图书在版编目（CIP）数据

全球工程前沿 . 2020 / 中国工程院全球工程前沿项目组编 . -- 北京 : 高等教育出版社 , 2020.12
ISBN 978-7-04-055297-3

Ⅰ. ①全… Ⅱ. ①中… Ⅲ. ①工程技术 - 研究 Ⅳ. ①TB

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 232866 号

全球工程前沿
QUANQIU GONGCHENG QIANYAN

策划编辑　黄慧靖　　责任编辑　黄慧靖　　封面设计　李树龙　　版式设计　张　杰
责任校对　　责任印制

出版发行	高等教育出版社	网　　址	http://www.hep.edu.cn
社　　址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印　　刷			http://www.hepmall.com
开　　本	850mm×1168mm　1/16		http://www.hepmall.cn
印　　张	0.000		
字　　数	0千字	版　　次	年　月　第　版
购书热线	010-58581118	印　　次	年　月　第　次印刷
咨询电话	400-810-0598	定　　价	0.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换

物 料 号　55297-00

内容提要

工程科技是改变世界的重要力量，工程前沿是工程科技未来方向的重要指引。把握全球工程科技大势，瞄准世界工程科技前沿，大力推动工程科技创新发展，有效地应对全球性重大挑战，实现人类社会可持续发展，已经成为世界各国的战略选择。2017 年以来，中国工程院连续组织开展“全球工程前沿”重大咨询研究项目，旨在按年度分析全球工程研究前沿和工程开发前沿，研判全球工程科技演进变化趋势。本书为 2020 年度“全球工程前沿”项目研究成果，由两部分组成——研究概况和领域报告，描述和分析了机械与运载工程、信息与电子工程、化工冶金与材料工程、能源与矿业工程、土木水利与建筑工程、环境与轻纺工程、农业、医药卫生和工程管理 9 个领域的工程研究前沿和工程开发前沿概况，并对重点前沿进行详细解读。

本书为“全球工程前沿”系列丛书之一，适合各相关领域的科研人员、工程技术人员、高校师生以及政府相关部门的公务员阅读。

目录

引言

工程科技是改变世界的重要力量，工程前沿是工程科技未来方向的重要指引。当今时代，世界面临百年未有之大变局，新一轮科技革命和产业变革持续深化演进，工程科技创新前沿加速交叉融合、不断衍生突破。把握全球工程科技大势，瞄准世界工程科技前沿，大力推动工程科技创新发展，有效地应对全球性重大挑战，实现人类社会可持续发展，已经成为世界各国的战略选择。

中国工程院作为国家工程科技领域最高荣誉性、咨询性学术机构，肩负着发挥学术引领作用、促进工程科技发展的历史使命。2017年以来，中国工程院连续组织开展“全球工程前沿”重大咨询研究项目，旨在按年度分析全球工程研究前沿和工程开发前沿，研判全球工程科技演进变化趋势。

2020年度全球工程前沿研究项目，主要依托中国工程院9个学部及中国工程院《工程》系列期刊开展研究工作。项目研究以数据分析为基础，以专家研判为核心，遵从定量分析与定性研究相结合、数据挖掘与专家论证相佐证、工程研究前沿与工程开发前沿并重的原则，凝练获得93个工程研究前沿和91个工程开发前沿，并重点解读28个工程研究前沿和28个工程开发前沿。

为提高前沿研判的科学性，在前三年实践经验的基础上，2020年度的研究工作进一步加大了数据与专家的交互力度，领域专家与图书情报专家深度参与数据准备、数据分析、图表制作、报告撰写等环节，专家智慧与客观数据在多轮迭代中不断融合，提升了研究的专业性和前瞻性。

本书为2020年度“全球工程前沿”项目研究成果，由两部分组成：第一部分为研究概况，主要说明项目研究采用的数据和研究方法；第二部分为领域报告，包括机械与运载工程，信息与电子工程，化工、冶金与材料工程，能源与矿业工程，土木、水利与建筑工程，环境与轻纺工程，农业，医药卫生和工程管理共9个领域分报告，分别描述和分析了各领域的工程研究前沿和工程开发前沿概况，并对重点前沿进行详细解读。

工程前沿研判是一项复杂且有挑战性的工作。在研究过程中，项目研究团队聚焦全球工程科技发展的热点和难点问题，将前沿研究、学术论坛与期刊建设紧密结合，相互促进，逐步探索出一条别具特色的研究路径。工程前沿研究得到了来自我国工程科技界各领域、各机构上千位院士和专家的支持，在此向所有指导工程前沿研究的院士、所有参与工程前沿研究的专家表示感谢！

第一章　研究方法

工程前沿指具有前瞻性、先导性和探索性，对工程科技未来发展有重大影响和引领作用的关键方向，是培育工程科技创新能力的重要指南。根据前沿方向的侧重点是工程科技的理论研究还是应用开发，工程前沿分为工程研究前沿和工程开发前沿。本研究中，工程前沿基于公开数据和专家研判得出，不涉及非公开领域。

2020 年度全球工程前沿研究继续在以专家为核心、数据为支撑的原则下，采用专家与数据多轮交互、迭代遴选研判的方法，实现了专家研判与数据分析的深度融合，共遴选出 2020 年度 93 个工程研究前沿和 91 个工程开发前沿，并重点解读了其中的 28 个工程研究前沿和 28 个工程开发前沿。9 个领域的前沿数量分布如表 1.1 所示。

前沿研究按数据准备、数据分析、专家研判 3 个阶段分步实施。在数据准备阶段，领域专家和图书情报专家对初始论文、专利数据进行修订，明确数据挖掘的范围；在数据分析阶段，通过共被引聚类方法获得文献聚类主题和专利地图；在专家研判阶段，通过专利地图解读、专家研讨、问卷调查等方法逐步筛选确定前沿，并结合前沿在论文或专利数据上的表现进一步调整 Top 10 前沿列表、完善前沿命名。为弥补因数据挖掘算法局限性或数据滞后所导致的前沿性不足，鼓励领域专家对定量分析结果查漏补缺，提名前沿。研究实施流程如图 1.1 所示，其中绿色部分以数据分析为主，紫色部分以专家研判为主，红色方框为专家与数据多轮深度交互的过程。

1　工程研究前沿的遴选

本报告中，工程研究前沿的基础素材主要来自以下两种途径，一是科睿唯安基于 Web of Science 核心合集的 SCI 期刊论文和会议论文数据，通过共被引聚类方法获得文献聚类主题；二是专家提名备选工程研究前沿。两种途径获得的前沿经过专家论证、提炼得到备选工程研究前沿，再经过问卷调查和多轮专家研讨，遴选得出 9 个领域 93 个工程研究前沿。

表 1.1　9 个领域前沿数量分布

领域	工程研究前沿 / 个	工程开发前沿 / 个
机械与运载工程	10	10
信息与电子工程	10	10
化工、冶金与材料工程	10	10
能源与矿业工程	12	12
土木、水利与建筑工程	10	10
环境与轻纺工程	10	10
农业	11	9
医药卫生	10	10
工程管理	10	10
合计	93	91

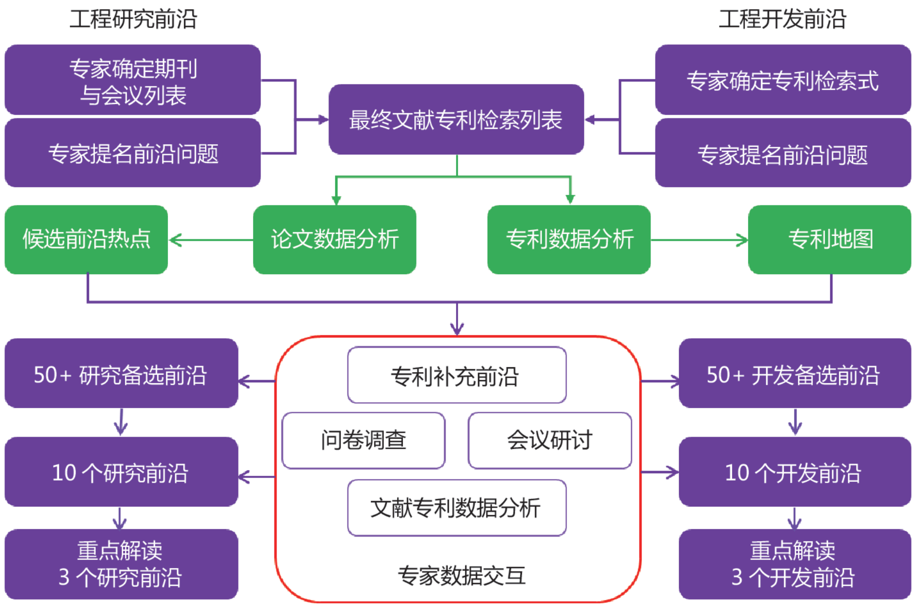

图 1.1　全球工程前沿研究实施流程

1.1　论文数据的获取与预处理

科睿唯安将 Web of Science 学科与中国工程院 9 个学部领域建立映射关系，获得每个领域对应的期刊和会议列表，经领域专家修订与补充，确定 9 个领域数据源共计 11 730 种期刊和 41 734 个会议。此外，对于 *Nature* 等 70 种综合学科的期刊，采用单篇文章归类的方法，即根据期刊内单篇文章的参考文献主要归属的学科来定义这篇文章的领域学科。在此基础上，检索得到 2014—2019 年上述期刊和会议收录的论文，论文引用时间截至 2020 年 2 月。

对于每个领域，科睿唯安综合考虑期刊和会议的差别、出版年等因素，对上述文献列表进行检索和数据挖掘，筛选出被引频次位于前 10% 的高影响力论文，作为研究前沿分析的原始数据集，如表 1.1.1 所示。

1.2　论文主题挖掘

通过对上述 9 个领域前 10% 的高影响力论文进行共被引聚类分析，得到每个领域的全部文献聚类主题。对于平均出版年在 2018—2019 年的聚类主题，按照核心论文的数量、总被引频次、常被引论文占比依次筛选，获得 25 个不相似的文献聚类主题；对于平均出版年在 2018 年之前的聚类主题，按照核心论文的数量、总被引频次、平均出版年、常被引论文占比依次筛选，获得 35 个不相似的文献聚类主题。其中，如果各领域聚类主题有交叉，则递补不交叉的聚类主题。此外，对于没有聚类主题覆盖的学科按关键词进行定制检索和挖掘。最终筛选得到 9 个领域 800 个备选研究热点，如表 1.2.1 所示。

1.3　研究前沿的确定与解读

在论文数据处理与挖掘的同时，领域专家基于对其他数据如科技新闻、各国战略布局等的综合分析，提出研究前沿问题，并将其融入前沿确定的每个阶段。

在数据准备阶段，图书情报专家将领域专家提出的研究前沿问题转化为检索式，这是初始数据源的重要组成部分。在数据分析阶段，针对没有文献

表 1.1.1　各领域数据源概况

序号	领域	期刊 / 种	会议 / 个	高影响力论文 / 篇
1	机械与运载工程	512	2641	70 748
2	信息与电子工程	958	17 418	199 347
3	化工、冶金与材料工程	1144	3939	253 221
4	能源与矿业工程	594	2181	105 674
5	土木、水利与建筑工程	560	1075	56 402
6	环境与轻纺工程	1326	1174	186 022
7	农业	1167	951	70 293
8	医药卫生	4675	11 163	445 940
9	工程管理	794	1192	45 716

表 1.2.1　各领域文献聚类结果

序号	领域	聚类主题 / 个	核心论文 / 篇	备选研究热点 / 个
1	机械与运载工程	7596	31 816	144
2	信息与电子工程	19 294	85 292	64
3	化工、冶金与材料工程	26 703	111 032	65
4	能源与矿业工程	11 621	49 722	95
5	土木、水利与建筑工程	6133	27 449	135
6	环境与轻纺工程	20 849	86 909	85
7	农业	7784	32 821	72
8	医药卫生	47 145	202 238	65
9	工程管理	4675	19 012	75

聚类主题覆盖的学科，领域专家提供关键词、代表性论文或代表性期刊，用于支撑科睿唯安进行定制检索和挖掘。在专家研判阶段，领域专家对照科睿唯安提供的文献聚类结果进行查漏补缺，对于未出现在数据挖掘结果中而专家认为重要的前沿进行第二轮提名，图书情报专家提供数据支撑。最终，领域专家对数据挖掘和专家提名的工程研究前沿素材进行归并、修订和提炼，而后经过问卷调查和多轮会议研讨，每个领域遴选出 10 个左右工程研究前沿。

各领域依据发展前景、受关注度选取 3 个重点研究前沿，邀请前沿方向的权威专家从国家和机构布局、合作网络、发展趋势、研发重点等角度详细解读前沿。

2　工程开发前沿的遴选

工程开发前沿的基础素材也来自两种途径：一是科睿唯安基于 Derwent Innovation 专利检索平台，对 9 个领域 53 个学科组中被引频次位于各学科组前 10 000 个的高影响力专利家族进行文本聚类，获得 53 张专利地图，领域专家从专利地图中解读出备选工程开发前沿；二是专家提名备选工程开发前沿。两种方式获得的备选开发前沿通过多轮专家研讨和问卷调查，获得每个领域 10 个左右工程开发前沿。

2.1 专利数据的获取与预处理

在数据准备阶段，科睿唯安基于 Derwent Innovation 专利数据库，采用德温特世界专利索引（DWPI）手工代码、《国际专利分类表》（IPC 分类）、美国专利局分类体系（UC）等专利分类号和特定的技术关键词，初步构建 9 个领域 53 个学科组的专利数据检索范围及检索策略；领域专家对专利检索式进行删减、增补和完善，并提名备选前沿主题，图书情报专家转化为专利检索式。科睿唯安将以上两部分检索式进行整合，确定 53 个学科组的专利检索式，在 DWPI 和德温特专利引文索引（DPCI）数据库中检索，获得相应学科的专利文献。专利检索时间范围为 2014—2019 年，专利引用时间截至 2020 年 2 月。

为了进一步聚焦专利文献，对检索得到的百万量级专利文献根据“年均被引频次”和“技术覆盖宽度”指标进行筛选，综合评估得到每个学科前 10 000 个专利家族。

2.2 专利主题挖掘

对 9 个领域 53 个学科组被引频次位于前 10 000 的高影响力专利开展专利文本语义相似度分析，基于 DWPI 标题和摘要字段进行主题聚类，获得 53 张能快速直观呈现工程开发技术分布的 ThemeScape 专利地图，以关键词的形式展现所聚集专利的总体技术信息。

领域专家在图书情报专家辅助下，从专利地图提炼技术开发前沿、归并相似前沿、确定开发前沿名称，得到每个学科组的备选工程开发前沿。同时，为避免遗漏新兴前沿，领域专家尤其注重专利地图中低频次、关联性较低的技术空白点的解读。

2.3 开发前沿的确定与解读

在专利数据处理与挖掘的同时，领域专家基于对其他数据如科技新闻、各国战略布局等的综合分析，提出开发前沿问题，并将其融入前沿确定的每个阶段。

在数据准备阶段，图书情报专家将领域专家提出的关键前沿问题转化为专利检索式，作为基础数据集的重要组成部分。在数据分析阶段，领域专家开展第二轮前沿提名，补充数据挖掘中淹没的专利量少、影响力尚未显现的新兴技术点。在专家研判阶段，领域专家研读高影响力专利，图书情报专家辅助领域专家从“高峰”和“蓝海”等多角度解读专利地图。最终，领域专家对专利地图解读结果与专家提名前沿进行归并、修订和提炼，得到备选工程开发前沿，而后通过问卷调查或多轮专题研讨，每个领域遴选出 10 个左右工程开发前沿。

各领域依据发展前景、受关注度选取 3 个重点开发前沿，邀请前沿方向的权威专家从国家和机构布局、合作网络、发展趋势、研发重点等角度详细解读前沿。

3 术语解释

文献（论文）：包括 Web of Science 中经过同行评议的公开发表的研究型期刊论文、综述和会议论文。

高影响力论文：指被引频次在同出版年、同学科论文中排名前 10% 的论文。

文献聚类主题：对高影响力论文进行共被引聚类分析获得的一系列主题和关键词的组合。

核心论文：根据研究前沿的获取方式不同，核心论文有两种含义，如果是来自数据挖掘经专家修正的前沿，核心论文指高影响力论文；如果是来自专家提名的前沿，核心论文指按主题检索被引频次排前 10% 的论文。图片中的圆点大小根据核心论文数量绘制。

论文比例：某个国家或机构参与的核心论文数量占全部国家或机构产出核心论文数量的比例。

施引核心论文：指引用核心论文的文献。

被引频次：指论文被科睿唯安 Web of Science 核心合集收录的论文引用的次数。

平均出版年：指对文献聚类主题中所有文献的出版年取平均数。

引文速度：引文速度是一定时间内衡量累计被引频次增长速度的指标。在本研究中，每一篇文献的引文速度是从发表的月份开始，记录每个月的累计被引频次。

常被引论文：指引文速度排名前 10% 的论文。

高影响力专利：每个学科被引频次排名前 10 000 的专利家族。

核心专利：根据开发前沿的获取方式不同，核心专利有两种含义：如果是来自专利地图的前沿，核心专利指高影响力专利；如果是来自专家提名的前沿，核心专利指按主题检索的全部专利。

专利比例：某个国家或机构参与的核心专利数量占全部国家或机构产出核心专利数量的比例。

专利地图：通过分析专利文献中的语义相似度，将相关技术的专利聚集在一起，并以地图形式可视化展现，是形象地反映某一行业或技术领域整体面貌的主题全景图。

技术覆盖宽度：指每个专利家族覆盖的 DWPI 分类的数量。该指标可以体现专利的领域交叉广度。

中国工程院学部专业划分标准体系：包含中国工程科学技术（含农业、医学）的 9 个学部所涵盖的 53 个专业学科，按照《中国工程院院士增选学部专业划分标准（试行）》确定。

第二章　领域报告

一、机械与运载工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

机械与运载工程领域 Top 10 工程研究热点涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（见表 1.1.1）。其中：属于传统研究深化的是增减材复合制造方法、基于机器学习的故障监测与诊断、超声速燃烧室技术研究、作业型飞行机器人、高功率无线电能传输；新兴前沿包括数字孪生驱动的智能制造、吸气式高超声速飞行器、连续纤维增强复合材料增材制造、空间大型可展开天线、基于第五代移动通信（5G）的车联网与实时交通管理方法。

2014—2019 年，各前沿相关的核心论文逐年发表情况见表 1.1.2。

（1）数字孪生驱动的智能制造

数字孪生作为新兴技术，基本特征是物理实体和数字孪生模型的双向映射；在数字化设计、虚拟仿真、工业物联网等关键使能技术交叉融合的基础上，构建产品 / 工厂所对应的数字孪生模型，对数字孪生模型进行可视化、调试、体验、分析与优化，以此提升实体产品 / 工厂的性能和运行绩效。2017—2019 年，高德纳咨询公司均将数字孪生列入十大新兴技术。数字孪生驱动智能制造主要体现在两方面。一是智能产品全生命周期的数字孪生应用，在产品设计制造阶段进行虚拟测试和半实物仿真；在产品服役阶段通过工业物联网采集产品运行数据，基于数字孪生模型仿真结果进行故障预测、绩效分析与优化；在产品报废回收再利用阶段结合数字孪生模型判断哪些零件可以进行再利用和再制造。二是智能工厂全生命周期的数字孪生应用，在新工厂建设前通过数字孪生模型对生产线进行虚拟调试；在智能工厂运行期间通过数字孪生模型对工厂运行状态进行可视化、优化和故障预警；在智能工厂改造升级过程中利用数字孪生模型优化改进方

表 1.1.1　机械与运载工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	数字孪生驱动的智能制造	9	847	94.11	2017.6
2	增减材复合制造方法	11	625	56.82	2015.3
3	吸气式高超声速飞行器	25	984	39.36	2016.6
4	基于机器学习的故障监测与诊断	41	2986	72.83	2017.7
5	连续纤维增强复合材料增材制造	10	750	75.00	2017.2
6	超声速燃烧室技术研究	28	640	22.86	2016.8
7	空间大型可展开天线	11	215	19.55	2016.7
8	基于 5G 的车联网与实时交通管理方法	17	1225	72.06	2017.1
9	作业型飞行机器人	46	1221	26.54	2015.2
10	高功率无线电能传输	20	1600	80.00	2016.8

表 1.1.2　机械与运载工程领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	数字孪生驱动的智能制造	0	0	1	3	4	1
2	增减材复合制造方法	2	4	5	0	0	0
3	吸气式高超声速飞行器	1	6	4	7	4	3
4	基于机器学习的故障监测与诊断	0	1	5	10	14	11
5	连续纤维增强复合材料增材制造	0	0	2	5	2	1
6	超声速燃烧室技术研究	2	4	4	8	9	1
7	空间大型可展开天线	1	0	3	5	1	1
8	基于 5G 的车联网与实时交通管理方法	2	2	2	3	3	5
9	作业型飞行机器人	18	14	6	5	3	0
10	高功率无线电能传输	0	5	2	6	5	2

案。相关研究热点有：高保真度数字孪生模型，三维交互式实时渲染，贯穿产品全生命周期的数字主线构建，数字孪生模型的多学科仿真与优化，应用人工智能（AI）和大数据技术对工业物联网开展数据实时分析以及与数字孪生模型进行实时映射等。

（2）增减材复合制造方法

增减材复合制造方法运用逐层堆叠的增材制造和适时的减材加工，实现零件在同一台机床上完成“增材堆积–减材精整”的连续或同步制造过程。方法的实质是将减材制造融入增材制造的成形过程中，旨在提高增材制造零件的精度和质量，直接获得结构复杂、组织致密、形状精度和表面质量高的零件，满足工业高精尖领域对精密零件的性能要求。相关研究主要分为三方面：一是增减材复合制造方法与装备，研究不同能量源和材料的增减材复合制造方法，开发多轴数控机床、增材制造机构、送料机构，研制增减材复合制造装备；二是增减材复合制造软件，开发重点是零件特征识别分层数据处理、增减材复合制造路径生成与规划、增减材加工工艺模拟；三是增减材复合制造工艺，根据成形材料特点和性能要求，优化增材和减材制造工艺，达到控形控性的目的。增减材复合制造工艺引入在线检测技术，可实现制造过程实时检测反馈，发现成形过程中产生的缺陷，动态调整成形过程中的复合工艺参数。利用减材技术实时去除增材形成的缺陷，是提高增减材复合制造零件性能和精度的有效手段，成为当前研究热点。

（3）吸气式高超声速飞行器

吸气式高超声速飞行器飞行马赫数不小于 5，以吸气式超燃冲压发动机或组合发动机为动力，可从地面零速起飞直到入轨，通常分为临近空间飞行器和空天飞行器。临近空间飞行器细分为高超声速巡航飞行器、高超声速跨域机动飞行器、高超声速飞机；空天飞行器指可自由进出空间的可重复使用航天运载器。吸气式高超声速飞行器具有速度快、航程远、性能优异等独特优势，将对人类社会发展和未来军事对抗模式产生重要影响。相关技术体系成为衡量一个国家航空航天领域发展程度的标志，研究集中在超燃冲压发动机及其组合循环动力技术、高超声速热防护结构与材料技术、飞行器 / 推进一体化气动外形设计技术、高超声速飞行器导航制导与控制技术、高超声速地面试验与飞行演示验证技术等。航天大国都将吸气式高超声速飞行器技术作为未来航空航天领域发展的重要方向，力争占据未来航空航天技术

发展的制高点。

（4）基于机器学习的故障监测与诊断

随着大数据挖掘和AI技术的发展，计算机网络规模趋于复杂，生成的过程数据越发庞大，出现了新的数据分析需求。基于机器学习的智能故障诊断方法普到工业界和产业界的遍受关注。当前主流的智能诊断方法分为机器学习和深度学习：前者有贝叶斯网络、人工神经网络、支持向量机、隐马尔可夫模型等，后者有卷积神经网络、循环神经网络、自动编码机、对抗学习网络、脉冲神经网络等，均具有强大的数据特征自动提取功能，可进行端对端的故障诊断。传统机器学习普遍存在泛化能力和精度有限、复杂多工况多分类场景下面临性能瓶颈等问题；相比之下，深度学习因其大数据适应能力强、覆盖范围广、适应性和移植性好而成为研究热点。第一代神经网络（以人工神经网络为代表）存在学习时间长、网络规模大等不足，第二代神经网络（以卷积神经网络为代表）在故障监测与诊断方面取得了良好的应用效果，但计算和存储需求偏大。为适应复杂工况智能诊断需求，同时具有高效学习、低存储和低成本的基本特征，第三代神经网络（如脉冲神经网络）利用随时间变化的脉冲序列传递特征信息，脉冲编码效率较高，也与智能故障诊断发展方向趋同。

（5）连续纤维增强复合材料增材制造

连续纤维增强复合材料作为一种先进高性能轻质材料，长期以来存在制备过程周期长、成本高、工艺复杂等问题，严重制约了应用范围和推广进度。增材制造具有工艺简单、加工成本低、原材料利用率高、无模自由成形、绿色环保等优点，理论上可制备具有任意复杂几何构型的结构件。两方面的技术融合具有重大前景，发展的制备工艺有选区激光烧结、熔融沉积制造、分层实体制造、立体光刻技术；其中熔融沉积制造因工艺成本低、设备简单、易于操作等特性，应用较为广泛。尽管针对打印装备、制备工艺、材料改性等已开展了大量的研发工作，但最终成型件的刚度、强度、表面质量、致密性等方面仍存在缺陷，尚不能完全满足工程应用需求。对标大规模工业化应用，未来重点发展方向有：具有特殊性能的连续纤维制备与开发，增材制造成型技术与连续纤维增强复合材料成型融合机理，连续纤维增强复合材料增材制造标准评价体系，适用面更宽泛的新型增材制造工艺。

（6）超声速燃烧室技术研究

随着高超声速技术的发展，超燃冲压发动备受工程界关注。在高超声速来流条件下，考虑到总压损失等一系列性能指标，气流经过进气道压缩后进入燃烧室时仍为超声速，出现了超声速燃烧现象。燃烧室要在数毫秒周期内完成燃料喷射、雾化、蒸发、掺混、点火、稳定燃烧等过程，还要实现高效能量转化和较小压力损失，设计难度极大。相关研究方向有：流道整体优化设计技术、燃料喷注与雾化技术、可靠点火和火焰稳定技术、高效低阻燃烧组织技术、可控燃烧技术、燃烧过程高精度测量等。目前，航天强国在工程层面上陆续突破了超声速燃烧技术，具备了满足一定工程应用推力需求的超燃冲压发动机和双模态冲压发动机的研制能力，但仍面临较多问题，如宽域燃烧、低压燃烧、多模态燃烧、更高马赫数燃烧、大尺度燃烧、高精度数值模拟等。这些问题的解决事关发动机性能提升和应用拓展，将是超声速燃烧技术方向的持续关注重点。大力开展超声速燃烧相关基础科学研究，在火焰生成及传播机理、液态燃料蒸发雾化机理、不稳定燃烧、燃烧模式及其转化等方面取得进一步突破。

（7）空间大型可展开天线

星载天线应用于空间和对地无线通信、电子侦察、导航、遥感、深空探测及射电天文，为了具备多波段、大容量、高功率能力以实现通信连接及网络服务，通信卫星需配备大口径星载天线。受限于运载火箭整流罩尺寸与发射费用，星载天线要求轻质且收拢体积小，因而大口径星载天线应具备可展开特性，常用的有反射面天线、阵列天线、微电子

机械天线。反射面天线是各种卫星使用最多的一类，可作为超高频、微波乃至毫米波波段的通信卫星天线，根据反射面结构形式又可分为刚性反射面天线、充气反射面天线、网状反射面天线、薄膜反射面天线。阵列天线具有更多的设计自由度，如线阵、平面阵、共形阵、相共阵等，能较好地实现高增益、窄波束、多目标、空分多址、自主控制等功能。微电子机械天线是一种结合了微机电系统技术的新型低成本、高性能天线，分为微电子机械相控阵天线、微电子机械可重构天线、微带栅格天线、微电子机械多频段天线等。近年来，空间大型可展开天线技术的研究集中在柔性结构和展开机构设计、反射面形面分析与调整、电磁性能分析与可靠性分析等方面，相关基础理论研究涉及机电热综合优化设计理论与方法、波束赋形反射面天线设计、性能测试、网状天线无源交调、新材料应用等。实现高频通信的大口径高精度天线是下一代可展开天线的发展方向，技术攻关重点包括可展开构架式反射面天线、充气式可展开反射面天线、空间组装大型天线、智能阵列天线等。

（8）基于 5G 的车联网与实时交通管理方法

5G 具有大带宽高速率、低时延高可靠和海量连接等特性，推动蜂窝车联网（C-V2X）持续演进。5G 车联网业务以智慧道路监测、自动驾驶、远程驾驶、编队行驶等业务为主，在 C-V2X 的基础上融合了蜂窝通信和直连通信，使“人 – 车 – 路 – 云”等交通参与要素有机地联系，实现交通网、信息网、能源网“三网合一”，形成随时通信、实时监控、及时决策的智能网络。“智能 + 网联”是未来车联网发展的基本路线，通过车 – 车、车 – 路、车 – 人、车 – 网的信息交互和共享来实现车辆和基础设施之间智能协同与配合；构建智能路况综合感知、动态协同交通控制等能力，旨在优化系统资源利用、提高道路交通安全、缓解交通拥堵；未来朝着更加安全、协同、智能、绿色的交通系统方向演进。C-V2X 将与超大规模多输入多输出、毫米波通信、移动边缘计算、雷达、基于 5G 增强的高精度定位等技术结合；突破 5G 车联网信息安全技术来确保交通行车安全、隐私和数据安全，通过全域感知、分级云控，建设地面交通在云端的数字孪生映射，利用 AI 技术实现快速高效的智慧交通实时管理。

（9）作业型飞行机器人

作业型飞行机器人由飞行器与作业装置（如机械臂）共同组成，是一种具有主动作业能力的新型机器人；由螺旋桨提供升力，机动灵活，操控性强。作业型飞行机器人系统具有诸多优势：在飞行过程中快速捕捉空中或地面目标，迅速到达地面机器人无法进入的复杂环境中（如地震、火山喷发等灾害现场）执行精细作业任务，多个作业型飞行机器人进行协同搬运、装配大负载，综合飞行能力和作业机构灵活性来拓展实现新概念多栖移动平台。由于作业装置与飞行器之间的强耦合性、作业装置与外部目标的接触对飞行器自身运动产生影响，作业型飞行机器人的应用依然面临一些问题，如欠驱动、多变量、强耦合的复杂非线性因素对飞行控制的影响。近年来，有关作业型飞行机器人的系统设计、视觉引导、运动控制获得较多关注，但目前还处于起步阶段，耦合效应建模与分析、高性能飞行与作业控制、运动 / 状态规划、实验系统构建等方面均待深入开展研究。

（10）高功率无线电能传输

无线电能传输（WPT）是一种综合利用电力电子与控制技术实现电能从电源到负载的非电气接触电能传递技术，重点发展方向是磁耦合无线电能传输，利用发射 / 接收线圈之间的高频交变耦合磁场来实现电能传输，具有安全、可靠、灵活、非接触等特点。2013 年，WPT 技术被世界经济论坛评为“对世界影响最大、最有可能为全球面临的挑战提供答案的十大新兴技术”之一。磁耦合无线电能传输技术为诸多领域提供新的供电解决方案，如电动汽车充电、植入式医疗设备供能、水下传能、高压电气设备供能等。相关研究方向主要有：WPT 系统最

大功率点跟踪、传输距离及传输效率分析、多线圈耦合方式优化与控制、多拾取动态无线电能传输系统控制方法、磁耦合 WPT 系统异物检测技术等。相关发展趋势包括：提高无线传能的功率，提高供能系统的功率密度，提高供能效率，提高传输距离，优化系统结构与控制方法，提高供能的可靠性、稳定性、鲁棒性。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 数字孪生驱动的智能制造

数字孪生技术的应用源于美国国家航空航天局（NASA）在航空产品的设计、制造、测试与服役中的应用，例如对“好奇号”火星车进行远程仿真与操控。在数字化设计技术和虚拟仿真技术发展和集成应用的过程中，产生了数字原型、数字样机、虚拟样机、全功能虚拟样机等技术，主要用于实现复杂产品的运动仿真、装配仿真和性能仿真。随着传感器技术和无线通信技术的发展，工业物联网开始应用于高价值工业设备的运行监控和维修维护。随着学术界的研究，通用电气公司、西门子集团等企业应用的示范下，数字孪生技术开始受到广泛关注，基于工业物联网实现了数字孪生模型与物理模型之间的虚实映射。

数字孪生已经成为智能制造领域的应用热点与研究前沿。智能产品数字孪生应用的价值在于，通过虚实映射来持续改进产品的性能，为客户提供更好的体验，提高产品运行的安全性、可靠性、稳定性，进而提升产品的市场竞争力。智能工厂数字孪生应用的价值主要体现为：构建透明工厂，提升工厂的运营管理水平，提高设备运转率，降低能耗，促进安全生产。数字孪生技术的典型应用场景有：机电软一体化复杂产品研发，智能产品运行监控和智能运维，智能工厂运行实时模拟和远程监控，生产线虚拟调试，数字营销等。目前，数字孪生技术的应用还处于初步阶段，主要研究方向包括：构建数字孪生技术应用的一体化集成平台；研发能够对轻量化三维模型进行交互式和实时三维渲染的底层平台，支持虚拟现实 / 增强现实应用；打通贯穿产品全生命周期的数字主线，串起各个阶段的数字孪生模型，确保在发生变更时各个数字孪生模型的一致性；对智能产品和智能工厂运行进行实时监控的三维可视化技术；对智能产品进行系统仿真和结构、流体、电磁等多学科仿真，为支持多学科仿真计算同步而发展的降阶处理技术；基于 AI 和工业大数据技术对传感器和物联网数据进行实时分析；基于工业物联网平台对来自边缘端的物联网数据、来自云端的数字孪生模型仿真结果数据进行分析比对的技术等。

“数字孪生驱动的智能制造”工程研究前沿中，核心论文发表量靠前的国家是中国、新加坡，篇均被引频次靠前的国家是美国、澳大利亚、法国、德国（见表 1.2.1）。在发文量 Top 7 国家中，中国和新加坡合作较多（见图 1.2.1）。核心论文发文量方面，北京航空航天大学、新加坡国立大学具有优势，篇均被引频次排在前列的机构是爱荷华大学、新南威尔士大学、埃尔朗根 – 纽伦堡大学、巴黎萨克雷大学（见表 1.2.2）。在发文量 Top 8 机构中，北京航空航天大学和新加坡国立大学合作较多（见图 1.2.2）。施引核心论文的主要产出国家是中国、美国、德国（见表 1.2.3），施引核心论文的主要产出机构是北京航空航天大学、查尔姆斯理工大学、武汉理工大学（见表 1.2.4）。

1.2.2 增减材复合制造方法

增材制造采用逐层制造并叠加原理，理论上可以成形任意复杂结构，而不受传统加工中刀具、模具、夹具等多样复杂条件问题的约束，突破了传统加工方法在整体成形复杂零件时面临的瓶颈问题。德国工业 4.0、美国先进制造、中国制造 2025、英国工业 2050、日本振兴战略等国家发展战略均将增材制造列为制造业未来发展的重要方向。然而，

表 1.2.1　“数字孪生驱动的智能制造”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	7	77.78%	630	90.00	2017.7
2	新加坡	3	33.33%	88	29.33	2017.0
3	澳大利亚	1	11.11%	148	148.00	2018.0
4	美国	1	11.11%	148	148.00	2018.0
5	法国	1	11.11%	134	134.00	2017.0
6	德国	1	11.11%	134	134.00	2017.0
7	瑞典	1	11.11%	83	83.00	2017.0

表 1.2.2　“数字孪生驱动的智能制造”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	北京航空航天大学	6	66.67%	575	95.83	2017.7
2	新加坡国立大学	3	33.33%	88	29.33	2017.0
3	爱荷华大学	1	11.11%	148	148.00	2018.0
4	新南威尔士大学	1	11.11%	148	148.00	2018.0
5	埃尔朗根－纽伦堡大学	1	11.11%	134	134.00	2017.0
6	巴黎萨克雷大学	1	11.11%	134	134.00	2017.0
7	查尔姆斯理工大学	1	11.11%	83	83.00	2017.0
8	北京理工大学	1	11.11%	55	55.00	2018.0

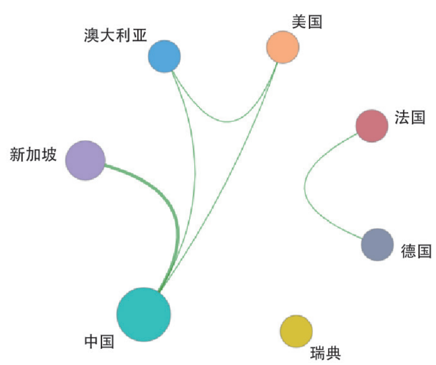

图 1.2.1　“数字孪生驱动的智能制造”工程研究前沿主要国家间的合作网络

与传统机加工相比，增材制造零件存在几何精度和表面质量差、内部缺陷多等突出问题。增减材复合制造技术运用逐层堆叠的增材制造以及适时的减材加工，实现零件在同一台机床上完成“增材堆积－减材精整”的连续或同步制造过程，直接获得结构复杂、组织致密、形状精度和表面质量高的零件，满足工业高精尖领域对精密零件的性能要求。该技术不但具有增材制造的成形零件复杂、材料利用率高等优点，而且兼顾了减材加工高质量与高精度的优势，因此成为目前全球制造业关注的重点与焦点。

当前相关研究主要有方法与装备、软件、工艺三方面。在增减材复合制造方法与装备方面，研究不同能量源和材料的增减材复合制造方法，开发多轴数控机床、增材制造机构、送料机构等系统，进而研制增减材复合制造装备。在增减材复合制造软件方面，开发零件特征识别分层数据处理、增减材复合制造路径生成与规划、增减材加工工艺模拟等软件。在增减材复合制造工艺方面，根据成形材料

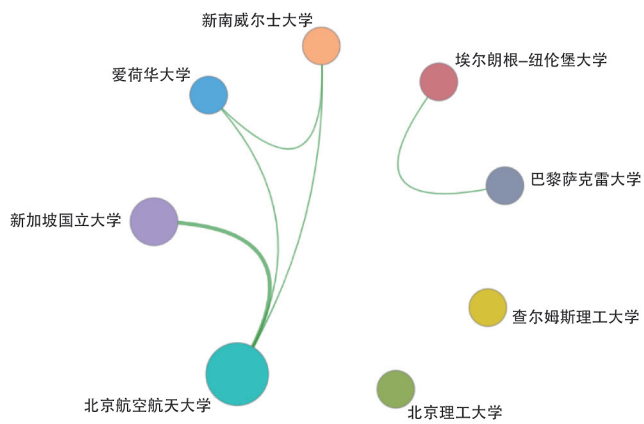

图 1.2.2 “数字孪生驱动的智能制造”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “数字孪生驱动的智能制造”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	238	40.07%	2018.9
2	美国	78	13.13%	2019.1
3	德国	47	7.91%	2019.0
4	英国	46	7.74%	2018.9
5	瑞典	39	6.57%	2018.8
6	意大利	33	5.56%	2019.1
7	法国	33	5.56%	2018.6
8	新加坡	24	4.04%	2019.0
9	韩国	23	3.87%	2018.9
10	印度	19	3.20%	2018.7

表 1.2.4 “数字孪生驱动的智能制造”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	北京航空航天大学	45	23.32%	2018.6
2	查尔姆斯理工大学	24	12.44%	2018.8
3	武汉理工大学	18	9.33%	2018.2
4	广东工业大学	16	8.29%	2018.6
5	南洋理工大学	15	7.77%	2019.3
6	上海交通大学	14	7.25%	2019.0
7	西北工业大学	14	7.25%	2018.9
8	香港大学	14	7.25%	2019.4
9	香港理工大学	13	6.74%	2019.4
10	浙江大学	10	5.18%	2018.9

与性能要求，对增材和减材制造工艺进行优化，最终达到控形控性的目的。增材过程易产生裂纹、气孔等内部缺陷，严重影响零件的拉伸强度、疲劳强度等力学性能，在要求苛刻的航空大型金属构件制造领域尤为明显。为此，在增减材复合制造工艺中引入在线测控技术，实现制造过程实时检测反馈，及时发现成形过程中产生的缺陷和尺寸偏差，对成形过程中复合工艺参数进行动态调整并形成闭环控制，是提高增减材复合制造零件性能和精度的新的有效手段，成为增减材复合制造的研究前沿和发展趋势。

“增减材复合制造方法”工程研究前沿中，核心论文发表量排在前列的国家是美国、英国，篇均被引频次排在前列的国家是韩国、英国、芬兰、法国（见表 1.2.5）。在发文量 Top 8 国家中，美国和韩国、美国与中国合作较多（见图 1.2.3）。核心论文发文量排在前列的机构是巴斯大学、扬斯敦州立大学；篇均被引频次最高的机构分别为美国劳伦斯伯克利国家实验室、首尔大学、华盛顿大学（见表 1.2.6）。在发文机构方面，首尔大学、美国劳伦斯伯克利国家实验室、华盛顿大学合作较多，坦佩雷理工大学、格勒诺布尔–阿尔卑斯大学和阿尔托大学合作较多（见图 1.2.4）。施引核心论文发文量排在前 3 位的国家是美国、中国、德国（见表 1.2.7）。施引核心论文的主要产出机构是都灵理工大学、首尔大学、大连理工大学（见表 1.2.8）。

表 1.2.5 “增减材复合制造方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	6	54.55%	318	53.00	2015.2
2	英国	2	18.18%	189	94.50	2015.5
3	韩国	1	9.09%	133	133.00	2014.0
4	芬兰	1	9.09%	56	56.00	2016.0
5	法国	1	9.09%	56	56.00	2016.0
6	比利时	1	9.09%	37	37.00	2014.0
7	中国	1	9.09%	25	25.00	2016.0
8	德国	1	9.09%	25	25.00	2016.0

表 1.2.6 “增减材复合制造方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	巴斯大学	2	18.18%	189	94.50	2015.5
2	扬斯敦州立大学	2	18.18%	52	26.00	2015.5
3	美国劳伦斯伯克利国家实验室	1	9.09%	133	133.00	2014.0
4	首尔大学	1	9.09%	133	133.00	2014.0
5	华盛顿大学	1	9.09%	133	133.00	2014.0
6	加利福尼亚大学伯克利分校	1	9.09%	97	97.00	2015.0
7	阿尔托大学	1	9.09%	56	56.00	2016.0
8	坦佩雷理工大学	1	9.09%	56	56.00	2016.0
9	格勒诺布尔–阿尔卑斯大学	1	9.09%	56	56.00	2016.0
10	鲁汶大学	1	9.09%	37	37.00	2014.0

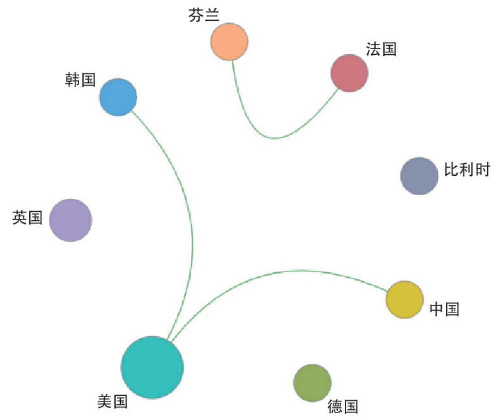

图 1.2.3 “增减材复合制造方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

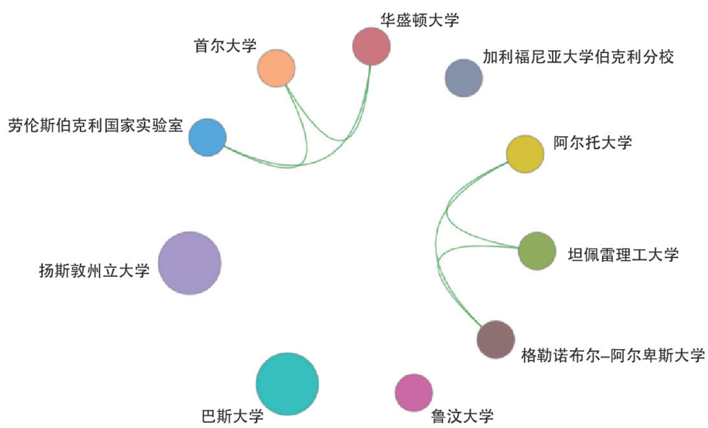

图 1.2.4 “增减材复合制造方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “增减材复合制造方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	99	22.45%	2018.2
2	中国	75	17.01%	2018.6
3	德国	53	12.02%	2018.2
4	意大利	46	10.43%	2018.2
5	英国	43	9.75%	2017.9
6	韩国	39	8.84%	2016.8
7	法国	28	6.35%	2018.1
8	西班牙	18	4.08%	2018.6
9	加拿大	18	4.08%	2018.7
10	荷兰	11	2.49%	2018.9

表 1.2.8　“增减材复合制造方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	都灵理工大学	16	14.29%	2018.1
2	首尔大学	15	13.39%	2016.4
3	大连理工大学	12	10.71%	2018.3
4	伊利诺伊大学	9	8.04%	2017.3
5	浙江大学	9	8.04%	2018.6
6	诺丁汉大学	9	8.04%	2017.3
7	哈尔滨工业大学	9	8.04%	2018.8
8	巴勒莫大学	9	8.04%	2017.7
9	格勒诺布尔 – 阿尔卑斯大学	8	7.14%	2017.6
10	密西西比州立大学	8	7.14%	2018.6

1.2.3　吸气式高超声速飞行器

吸气式高超声速飞行器概念早于航天飞机。美国针对全球快速抵达的应用目标，发展了多型吸气式高超声速飞行器，如 X-30、X-43A/B/C、SR-72、X-51A 等。2004 年 NASA 完成 X-43A 第 2 次飞行试验，首次实现 Ma10 吸气式飞行器关键技术验证。2010 年以来，美国启动了“高超声速吸气式武器概念”项目，作为 X-51A 的延续，旨在发展飞行速度为 Ma5~6、射程约为 1000 km、能适应轰炸机内埋和战斗机外挂的战术级吸气式高超声速巡航导弹。此外，俄罗斯优先研制和发展高超声速武器，2016 年试射的“锆石”高超声速反舰巡航导弹飞行速度为 Ma6~8；提出了高超声速隐身战略轰炸机概念方案，采用组合动力，飞行速度超过 Ma5。

鉴于空天飞机研制难度极大、短期内较难实现应用，目前国际上针对吸气式高超声速飞行器的技术突破主要集中在以临近空间飞行器为主的武器应用方面。随着大国间竞争的对抗性上升，高超声速导弹这类兼具高度战术实用与战略威慑的先进武器正引发了全球高度关注，并扩散到包括攻防两端能力建设、潜在军控层面在内的全方位博弈。从技术发展来看，一次性使用的吸气式高超声速导弹技术已经获得突破，预计在 2023—2025 年迎来井喷式部署列装。为进一步拓展应用范围，后续应重点关注飞行器总体设计、高超声速冲压及组合推进、机体 / 推进一体化设计、先进结构与热防护材料、高动态快响应飞行控制等。

“吸气式高超声速飞行器”工程研究前沿中，核心论文发表量排在前列的国家是中国、加拿大、英国，篇均被引频次排在前列的国家是中国、加拿大、英国（见表 1.2.9）。在发文量排名靠前国家中，中国和加拿大合作较多（见图 1.2.5）。核心论文发文量排在前列的机构是中国人民解放军空军工程大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学。篇均被引频次排在前列的机构是西北工业大学、天津大学、清华大学、北京科技大学（见表 1.2.10）。在发文量 Top 10 机构中，中国人民解放军空军工程大学和西北工业大学、哈尔滨工业大学和滑铁卢大学合作较多（见图 1.2.6）。施引核心论文发文量排在前 3 位的国家是中国、加拿大和美国（见表 1.2.11）。施引核心论文的主要产出机构是西北工业大学、哈尔滨工业大学、中国人民解放军空军工程大学（见表 1.2.12）。

表 1.2.9 “吸气式高超声速飞行器”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	25	100.00%	984	39.36	2016.6
2	加拿大	2	8.00%	42	21.00	2018.0
3	英国	1	4.00%	19	19.00	2017.0

表 1.2.10 “吸气式高超声速飞行器”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国人民解放军空军工程大学	8	32.00%	186	23.25	2017.1
2	哈尔滨工业大学	7	28.00%	221	31.57	2017.3
3	西北工业大学	5	20.00%	310	62.00	2017.2
4	天津大学	3	12.00%	159	53.00	2015.3
5	北京航空航天大学	3	12.00%	112	37.33	2015.7
6	滑铁卢大学	2	8.00%	42	21.00	2018.0
7	清华大学	1	4.00%	43	43.00	2019.0
8	北京科技大学	1	4.00%	43	43.00	2019.0
9	中国航天科技集团有限公司	1	4.00%	41	41.00	2015.0
10	北京机电工程研究所	1	4.00%	37	37.00	2015.0

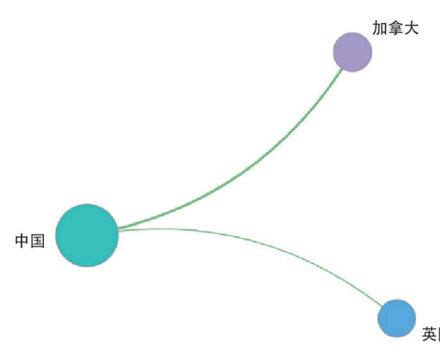

图 1.2.5 “吸气式高超声速飞行器”工程研究前沿主要国家间的合作网络

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

机械与运载工程领域的 Top 10 工程开发前沿涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（见表 2.1.1）。其中，属于传统研究较深入的有基于大数据的智能制造系统生产调度技术、复杂曲面超精密加工技术、可穿戴多功能集成传感器开发、仿生软体机器人开发、高超声速飞行器热防护技术、有人机 / 无人机协同控制技术、智能电网运行与调度技术；新兴前沿包括基于 5G 技术的无人驾驶系统开发、水下无人航行器及其舰载技术、柔性电子制造技术。各个开发

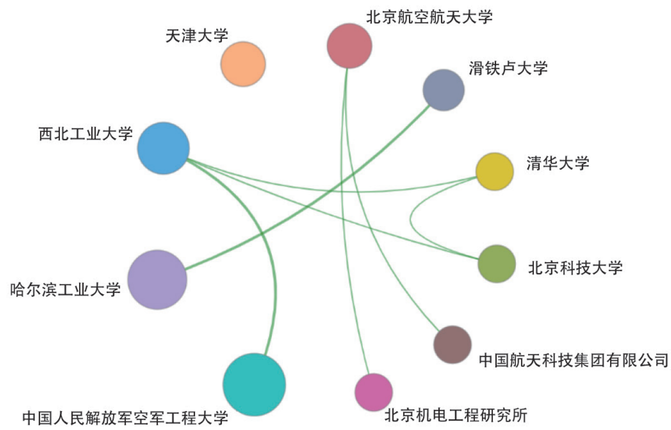

图 1.2.6　“吸气式高超声速飞行器”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“吸气式高超声速飞行器”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	502	83.25%	2018.1
2	加拿大	26	4.31%	2017.9
3	美国	22	3.65%	2018.1
4	英国	16	2.65%	2017.7
5	新加坡	10	1.66%	2017.2
6	伊朗	7	1.16%	2018.1
7	印度	5	0.83%	2018.4
8	意大利	4	0.66%	2018.0
9	法国	4	0.66%	2018.5
10	澳大利亚	4	0.66%	2018.2

表 1.2.12　“吸气式高超声速飞行器”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	西北工业大学	87	20.81%	2018.0
2	哈尔滨工业大学	60	14.35%	2018.3
3	中国人民解放军空军工程大学	49	11.72%	2017.7
4	南京航空航天大学	48	11.48%	2018.2
5	北京航空航天大学	46	11.00%	2018.3
6	天津大学	32	7.66%	2017.6
7	中国科学院	29	6.94%	2017.7
8	中国科学院大学	19	4.55%	2018.1
9	康考迪亚大学	18	4.31%	2017.9
10	中国人民解放军国防科技大学	15	3.59%	2018.0

前沿涉及的核心专利2014—2019年公开情况见表2.1.2，基于5G技术的无人驾驶系统开发、水下无人航行器及其舰载技术是近年来专利公开量增速最显著的方向。

（1）基于5G技术的无人驾驶系统开发

无人驾驶是集环境感知、决策规划和自动控制为一体的智能化技术，操作对象包括汽车、飞行器、舰船或其他形态装置。“网联化＋智能化”的技术融合与产业发展，是实现无人驾驶的必经之路。5G因其高速率、低时延、精确测距和传感能力，已成为网联化和智能化发展的关键技术。当前主流的自动驾驶技术依赖个体独立的感知能力，需搭载昂贵的摄像头、激光雷达、毫米波雷达、超声传感器、惯性导航/卫星导航等传感器；仅能进行视距范围的感知，在恶劣天气和光线急剧变化情况下难以稳健感知，时间和空间同步存在困难。无人驾驶面临复杂计算任务，而车载计算平台价格昂贵、处理能力受限、难以规模量产。第四代移动通信（4G）能力有限，无法为高清地图、虚拟现实/增强现实应用提供足够的数据速率支持，难以满足道路安全对低时延和高可靠的要求。5G与无人驾驶系统相结合自然成为无人驾驶领域

表2.1.1　机械与运载工程领域Top 10工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	基于5G技术的无人驾驶系统开发	137	106	0.77	2018.6
2	水下无人航行器及其舰载技术	536	2413	4.50	2016.6
3	柔性电子制造技术	671	5047	7.52	2016.0
4	基于大数据的智能制造系统生产调度技术	26	24	0.92	2018.2
5	复杂曲面超精密加工技术	76	259	3.41	2016.2
6	可穿戴多功能集成传感器开发	119	487	4.09	2017.1
7	仿生软体机器人开发	30	244	8.13	2016.4
8	高超声速飞行器热防护技术	73	171	2.34	2017.0
9	有人机/无人机协同控制技术	49	210	4.29	2016.7
10	智能电网运行与调度技术	133	686	5.16	2016.0

表2.1.2　机械与运载工程领域Top 10工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
1	基于5G技术的无人驾驶系统开发	1	0	3	8	30	95
2	水下无人航行器及其舰载技术	42	44	94	89	85	137
3	柔性电子制造技术	60	83	84	106	121	112
4	基于大数据的智能制造系统生产调度技术	0	0	4	2	5	15
5	复杂曲面超精密加工技术	5	14	10	14	11	14
6	可穿戴多功能集成传感器开发	6	8	18	36	34	17
7	仿生软体机器人开发	2	5	5	2	3	10
8	高超声速飞行器热防护技术	2	5	6	17	16	21
9	有人机/无人机协同控制技术	2	4	2	5	22	7
10	智能电网运行与调度技术	9	29	18	22	14	22

的研究前沿和热点问题，典型应用场景有：车联网、远程操控、边缘计算、建立个体与环境中一切事物的联系等。

（2）水下无人航行器及其舰载技术

相较于传统的水下探测手段，新型水下无人航行器具有生存能力强、自主性高、不易被侦察等优点，可作为无人水下监测网络的重要节点。由于海水密度、海流、海底地形地貌等环境复杂因素的影响，水下通信带宽和传输距离的限制，水下无人航行器的使用效能受到制约。关于水下无人航行器的技术研究主要是复杂海洋环境下单体自适应跟踪控制、水下复杂环境感知及自主任务决策、跨平台通信网络中继等。为拓宽水下无人航行器的使用场景，在应用部署方面也出现了无人机空投、舰载布放等探索性研究。水下无人航行器集群协同跟踪探测效能远优于单体跟踪探测，可最大限度地发挥单一平台优势，因此在强扰动及异步航行条件下的水下无人航行器集群协同组网控制，成为后续重点研究方向。

（3）柔性电子制造技术

柔性电子将有机/无机薄膜电子器件制作在柔性/可延性基板上，因其独特的柔性/延展性、高效/低成本的制造工艺，在信息、能源、医疗、国防等领域具有广泛应用前景，正在引领下一代电子产业技术革命。柔性电子制造可在任意形状、柔性衬底上实现纳米特征–微纳结构–宏观器件的大面积集成，涉及有机、聚合物、金属、非金属、纳米等机电特性迥异的材料功能界面精确形成；突破传统微电子的尺度极限、柔性极限、可靠性极限，促进从“平面”到“曲面”、从“二维”到“三维”、从“不可变形”到“大变形”的制造技术变革。主要技术趋势包括：发展纳米特征–微米结构–米级器件跨尺度高精度制造方法，在非平面/大变形基板上大面积精确制造有机或无机微纳结构，满足光学/电学/力学的苛刻性能要求；发展柔性微纳结构设计与制造方法，满足柔性电子的柔性与延展性苛刻要求（变形>50%），突破传统硅基器件的变形极限（通常其延展性不超过2%）；改善柔性电子设计、制造及集成的可靠性，攻克柔性电子因软硬材料失配、反复弯折拉伸、多功能集成等带来的挑战。

（4）基于大数据的智能制造系统生产调度技术

智能制造系统在大规模个性化定制的驱动下，以工业大数据、AI、产业智联网等技术为支撑，由人类专家与智能机器共同构成人机一体化的智能生产系统，成为智能制造的核心环节，且关键在于智能调度。在大数据技术出现之前，制造系统的生产调度高度依赖于精确建模和高效算法，随着产品需求、工艺形式的多样化，系统趋于复杂，传统的“因果+建模+算法”模式已举步维艰。大数据技术为解决该类问题提供了全新思路。随着信息化和自动化技术的快速进步，特别是数控机床、传感器、数据采集装置、其他具备感知能力的智能设备在制造系统中的大量使用，可以较为完备地收集制造系统的各种类型数据。采用大数据技术来分析和利用这些数据，进而实现智能调度成为当前制造系统领域的研究前沿。主要研究方向包括：制造系统人–信息–物理融合与知识生成、基于大数据的制造系统不确定性信息精准预测、人机物共融的动态生产调度、跨区域与跨尺度的分布式生产调度、模型与数据混合驱动的调度优化决策、数字孪生使能的生产调度等。

（5）复杂曲面超精密加工技术

随着先进光学、微电子和航空航天等先端技术领域的快速发展，高性能复杂曲面元件的超精密制造需求日益增多，以满足其长寿命、高可靠、轻量化等高品质使役需求。目前在复杂曲面超精密加工方面，主要基于超高精度复杂曲面的创成理论与制造工艺方法，开展复杂曲面创成机制、材料去除机理、面型精度保障机制、先进刀具设计与制造等方面的研究，探究高精度复杂曲面元件成型演变规律。元件尺度极端化、形状复杂化、材料多样化、损伤

近零化等前沿制造需求，对复杂曲面超精密加工提出了全新挑战，成为纳米精度制造科学的重要需求牵引。主要研究方向分为两方面：一是高性能复杂曲面超精密创成的新原理与新方法，引入多能场辅助制造模式，揭示加工过程中力、热、光等多能场耦合作用机制以及材料的微观断裂传递基本规律，实现高精度低损伤制造；二是高性能复杂曲面超精密装备设计制造及加工过程智能控制体系，研究复杂曲面超精密装备设计理论和制造技术，揭示零部件特征与装备精度及加工路径的相互制约机制，实现纳米级精度控性智能制造。

（6）可穿戴多功能集成传感器开发

柔性电子、可拉伸电子技术的发展为实现传感系统的柔性和可穿戴性提供了解决方案，可穿戴多功能传感器件可准确地将环境刺激转化为电信号，具有精度高、贴合性好、共形性好、稳定性高等优点，广泛应用于机器人智能感知、可穿戴健康监测、康复医疗等领域。目前相关发展集中在多模态感知增敏机理研究、可拉伸材料设计与合成、多模态传感器结构设计与高效可控制备、多模态传感器高效集成等方面。多模态感知增敏机理研究针对传感器对压力、剪切力、温度、湿度等多种外界信息的感知需求，设计不同的传感原理并结合生物体感知机理，实现高性能和高灵敏度传感。可拉伸材料设计与合成通过开发具备柔性和高可拉伸性能的传感功能材料和基底材料，实现传感单元的可拉伸性。多模态传感器结构设计与高效可控制备通过结构设计来获得传感系统的高可拉伸性，包括应力分离结构设计，层次化、阵列化传感器布局结构设计，微纳结构高效可控制备工艺。多模态传感器高效集成涉及基于柔性或可拉伸基底的封装工艺，高密度传感阵列信号抗干扰读取技术，多模态传感信息智能融合处理技术。未来发展研究方向有：传感单元的高灵敏度和高响应速度，高密度、高空间分辨率、多模态传感器集成，多功能集成传感器的自适应和自主感知。

（7）仿生软体机器人开发

近年来机器人得到了广泛工程应用，更加复杂的动态非结构化场景对机器人技术提出了更高的适应性要求。仿生软体机器人学作为机器人学科的一个分支，通过模仿生物体柔软的结构来赋予机器人较好的柔顺性和大变形能力，使其可与不可预知的环境进行形态适应交互。利用机器人材料的内在属性，降低有关机械结构和控制算法的复杂性，高自由度地实现一些复杂的功能和行为。主要研究方向有：新型智能软材料开发，新型驱动 / 功能机理，仿生软体机器人结构设计，驱动 / 感知一体化集成，设计 / 制造一体化技术，交互控制策略及理论，高能量密度柔性电池技术。目前的仿生软体机器人相比于生物智能还处于发展的初步阶段，未来研究将结合组织工程、人造生物学等，进一步创造具有独特的感知能力、动态响应性和移动性的生物混合系统。此外，加速协同机器人研究，使仿生软体机器人更安全地与人类和环境共融，拓展和丰富更多的应用场景。

（8）高超声速飞行器热防护技术

飞行器长时间高超声速飞行（Ma10），气动热环境（表面温度 >1500 K）会严重威胁飞行器结构安全，开展针对性热防护设计以解决高温热烧蚀属于高超声速飞行器研制的重大关键技术。烧蚀防热通过防热材料的烧蚀产生气体，在气流作用下带走气动热以实现防热目的，是高超飞行器广泛使用的一种热防护技术。各国都在研发高性能、轻量化的耐烧蚀涂层材料，如酚醛树脂基防热复合材料、陶瓷 / 金属复合耐热功能梯度材料、氧化铝增强热屏蔽材料、氧化铝可溶改性隔热材料、超轻刚性隔热材料、合成多密度材料等刚性隔热材料，新型复合柔性隔热毡、可缝制柔性隔热毡等柔性隔热材料。随着各种新型防热材料的出现，材料的低成本生产技术是批量应用需要考虑的问题，涵盖原材料、复合工艺和质量控制等方面。主要研究方向有：低温固化 / 高温使用 / 长寿命树脂和预浸料，使用混杂

纤维的复合材料，预浸料制备自动化程度提升，纤维或织物增强体的自动化铺放技术，低温固化 / 电子束固化 / 树脂传递模塑及其衍生技术等。

（9）有人机 / 无人机协同控制技术

有人机 / 无人机协同指有人机系统与无人机系统之间在决策、规划、控制、感知等方面，既各自进行独立的计算、存储、处理，又通过交互共融达成群体协同来完成目标任务。一方面，无人机系统目前还不具备意外事件实时响应和处理能力，无法完全自主执行任务，需要由人通过数据链进行操作和控制，以确保任务完成和使用安全；另一方面，无人机与有人机在平台能力（隐身性、机动性、滞空时间、作战半径等）、机载传感器性能、机载武器性能等方面具有能力互补的天然优势。因此，开展高端无人机和先进有人机协同作战，是一种极富潜力、可实现性强的作战样式，是弥补有人机和无人机能力不足的重要途径，将极大提高协同系统的作战效能和战场生存能力，成为空中作战模式的创新方向。主要研究内容有：多机多任务分配和动态环境下编队整体分配优化及协同态势感知与信息融合，基于任务规划指标、飞行约束条件和战场环境的有人机 / 无人机协同航路规划，基于自然语言理解的人机交互控制及信息交换，集群异构多智能体技术在有人机 / 无人机协同决策智能化方面的拓展应用。

（10）智能电网运行与调度技术

近年来，可再生能源渗透率的提高增大了电网的不确定性，电力电子化的发展趋势使电网的相对惯量趋于减小，电力市场化的推进使多市场主体间的博弈加强，使得电网安全运行面临着前所未有的挑战。同时，电力与其他能源系统的耦合不断加强，智能电网在未来大能源体系中的枢纽平台作用日益凸显。智能电网运行与调度采用先进的传感量测技术、控制决策方法，通过电源、电网、负荷之间的互动，实现含大量可再生能源电网的安全、优质、经济、绿色运行。在电源侧，通过多种发电互补来降低可再生能源出力的波动性，提升传统发电厂的调节能力；在电网侧，采用区域互联和辅助服务交易来实现跨区平衡和消纳；在负荷侧，通过建设微网和主动配网，经由负荷集成商提供需求侧响应，或通过电力多元化转换来跨越多能源网络平衡供需。相应发展趋势有：低惯量智能电网调度运行与控制理论，保障高比例非同步机电源接入的智能电网能够安全稳定运行；新型商业模式激励发电厂商和用户向电网提供辅助服务，积极消纳可再生能源；构建数据和模型相融合的理论方法，在不确定性环境下进行智能决策，提升智能电网运行的经济性和可再生能源的利用效率。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 基于 5G 技术的无人驾驶系统开发

发展基于 5G 技术的无人驾驶系统，可获得以下收益：扩大态势感知范围，感知更精准，更好保障行车安全；减少单车高精度传感器的部署数量，降低感知和计算成本；实现车辆与道路实时联动，增加道路通行效率，缓解交通拥堵；建立包括远程驾驶、编队行驶、自动泊车、车速引导、路况精准提醒、高清视频实时分享在内的网联应用。

在 5G 技术支撑下，通过协作感知，突破无人驾驶在感知层的局限性，建立车–车、车–基站、车–路灯之间的通信，降低强阳光、黑夜、雾霾、暴雨等不利环境对驾驶的影响。感知交叉路口各个方位的车辆信息，使前后左右的车辆相互“透视”，由此降低单车传感器的作用权重、无人驾驶系统成本，同时提高适用性、可靠性、安全性。5G 环境下的自动驾驶远程操控能力比 4G 要高数倍，可有效地对现场情况做出反应，提升远程操控的稳定性与实时性。利用 5G 网络为自动驾驶提供边缘计算支持，无人驾驶系统将其传感器信息上传到边缘节点，并

基于边缘节点强大的计算能力获得驾驶决策结果。增强车辆与一切事物相连的通信能力，实现信息互联，有利于交通管理部门在云端做出智能化的交通管理资源调度与决策，提高公共交通效率。

基于 5G 技术的无人驾驶系统面临安全性，泛在、统一的高精度时空基准两大挑战。5G 实现了计算与通信的融合，但 5G 的虚拟化和软件定义功能也引入了新的安全风险，相比过去的专用电信设备更易受攻击，网络稳定性也易受影响。无人驾驶行驶对自身及环境定位要求极高，亚米级甚至厘米级高精度定位是车联网开展车辆自动行驶和决策安全业务的重要保障，而协作感知的信息融合必须建立在统一的时空框架之内。亟须通过 5G + 全球导航卫星系统来建立无缝覆盖的高精度时空基准，为无人驾驶系统提供关键基础条件。

目前，本方向的核心专利产出数量较多的国家是中国、韩国、美国，篇均被引频次排在前列的国家是美国、中国、德国（见表 2.2.1）。核心专利产出数量较多的机构是乐金集团、日本电报电话公司、华为技术有限公司（见表 2.2.2）。专利主要产出国家之间、产出机构之间均不存在合作关系。

2.2.2 水下无人航行器及其舰载技术

水下无人航行器在海洋科学观测、水下目标探

表 2.2.1 “基于 5G 技术的无人驾驶系统开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	96	70.07%	82	77.36%	0.85
2	韩国	15	10.95%	1	0.94%	0.07
3	美国	7	5.11%	22	20.75%	3.14
4	日本	6	4.38%	0	0.00%	0.00
5	德国	4	2.92%	1	0.94%	0.25
6	印度	3	2.19%	0	0.00%	0.00
7	瑞典	2	1.46%	0	0.00%	0.00
8	芬兰	1	0.73%	0	0.00%	0.00
9	荷兰	1	0.73%	0	0.00%	0.00

表 2.2.2 “基于 5G 技术的无人驾驶系统开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	乐金集团	韩国	11	8.03%	0	0.00%	0.00
2	日本电报电话公司	日本	6	4.38%	0	0.00%	0.00
3	华为技术有限公司	中国	5	3.65%	11	10.38%	2.20
4	西安理工大学	中国	5	3.65%	0	0.00%	0.00
5	大疆创新科技有限公司	中国	3	2.19%	27	25.47%	9.00
6	上海朗帛通信技术有限公司	中国	3	2.19%	0	0.00%	0.00
7	美国电话电报公司	美国	2	1.46%	16	15.09%	8.00
8	德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会	德国	2	1.46%	1	0.94%	0.50
9	广东容祺智能科技有限公司	中国	2	1.46%	1	0.94%	0.50
10	北京航空航天大学	中国	2	1.46%	1	0.94%	0.50

测等方面获得广泛应用，相关技术得到广泛关注并投入工程实践。由于复杂海洋环境对平台跟踪控制构成强扰动，水下无人航行器的跟踪探测依然是难题，相关研究重点是传感器搭载、复杂环境感知、自适应任务规划、航路规划等。水下环境复杂多变，单一类型的探测信号局限性大，从平台角度出发扩展传感器搭载类型，利用深度学习方法分析多源数据特征，研究多源数据融合来提高平台对复杂海洋环境的感知能力。结合先验信息和环境感知结果来建模水下环境，针对探测任务需求与跟踪目标特性，实施水下自主航行器的自适应跟踪探测。

以集群协同组网的模式部署水下无人航行器，执行复杂环境下的跟踪探测任务是应用发展趋势，关键在于使多平台达到某些维度上的一致性。通常需要利用通信网络来获得相邻平台或者所有平台的信息，采取协同策略来生成控制指令以保障一致性。计及水下扰动和通信迟滞，开展水下无人航行器分布式协同研究，即设计分布式一致性协议，给定期望的一致性变量，利用映射关系反演所需的控制系数，实现多个水下无人航行器的协同设计。水下无人航行器也可作为水面舰艇或者潜艇的支援平台，其外形包络与当前服役的水中兵器类似。发展水下无人航行器舰载技术，拓展传统水下无人航行器的使用场景、简化部署环节，如利用鱼雷发射管自航布放、水下气动布放、舰载无人机空投布放等。

目前，本方向的核心专利产出数量较多的国家是中国、美国、日本，篇均被引频次排在前列的国家是美国、意大利、德国（见表 2.2.3）；美国和哥伦比亚合作较多，意大利和荷兰、美国和荷兰、日本和哥伦比亚均存在合作（见图 2.2.1）。核心专利产出数量排在前列的机构是哈尔滨工程大学、美国海军、中国船舶集团有限公司（见表 2.2.4）；专利主要产出国家之间不存在合作关系。

2.2.3 柔性电子制造技术

随着晶体管特征尺寸逐渐接近极限，近年来从功能集成的角度提出“超越摩尔定律”，从硅基微电子发展到聚合物基柔性电子，应用领域从信息处理扩展到光电器件、生物传感、人机交互、健康医疗等，正在变革整个电子制造技术与产业。柔性电子材料、器件、工艺与装备的系统研究是实现柔性电子从实验室走向工业应用的关键，也是下一代信息产业的突破口和制高点。2018 年“美国制造业创新网络”将柔性混合电子制造列为第 7 个主题，欧盟、英国、韩国、日本也纷纷启动综合性计划以大力发展柔性电子技术和产品。

表 2.2.3 “水下无人航行器及其舰载技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	196	36.57%	398	16.49%	2.03
2	美国	177	33.02%	1587	65.77%	8.97
3	日本	45	8.40%	67	2.78%	1.49
4	德国	27	5.04%	155	6.42%	5.74
5	俄罗斯	27	5.04%	11	0.46%	0.41
6	哥伦比亚	20	3.73%	60	2.49%	3.00
7	英国	16	2.99%	63	2.61%	3.94
8	韩国	16	2.99%	19	0.79%	1.19
9	荷兰	5	0.93%	2	0.08%	0.40
10	意大利	4	0.75%	24	0.99%	6.00

表 2.2.4 “水下无人航行器及其舰载技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	哈尔滨工程大学	中国	110	20.52%	281	11.65%	2.55
2	美国海军	美国	35	6.53%	80	3.32%	2.29
3	中国船舶集团有限公司	中国	16	2.99%	13	0.54%	0.81
4	阿特拉斯电子有限公司	德国	15	2.80%	142	5.88%	9.47
5	波音公司	美国	13	2.43%	19	0.79%	1.46
6	雷神公司	美国	12	2.24%	28	1.16%	2.33
7	西北工业大学	中国	11	2.05%	9	0.37%	0.82
8	Adaptive Methods Inc.	美国	10	1.87%	25	1.04%	2.50
9	海底七有限公司	英国	8	1.49%	29	1.20%	3.63
10	川崎重工业株式会社	日本	8	1.49%	7	0.29%	0.88

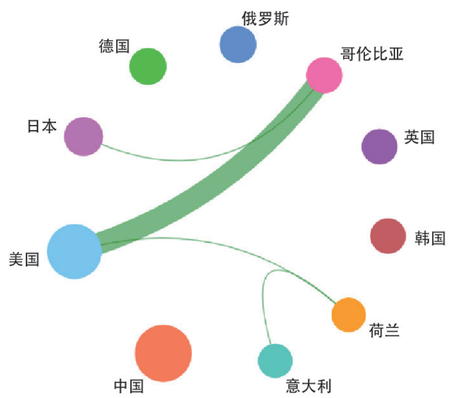

图 2.2.1 “水下无人航行器及其舰载技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

为了突破传统微电子的尺度极限、柔性极限、可靠性极限，开拓柔性电子产品创新 / 重大应用，应系统地开展柔性电子制造的新型材料、工艺机理和装备原理研究，构建理论、技术和装备支撑。相关研究方向包括：高性能柔性电子功能材料研发与制备，研究柔性电子功能材料的制备新原理与新技术、功能材料与聚合物的表界面控制、纳米复合功能纤维、纳米尺度纤维及低维功能材料制备的新方法；大面积柔性致密薄膜的高效低温制备，研究柔性基板上的电极层、半导体层、介电层和密封层的低温气相、液相薄膜沉积技术、印刷技术，探索低温工艺下异质薄膜的界面性能及其调控方法；柔性微纳结构跨尺度图案化制造，采用大尺寸大面积元件以支持柔性功能结构向微米、亚微米线宽发展，优选新型印刷技术、高速率激光图案化技术、图案化溅射沉积工艺等，提升制造精度和效率；柔性混合电子器件系统高效集成，针对高集成度与分布式融合特征，研究不同物理化学特性的材料、尺寸差异极大的异质元器件集成涉及的表 / 界面效应及其调控；柔性电子器件设计与可靠性保证，研究柔性电子的机械性能、有机 / 无机材料的界面强度、系统的疲劳寿命等。

目前，本方向的核心专利产出数量较多的国家是中国、美国、韩国，篇均被引频次排在前列的国家是法国、美国、荷兰（见表 2.2.5）；注重领域合作的国家有美国和韩国、中国和英国（见图 2.2.2）。核心专利产出数量较多的机构是东洋纺有限公司、日产化学工业株式会社、三星电子材料有限公司（见表 2.2.6）。相关机构中三星电子材料有限公司和韩国科学技术院存在较多合作（见图 2.2.3）。

表 2.2.5 “柔性电子制造技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	165	24.59%	292	5.79%	1.77
2	美国	152	22.65%	2948	58.41%	19.39
3	韩国	110	16.39%	217	4.30%	1.97
4	日本	104	15.50%	423	8.38%	4.07
5	法国	18	2.68%	432	8.56%	24.00
6	英国	17	2.53%	162	3.21%	9.53
7	瑞士	10	1.49%	42	0.83%	4.20
8	德国	8	1.19%	28	0.55%	3.50
9	意大利	8	1.19%	27	0.53%	3.38
10	荷兰	7	1.04%	68	1.35%	9.71

表 2.2.6 “柔性电子制造技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	东洋纺有限公司	日本	22	3.28%	29	0.57%	1.32
2	日产化学工业株式会社	日本	18	2.68%	24	0.48%	1.33
3	三星电子材料有限公司	韩国	16	2.38%	81	1.60%	5.06
4	韩国电子通信研究院	韩国	14	2.09%	37	0.73%	2.64
5	韩国科学技术院	韩国	12	1.79%	17	0.34%	1.42
6	英特尔公司	美国	10	1.49%	45	0.89%	4.50
7	清华大学	中国	10	1.49%	27	0.53%	2.70
8	MC10 Inc.	美国	9	1.34%	365	7.23%	40.56
9	加利福尼亚大学	美国	9	1.34%	86	1.70%	9.56
10	LG 集团	韩国	9	1.34%	44	0.87%	4.89

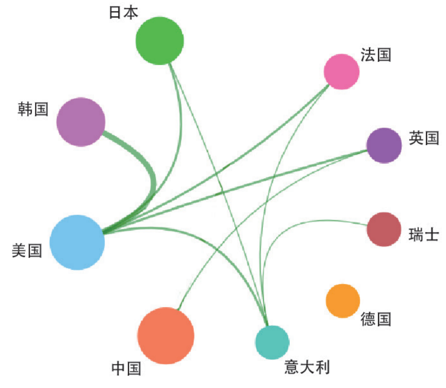

图 2.2.2 “柔性电子制造技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

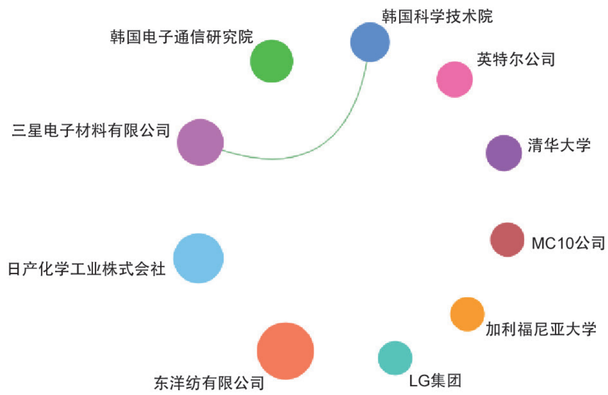

图 2.2.3 “柔性电子制造技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

课题组组长： 段正澄　郭东明

课题组成员：

蒋庄德　黄庆学　樊会涛　向锦武　刘怡昕
杜善义　徐德民　马伟明　徐　青　陈玉丽
宋爱国　方勇纯　彭志科　尧命发　刘　辛
王钻开　王立平　陈伟球　陈海生　王开云
訾　斌　轩福贞　王　东　贺　永　郑津洋
陈　旭　贾利民　史铁林　姬　学

执笔组成员：

黄　培　闫春泽　刘晓伟　轩建平　夏　凉
罗飞腾　刘智勇　赵江滨　孙　博　李开成
魏蛟龙　李宝仁　黄永安　高　亮　许剑峰
尹周平　吴　豪　吴志刚　李毅超　张园园
文劲宇　姚　伟　夏　奇　陈惜曦

二、信息与电子工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿见表 1.1.1，涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向。其中，“类脑智能芯片”“边缘计算”“对抗学习”这 3 项基于科睿唯安数据挖掘经专家研判获得，其他 7 项基于专家推荐，经数据与专家交互获得。各前沿涉及的核心论文 2014—2019 年发表情况见表 1.1.2，其中，“6G 无线传输与网络构架”近年来核心论文发表数量增速最显著。

（1）类脑智能芯片

类脑智能芯片，也称类脑芯片，是借鉴人脑处理信息的基本原理，面向类脑智能而发展的新型信息处理芯片，可分为类脑计算和类脑感知芯片。类脑计算芯片是借鉴脑科学基本原理，面向类脑智能发展的非冯·诺依曼新型信息处理芯片。有别于提供专有算法的加速平台，类脑计算芯片旨在像大脑一样以低功耗、高并行、高效率、通用、强鲁棒和智能地处理各种复杂非结构化信息。类脑感知芯片是借鉴生物感知基本原理实现信息感知的新型芯片，作为类脑计算芯片的信号输入器件，类脑感知芯片为类脑计算芯片提供高灵敏、精确、高速的感知信息，有效地保障类脑计算芯片正确地进行学习、记忆、识别、认知和决策等智能化处理。类脑芯片技术是一项新兴技术，目前没有明确的技术方案和研究路线图，美国、英国、德国、法国、韩国、日本、瑞士、新加坡、中国等国家的研究团队分别从架构、模型、集成电路、器件、编解码、信号处理、设计、制程、集成、测试和软件等各个层次探索类脑芯片的解决方案。类脑芯片是类脑智能发展的基石，特别适合于实时高效地解决不确定及复杂环境下的问题，可以赋能各行各业，全面带动工业、农业、医疗、金融以及国防等各行业的飞速发展。

（2）多尺度时空超分辨医学成像仪器

重大疾病往往在发生发展机制上呈现复杂性，在人类科技已取得巨大成就的今天，疾病（如肿瘤）的早期预警与诊断，仍然是我们面临的重大难题之

表 1.1.1　信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	类脑智能芯片	60	5664	94.40	2016.1
2	多尺度时空超分辨医学成像仪器	120	6774	56.45	2015.5
3	边缘计算	492	32 594	66.25	2017.4
4	6G 无线传输与网络构架	22	750	34.09	2018.3
5	碳基集成电路	72	4413	61.29	2015.8
6	天地一体化定位导航体系	9	532	59.11	2016.2
7	对抗学习	216	10 725	49.65	2017.6
8	超精密三维显微原理与仪器	83	2909	35.05	2015.4
9	面向信息物理融合系统的软件自动化	237	5479	23.12	2015.7
10	长距离水下无线光通信	55	2875	52.27	2016.4

表 1.1.2 信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	类脑智能芯片	10	14	12	11	8	5
2	多尺度时空超分辨医学成像仪器	38	28	21	24	7	2
3	边缘计算	15	27	57	119	178	96
4	6G 无线传输与网络构架	0	0	1	5	3	13
5	碳基集成电路	16	20	14	10	9	3
6	天地一体化定位导航体系	1	3	1	1	3	0
7	对抗学习	6	10	13	54	91	42
8	超精密三维显微原理与仪器	27	18	19	17	2	0
9	面向信息物理融合系统的软件自动化	63	53	49	37	25	10
10	长距离水下无线光通信	2	9	17	19	7	1

一。医学成像仪器利用电磁波（X 射线、正电子或光子）或声波等与研究对象的相互作用，在宏观、介观、微观、纳观尺度上获取疾病相关的结构、生理、细胞或分子的时间序列信息。提供结构和生理信息的宏观成像系统如 X 射线断层成像、核磁共振成像、超声、正电子发射断层成像、单光子发射断层成像，已经在临床实践中广泛应用。

理想的成像仪器应该是定量且高时空分辨的，能够得到高灵敏度和高特异性的组织结构信息、生理代谢信息、分子信息甚至基因信息，为临床医生对疾病的诊断和监控提供全面的帮助。目前，欧美等地区的政府、学术界、工业界高度重视这样的成像仪器研发。“分子影像”“精准医学”和各种“脑计划”无不依赖多尺度时空超分辨医学成像仪器的进步。多尺度时空超分辨医学成像仪器的主要研究方向包括：①发展超高时间分辨、空间分辨的结构与功能成像技术，以及图像处理分析新方法，为疾病诊断提供新工具；②发展多参数时空动态同时成像系统，揭示各监测参数之间的关联，从各参数响应的快慢推测病理生理反应中的因果关系，诠释病理生理反应机制；③联合利用光、声、电、磁等手段，发展覆盖分子—细胞—组织—器官等多个尺度的在体高分辨成像理论与技术。

（3）边缘计算

物联网、移动互联网技术的发展使得网络边缘侧数据发生爆炸式增长，基于云计算模型的单一计算资源已不能满足大数据处理的实时性、安全性和低能耗等需求，在此背景下，边缘计算应运而生。边缘计算是指在网络边缘侧执行计算的一种新型计算模式。区别于云计算，边缘计算可以在靠近物或数据源的一侧就近提供服务，具有低延迟、高隐私等技术特点。

近年来，边缘计算在学术界、工业界得到广泛关注。美国韦恩州立大学施巍松教授团队于 2016 年 5 月首次定义边缘计算。同年，美国计算机协会（ACM）和电气和电子工程师协会（IEEE）联合资助并发起边缘计算国际研讨会 ACM/IEEE Symposium on Edge Computing （SEC）。随后 MobiCom、INFOCOM 等重要国际会议相继增加边缘计算主题。亚马逊公司于 2017 年发布 Greengrass 平台，支持在边缘侧部署机器学习服务。随后，云平台提供商谷歌、微软、阿里云、百度相继发布各自的边缘计算软硬件平台。开源软件项目 EdgeX、KubeEdge 等积极推进，在开源社区、学术界、工业界产生重要影响。中国边缘计算发展速度和世界几乎同步。2016 年 11 月，华为联合国内外多家企

业成立边缘计算产业联盟。阿里巴巴集团、腾讯公司等互联网企业，中国移动通信集团公司、中国联合网络通信集团有限公司、中国电信集团公司等移动运营商，都积极部署边缘计算战略。安防视频龙头企业海康威视数字技术股份有限公司于 2017 年发布 AI Cloud 框架，重点关注边缘计算。未来边缘计算的主要研究方向包括边缘计算系统平台、云边任务协同调度机制、边缘智能算法、边缘计算创新应用等。

（4）6G 无线传输与网络构架

第六代移动通信系统（6G）是面向 2030 年信息社会发展的新一代移动通信技术。6G 期望引入新的性能指标与应用场景，例如，提供全球覆盖、更高的频谱 / 能量 / 成本效率、更高的智能化水平与安全性等。为了满足这些需求，6G 依赖于新的使能技术，将出现新的 4 大范式转换，可以概括为"全覆盖、全频谱、全应用、强安全"。6G 将具备超高吞吐量（Tbps）、超高频谱效率（kbps/Hz）、超低时延（μs）及全球覆盖（90%）的能力，支持更加异构多样的业务类型。

6G 网络架构研究面向全社会、全行业、全生态的网络自治与智能生成，以数据为中心的 ICDT 深度融合和多维立体全场景服务下新型绿色无线网络架构及组网关键技术。6G 无线传输正开展包括波形设计、多址接入、信道编码以及无蜂窝大规模多入多出（MIMO）等研究。6G 将不局限于陆地无线移动通信网络，需要卫星、无人机等非陆地网络作为有效补充，构建空天地海一体化网络。为进一步提升数据传输速率和连接数密度，将充分挖掘包括 Sub-10 GHz、毫米波、太赫兹、光频段在内的全频谱资源。超异构网络、多种通信场景、大量天线单元、大带宽、新服务需求的出现，将产生海量数据，6G 将借助人工智能与大数据技术实现一系列智能化应用。

（5）碳基集成电路

碳基集成电路是指采用碳纳米管作为有源层的晶体管构成的集成电路。碳纳米管具有超高的室温载流子迁移率、极低的本征电容和优异的静电学特性，有望构建更高性能、更低功耗和更易微缩的晶体管。从广义上讲，碳基集成电路充分利用碳纳米管等新型纳米半导体材料独特的物理、电子、化学和机械优势，构建性能优异、功耗低的信息处理芯片，更为灵敏、形态更为丰富的传感器，以及工作频段更高、速度更快的通信芯片，并有望实现这些功能芯片的在片三维集成，构建性能更高的信息处理系统。

碳基集成电路经历了 20 多年基础研究阶段，发展出包括碳基材料制备和输运性质研究、器件物理和互补金属氧化物半导体（CMOS）器件制备方法和基本集成电路构建等在内的完整技术体系，验证并初步实现了碳基器件在能效上的优势。目前开始进入工程化阶段，继续发展需要解决晶圆级材料制备、先进技术节点碳基 CMOS 晶体管制备技术、电子设计自动化（EDA）平台、碳基集成电路设计等重要问题。

2018 年 7 月，在美国国防部高级研究计划局（DARPA）"电子复兴"（ERI）计划资助下，美国麻省理工学院联合美国亚德诺半导体（ADI）公司、美国空军研究实验室，使用行业标准设计流程和加工工艺，推进碳基集成电路的工程化发展。同年，中国北京大学推进先进技术节点碳基集成电路技术工程化发展。

（6）天地一体化定位导航体系

天地一体化导航定位体系是以全球卫星导航系统为核心，以低轨星、空地伪卫星、地面 5G 等通信网络以及多种室内外定位导航源为手段，基于网络化时空资源统一管理与云端协同监测处理，构建从地下到深空，具有"泛在、精准、统一、融合、智能"特征的天地一体化导航定位网络体系。其主要研究方向为：①以全球卫星导航系统为基石，开展地下 / 地面 / 空中 / 低轨星导航源无线基站定位技术研究，形成与全球导航卫星系统空间信号兼容、

通导融合以及时空统一的天地一体化导航增强网络，实现泛在的室内外无缝精准定位、导航与授时（PNT）服务。②以异构多导航源混合网络为主体，加强与物联网和 5G 网络的融合协同，开展智能混合云定位技术研究，通过时空大数据智能化处理提升个体及群体的连续可信导航与授时（PNT）服务能力。③以泛在实时精准定位数据为基础，以全息位置地图为支撑，开展网络化位置服务操作系统平台和开放标准协议技术研究，实现用户时空信息关联的多维空间智能化位置服务。天地一体化导航定位体系的建设将引领 PNT 技术快速发展，使 PNT 信息与大数据业务广泛融合，催生人工智能技术对时空大数据的深度挖掘，推动 PNT 技术向更加泛在、更加融合、更加智能的国家综合 PNT 体系发展。

（7）对抗学习

对抗学习研究如何通过数据扰动来探查、利用机器学习算法的脆弱性并削弱机器学习系统的安全性，同时通过对抗训练等方法填补模型漏洞，以提升机器学习算法在对抗环境下的鲁棒性与泛化能力。对抗学习可应用于计算机视觉、自然语言处理、无人驾驶系统等领域的模型不确定性评估与神经网络漏洞探查，近期研究也显示其在深度学习加速训练与人工智能系统鲁棒性提升等方向的巨大潜力。对抗学习的研究方向主要包括对抗攻击、对抗防御以及对抗博弈 3 个方面。其中对抗攻击研究在数据样本上生成和优化对抗噪声的方法，根据攻击方对目标模型了解程度的高低可分为白盒攻击和黑盒攻击。对抗防御研究如何通过噪声检测和主动防御实现模型鲁棒性的提升。对抗博弈则研究通过攻防双方博弈式的训练过程提升模型性能的方法，如利用生成器和判别器相互博弈学习的生成式对抗网络。物理攻击、自然噪声生成和对抗训练加速是对抗学习未来的重要发展方向。物理攻击需要摆脱现有方法对模拟场景的依赖，构建在真实世界不同角度、距离和光照条件下均具备攻击能力的对抗样本。为进一步提升对抗噪声的自然性，需利用生成式对抗网络将对抗样本映射到原始图像的流形。针对现有对抗训练方法通用性差、收敛速度慢的问题，需推广生成式对抗网络的学习框架，在协同训练中提升多模型鲁棒性与泛化能力，同时加速训练过程的收敛。

（8）超精密三维显微原理与仪器

显微测量的表征精度代表人类微制造的能力极限。新一代微器件与微系统技术全面进入立体集成时代，超精密级三维微结构功能化表征成为全球信息产业竞争的质量基础和科学前沿。光学显微测量属于非接触测量，具有空间分辨力高、不损伤样品等优点，广泛应用于高灵敏度光电探测器、高效照明发光二极管（LED）、高集成度微机电系统（MEMS）器件制造以及增强现实 / 虚拟现实（AR/VR）系统中超光滑曲面宏微复合结构测量等。超精密三维显微测量是纳米器件与微系统不断突破极限性能的必备手段，主要研究方向涵盖超精密三维显微测量创新原理与方法、测量结果的三维重构及可视化、误差分析与测量不确定度评定、超精密三维显微仪器的校准及量值溯源等。发展趋势包括：①异型微结构功能化几何参数的高精度表征；②复杂工业场景下产品关键几何参数的在线测量及智能监测；③复合式多模态参数测量仪器的创新集成；④三维显微计量理论新突破。

（9）面向信息物理融合系统的软件自动化

信息物理融合系统（CPS）是信息空间和物理空间紧耦合环境下软件和系统发展的新形态。它通过感知、计算、通信和控制的有机融合与深度协作，完成和优化复杂系统的各种功能和智能服务，广泛应用于国民经济各个领域，加速软件成为信息社会基础设施。相应地，高安全、高可靠和高可用是其刚需。基于模型 / 合约的方法是 CPS 设计的主流途径，其中基于模型的设计通过抽象 / 精化对复杂 CPS 进行不同抽象粒度建模并建立模型间一致性，

而基于合约设计通过组合/分解对复杂CPS进行不同视点建模并建立视点模型和系统模型间一致性。但是，如何建立基于模型和合约的CPS设计理论，保证设计正确的CPS抽象模型，并高效地自动生成和演进正确可靠的程序代码，是一个巨大挑战。在代码生成自动化方面，目前工业界主要采取以Simulink/Stateflow为代表的基于仿真的方法；学术界主要采取基于形式验证和综合的方法。基于仿真的方法由仿真图形模型直接生成代码，直观、高效，易于使用，但是无法保证生成程序代码的可靠性；基于形式验证和综合的方法首先建立系统形式模型并验证其正确性，然后由验证模型根据精化理论生成正确程序代码，但是效率低、不易使用、扩展性差。未来的趋势是将上述两种方法结合，共同解决安全可靠的CPS控制软件的高效设计、自动生成和演进问题。

（10）长距离水下无线光通信

长距离水下无线光通信是以光作为信息载体在水下进行长距离无线通信的技术，其具有带宽高、功耗体积小、时延低、安全性好等优势，在海底勘探、海洋监测及水下组网等领域已成为世界各国竞相发展的重要通信技术之一。长距离水下无线光通信基于大功率光源、高灵敏探测器、信号处理技术和自动捕获、跟踪、瞄准系统，最新研究成果已证明高数据速率（Gbps量级）和长传输距离（超过100 m）水下无线光通信的可行性，也显示其用于水下数据传输、水下照明与通信、水下定位、无人潜器集群间通信及军事领域的巨大潜力。尽管长距离水下无线光通信仍面临诸多挑战，其仍是深海通信中的重要组成部分。

针对水下无线光通信系统具有的独特信道，对其固有光学特性、体散射函数以及海水中的气泡和湍流等特性的研究是设计长距离水下无线光通信系统的基础；光信号在水下传输衰减严重，高功率、高光束质量的光源和高灵敏的探测器也是构建长距离水下无线光通信系统的重点；结合光信号在海水中的散射和多径特性，设计合适的信道编码、信道均衡、分集复用等高效率的信号处理技术提高系统鲁棒性。此外人工智能可以在无法准确建模的情况下，使系统从经验中学习，提升系统性能，有助于水下无线光通信系统的智能化。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 类脑智能芯片

类脑芯片目前没有公认的技术方案和研究路线图，全球的研究团队分别从架构、模型、集成电路、器件、编解码、信号处理、设计、制程、集成、测试和软件等各个层次探索类脑芯片的解决方案。类脑芯片架构是基础，由于大脑信息编码具有时空融合特性，国外主要类脑芯片均采用时空融合架构，支持具有高度时空复杂性的脉冲神经网络算法模型。按数据表达分类，目前类脑计算芯片架构分为数字型架构、模拟型架构和数模混合型架构。利用超大规模集成电路来实现神经网络模型，用于构建类脑的感知和计算系统，是由Carver A. Mead等人在20世纪80年代末提出的。以类脑计算方案与传统冯·诺依曼架构背离程度为标准，可将方案的层次从上到下大致分为程序级、架构级、电路级和器件级等层次。据此，现有主流方案代表有：英国曼彻斯特大学的SpiNNaker是程序级的代表，IBM的TrueNorth、Intel的Loihi和清华大学的Tianjic是架构级的代表，德国海德堡大学的BrainScaleS是电路级的代表，美国斯坦福大学的Neurogrid是器件工作状态级的代表。

除了基于硅技术的类脑芯片外，还有基于新型纳米器件的类脑芯片，例如阻变存储器和忆阻器阵列(STT-RAM、PCM、RRAM等)。这种芯片直接利用定制的器件结构来模拟生物神经元的电特性，集成度更高，是非常有潜力的类脑芯片方案。但是

目前大规模阻变存储器制造工艺相对不成熟，一致性和重现性都较差，现在还没有与基于硅技术的类脑芯片规模相当的芯片。

类脑芯片研究的核心是要借鉴哪些脑科学原则，在类脑芯片中表达、存储、计算和传输信息，用芯片和软件协同设计去控制、调度和管理信息。目前主要采用的核心技术包括存算一体、事件确定、高度并行、异步、稀疏编码和异构融合等。利用未来计算机架构发展的黄金十年，需要扩展图灵计算架构，利用模型、芯片、软件协同设计的方式创新发展类脑芯片。

如今窄人工智能发展碰到的问题，例如小或者脏数据，不确定性新问题或不完整的知识，动态、多体系多模态复杂系统等，最好的解决方案是发展类脑通用智能，类脑芯片是类脑通用智能的基石，类脑智能可以赋能各行各业，全面推动工业、农业、医疗、金融以及国防等行业飞速发展。

“类脑芯片”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家以及研究单位分布情况见表 1.2.1 和表 1.2.2。“类脑芯片”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家以及研究单位分布情况见表 1.2.3 和表 1.2.4。类脑芯片研究在学术界和企业界得到广泛关注，美国研究基础特别雄厚，核心论文排名第 1；中国和瑞士核心论文分别居于第 2、第 3 位。在排名前 10 的核心论文主要产出机构中，5 家来自美国，3 家来自中国，2 家来自瑞士（见表 1.2.2）。美国和中国目前在这个研究领域合作较多（见图 1.2.1）。从表 1.2.2 可以看出，在研究机构中，苏黎世联邦理工学院、苏黎世大学、密西根大学、普渡大学等在核心论文发表方面处于前列。在机构合作方面，苏黎世联邦理工学院与苏黎世大学合作最为密切（见图 1.2.2）。

1.2.2 多尺度时空超分辨医学成像仪器

计算机断层扫描（CT）的问世被公认为伦琴（W.C. Rontgen）发现 X 射线以来的的重大突破，因为它标志着物理学、电子学、计算机学和数学相结合的里程碑。成像可以利用自身 / 内源信号、成像分子探针和信号来定性或定量检测生物体内生理和病理变化。医学成像仪器的研发具有科学前沿和综合交叉的双重特征。借助成像仪器，人类不断延伸和扩展在时空间分辨和识别判读等方面的能力。可以说，成像技术为推动医学和生命科学的发展发挥了巨大作用。恶性肿瘤和心脑血管疾病作为人类健康杀手，是导致人类死亡率最高的两类疾病。科学技术发展对这些疾病的诊断与预警提出更高要

表 1.2.1 “类脑智能芯片”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	38	63.33%	3702	97.42	2016.3
2	中国	13	21.67%	1141	87.77	2017.2
3	瑞士	8	13.33%	645	80.62	2015.2
4	德国	6	10.00%	349	58.17	2016.5
5	韩国	5	8.33%	430	86.00	2016.0
6	日本	4	6.67%	645	161.25	2015.0
7	新加坡	4	6.67%	224	56.00	2017.0
8	英国	3	5.00%	488	162.67	2015.7
9	法国	3	5.00%	432	144.00	2015.3
10	卡塔尔	2	3.33%	367	183.50	2016.5

表 1.2.2　“类脑智能芯片”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	苏黎世联邦理工学院	8	13.33%	645	80.62	2015.2
2	苏黎世大学	6	10.00%	525	87.50	2015.3
3	密西根大学	4	6.67%	495	123.75	2016.8
4	普渡大学	4	6.67%	217	54.25	2016.2
5	康奈尔大学	3	5.00%	582	194.00	2015.3
6	IBM 公司 Almaden 研究中心	3	5.00%	478	159.33	2015.0
7	清华大学	3	5.00%	340	113.33	2018.0
8	西南大学	3	5.00%	157	52.33	2017.0
9	亚利桑那州立大学	3	5.00%	156	52.00	2016.0
10	中国科学院	3	5.00%	126	42.00	2017.3

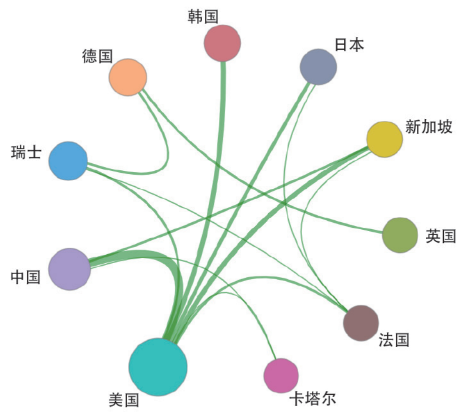

图 1.2.1　“类脑智能芯片”工程研究前沿主要国家间的合作网络

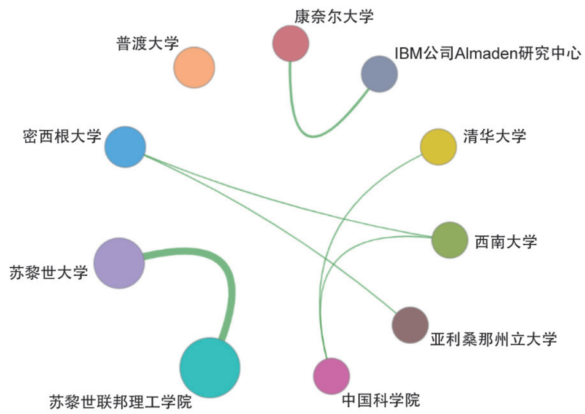

图 1.2.2　“类脑智能芯片”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3　“类脑智能芯片”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	1287	29.14%	2018.4
2	中国	1262	28.58%	2018.7
3	韩国	316	7.16%	2018.7
4	英国	267	6.05%	2018.3
5	瑞士	242	5.48%	2017.8
6	德国	240	5.43%	2018.5
7	法国	188	4.26%	2018.2
8	日本	186	4.21%	2018.7
9	印度	150	3.40%	2018.8
10	新加坡	142	3.22%	2018.5

表 1.2.4 “类脑智能芯片”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	178	16.35%	2018.8
2	苏黎世联邦理工学院	151	13.87%	2017.5
3	清华大学	123	11.29%	2018.3
4	苏黎世大学	105	9.64%	2017.2
5	首尔大学	105	9.64%	2018.4
6	华中科技大学	82	7.53%	2018.7
7	中国科学院大学	73	6.70%	2018.9
8	普渡大学	71	6.52%	2018.3
9	北京大学	70	6.43%	2018.6
10	新加坡国立大学	66	6.06%	2018.5

求，这是传统成像仪器难以胜任的。新现象的发现，优化技术、探测技术、高速采集和信号处理技术的发展，为成像仪器发展注入新鲜血液。

医学成像仪器的发展趋势如下：

（1）发展超时间分辨、超空间分辨、超灵敏度的测量新技术。医学成像仪器能够在活体状态下对生物过程进行定性和定量研究，对生物体生理、病理变化进行实时、动态、无创成像。高时间分辨率、高空间分辨率和高灵敏度对于医学成像仪器至关重要。超快磁共振成像（MRI）、超声成像、低剂量 CT、正电子发射型计算机断层显像（PET）、超光学衍射极限的显微成像仪器都是人们研究的目标。

（2）发展多尺度、多模态、多参数的在体测量技术。凭单一生理指标的变化难以全面判断肿瘤病理生理状态，亟须一种能够同时进行多病理生理参数综合评价的成像仪器。可以同时对多个生理参数成像的多示踪剂 PET 成像仪器和指纹 MRI 技术是发展方向之一，而多色荧光成像仪器可以实现多个结构的同时显像。

（3）发展融入人工智能的新型成像仪器。人工智能自出现以来，经历了 2 次低谷、3 次浪潮，随着算法、算力和大数据的发展，人工智能尤其是机器学习的算法迅速发展，其中深度学习作为机器学习的领域之一，发展更为迅猛。成像仪器必将与人工智能深度结合，出现新一代成像仪器。2020 年，浙江大学光电科学与工程学院和美国国立卫生研究院联合在 *Nature Biotechnology* 在线发表题为“Rapid image deconvolution and multiview fusion for optical microscopy”的研究论文，提出荧光显微镜图像去卷积和多视角图像融合新技术，使荧光显微镜图像后处理效率提高数十甚至上千倍。论文发表 1 个月后，该技术被评为世界显微成像技术十大进展之一。

（4）发展新原理成像仪器，向人们无法触及的领域迈进。2016 年，*Nature* 发表偏振核成像技术，它利用 MRI 技术实现核成像，使得图像既有核医学图像的功能信息，也有 MRI 成像的高分辨特性。

“多尺度时空超分辨医学成像仪器”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家分布情况见表 1.2.5。美国医学成像仪器研究基础雄厚，核心论文占全球一半以上；德国核心论文占全球近 15%；瑞士、法国、意大利和英国平分秋色。中国的国际合作对象主要是美国（见图 1.2.3）。表 1.2.6 表明核心论文产出机构也比较集中，核心论文达到 4 篇的机构中，除瑞士保罗谢勒研究所外，其余均是医

学成像领域的著名大学，包括哈佛大学、麻省理工学院、苏黎世联邦理工学院、加州大学伯克利分校和加州大学戴维斯分校。核心论文产出机构联系方面呈现有趣现象，瑞士的两家研究机构——苏黎世联邦理工学院与瑞士保罗谢勒研究所合作最为紧密（见图 1.2.4）。施引核心论文数量（见表 1.2.7 和 1.2.8），美国占比超过 30%，中国也有不俗表现，超过 14%，德国超过 10%，其他产出国分布基本相当，表明中国在医学成像领域追赶势头明显。

1.2.3　边缘计算

针对现有云计算模型存在的实时性低、安全性差、能耗高等问题，设计出一套以边缘计算与云边协同调度为核心，面向海量边缘侧数据实时处理技术，是边缘计算技术研究亟待解决的关键问题。近年来边缘计算在学术界、工业界得到广泛关注。2016 年 ACM 和 IEEE 联合资助并发起边缘计算国际研讨会 ACM/IEEE Symp on Edge Computing (SEC)。亚马逊于 2017 年发布 Greengrass 平台，支持在边缘侧部署机器学习服务，随后云平台提供商谷歌公司、微软公司、阿里云计算有限公司、百度相继发布各自的边缘计算软硬件平台。开源软件项目 EdgeX、KubeEdge 等积极推进，在开源社区、学术界、工业界产生重要影响。

表 1.2.5　“多尺度时空超分辨医学成像仪器”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	63	52.50%	3478	55.21	2015.6
2	德国	17	14.17%	1192	70.12	2015.5
3	瑞士	11	9.17%	881	80.09	2015.9
4	法国	10	8.33%	443	44.30	2016.0
5	意大利	9	7.50%	402	44.67	2015.8
6	英国	9	7.50%	398	44.22	2015.4
7	荷兰	8	6.67%	615	76.88	2015.4
8	澳大利亚	8	6.67%	314	39.25	2015.4
9	西班牙	7	5.83%	728	104.00	2016.0
10	中国	7	5.83%	467	66.71	2015.3

表 1.2.6　“多尺度时空超分辨医学成像仪器”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	苏黎世联邦理工学院	7	5.83%	633	90.43	2015.7
2	麻省理工学院	7	5.83%	400	57.14	2015.7
3	瑞士保罗谢勒研究所	4	3.33%	237	59.25	2015.5
4	加州大学伯克利分校	4	3.33%	202	50.50	2016.2
5	哈佛大学	4	3.33%	179	44.75	2015.8
6	加州大学戴维斯分校	4	3.33%	175	43.75	2016.0
7	西班牙国家研究委员会	3	2.50%	327	109.00	2017.3
8	加州理工学院	3	2.50%	240	80.00	2015.7
9	得克萨斯大学奥斯汀分校	3	2.50%	228	76.00	2016.0
10	日内瓦大学	3	2.50%	204	68.00	2016.3

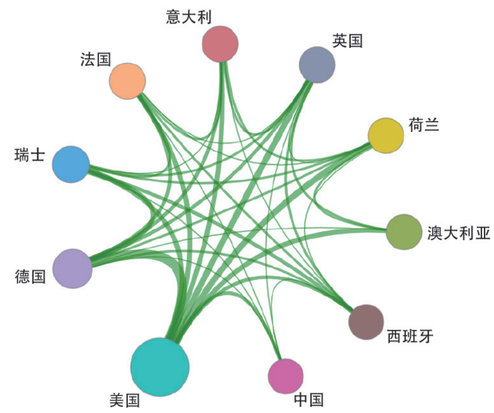

图 1.2.3 “多尺度时空超分辨医学成像仪器”工程研究前沿主要国家间的合作网络

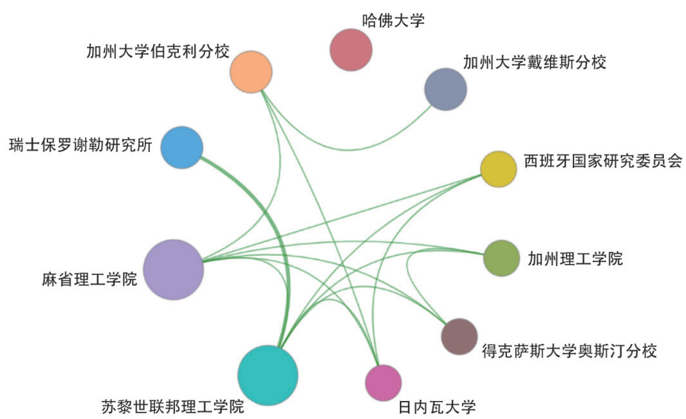

图 1.2.4 “多尺度时空超分辨医学成像仪器”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “多尺度时空超分辨医学成像仪器”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	2229	30.48%	2017.8
2	中国	1060	14.49%	2018.3
3	德国	870	11.89%	2017.9
4	英国	673	9.20%	2017.9
5	法国	524	7.16%	2018.0
6	澳大利亚	343	4.69%	2018.0
7	加拿大	343	4.69%	2018.1
8	意大利	336	4.59%	2017.8
9	瑞士	324	4.43%	2017.9
10	荷兰	320	4.38%	2017.9

表 1.2.8 “多尺度时空超分辨医学成像仪器”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	214	17.48%	2018.2
2	加州理工学院	139	11.36%	2018.0
3	南洋理工大学	130	10.62%	2018.1
4	哈佛大学	121	9.89%	2017.8
5	麻省理工学院	102	8.33%	2018.0
6	斯坦福大学	90	7.35%	2017.7
7	多伦多大学	90	7.35%	2017.7
8	伊利诺伊大学	88	7.19%	2017.8
9	中国科学院大学	87	7.11%	2018.5
10	加州大学伯克利分校	83	6.78%	2017.8

边缘计算技术研究主要围绕以下 4 个方向开展：

（1）边缘计算系统平台。边缘计算环境具有软硬件异构性强、可靠性低、资源受限等特点，现有的云计算软件架构难以满足可靠性、实时性、动态性等应用需求。因此，需要面向不同应用场景针对性地设计边缘计算系统平台，并攻克边缘服务灵活定制、分布式计算资源高效利用、高实时高可靠等关键问题。

（2）云边任务协同调度机制。云计算、边缘计算各有优缺点。云计算算力强、可靠性高，边缘计算实时性、安全性高。云边协同计算可以结合两种计算模式的优点。此外，边缘侧设备异构性强，计算、存储能力等各不相同，因此边缘计算系统需要根据计算任务类型、边缘设备计算能力、网络带宽情况等条件进行云边协同调度，从而提高系统运行效率。在云中心和边缘设备之间实现任务协同调度，实现无缝、高效的计算迁移，是关键研究问题。

（3）边缘智能算法。如何在资源相对受限的边缘设备高效实现人工智能、机器学习算法是一个挑战。因此，重点开展边缘智能算法自适应优化机制研究，在维持算法精度的前提下，有效降低智能算法的计算资源开销，同时按需设计场景相关智能算法。

（4）边缘计算创新应用。边缘计算技术发展离不开重要、关键性应用。以边缘计算系统平台为基础，以云边协同调度、边缘智能算法等为关键技术，结合具体应用场景，实现智能视频监控、自动驾驶汽车、智能工厂、智能建筑结构监测等一系列边缘计算关键应用，通过具体应用场景完善边缘计算系统架构、突破一系列关键技术，并进一步发现潜在的挑战与机遇。

“边缘计算”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家分布情况见表 1.2.9。边缘计算研究在学术界和工业界得到广泛关注，中国核心论文数量占全球近 50%。美国核心论文占全球近 30%，英国、加拿大各占 10% 左右。中国的国际合作对象主要是美国、英国与加拿大，其他国家之间的合作比较均衡（见图 1.2.5）。核心论文产出机构也比较集中（见表 1.2.10 和图 1.2.6），施引论文数量方面（见表 1.2.11），中国占比近 40%。排名前 10 位的施引论文产出机构中，9 家来自中国（见表 1.2.12），表明中国对边缘计算关注度颇高。其中北京邮电大学、西安电子科技大学与华中科技大学均以移动边缘计算作为核心研究方向，同时兼顾边缘计算在具体场景如车联网、智能视频处理中的应用研究。

表 1.2.9 “边缘计算”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	234	47.56%	15 171	64.83	2018.0
2	美国	135	27.44%	10 674	79.07	2017.5
3	英国	60	12.20%	3594	59.90	2017.4
4	加拿大	53	10.77%	3201	60.40	2017.6
5	韩国	31	6.30%	2668	86.06	2017.3
6	意大利	30	6.10%	1211	40.37	2017.0
7	芬兰	28	5.69%	1976	70.57	2017.2
8	澳大利亚	28	5.69%	1905	68.04	2017.5
9	印度	27	5.49%	1250	46.30	2017.5
10	德国	26	5.28%	2356	90.62	2016.3

表 1.2.10 “边缘计算”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	北京邮电大学	28	5.69%	1480	52.86	2017.8
2	西安电子科技大学	23	4.67%	1270	55.22	2018.2
3	华中科技大学	18	3.66%	1070	59.44	2018.2
4	沙特阿拉伯国王大学	18	3.66%	657	36.50	2018.2
5	大连理工大学	17	3.46%	968	56.94	2018.2
6	电子科技大学	16	3.25%	985	61.56	2018.1
7	奥斯陆大学	15	3.05%	1397	93.13	2018.0
8	南京大学	15	3.05%	1285	85.67	2018.2
9	阿尔托大学	14	2.85%	1105	78.93	2017.3
10	广东工业大学	14	2.85%	833	59.50	2018.1

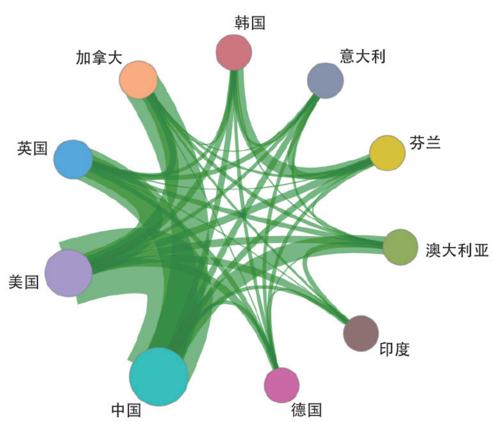

图 1.2.5 “边缘计算”工程研究前沿主要国家间的合作网络

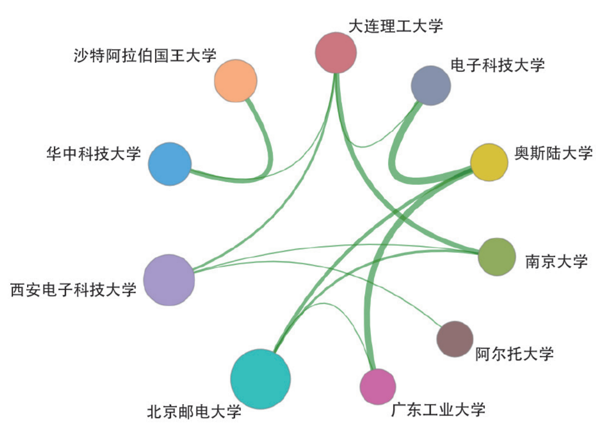

图 1.2.6 “边缘计算”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “边缘计算”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	6559	39.83%	2018.9
2	美国	2738	16.63%	2018.7
3	英国	1201	7.29%	2018.7
4	加拿大	1006	6.11%	2018.7
5	印度	932	5.66%	2018.7
6	韩国	870	5.28%	2018.8
7	意大利	774	4.70%	2018.6
8	澳大利亚	693	4.21%	2018.9
9	西班牙	602	3.66%	2018.6
10	德国	581	3.53%	2018.4

表 1.2.12 “边缘计算”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	北京邮电大学	633	20.77%	2018.7
2	中国科学院	382	12.54%	2018.8
3	西安电子科技大学	287	9.42%	2019.0
4	电子科技大学	264	8.66%	2018.9
5	清华大学	260	8.53%	2018.8
6	华中科技大学	240	7.88%	2018.9
7	沙特阿拉伯国王大学	236	7.75%	2019.1
8	东南大学	203	6.66%	2018.9
9	浙江大学	189	6.20%	2018.8
10	上海交通大学	181	5.94%	2018.7

2　工程开发前沿

2.1　Top 10 工程开发前沿发展态势

信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿见表 2.1.1，涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向。其中，“用于集成电路芯片纳米光刻的 EUV 光源开发”“无线通信与感知一体化技术”“智能机器人集群协作系统设计与实现”“太赫兹核心器件及超高速无线应用”这 4 项来自专家独立推荐，其余 6 项来自德温特专利数据库分析提炼，经专家研判获得。各开发前沿涉及的核心专利 2014—2019 年公开情况见表 2.1.2。

（1）用于集成电路芯片纳米光刻的 EUV 光源开发

半导体集成电路芯片作为高端制造业皇冠上的明珠，深刻影响着现代人类生活的方方面面。按照摩尔定律，集成电路芯片最小节点线宽已达到 1 nm。作为影响节点尺寸的重要因素，光刻光源的波长起到至关重要的作用。目前，主流光刻机采用深紫外光源（DUV），通过多次曝光可达到 7 nm

表 2.1.1　信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	用于集成电路芯片纳米光刻的 EUV 光源开发	121	980	8.10	2014.4
2	无线通信与感知一体化技术	299	1113	3.72	2016.4
3	智能机器人集群协作系统设计与实现	243	1094	4.50	2016.2
4	虚拟现实 / 增强现实近眼显示技术	156	1869	11.98	2017.5
5	用于精密测量与时间计量的光梳技术	156	573	3.67	2016.2
6	大规模天线阵列与射频一体化技术	158	843	5.34	2016.9
7	智能移动机器人自主环境感知与场景认知	70	71	1.01	2017.5
8	全固态车载相控阵激光雷达	47	367	7.81	2018.2
9	太赫兹核心器件及超高速无线应用	145	534	3.68	2016.3
10	基于区块链的分布式网络安全与管理	125	332	2.66	2018.5

表 2.1.2　信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	前沿名称	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	用于集成电路芯片纳米光刻的 EUV 光源开发	24	20	21	10	4	9
2	无线通信与感知一体化技术	24	28	46	51	59	58
3	智能机器人集群协作系统设计与实现	4	9	8	26	46	66
4	虚拟现实 / 增强现实近眼显示技术	7	9	22	25	38	52
5	用于精密测量与时间计量的光梳技术	13	20	19	21	22	36
6	大规模天线阵列与射频一体化技术	18	15	24	21	36	38
7	智能移动机器人自主环境感知与场景认知	1	7	8	9	32	13
8	全固态车载相控阵激光雷达	1	2	2	5	9	28
9	太赫兹核心器件及超高速无线应用	16	15	17	18	39	23
10	基于区块链的分布式网络安全与管理	0	0	1	12	33	79

节点线宽。最新一代极紫外（EUV）光刻机可以通过单次曝光方式实现 7 nm 光刻，通过工艺改进甚至可实现 1 nm 的节点线宽。因此，EUV 光刻机在节点线宽、效率以及成品率方面都远胜于 DUV 光刻机，这也使得 EUV 光源的研制成为新一代大规模产业应用光刻机的关键。

EUV 是波长为 10~121 nm 的极端紫外线辐射。目前，获得 EUV 光源主要有激光等离子体（LPP）和放电等离子体（DPP）两种途径。LPP 主要通过 Nd:YAG 激光器产生预脉冲轰击液滴状锡（Sn）靶，形成亚微米级薄雾，再由万瓦级 CO_2 激光器输出的主脉冲激光轰击亚微米级 Sn 滴，形成高温、高密度的等离子体，产生 EUV 辐射。相较于 DPP，该途径不会损坏电极，所产生的光学碎屑量相对较少。这使得 LPP 成为目前 EUV 光源产生的主流方案。

集成电路芯片加工精度对于 EUV 光源性能的要求越来越高。对于 3 nm 集成电路芯片纳米光刻的技术节点，EUV 光源的功率需要提高到千瓦级别。此外，金属 Gd 靶材的应用以及对自由电子激光的研究有望获得更短波长、更高功率的 EUV 光源输出，从而突破纳米光刻的更小节点。

（2）无线通信与感知一体化技术

无线通信与感知一体化技术是通过共用无线通信系统基础设施和时－频－空资源，对通信和感知领域先进技术在硬件架构和算法层面高度融合，利用高速率、低时延无线通信系统的信息交互能力，实现通信与感知的协同，打破传统各自为营格局，实现通信和感知的联合设计，达成无线通信与感知一体化系统超高速率、超低时延、超强可靠性等通信需求，并延伸其厘米级精度定位和超高细粒度感知的能力。无线通信与感知一体化技术已成为通信系统演进、产业技术变革及智慧社会升级的新动能。

无线通信与感知一体化技术领域的研发尚处于起步阶段。主流方向侧重于把握无线通信系统大规模天线阵列、超密集组网、新型多址接入、全频谱等技术带来的新机遇，建立通信与感知的协作与共生，以最大化频谱效率降低硬件成本。立足基础和现状，未来无线通信与感知一体化技术的主要研究方向为：构建通信定位感知成像一体化的多层次、多功能、智能化网络；建立高动态移动性场景下通信与感知的交互耦合、协作互助机制；研究适用于高维度、大规模、超异构的信息融合和资源协同技术。

（3）智能机器人集群协作系统设计与实现

智能机器人集群协作系统是由大量具有一定自主能力的机器人围绕共同目标协同完成作业任务的复杂系统，常见于机器人集群协同生产制造、码头与仓储物流、无人系统集群协同区域搜索等应用场景。通常从机器人集群的体系架构、作业环境和任务使命 3 个方面区分不同类型的系统。机器人可以异构或同构甚至跨域组合，例如无人机和无人车的空地协同可实现高效的目标搜索。根据任务和环境要素的差异，智能机器人集群协作系统的体系架构、协作关系、网络拓扑、控制方式等可能存在显著差异。例如，车间作业环境便于布设通信网络，从而支撑调度中心与机器人以及机器人之间的信息互联互通；野外环境作业机器人之间则主要通过自组移动无线网络实现信息交互与共享。智能机器人集群协作系统主要技术方向包括：集群体系架构设计、通信与组网技术、感知与导航定位技术、任务规划与决策技术、机器人协同运动与操作控制技术等。一方面，随着集群规模和作业空间的扩大，感知、规划、决策、控制等方面都呈现分布化的发展趋势；另一方面，为满足多样化的复杂任务要求，具备较高的环境适应性，机器人的集群协同作业仍将保持智能化和自主化的发展趋势，在执行各种复杂任务时将具有更高的自组织协作能力和更高的作业效率。

（4）虚拟现实 / 增强现实近眼显示技术

虚拟现实 / 增强现实（VR/AR）近眼显示设备被认为是未来个人移动设备的显示终端。近眼显示根据人眼是否可光学透视显示设备，被分为 VR（不可透视）和 AR（可透视）两种。近眼显示设备通常包含微显示芯片、成像光学系统、头部跟踪设备等。微显示芯片主要涉及硅基液晶（LCOS）、数字光处理器（DLP）、有机发光显示（OLED）以及微发光二极管（Micro-LED）等技术。成像光学系统包含微投影光机、光学波导、自由曲面元件等光学技术。头部跟踪涉及同步定位与地图构建（Slam）技术。

近眼显示主要朝着轻巧、高分辨、高亮度、大视场角方向发展，涉及的关键技术包括：在显示芯片方面，发展高分辨、高亮度的 LCOS、Micro-LED、OLED、激光扫描等显示技术；在光学成像方面，波导技术是目前接近普通眼镜形式的主要技术手段，主要发展浮雕光栅波导、全息波导以及液晶聚合物光栅波导等技术，实现高均匀性、高效率的图像传输；研究折叠式光学系统、视场拼接光学技术、自由曲面成像技术、全息元件成像技术，实现超薄、大视场的近眼显示；探索光场近眼显示技术、变焦透镜技术，以及近眼全息显示技术等，实现多焦面或连续焦面的近眼显示，解决近眼显示立体视觉中人眼辐辏聚焦冲突造成的晕眩问题。

（5）用于精密测量与时间计量的光梳技术

光学频率梳（简称光梳）产生一系列均匀间隔且具有相干稳定相位关系的梳齿光谱，其中心频率在光学波段，梳齿间隔在微波波段，是光和微波间的重要桥梁，可实现极其精准的时频基准，大幅提升精密测量与时间计量精度。

基于光梳技术的光频原子钟（简称光钟）对频率 / 时间测量的不确定度已达 10^{-18} 量级，由此，时间成为测量精度最高的物理量。光梳技术还在引力波探测、基本物理常量测试、阿秒超快科学等基础研究领域和超宽带通信、低噪声微波光子源、超精确谱分析等应用研究领域有重要应用前景。

目前，高稳定（自锁定）光梳技术主要包括基于飞秒锁模技术的激光频率梳、基于电光调制技术的电光频率梳和基于微型谐振腔的新型光梳等。其中激光频率梳已商业化，但构造复杂、成本昂贵，限制了其大规模应用。电光频率梳噪声抑制技术尚不成熟，离工程应用还有相当距离。新型光梳中，基于片上微环和光纤微法珀结构等高 Q 值光学微腔的克尔光梳技术能够在实现自参考锁定的同时保持非常低的噪声，且尺度紧凑、结构简单，可在超低功耗下工作，与 CMOS/ 全光纤接入等工艺兼容，有望实现芯片级大规模生产和系统级大规模应用。目前，美国 DARPA 和欧盟 Horizon 2020 计划都正在大力发展这种微腔光梳技术，希望占领这个精确测量和时间计量技术的制高点，引领导航定位、精密计量、高速通信和智能感知等领域的跨代发展。

（6）大规模天线阵列与射频一体化技术

在 5G 基站中，由于大规模天线阵列技术的应用，天线从无源变为有源，与射频单元合并为一体化有源天线。一体化天线具备较好的可靠性和稳定性，与普通天线相比，在减小馈缆接头损坏、美化天线外观、安装维护便捷性等方面具有一定优势；在 5G 终端侧，由于通信协议越来越复杂，需要的多输入多输出天线阶数随之增加，而终端设备始终朝着小型化、轻薄化、集成化方向发展，因此，天线和射频的集成度越来越高。

在大规模天线与射频一体化演进过程中，有以下技术趋势：①实际应用场景中，天线设计尺寸被压缩，而天线数目及其工作频段增多，需要紧凑的大规模天线阵列的共口径和去耦合设计。②天线与无源馈电网络和器件以及有源放大器整合，出现无（电）缆天线振子、天线滤波单元、塑料振子、有源天线等一系列新形态多天线系统，以提高集成度，减小馈电损耗。③在毫米波频段，出现了封装和芯片天线，在高频率下天线（阵）体积明显缩小至封装乃至芯片级，出现大量基于硅基、碳基的新型天线阵列，通过先进的集成电路工艺和封装技术，实现与有源射频芯片乃至基带芯片的集成化封装，促使天线逐渐变成片上器件。④随着频率提高，设备射频前端和天线阵子高度集成，由于待测件可能不存在测试射频接口，以往能够通过传导法测试的项目（如发射机和接收机），现在需要通过空口进行，此外，在研发和封测环节，需要对芯片级或 PCB 级天线作空口测试。大规模天线阵列单元数目成百上千，传统射频性能和辐射性能测试效率亟须提高，以便快速得到多个端口的无源、有源参数。由于基站侧出现有源天线，其性能量测方式也值得关注。

（7）智能移动机器人自主环境感知与场景认知

智能移动机器人根据自身搭载的多传感器系统对所处动态环境进行多模态信息获取，并提取环境中有效特征信息加以处理和理解，最终通过建立所在环境的模型来认知所在场景的信息，保证移动机器人在长期运行中具有良好的环境自适应能力，进而更好地完成自主定位、环境探索与自主导航等基本任务。智能移动机器人在军事、工业、农业、商业、交通、物流等领域有着广泛的应用前景，如在抗击新冠疫情工作中，为减少人与人的接触，在医疗、配送、巡检等领域，拥有自主移动技术的服务机器人贡献巨大。

智能移动机器人自主环境感知与场景认知技术

的未来研究方向主要包括：①深度融合多元感知数据，构建覆盖所有空间和时间的检测系统，提高感知系统的能力，为智能移动机器人提供更可靠的决策依据。②利用迁移学习将从有限数据集训练获得的知识迁移到开放环境的不同场景和不同任务中，有效增强移动机器人的长期自主环境适应能力。③对物体与物体间、物体与场景间的关联进行挖掘与分析，使机器人获得场景类别层面的认知，进而针对性地选取与场景认知结果对应的模型与参数，用于重定位与场景理解等任务。④能够自动从海量的多源异构数据中抽取知识构建关系，理解高层语义信息，并与应用场景有效结合，实现移动机器人从感知智能到认知智能的跨越。

（8）全固态车载相控阵激光雷达

激光雷达是指利用发射和接收激光光束完成障碍物探测和测距的系统，由于具有长程和高精度探测的特点，是实现三维感知的一种重要技术方式。激光雷达主要面向汽车无人自动驾驶、机器人、地理测绘以及大气探测等领域，其中，汽车无人自动驾驶领域是激光雷达面向的一个关键市场。激光雷达作为自动驾驶系统感知端中最重要的传感器，主要包含两个核心作用：①通过激光光束扫描得到汽车周围环境的三维模型，运用相关算法准确探测周围的车辆和行人；②将实时全局地图与高精度地图比对，实现导航及提升车辆定位精度。

激光雷达的图像映射方法主要包括机械旋转扫描和固态扫描两种方式。目前市场上大部分激光雷达系统均采用旋转机械装置实现光束扫描，代表产品有 Velodyne 的 HDL-64E 和 HDL-32E，知名无人驾驶汽车制造商（如 Google、百度、沃尔沃等）均采用其激光雷达产品。整个扫描装置按照一定速率旋转，在旋转过程中不断发射和探测激光脉冲。机械旋转扫描机制由于固有的局限性，限制了光束扫描速率，降低了实用性并且增加了系统的复杂程度和成本。近年来，人们开始重点关注另外一种激光雷达技术，即全固态光束扫描系统。其内部没有宏观运动部件，因此具有较好的耐久性和可靠性，顺应了自动驾驶对激光雷达固态化、小型化和低成本的要求。

作为实现全固态光束扫描的一种主要方案，光学相控阵列（OPA）由若干发射接收单元组成阵列，通过外部电学控制，可以独立控制不同单元发射光波的特性（如光强、相位）。基于相干光的干涉效应，通过调谐阵列中不同单元的相位和振幅分布，可以在指定方向上实现多光束干涉增强，而在其他方向干涉相消，进而实现光束扫描。OPA 实现方式和材料平台有多种。早期基于 AlGaAs 波导阵列的方案无法实现较大的拉格朗日不变量，从而扫描角度过小。而基于液晶技术的相控阵在大角度下偏转效率较低，且响应时间一般在毫秒量级，无法满足如无人自动驾驶等特定应用场景的要求。由于与 CMOS 工艺的兼容特性，硅基光子集成技术为芯片尺度的固态激光雷达系统提供了一个低成本技术方案。近年来，作为固态激光雷达系统的核心组件，硅基集成 OPA 由于具备固态光束扫描能力而被广泛研究。硅基集成 OPA 具有扫描速度快（兆赫兹量级）、指向精度高（0.1 度量级）、可控性好（除对目标区域高密度扫描外，在其他区域也能稀疏扫描）等优点。对比目前硅基集成 OPA 发展现状和实际应用需求，仍然存在很多关键的技术难题有待突破，未来发展方向主要表现为以下几个方面：①在光源方面，将激光光源的产生、调制以及放大等过程与光学相控阵列封装集成到单个芯片中；②在光操控方面，解决高密度波导阵列中相邻天线间的串扰问题，突破高调制效率、低插损、低振幅啁啾、高速的片上相位调制技术，在水平和竖直两个方向上满足要求的视场范围以及角度分辨率；③在探测方面，需解决背景杂散光的干扰、目标反射光的定向性以及片上微弱光信号探测等一系列问题。

（9）太赫兹核心器件及超高速无线应用

太赫兹核心器件及超高速无线应用包括两个内涵：太赫兹频段核心功能器件以及太赫兹高速通信。

太赫兹频段核心功能器件主要包括太赫兹频段的混频器、放大器、倍频器、调制器、天线导波结构及信道化组件等。太赫兹高速通信是以太赫兹信号作为载波的通信、数据传输和组网互联等，其主要应用方向为空间高速通信、航空海量数据传输以及后 5G 或 6G 时期的回传链路。随着人类社会信息化程度加剧，数据显示家庭平均接入宽带速率已达 30 Mb/s，移动 4G 终端的普及使得个人移动网络平均接入速率已达 100 Mb/s，因此未来巨量数据的传输和无缝的空、天、地覆盖都将成为技术驱动力。当前，太赫兹通信技术虽已初步具备应用的技术条件，但是系统成本较高，需攻关并突破低成本、量产化和集成化的太赫兹通信系统技术。因此，太赫兹通信集成化和单片化系统技术、太赫兹高功率高效率核心部组件技术、太赫兹智能波束技术、太赫兹频段高鲁棒性自适应捕获跟踪技术等都是未来亟待突破的技术。伴随上述技术的突破，太赫兹通信技术的商用普及时代越来越近。综上，太赫兹通信技术的发展趋势可以概括为：更高频段、更高速率、更小体积、更低功耗、更低成本、空天地无缝互联。

（10）基于区块链的分布式网络安全与管理

基于区块链的分布式网络安全与管理是在对等网络中，利用区块链技术将地域分散、地位平等且规则明确的大量网络节点，构建一套可信、透明、自治的网络运行及数据信息安全防护体系，实现网络安全与管理理念从单点到体系的跃升。该体系下，节点不再是孤点，而是规则下的自主协同单元；每个节点既有自我防护能力，同时也输入和输出安全服务；任何一个节点自身的不安全状态，不会传播到其他节点，有效阻断内外威胁。主要技术方向包括体系化协同防护、可信身份验证、访问控制与权限管理、数据确权与安全、隐私保护等，融合区块链技术在网络架构、共识规则、智能合约、数据管理等方面的优势，解决网络安全与管理面临的难题。其发展趋势有两大方向，一是面向用户提供应用服务，解决垂直应用领域的安全问题，例如针对物联网应用场景，提供身份管理、时间戳服务、数据防护、单点容错等解决方案；二是面向硬件设施提供基础协议或算法，提升底层安全防护能力。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 用于集成电路芯片纳米光刻的 EUV 光源开发

EUV 光源作为光刻机的核心组成部分，其更短的波长可以有效减小集成电路芯片的节点线宽。目前，商用 EUV 光刻机主要采用 LPP 光源。EUV-LPP 主要由主脉冲激光器、预脉冲激器、光束传输系统、Sn 液滴靶、Sn 回收器、收集镜、靶室等构成。主脉冲激光器通常采用结合多级放大器的高功率 CO_2 激光器。激光器产生的主脉冲和预脉冲经光束传输系统后聚焦于收集镜的焦点，Sn 液滴靶产生的 20~30 μm 直径的液滴先后被预脉冲与主脉冲汇聚轰击，转化为高温 Sn 等离子体，辐射出 13.5 nm 的 EUV 光，经收集镜于中间焦点。

EUV 光源技术攻关的主要方向是寻找更短波长的靶材，更有效消除碎屑，获得更高的转换效率。值得关注的是，在寻找更短波长靶材的过程中，发现稀土元素 Gd 在 6.7 nm 处产生强的窄带共振辐射与元素 Sn 在 13.5 nm 处类似，很有可能成为未来 6.7 nm 光源理想的燃料靶材，可大幅提高光刻精度。另一方面，碎屑问题作为大规模工业化生产过程不可忽视的问题之一，仍然是限制 EUV 光源转换效率的主要因素。当前去除碎屑的主要方法有两种：一是采用双脉冲激光辐射，二是充入惰性气体或氢气与外加磁场相结合。此外，达到工业量产所需的光源功率和长时间稳定工作的要求，也是需要深入研究的问题。

用于集成电路芯片纳米光刻的 EUV 光源开发方向核心专利主要产出国家、主要产出机构、主要国家间合作网络分别见表 2.2.1、表 2.2.2 和图 2.2.1。

表 2.2.1 “用于集成电路芯片纳米光刻的 EUV 激光光源开发”核心专利主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	日本	40	33.06%	219	22.35%	5.48
2	美国	26	21.49%	663	67.65%	25.50
3	中国	23	19.01%	23	2.35%	1.00
4	德国	16	13.22%	70	7.14%	4.38
5	荷兰	14	11.57%	20	2.04%	1.43
6	韩国	1	0.83%	1	0.10%	1.00

表 2.2.2 “用于集成电路芯片纳米光刻的 EUV 激光光源开发”核心专利主要产出机构序号

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	阿斯麦公司	荷兰	36	29.75%	668	68.16%	18.56
2	株式会社小松制作所	日本	14	11.57%	180	18.37%	12.86
3	卡尔．蔡司半导体仪器公司	德国	13	10.74%	54	5.51%	4.15
4	优志旺电机株式会社	日本	8	6.61%	9	0.92%	1.13
5	哈尔滨工业大学	中国	7	5.79%	1	0.10%	0.14
6	中芯国际集成电路制造（上海）有限公司	中国	6	4.96%	12	1.22%	2.00
7	IHI 株式会社	日本	4	3.31%	12	1.22%	3.00
8	中国科学院光电研究所	中国	4	3.31%	5	0.51%	1.25
9	关西大学	日本	4	3.31%	1	0.10%	0.25
10	中国科学院上海光学精密机械研究所	中国	3	2.48%	3	0.31%	1.00

核心专利公开量和被引数排前 3 位的是日本、美国、中国，其中美国在被引数方面占据领先地位。国家间合作网络集中在美国、日本和德国。核心专利主要产出机构排名前 3 位的是阿斯麦公司、株式会社小松制作所和卡尔．蔡司半导体仪器公司。主要机构间无合作关系。

中国对 EUV 光刻技术的研究起步较晚，主要由中国科学院和部分高校的一些团队在进行相关研究工作。中国已有的技术积累和产业基础尚不成熟。我们需要积极借鉴和学习国外先进技术，集中优秀人才，组织相关团队，踏踏实实地在 EUV 光刻技术领域创新与发展。

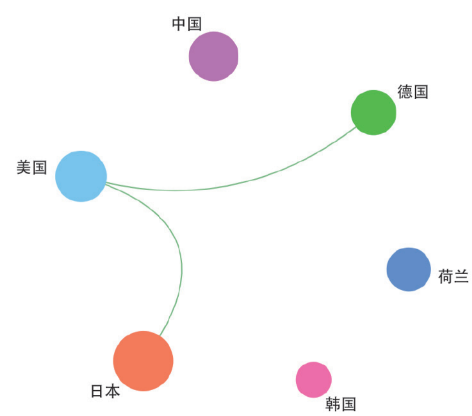

图 2.2.1 “用于集成电路芯片纳米光刻的 EUV 激光光源开发”主要国家间合作网络

2.2.2 无线通信与感知一体化技术

无线通信系统从 1G 到 5G 不断演进，不仅带来了通信能力质的飞跃，其感知精度也逐步增强，无线通信与感知正在不断交叉、相互促进。随着大规模天线阵列、超密集组网、新型多址接入、全频

谱等技术进一步发展，以及可重构智能超表面和人工智能等技术的使能，无线通信与感知一体化已成为无线通信和感知领域发展的引领方向。

无线通信与感知一体化技术是通过共用无线通信系统基础设施和时–频–空资源，以降低硬件成本，对通信和感知领域先进技术在硬件架构和算法层面高度融合，利用高速率、低时延无线通信系统的信息交互能力，实现通信与感知的协同，打破传统各自为营格局，实现通信和感知的联合设计，达成无线通信与感知一体化系统超高速率、超低时延、超强可靠性等通信需求，延伸其厘米级精度定位和超高细粒度感知的能力。

目前，无线通信与感知一体化技术的应用在车联网、智能交通和工业网络系统等领域不断涌现，未来无线通信与感知一体化技术将进一步成为通信系统演进、产业技术变革、智慧社会升级的新动能。无线通信与感知一体化技术将围绕构建多层次、多功能、智能化的通信定位感知成像一体化网络展开，揭示传输、感知、乃至控制之间相互制约和相辅相成的耦合关系，同步提升系统在通信和感知方面的整体性能，建立高动态移动性场景下通信与感知的交互耦合、协作互助机制，研究适用于高维度、大规模、超异构的信息融合和资源协同技术。

无线通信与感知一体化技术工程开发前沿中核心专利主要产出国家排名前 3 位的是中国、韩国和美国（见表 2.2.3）。核心专利主要产出机构排名前 3 位的是韩国的 LG 电子公司、美国的高通公司和韩国的三星电子公司（见表 2.2.4）。LG 电子公司的主要研究对象为移动终端与可穿戴智能设备、智能机器人、无线 IP 电视等方面；高通公司的研究集中于通过利用感知技术来对无线通信系统进行改善提升，包括对信道特征、信号特性等进行感知；三星电子公司的研究方向则较为宽泛，涉及了无线通信与感知一体化技术在智能交通、智能家居与设备监测中的应用。主要机构间无合作关系。

2.2.3 智能机器人集群协作系统设计与实现

智能机器人集群协作系统的设计与开发涉及复杂的技术体系，以机器人单体技术为基础，以多系统、多层次、多学科综合集成为核心，依靠网络体系构建实现互联互通，依靠人工智能技术实现任务赋能，涉及机电系统、通信网络、运筹调度、人工智能、控制论等多学科知识的综合运用。常见于机器人集群协同生产制造、码头与仓储物流、无人系统集群协同搜索救援等应用场景，在我国智能制造与人工智能发展战略中具有非常重要的地位，是自主智能系统、群智能等人工智能前沿技术的重要载体。随着人工智能技术快速发展和通信网络技术不

表 2.2.3 “无线通信与感知一体化技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	182	60.87%	332	29.83%	1.82
2	韩国	56	18.73%	159	14.29%	2.84
3	美国	27	9.03%	480	43.13%	17.78
4	日本	17	5.69%	28	2.52%	1.65
5	瑞典	3	1.00%	7	0.63%	2.33
6	芬兰	2	0.67%	62	5.57%	31.00
7	马来西亚	1	0.33%	4	0.36%	4.00
8	爱尔兰	1	0.33%	1	0.09%	1.00
9	德国	1	0.33%	0	0.00%	0.00
10	英国	1	0.33%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4 “无线通信与感知一体化技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	LG 电子公司	韩国	13	4.35%	31	2.79%	2.38
2	高通公司	美国	11	3.68%	347	31.18%	31.55
3	三星电子公司	韩国	5	1.67%	139	12.49%	27.8
4	北京邮电大学	中国	3	1.00%	28	2.52%	9.33
5	国家电网公司	中国	3	1.00%	25	2.25%	8.33
6	爱立信公司	瑞典	3	1.00%	7	0.63%	2.33
7	电子科技大学	中国	3	1.00%	5	0.45%	1.67
8	丰田信息技术中心	日本	3	1.00%	4	0.36%	1.33
9	索尼公司	日本	3	1.00%	0	0.00%	0.00
10	电信科学技术研究院	中国	2	0.67%	24	2.16%	12.00

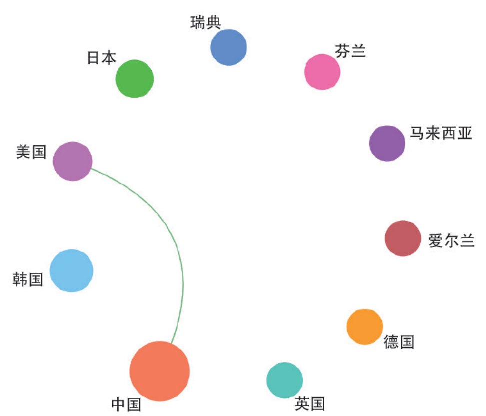

图 2.2.2 “无线通信与感知一体化技术”工程开发前沿的主要国家间合作网络

断进步，未来机器人自主能力和智能水平不断提升，机器人集群规模增长，成本也会不断降低，高效的作业方式必将促进智能机器人集群协作系统的广泛应用，人类的生产生活方式都将发生重大变革。

智能机器人集群协作系统主要用于执行空间分布范围较大、作业环节和数量繁多的复杂任务，多见于生产制造、物流转运等领域，例如加工机器人和搬运机器人等异构机器人可构成机器人集群协同生产制造系统，显著提升生产效率和生产制造的自动化、智能化程度，而京东、菜鸟、亚马逊等电商企业已建立以搬运机器人为基本作业单元的智能仓储系统，显著提升了物流系统的运行效率。其他典型应用还包括无人机、无人车、无人艇等各种同构或异构无人系统集群协同执行区域搜索、目标探测等复杂任务。美国、俄罗斯、英国、法国等国家都制定了长期发展规划，深入开发各种机器人集群系统。随着集群规模和作业空间扩大以及应用范围不断拓展，机器人集群协同作业系统在体系架构、感知、规划、决策、控制等方面都呈现分布化、智能化、自主化的发展趋势。

本方向核心专利主要产出国家、主要产出机构及主要国家间合作网络分别见表 2.2.5、表 2.2.6 和图 2.2.3。核心专利公开量和被引数排名前 3 位的是中国、美国、日本，其中中国在专利公开量和被引数方面均占据绝对领先地位。核心专利主要产出机构排名前 3 位的是波音公司、杭州电子科技大学和西安电子科技大学，美国与沙特有少量合作，主要机构间无合作关系。中国的相关科研机构以高等院校为主，侧重多机器人协同路径规划、分布式运动控制等基础方法和技术，而美国、日本的科研机构主要是大型国际公司，其研究以特定工业领域的多机器人协作技术应用为主，例如美国波音公司的技术发明涉及多机器人协作进行工件表面操作、复杂作业环境下人机协作进行机身部件安装等实际作业任务，日本东芝公司的技术发明采用位移测量和外力估计等手段实现多机器人协同搬运货物的操作。

表 2.2.5 “智能机器人集群协作系统设计与实现”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	85	75.89%	122	47.47%	1.44
2	美国	7	6.25%	27	10.51%	3.86
3	日本	6	5.36%	66	25.68%	11.00
4	韩国	3	2.68%	20	7.78%	6.67
5	沙特阿拉伯	3	2.68%	9	3.50%	3.00
6	德国	3	2.68%	0	0.00%	0.00
7	加拿大	1	0.89%	15	5.84%	15.00
8	意大利	1	0.89%	1	0.39%	1.00
9	法国	1	0.89%	0	0.00%	0.00
10	印度	1	0.89%	0	0.00%	0.00

表 2.2.6 “智能机器人集群协作系统设计与实现”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例
1	波音公司	美国	4	3.57%	3	1.17%
2	杭州电子科技大学	中国	3	2.68%	5	1.95%
3	西安电子科技大学	中国	3	2.68%	2	0.78%
4	顺德职业技术学院	中国	3	2.68%	1	0.39%
5	东芝公司	日本	2	1.79%	40	15.56%
6	北京航空航天大学	中国	2	1.79%	24	9.34%
7	沙特阿拉伯国家石油公司	沙特阿拉伯	2	1.79%	6	2.33%
8	东南大学	中国	2	1.79%	6	2.33%
9	上海大学	中国	2	1.79%	4	1.56%
10	杭州新松机器人自动化股份有限公司	中国	2	1.79%	3	1.17%

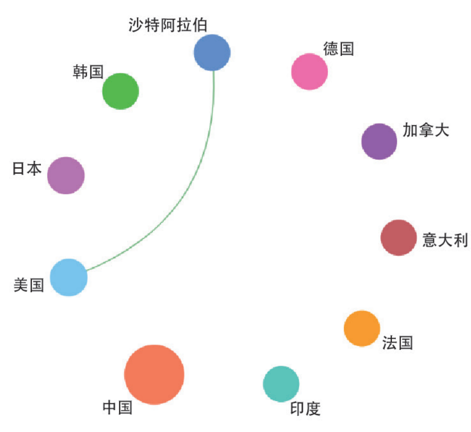

图 2.2.3 “智能机器人集群协作系统设计与实现”工程开发前沿的主要国家间合作网络

领域课题组人员

领域课题组专家

领域课题组组长：卢锡城 潘云鹤

院士专家（按姓氏拼音顺序）：

第一组：姜会林 李天初 刘泽金 吕跃广 谭久彬 张广军

第二组：陈志杰 丁文华 段宝岩 吴曼青 余少华

第三组：柴天佑 陈 杰 费爱国 卢锡城 潘云鹤 赵沁平

其他专家（按姓氏拼音排序）：

蔡一茂 Yuen Chau 陈关荣 陈晓明 程 鹏 董 为 付 俊 顾险峰 韩亚洪 郝 翔 贺诗波 胡慧珠 江 天 李 莉 刘 安 刘华锋 刘 伟 陆振刚 潘 纲 浦 剑 石宣化 田晓华 王从思 王 戟 王 璞 伍 军 谢国琪 辛 斌 徐 鹏 徐 杨 徐志伟 杨 博 易 伟 张 帆 张 晗 张建华 张军平 张拳石 张勇刚 郑能干 钟财军 周 明 卓 成 訾 斌

工作组成员名单

学术指导：吴朝晖 王成红

图情专家：

杨未强 梁江海 李 红 霍凝坤 吴 集 杨 筱 徐海洋 刑中阳 史 尘 赵惠芳 王凯飞 刘书雷 陈振英 耿国桐

联 络 员：黄海涛 王 兵 王甜甜 张纯洁

秘 书：翟自洋 杨未强 谌群芳

执笔组成员名单（按姓氏拼音排序）：

研究前沿：

董 玮 韩亚洪 刘辰光 刘华锋 刘 俭 吕伟超 施路平 王海明 王 戟 蔚保国 伍蔡伦 徐 敬 詹乃军 张志勇

开发前沿：

冯明涛 侯玉斌 胡慧珠 胡伟东 姜校顺 金 石 李海峰 廉 蔺 刘 英 吕海斌 彭志刚 王 璞 王耀南 辛 斌 赵鲁豫

三、化工、冶金与材料工程

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判得到的 Top 10 工程研究前沿的核心论文情况见表 1.1.1 和表 1.1.2。其中，基于数据挖掘并经专家研判得出 5 个研究前沿，包括“用于肿瘤诊疗的智能纳米药物”“用于骨修复的高性能新型多孔生物材料制备”“基于二维材料的下一代先进电子元器件研究”“高效稳健合成太阳燃料”和“高能量密度有机系钾离子电池”。其他 5 个研究前沿则基于专家提名，经数据与专家交互获得。与能源相关的研究一直是化工 / 材料领域的研究前沿，尤其是绿色的太阳燃料，比如“高效稳健合成太阳燃料”总体来说呈现核心论文增加的趋势。“可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备”研究和技术开发均备受关注。

（1）用于肿瘤诊疗的智能纳米药物

癌症是人类致死率最高的疾病之一，是威胁人类健康的头号杀手。癌症的传统临床治疗方法包括化疗、放疗、免疫治疗和基因治疗等。为了提高临床治疗的效果，减少不良副作用，基于纳米技术的纳米药物作为新型诊疗方案，以实现更加精确的癌症诊断和治疗。智能纳米药物是利用药物分子与蛋白质、脂质、聚合物、有机 / 无机纳米材料等不同生物相容性材料结合，构建多功能纳米颗粒，具有对外源性刺激（光、温度、超声和磁场等）和肿瘤微环境刺激（pH、还原物质、酶、活性氧和三磷酸腺苷等）的响应能力，提高纳米药物的特异性、可控性和智能化，实现癌症的精准诊疗。目前，相关的前沿研究包括以下几个方面：构建纳米药物的新型生物相容性纳米材料及其组装；癌症治疗的特异性智能纳米药物及可控释放；肿瘤成像及癌症诊断的特异性纳米探针；肿瘤诊疗一体化的纳米医学

表 1.1.1 化工、冶金与材料工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	用于肿瘤诊疗的智能纳米药物	190	27 890	146.79	2015.7
2	可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备	177	27 040	152.77	2016.0
3	强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备	139	5431	39.07	2015.8
4	用于骨修复的高性能新型多孔生物材料制备	161	13 121	81.50	2015.8
5	基于二维材料的下一代先进电子元器件研究	86	15 572	181.07	2015.9
6	高效稳健合成太阳燃料	77	6893	89.52	2017.6
7	高能量密度有机系钾离子电池	52	8710	167.50	2017.0
8	高超声速导弹天线罩陶瓷材料	94	4140	44.04	2015.7
9	人工结构量子材料与器件	167	12 065	72.25	2015.5
10	大线能量焊剂基础研究	115	2954	25.69	2015.6

表 1.1.2　化工、冶金与材料工程领域 Top10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	用于肿瘤诊疗的智能纳米药物	37	51	51	29	20	2
2	可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备	31	48	31	28	31	8
3	强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备	34	33	29	24	13	6
4	用于骨修复的高性能新型多孔生物材料制备	32	43	30	34	20	2
5	基于二维材料的下一代先进电子元器件研究	21	15	21	15	10	4
6	高效稳健合成太阳燃料	0	4	7	21	26	19
7	高能量密度有机系钾离子电池	1	5	5	24	16	1
8	高超声速导弹天线罩陶瓷材料	21	23	22	20	6	2
9	人工结构量子材料与器件	44	50	33	23	15	2
10	大线能量焊剂基础研究	23	35	30	21	6	0

新策略；智能纳米药物的体内代谢和毒理研究。

（2）可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备

可快速充电电池 – 电容器储能体系以锂离子电容器为代表，是一种介于锂离子电池和超级电容器之间的储能装置，兼具锂离子电池的高能量密度和超级电容器的高功率密度、长循环寿命等优点，是一种新型储能器件。锂离子电容器电极材料的种类、结构、正负极的匹配以及电位窗口的选择均会影响其能量密度、功率密度及循环寿命。目前，其正极材料多为具有双电层储能特点的活性碳材料，负极材料多为具有锂离子脱嵌功能的碳材料，但碳材料容量和电位限制了锂离子电容器的能量密度。虽然过渡金属氧化物、材料预锂化及有机电解液的使用可使锂离子电容器的能量密度接近锂离子电池，但相比于超级电容器，锂离子电容器的循环寿命、功率密度还需进一步提升。因此，设计新型高能量密度电极材料，调控电极材料表 / 界面结构，优化正负极材料匹配工艺，器件微型、柔性、透明化将是未来锂离子电容器的重要研究方向。

（3）强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备

提升金属材料的使役性能和开发材料的新型功能是冶金材料领域持续发展的重大需求，也是此领域始终面临的难题。强磁场（2 T 以上，通常永磁体和普通电磁铁难以达到的磁感应强度）具有多种力、热和能的特殊效应，各种效应的高效协同对金属功能材料的设计和开发展现出巨大潜力，为冶金与材料制备技术的创新提供了新途径。该前沿研究领域包括以下主要方向：强磁场环境下材料制备和性能检测实验装备研究；强磁场下高温金属熔体的物性测量；强磁场下的合金凝固理论研究；强磁场冶金技术的开发；新型金属功能材料的设计。阐明强磁场各种效应对冶金和材料过程的协同作用效果和相互竞争机制是该研究领域亟待解决的重要科学问题。

（4）用于骨修复的高性能新型多孔生物材料制备

随着我国社会快速发展以及人口老龄化日趋严重，各种原因引起的骨创伤病例快速增加，大段骨、老年骨愈合是临床面临的挑战，研究新型骨修复材料意义重大。骨修复生物材料要求具有三维多孔结构，以利于血管长入从而利于骨再生。3D 打印技术制备的多孔支架材料不仅可以构建与缺损骨组织相匹配的复杂外形，还可以精确调控内部孔隙结构

以及仿生天然骨结构，提高促进成骨的活性，具有巨大应用前景。早期 3D 打印多孔支架通常局限于单一材料，而综合多种材料的优点并通过组成与结构控制来调控骨修复支架材料的最适参数(如孔径、孔隙率、降解速率和力学强度等)，特别是从结构与组成仿生角度，以达到最优的骨修复效果是研究发展趋势。同时构建神经、血管网络等精细结构，重现骨组织功能的复杂多样性，也是目前 3D 打印多孔支架追求的目标。另一方面，近年来骨修复材料的重要进展就是从细胞和分子水平来指导生物材料的合成和材料表面结构的控制，从而形成具有“主动修复功能”和“组织微环境响应特性”的新型可降解生物活性骨修复材料。基于这个理念，新型骨修复材料的研究集中在材料的化学组成与结构对细胞和组织的诱导作用上，包括新型生物材料合成、材料表面的活化和纳微米结构的构建。

（5）基于二维材料的下一代先进电子元器件研究

先进电子元器件是发展下一代集成电路和光子芯片的核心器件，是实现高性能通信、雷达和电子战系统小型化、集成化的“使能”技术。基于二维材料异质异构技术堆叠而成的下一代先进电子元器件，比目前硅基元器件具有更高的集成水平、更高的工作频率、更低的功耗，有望引发电子装备新一轮革命性变革。美国和欧洲已经全面布局二维材料元器件的研究，尤其美国 2017 将“先进电子元器件及材料”列入“电子复兴计划（ERI）”，以期确保美国电子技术能力保持领先。目前我国已经具备了和国际先进水平竞争的能力，面对前所未有的发展机遇，中国也亟须提前布局，加大基础研发和工程化力度，攻克关键材料制备与技术问题，拥有自主的创新体系，成为国际电子信息产业的中坚力量，推动中国电子信息产业从大到强。二维材料元器件面临的主要挑战和基础问题包括：①晶圆级大尺寸高质量单晶制备技术，包括石墨烯、单层二维过渡金属二硫属化物、铁磁二维材料等；②大面积无损异质异构转移和集成技术；③跨尺度多物理场耦合效应作用机理和性能演化规律。

（6）高效稳健合成太阳燃料

太阳能清洁、丰富、可再生而且潜力巨大，将其转化为人类可以利用的燃料是解决能源危机、环境问题的有效途径之一。受自然光合作用的启发，太阳燃料是指利用太阳能等可再生能源转化二氧化碳和水生成化学燃料（氢气、甲醇等）。其实现方式可分为两种：一是利用太阳能，通过光（电）催化的方式分解水产生氢气和氧气，再将产生的氢气与二氧化碳结合生成甲醇；二是利用光（电）催化直接将二氧化碳还原为甲醇。太阳燃料的合成不仅可以实现零碳排放，也是实现低碳能源的主要途径。考虑到化石燃料的不可再生以及能源需求的不断增长，太阳燃料的实现势必成为未来能源结构的重要组成部分。在太阳燃料合成过程中，有两个关键催化技术：一是高效、廉价、稳定的分解水 / 二氧化碳还原（光）电催化剂，能量转换效率要求达 80% 以上；二是廉价、高选择性二氧化碳加氢制甲醇催化剂。提升分解水制氢 / 二氧化碳还原的转化效率，催化剂的选择性、稳定性以及两个关键技术的耦合是目前该领域的研究方向。

（7）高能量密度有机系钾离子电池

钾元素在地壳中储量丰富、来源广泛，且物理化学性质与锂元素相似，使得钾离子电池有望成为锂离子电池的有益补充。和锂离子电池的工作原理相似，钾离子电池是通过钾离子在正负电极之间可逆的嵌脱引起电极电势的变化而实现电池的充放电。相比于锂离子，钾离子半径较大，在材料体相中的迁移速度较慢，从而导致钾离子电池的电化学性能优势不足。因此，开发具有稳定结构、能够可逆嵌脱的正负极材料和与之相匹配的电解液，成为钾离子电池亟须攻克的关键科学技术问题。目前，正极材料主要集中于普鲁士蓝类材料，但具有较高理论比容量的层状过渡金属氧化物正极与兼具高电压和稳定性的聚阴离子正极材料也有一定程度的研

究；负极材料则主要集中于嵌入型和合金型负极材料，虽然各自具有一定程度的缺陷，但是经过掺杂、包覆、纳米化等手段改性后，具有较为优异的电化学性能；电解液方面则是在与材料的匹配性上进行了部分探索。随着研究的不断深入，钾离子电池将有望在低速电动车、规模储能等领域成为锂离子电池的有益补充。

（8）高超声速导弹天线罩陶瓷材料

先进高温防热陶瓷材料具有独特的综合性能，能够适应高超音速长时飞行、大气层再入、跨大气层飞行和火箭推进系统等极端环境。天线罩技术是高超音速导弹的关键技术之一，直接制约着先进导弹型号的发展。随着导弹飞行速度的提高，天线罩陶瓷材料的工作环境也变得愈加恶劣，除了要求承受和传递的各种静态、动态载荷外，还要承受高温、高压、高速气流的烧蚀和冲刷。因此陶瓷材料应具有优异的力学、介电、耐烧蚀、抗氧化、抗热震性能和良好的成型加工性以保障高的传输功率和低的瞄准误差。当前关键型号用防热陶瓷及其复合材料久攻不破，内在原因是对关键制备技术所涉及到的前沿基础科学问题理解不深，或受制于高纯超细陶瓷粉体、先驱体等原料和重大装备的发展。针对陶瓷材料耐长时热–力耦合烧蚀问题，未来需重点开发新型耐更高温烧蚀和优异透波性能的陶瓷纤维及其复合材料，特别是有效提升其高温介电稳定特性；针对大尺寸薄壁异形构件，应优先发展高效近净尺寸材料成型技术；针对多孔透波构件，需开发耐更高温的致密透波陶瓷涂层。

（9）人工结构量子材料与器件

人工结构量子材料和器件是通过多种物理或化学手段在纳米尺度上进行人工设计、制造的新型半导体材料和器件，其有趣的功能主要来自特殊的结构而不是内在的特征。目前，人工结构量子材料与器件的研究主要聚焦在二维材料中原子尺度缺陷的调控、半导体异质结构中人工多量子阱以及超晶格周期性结构的设计等。通过将第一性原理计算和微细加工技术相结合，从原子、分子或纳米尺度上控制缺陷掺杂和人工设计结构的可控生长，进而可研制出具有新型功能的人工结构量子器件。人工结构量子材料与器件研究的关键在于精确、任意地控制量子阱 / 势垒厚度及多重堆叠，进一步揭示半导体量子点结构中光子、声子和电子之间的相互作用机制以及其与电子输运、光学跃迁和量子能态的内在规律。针对国家重大战略需求，结合高精度人工半导体微结构技术和原子图案化加工技术，可望进一步实现高性能、高灵敏的中红外探测器、量子级联激光器和超发光二极管等新型人工结构量子器件的集成和发展。

（10）大线能量焊剂基础研究

船舶与海洋工程用钢、压力容器用钢、水电核电用钢等厚板产品具有高技术含量和高附加值，是“大国重器”，其自主供应和满足极端需要的能力是国家工业发展战略和安全的综合实力体现。需要指出的是，焊接效率成了制约厚板产品建造的瓶颈问题。大线能量焊接技术可显著提高焊接施工效率，节省厚板建造成本，日渐成为厚板高效制造的重要手段。现有研究表明，氧化物冶金技术是厚板大线能量焊接研究与应用的恰当切入点。针对高强度厚钢板大线能量焊接用配套焊材和高级别焊材研发的核心均源自于对焊接过程中所发生的冶金问题，如焊剂 / 焊接熔渣分解规律、焊缝增氧机制及合金元素过渡等的深入理解。因此，将焊接熔渣结构、合金元素过渡、夹杂物溶解与析出等演化历程考虑到焊接熔池反应热力学及动力学模型中，探寻焊缝金属组织调控本质规律，对于夯实厚板大线能量焊接的氧化物冶金基础、提高高端材料具有重大意义。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 用于肿瘤诊疗的智能纳米药物

癌症作为一种发病率与死亡率较高的疾病，严重威胁着人们的健康。迄今为止，在癌症临床治疗

上广泛使用了包括放射疗法、化学疗法、基因疗法、免疫疗法、光动力疗法等多种方法来治疗癌症。现在癌症治疗已经进入了精准医学的时代，智能纳米药物成为一种癌症诊断和治疗的新兴策略。智能纳米药物以纳米科学和纳米技术为基础，着力于解决传统化疗药物和诊断试剂等在递送过程、病灶部位富集、系统毒性等存在的瓶颈问题，同时能够对病理条件或外源性刺激产生特定响应，实现探针分子或药物分子在特定部位的积累和释放，进一步提高其生物学效应和诊疗作用。

近年来，纳米药物在癌症的精准诊疗研究中愈发受到关注，研究前沿主要集中在以下 5 个方面：①运用纳米技术，提高传统化疗药物的药效。设计和制备各类生物相容性材料（核酸、蛋白质、脂质等）并通过化学偶联、物理包载以及超分子自组装等形式将小分子药物或大分子药物（如核酸、蛋白、抗体等）聚集成纳米颗粒，可有效增强药物分子的稳定性、降低药物分子的毒性。如 2005 年，美国食品药品管理局（FDA）批准的白蛋白偶联紫杉醇纳米药物 Abraxane®，用于治疗非小细胞肺癌等恶性肿瘤，大大降低紫衫醇的系统毒性；而聚乙二醇化修饰的脂质体纳米药物 Doxil® 中明显改善阿霉素的治疗效果。②癌症治疗的特异性智能纳米药物及可控释放。抗体偶联药物（ADC）具有主动靶向性，被称为智能生物导弹。2020 年 1 月，美国国家药品监督管理局（NMPA）批准了靶向纳米药物 Kadcyla® 国内上市，相比于曲妥珠单抗 HER2 阳性乳腺癌的复发和全因死亡风险降低了 50%。此外，通过引入外源性（如光、温度、超声和磁场等）和内源性（pH、还原物质、酶、活性氧和三磷酸腺苷等）刺激响应的纳米药物，可防止药物分子在递送过程中的泄露，在到达肿瘤部位时，药物分子得以释放，极大提高肿瘤部位的药物浓度，提高药效，降低毒性等。③肿瘤成像及癌症诊断的特异性纳米探针的研发。该领域的研究聚焦在肿瘤检测的特异性纳米探针和多模态的精准检测方面。目前在研究和临床开发中将各种具有靶向特异性肿瘤表面受体的核酸适配体、抗体、多肽以及特异性给体小分子偶联到纳米探针上，开发各种高对比度的红外荧光纳米探针、拉曼纳米探针、放射性核素标记纳米探针以及量子点等，用于实现肿瘤诊断以及手术导航等。④肿瘤诊疗一体化的纳米医学新策略。通过精准的纳米药物设计，构建新型的纳米探针和纳米药物分子一体化，实现肿瘤成像指导下肿瘤的局部精准治疗。此外，设计并构建特异性的靶向治疗纳米机器人、活体自组装纳米结构和肿瘤诊疗的蛋白纳米反应器等新策略，也成为智能纳米药物研究的新领域。⑤智能纳米药物的体内代谢和毒理研究。不同于传统药物分子，纳米药物的尺寸和形状等因素影响其血液循环、肿瘤穿透、细胞摄取和生物代谢通路等。对纳米药物的安全性评价、风险评估和纳米毒理学机制等研究将有助于纳米药物的临床诊疗的应用。

在 190 篇核心论文中，综述文章 67 篇，2017 年哈佛医学院的研究人员发表的相关综述“Cancer nanomedicine: progress, challenges and opportunities”，引用已经超过 1500 次。2014 年以来，“用于肿瘤诊疗的智能纳米药物”研究核心论文的主要产出国家（或地区）及机构分别见表 1.2.1 和表 1.2.2，主要国家或地区及机构间的合作情况见图 1.2.1 和图 1.2.2。其中，主要核心论文产出国家（或地区）前 3 名为中国、美国和韩国；在主要产出机构中，中国科学院位居第 1。在合作网络中，中国和美国的合作关系最多，法国和意大利、美国和新加坡之间也有相当的合作（见图 1.2.1）。图 1.2.2 表明中国科学院相关机构合作较多（中国科学院大学、中国科学院与国家纳米中心）。根据表 1.2.3，核心论文施引国排名前 3 的是中国、美国和印度；而表 1.2.4 表明，施引核心论文产出最多的机构仍然是中国科学院的机构和大学。

表 1.2.1　“用于肿瘤诊疗的智能纳米药物”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	102	53.68%	12 767	125.17	2015.9
2	美国	66	34.74%	12 137	183.89	2015.6
3	韩国	14	7.37%	1977	141.21	2015.2
4	新加坡	9	4.74%	909	101.00	2015.2
5	意大利	7	3.68%	1068	152.57	2015.1
6	西班牙	6	3.16%	703	117.17	2015.8
7	印度	6	3.16%	570	95.00	2016.2
8	法国	5	2.63%	852	170.40	2015.0
9	葡萄牙	5	2.63%	566	113.20	2016.2
10	加拿大	5	2.63%	452	90.40	2015.8

表 1.2.2　“用于肿瘤诊疗的智能纳米药物”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	39	20.53%	4923	126.23	2015.8
2	中国科学院大学	15	7.89%	2284	152.27	2016.0
3	苏州大学	14	7.37%	1520	108.57	2015.9
4	哈佛大学	12	6.32%	4310	359.17	2016.0
5	国家纳米科学技术中心	7	3.68%	716	102.29	2015.9
6	厦门大学	6	3.16%	1056	176.00	2016.8
7	麻省理工学院	5	2.63%	1916	383.20	2014.4
8	美国国立卫生研究院生物医学成像与生物工程研究所	5	2.63%	878	175.60	2016.4
9	首尔国立大学	5	2.63%	774	154.80	2014.6
10	北卡罗来纳大学教堂山分校	5	2.63%	577	115.40	2015.0

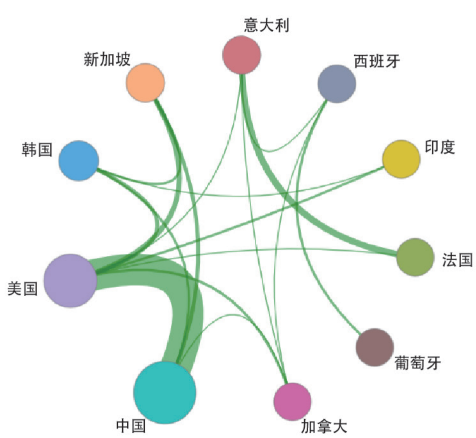

图 1.2.1　“用于肿瘤诊疗的智能纳米药物”工程研究前沿主要国家间的合作网络

1.2.2　可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备

随着化石能源的逐年耗尽，改变能源结构，推进新能源技术的开发和大规模使用已纳入世界各国的中长期发展战略。此外，新能源汽车及智能电子设备的快速发展，要求储能设备具有可快速充电、高能量密度、高功率密度、长寿命等特点。因此，迫切需要提高现有能源存储系统的能量密度、功率密度及使用寿命。

电化学储能技术由于其灵活性，能量转换效率

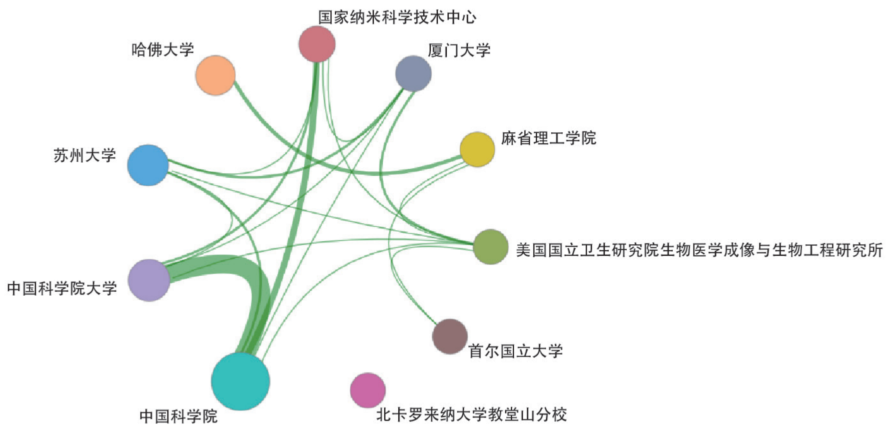

图 1.2.2 “用于肿瘤诊疗的智能纳米药物”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “用于肿瘤诊疗的智能纳米药物”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	10 396	50.47%	2018.1
2	美国	3673	17.83%	2017.8
3	印度	1146	5.56%	2018.1
4	韩国	898	4.36%	2018.0
5	德国	726	3.52%	2018.0
6	西班牙	680	3.30%	2017.9
7	伊朗	679	3.30%	2018.3
8	意大利	663	3.22%	2017.8
9	英国	619	3.01%	2018.0
10	法国	567	2.75%	2017.8

表 1.2.4 “用于肿瘤诊疗的智能纳米药物”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	1792	30.43%	2018.0
2	中国科学院大学	716	12.16%	2018.1
3	苏州大学	483	8.20%	2017.7
4	上海交通大学	440	7.47%	2018.2
5	浙江大学	386	6.56%	2018.3
6	四川大学	368	6.25%	2018.0
7	吉林大学	364	6.18%	2018.1
8	复旦大学	364	6.18%	2018.1
9	中国科学技术大学	340	5.77%	2018.4
10	哈佛大学	335	5.69%	2017.8

高和维护简便等优点，是电能存储的有效方法。但是电化学储能材料与器件的研究涉及材料、物理、化学、冶金等多个学科领域，涉及面广，体系庞杂。到目前为止，锂离子电池是开发最成功的电化学储能技术，但锂离子电池受材料化学反应动力学及反应机制限制，难以实现高功率密度及长使用寿命。相比于锂离子电池，超级电容器具有高功率密度、长寿命等特点，但其无法提供高的容量和能量密度。锂离子–电容器储能系统是一种特殊的储能体系，它由锂离子电池型电极和电容器型电极结合而成，既具有贴近锂离子电池的高能量密度，同时还具有超级电容器高功率的特点。近年来，在锂离子电池和超级电容器技术的基础上，电池–电容器储能体系发展迅速，主要研究集中在以下几个方面：①制备新型电极材料，以提高体系能量密度。新型电池侧电极材料的研究多为高容量金属氧化物类材料，如 Li-Ni-Mn-O、Nb_2O_5 等；电容器侧电极材料多选择赝电容型材料替代碳材料，如 MXenes、MoO_3 等。部分新型电极材料可使锂离子电池–电容器的能量密度和功率密度分别达到 92.3 Wh/kg 和 1100 W/kg。②电极材料纳米化。设计、调控并制备多种形貌、结构的纳米材料，并通过外场调控、包覆、掺杂、表 / 界面设计等形式，提升电化学反应动力学特性，提高电极材料比表面积和电导率，从而有效提高体系的功率密度和循环性能。此外，三维、一体化电极的高浸润性和高电子、离子传输性等特点对体系性能的提升也具有明显的优势。③新型电解质开发，提高体系电化学性能与安全性。电解质的研究包括电压窗口范围、离子电导率、热稳定性、与电极材料相容性等。2015 年，Science 期刊发表了热稳定性好、耐高电压“水系浓盐”电解质应用于电池–电容器的研究，该电解质在高功率密度的基础上，有效地提升了水系电池–电容器的能量密度。④电池–电容器的多元化、功能化。高能量密度、高功率密度、长寿命储能器件将在智能 / 无线电子器件及光电器件有广阔的应用前景，因此，柔性、可折叠、甚至透明电池–电容器器件在未来具有极大的需求。此外，具有快速电化学反应动力学、高容量钠离子电容器也将具有广阔的发展空间。

2014 年以来，“可快速充电电池–电容器储能体系电极材料结构调控及制备”研究的核心论文的主要产出国家及机构分别见表 1.2.5 和表 1.2.6，主要国家或地区及机构间的合作情况见图 1.2.3 和图 1.2.4。其中，主要核心论文产出国家前 3 名为中国、美国和韩国；在主要产出机构中，中国科学院位居第 1。在国家或地区合作网络中，中国和美国的合作最多（见图 1.2.3）。根据表 1.2.7，核心论文施引国排名前 3 的国家是中国、美国和韩国；而表 1.2.8 表明中国科学院系统的跟踪研究比较活跃。佐治亚理工大学的 Yushin 课题组和斯坦福大学崔屹课题组在此方向的研究成果获得了广泛关注，发表的文章引用较高。复旦大学夏永姚课题组 2016 年的综述“Electrochemical capacitors: mechanism, materials, systems, characterization and applications”，其引用也超过了 1300 次。

1.2.3　强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备

开发高效、绿色的冶金与材料制备技术，提升金属结构材料的使役性能和开发新型功能材料，是我国高端装备制造、航空航天、能源等领域发展的重大需求，也是冶金与材料学领域研究的核心。磁场，尤其是强磁场（永磁体和普通电磁铁难以达到的磁感应强度，2 T 以上）作为一种非接触性的极端物理场可以作用至物质的原子尺度，对物质表现出增强的洛伦兹力、热电磁力（特殊洛伦兹力）、磁化力、磁力矩、磁偶极子相互作用以及磁化能等多种力和能效应，为冶金和材料制备过程中的核心问题——金属凝固控制提供了独特手段，进而为孕育冶金和材料制备新技术、开发新型功能材料提供了重大机遇。

近年来，强磁场下冶金和材料过程已被世界各

表 1.2.5 “可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	95	53.67%	13 859	145.88	2016.4
2	美国	58	32.77%	11 617	200.29	2016.0
3	韩国	15	8.47%	2212	147.47	2015.6
4	德国	11	6.21%	1821	165.55	2016.4
5	加拿大	11	6.21%	1461	132.82	2016.5
6	日本	9	5.08%	912	101.33	2015.0
7	新加坡	7	3.95%	1468	209.71	2015.0
8	澳大利亚	7	3.95%	957	136.71	2015.9
9	英国	5	2.82%	703	140.60	2016.8
10	法国	5	2.82%	587	117.40	2014.8

表 1.2.6 “可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	18	10.17%	2129	118.28	2016.0
2	复旦大学	8	4.52%	1757	219.62	2017.0
3	清华大学	8	4.52%	908	113.50	2017.6
4	南洋理工大学	7	3.95%	1468	209.71	2015.0
5	南京大学	7	3.95%	768	109.71	2015.6
6	布鲁克海文国家实验室	7	3.95%	535	76.43	2015.0
7	斯坦福大学	6	3.39%	1375	229.17	2016.0
8	美国阿贡国家实验室	6	3.39%	830	138.33	2016.8
9	中国科学院大学	6	3.39%	769	128.17	2017.7
10	滑铁卢大学	5	2.82%	894	178.80	2017.0

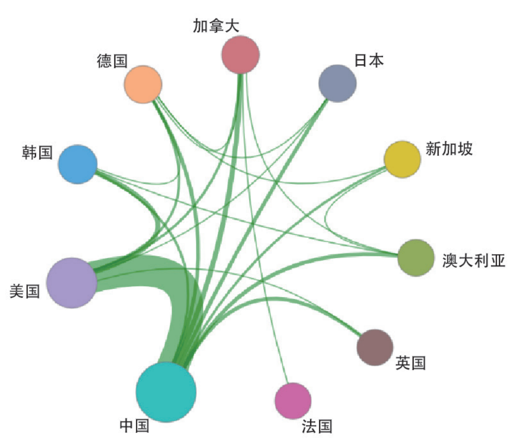

图 1.2.3 “可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备”工程研究前沿主要国家间的合作网络

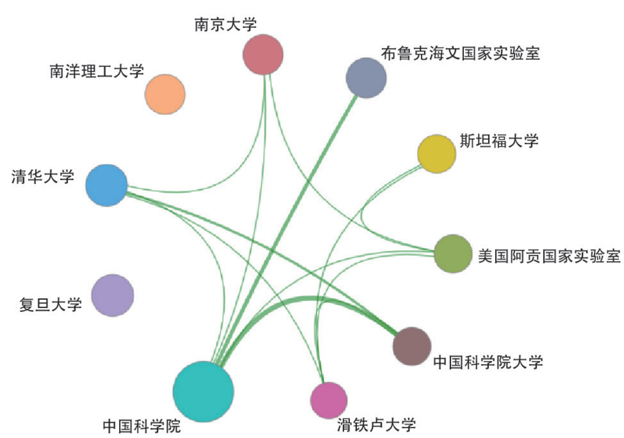

图 1.2.4 “可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	12 484	53.07%	2018.3
2	美国	3670	15.60%	2018.1
3	韩国	1584	6.73%	2018.2
4	德国	1238	5.26%	2018.1
5	澳大利亚	891	3.79%	2018.3
6	印度	818	3.48%	2018.3
7	日本	707	3.01%	2018.2
8	加拿大	592	2.52%	2018.3
9	新加坡	544	2.31%	2017.8
10	英国	534	2.27%	2018.3

表 1.2.8 “可快速充电电池 – 电容器储能体系电极材料结构调控及制备”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	1687	29.39%	2018.2
2	中国科学院大学	644	11.22%	2018.3
3	清华大学	588	10.24%	2018.1
4	中国科学技术大学	427	7.44%	2018.4
5	中南大学	407	7.09%	2018.0
6	南开大学	389	6.78%	2018.1
7	哈尔滨工业大学	328	5.71%	2018.2
8	南洋理工大学	322	5.61%	2017.6
9	华中科技大学	321	5.59%	2018.0
10	北京大学	318	5.54%	2018.3

国视为兼具前瞻性和战略性的重大研究领域。日本科学技术协会制定了“强磁场下新型材料研制”的专项研究计划，美国国家强磁场实验室开展了强磁场下高温超导材料、合金材料、复合材料等研究工作，法国、英国、德国等国家也积极开展了强磁场下新材料的研制工作。2000 年以来，国内多家高校和科研院所相继成立独立的研究团队，大力开展以金属凝固行为研究为主的强磁场下冶金和材料过程领域的研究。经过近 20 年的持续积累，中国的研究团队攻克了诸多强磁场环境下的设备开发技术难题，研发了一批强磁场环境下的特殊实验装置，针对强磁场下金属凝固过程中的流体流动、溶质迁移、传热等传输行为，及其同凝固组织演化之间的关系开展了大量研究，取得了一大批具有原创性的重要实验发现和理论成果，使中国处在该领域研究的世界领先水平。

当前该领域的前沿研究包括：①强磁场环境下材料制备和性能检测装备研发。开发性能可靠、功能全面的新型强磁场环境下的材料制备、物质的物性分析、组织和性能检测等实验装置是开展强磁场下冶金和材料过程研究的前提。②强磁场下高温金属熔体的物性测量。重点关注的高温金属熔体物性

包括导电率、黏度、磁化率、扩散系数、接触角、相变温度等，测量得到的物性参数数据是定量计算及分析强磁场各种力和能效应的依据，也将为其他强磁场下重大基础科学问题研究提供支持。③强磁场下的合金凝固理论研究。该方面的研究包括强磁场下的流体流动行为、溶质扩散和迁移、固 / 液界面稳定性、晶体生长等理论，这些理论是揭示强磁场作用机制、设计强磁场调控技术和工艺的基础。④强磁场冶金技术的开发。技术开发的重点是将强磁场以“非接触”的方式作用于金属材料的熔体处理、液态成型、铸造、定向凝固、液相烧结等多种主要冶金和材料制备过程，高效、绿色地调控材料的凝固组织。⑤新型金属功能材料的设计。该方面研究主要针对传统冶金技术的局限，利用强磁场冶金和材料制备技术的独特效果开发具有梯度分布、各向异性、第二相增强等特殊组织的磁致伸缩、磁存储、永磁、热电、磁热、磁光等高性能功能材料。

2014 年以来，“强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备”研究的核心论文的主要产出国家及机构分别见表 1.2.9 和表 1.2.10，主要国家或地区及机构间的合作情况见图 1.2.5 和 1.2.6。其中，主要核心论文产出国家，中国占绝对优势；上海大

表 1.2.9 “强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	61	43.88%	1870	30.66	2015.8
2	美国	20	14.39%	799	39.95	2016.1
3	伊朗	19	13.67%	1438	75.68	2017.6
4	德国	19	13.67%	1242	65.37	2015.4
5	法国	18	12.95%	473	26.28	2014.9
6	澳大利亚	10	7.19%	498	49.80	2016.2
7	日本	8	5.76%	296	37.00	2015.9
8	印度	8	5.76%	247	30.88	2015.9
9	突尼斯	6	4.32%	165	27.50	2014.3
10	俄罗斯	6	4.32%	149	24.83	2016.0

表 1.2.10 “强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	上海大学	17	12.23%	382	22.47	2015.5
2	伊朗巴博尔诺什瓦尼理工大学	12	8.63%	1230	102.50	2018.3
3	东北大学	10	7.19%	277	27.70	2015.4
4	中国科学院	8	5.76%	181	22.62	2015.4
5	法国国家科学研究中心	7	5.04%	188	26.86	2014.4
6	北京科技大学	4	2.88%	135	33.75	2015.8
7	大连理工大学	4	2.88%	115	28.75	2014.8
8	艾克斯 - 马赛大学	4	2.88%	93	23.25	2014.5
9	西安交通大学	3	2.16%	252	84.00	2017.7
10	公共应用教育培训局	3	2.16%	222	74.00	2018.0

学以发表论文 12.23% 的比例位居主要产出机构第 1。在相关研究国家或地区中，中国和美国的合作关系最多，中国—德国、中国—法国、中国—伊朗、伊朗—澳大利亚、法国—突尼斯之间也有较多的合作，如图 1.2.5 所示。上海大学和法国艾克斯 – 马赛大学、法国国家科学研究中心、中国科学院的合作密切（见图 1.2.6）。根据表 1.2.11，核心论文施引国排名前 3 的是中国，美国和德国；而表 1.2.12 表明中国东北大学、中国科学院和伊朗巴博尔诺什瓦尼理工大学是施引核心论文最多的三大研究机构。

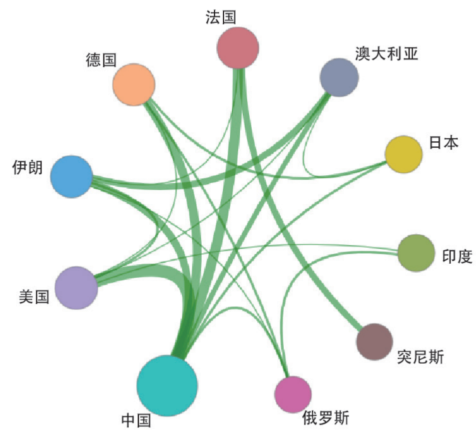

图 1.2.5 “强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备”工程研究前沿主要国家间的合作网络

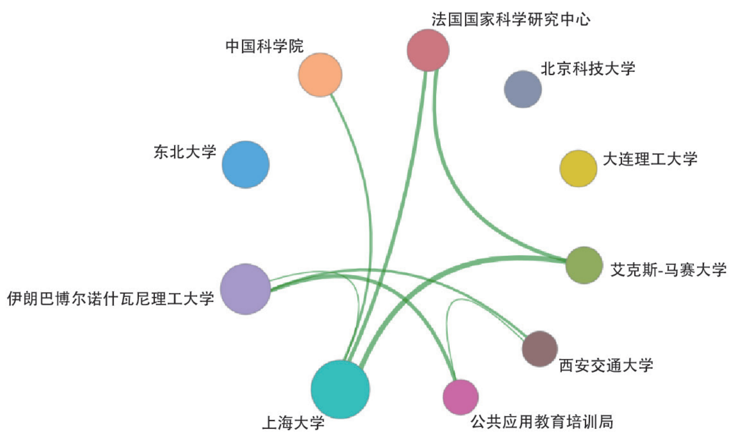

图 1.2.6 “强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	1678	35.01%	2018.1
2	美国	643	13.42%	2018.0
3	德国	352	7.34%	2017.9
4	伊朗	347	7.24%	2018.6
5	法国	333	6.95%	2017.7
6	日本	282	5.88%	2018.0
7	印度	259	5.40%	2018.2
8	俄罗斯	257	5.36%	2017.9
9	沙特阿拉伯	225	4.69%	2018.4
10	巴基斯坦	215	4.49%	2018.5

表 1.2.12 “强磁场下冶金和材料过程及功能材料制备”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	东北大学	224	17.23%	2017.8
2	中国科学院	177	13.62%	2018.0
3	伊朗巴博尔诺什瓦尼理工大学	133	10.23%	2018.8
4	上海大学	130	10.00%	2017.8
5	越南孙德盛大学	128	9.85%	2019.1
6	伊朗伊斯兰阿扎德大学	96	7.38%	2018.6
7	吉林大学	90	6.92%	2018.0
8	伍伦贡大学	89	6.85%	2018.7
9	北京科技大学	81	6.23%	2018.3
10	俄罗斯科学院	76	5.85%	2017.9

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判得到的 Top 10 工程开发前沿见表 2.1.1。其中“基于固态锂电池与锂电容器技术的全天候‘功’‘能’兼备的电化学储能系统”和“半导体精密蚀刻技术”是基于德温特专利数据聚类得出，另外的 8 个开发前沿为专家提出。在 10 个开发前沿中，化工 / 环境 / 能源 / 材料 / 冶金交叉的前沿包括 4 个（“废塑料降解与回收循环利用”“基于固态锂电池与锂电容器技术的全天候‘功’‘能’兼备的电化学储能系统”“跨尺度、多维度、原位动态分析技术”“多元复合固废精细化分选技术及装备”），冶金方向的有 4 个（“新一代舰船钢铁材料制造技术”“航空用高温钛合金体系及零部件的开发和应用”“重大装备核心大构件低成本高品质增材制造”“高洁净超细化超级轴承钢”），材料方向的有 2 个（“半导体精密蚀刻技术”“具有高适应性智能制造装备的智能材料与技术开发”）。“跨尺度、多维度、原位动态分析技术”和“重大装备核心大构件低成本高品质增材制造”近年来核心专利数量增长较快（见表 2.1.2）。与环境化工相关的“废塑料降解与回收循环利用”入选开发前沿 Top 1，而“多元复合固废精细化分选技术及装备”的平均被引次数达到 13.69，说明环保仍然是大家广泛关注的领域。

（1）废塑料降解与回收循环利用

塑料工业的迅猛发展导致大量废弃物的产生，大多通过填埋、焚烧或丢弃处理，造成严重的环境污染和资源浪费。废塑料降解与回收循环利用目前成为全球学界和产业界以及各级政府关注的热点。一方面研究开发低成本和降解可控的生物降解塑料，利用自然界的微生物降解作用，最终以 CO_2 和水的形成回到自然界。另一方面利用机械、热、溶剂等作用，将废塑料转化为再生塑料、能量或小分子化学品，主要集中在发展高效高选择性催化体系、绿色温和溶剂体系及降解产物的高效分离技术；研究开发具有可回收单体和可逆动态键的新型可反复循环利用塑料。从战略布局来讲，应加强以应用为导向的高分子闭环与升级回收技术研发，实现资源利用和环境保护最大化。在实际应用中，对于不易回收的应用领域，重点发展在废弃环境条件下快速无害降解的生物降解塑料；对于可回收的应用领域，应当加强开发废塑料的高效清洁回收和高值化利用技术，以及性能优良的可反复循环利用塑料。

表 2.1.1　化工、冶金与材料工程领域 Top 10 工程开发前沿

排名	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	废塑料降解与回收循环利用	627	649	1.04	2017.04
2	基于固态锂电池与锂电容器技术的全天候“功”“能”兼备的电化学储能系统	818	3706	4.53	2015.98
3	新一代舰船钢铁材料制造技术	595	2590	4.35	2015.03
4	半导体精密蚀刻技术	546	5028	9.21	2014.59
5	跨尺度、多维度、原位动态分析技术	954	802	0.84	2018.42
6	航空用高温钛合金体系及零部件的开发和应用	410	713	1.74	2016.52
7	重大装备核心大构件低成本高品质增材制造	967	4369	4.52	2017.68
8	高洁净超细化超级轴承钢	656	3916	5.97	2015.42
9	具有高适应性智能制造装备的智能材料与技术开发	1223	6469	5.29	2016.63
10	多元复合固废精细化分选技术及装备	807	11 049	13.69	2016.59

表 2.1.2　化工、冶金与材料工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	废塑料降解与回收循环利用	38	47	57	92	199	153
2	基于固态锂电池与锂电容器技术的全天候“功”“能”兼备的电化学储能系统	93	90	83	103	144	166
3	新一代舰船钢铁材料制造技术	74	60	64	75	78	76
4	半导体精密蚀刻技术	82	56	65	60	59	52
5	跨尺度、多维度、原位动态分析技术	5	4	27	108	176	628
6	航空用高温钛合金体系及零部件的开发和应用	49	54	65	83	73	69
7	重大装备核心大构件低成本高品质增材制造	21	49	76	186	275	348
8	高洁净超细化超级轴承钢	78	100	84	91	57	107
9	具有高适应性智能制造装备的智能材料与技术开发	89	123	234	233	254	216
10	多元复合固废精细化分选技术及装备	49	46	101	143	190	189

（2）基于固态锂电池与锂电容器技术的全天候“功”“能”兼备的电化学储能系统

电化学储能系统跟踪负荷变化能力强，响应速度快，控制精确，且具有双向调节能力和削峰填谷的双重功效，是重要的调峰电源。固态锂电池具备高比能、高安全、长寿命等特点，锂离子电容器具有高功率、宽温区、快响应等显著优势，基于聚合物固态锂电池与锂电容器技术创新集成一种新型全天候“功”“能”兼备的电化学储能系统。其研发内容主要包括：①固态电解质、无钴正极、复合锂负极等核心材料体系及其相关界面技术；②无钴固态电池关键材料产业化技术；③固态电极和固态单体制备工程技术；④快速储锂技术；⑤精准可控预锂化及新超低温复配技术；⑥双源储能系统高效智能化集成与示范技术。

（3）新一代舰船钢铁材料制造技术

钢铁材料是建设各类舰船最重要、最关键的结构原材料，其性能优劣直接关系到舰船技术性能的先进程度、使用寿命和安全可靠性。在大型船体用钢方面，美国率先提出了新一代 HSLA（High

Strength Low Alloy）舰船用钢的开发计划，目前美国形成了以 HSLA80、HSLA100、HSLA115、HSLA130 等钢为代表的易焊接高强钢体系并用于实船建造；在水下船体结构用钢方面，俄罗斯开发了屈服强度 1175 MPa 级耐压壳体用钢，下潜深度超过 650 m。随着舰船向大型化、深潜化发展，要求船体结构用钢具有高强度、高韧性和易焊接性。其先进的制造技术包括：①超低碳洁净钢冶炼技术；②超快冷为核心的新一代热机械控制（TMCP）工艺技术；③配套焊接材料开发及焊接工艺技术。

（4）半导体精密蚀刻技术

半导体材料和技术是计算机、通信和电子领域的核心，是社会信息化发展的基石。精密蚀刻作为半导体生产的核心技术，是先进制程工艺的基础，直接决定半导体器件的性能，其蚀刻精度是评价半导体工业发展水平的重要指标。该技术利用化学或物理方法将材料选择性去除，根据工艺类型可分为湿式蚀刻和干式蚀刻，蚀刻质量通过方向性、选择比、蚀刻速率和均匀性等指标评价。在半导体器件的大规模生产制备中，亟需精密蚀刻技术的高可靠性来保证生产的高连续性和极低的缺陷率。在传统硅基半导体领域，常利用选择性好的湿式蚀刻进行磨片、抛光、清洗和腐蚀过程，并通过干式蚀刻的各向异性构筑集成电路的精细结构。随着半导体制程的不断提升，蚀刻需要实现高选择性、高稳定性以及各向异性来满足不断降低的临界尺寸的要求。另一方面，以碳化硅、氮化镓等为代表的新型第三代半导体材料正被迅速开发与应用，其蚀刻加工需要适应材料的新特性，使其集成器件满足高温、强辐射和大功率的使用环境。面向集成电路小尺寸、高集成度以及新材料发展的要求，精密蚀刻在优化蚀刻工质、强化蚀刻过程控制和探索蚀刻新原理等方面的创新，将会推动加工可靠性的提升和分辨率极限的突破，助力半导体工业和信息社会的更大发展。

（5）跨尺度、多维度、原位动态分析技术

基于国家大科学装置同步辐射光源的跨尺度（纳米～厘米）、多维度（二维、三维、四维）、原位动态分析技术是先进的前沿表征技术，其具有高的时间和空间分辨率特点，用该技术可实现高性能新型材料在制备过程中的组织或缺陷形成与演化，模拟极端使役环境下材料微结构演化与损伤过程的原位动态实时观察，并可对随时间变化的组织或相关信息（如化学成分）进行定量化分析，是揭示材料成分、组织结构、加工工艺与服役性能关系这一材料研究关键科学问题的利器。例如，用该技术可研究重大装备核心部件（如航空发动机叶片、月球车悬臂梁、破冰船螺旋桨等）用高性能金属材料制备与模拟复杂极端服役环境（极端高温 / 低温或交变温度、腐蚀或这些因素耦合叠加的环境）中的组织 / 微结构演化与损伤机理，对于材料物理模型的开发与完善，以及提升重大装备核心部件的使役性能和安全均具有重大意义。该技术的主要发展方向为：①材料多场耦合制备与极端使役环境原位装置的设计与建造；②高时空分辨高精度同步辐射 X 射线方法学与自动化数据分析技术的开发；③同步辐射 X 射线成像、衍射、荧光、散射等多种 X 射线方法的深度融合技术与联合应用。

（6）航空用高温钛合金体系及零部件的开发和应用

高温钛合金具有高比强度和抗疲劳等优异性能，被广泛应用在航空航天等领域，例如，航空发动机舱、隔热板、外涵机匣、涡轮盘、高压压气机叶片和盘等部件。从高温钛合金研制进展来看，开发新合金成分、解决制备高温钛合金过程中技术、工艺问题具有重要意义。制备高温钛合金的技术包括铸造、锻压、焊接、粉末冶金和 3D 打印等工艺方式，其中多种工艺共同制备的合金锭或零件，组织性能会优于单一工艺制备的合金。根据强化方式及相变，高温钛合金以 α 和 β 相为主，其使用温度可达 480 ℃，加入微量合金元素可达 550~650 ℃。进一步的开发研究主要从以下方面进行：①研究 α、β、增强相和 α_2 相的大小、形态及含量，以改善高

温钛合金组织的稳定性；②开发基于大型高质量铸锭的联合制备技术，控制片状 α 构成、等轴 α 结构及 β 转变基体组成的三态组织，在不降低塑性、确保热稳定性的前提下提高材料的使用温度；③利用定向凝固技术，制备性能优良的高温钛合金柱状晶或单晶叶片坯锭；④建立凝固过程的有限元模型，确定高温钛合金中平衡热强性和热稳定性的 α_2 相尺寸、含量的临界转变值，为开发高性能的高温钛合金提供技术指导。

（7）重大装备核心大构件低成本高品质增材制造

大锻件是重大装备的核心部件，在国防安全、国民经济中发挥着不可或缺的作用。传统大锻件普遍采用百吨级铸锭制备，由于金属凝固过程的尺寸效应，大铸锭慢冷凝固造成的偏析、疏松等问题会严重影响锻件质量，使得大锻件的均质化制备成为亟待解决的世界性难题。目前已经实现了 3D 打印方法制备钛合金大型整体主承力结构件等大型零件，材料的性能可以达到或接近锻件水平，但对于铁基和镍基材料，3D 打印因其经济性和可靠性问题，一直难以与传统的锻造方法相媲美。近年来，中国率先提出利用金属构筑成形技术实现高品质大锻件的制造，这项技术结合了传统的锻造技术与新兴的增材制造技术的优势，能够实现能源电力等领域大构件的低成本高品质增材制造。目前，金属构筑成形技术在风电、水电、核电等领域已初步实现工程化应用。但当前该技术的研究和应用均处于起步阶段，制约该技术大规模应用的关键技术包括：①不同合金体系适度尺寸构筑基元的研制技术；②基元表面的高效清洁与活化处理技术；③构筑界面的氧化膜破除与分解技术；④高温合金、钛合金、特种不锈钢大构件的构筑成形技术。为解决上述问题，以下几方面亟待解决：①建立金属构筑成形通用技术标准，确定构筑成形材料的评价体系与应用准则，使该技术引领大构件极限制造技术的发展；②探索高效表面加工清洁方法与活化工艺，研制专用表面处理设备，开发智能型金属构筑成形生产线，以高均质、低成本的构筑成形坯取代传统的大钢锭；③面向重型燃机涡轮盘、核电 / 加氢压力容器、高品质模具钢等迫切需要解决的大尺寸材料均质化问题，研发相应材料体系的构筑成形技术，研制样件并进行考核评定，形成技术规范。

（8）高洁净超细化超级轴承钢

轴承钢被公认为是对材料质量要求最高的钢种，号称“钢中之王”。高端轴承主要包括航空发动机、海工装备、高速列车、盾构机、数控机床、风电轴承等，技术开发的要点在于轴承的服役寿命和可靠性。一方面要研发洁净度高、均质性好、材料组织细密的轴承用钢材，以解决轴承早期失效、强韧性不足、耐磨性差等问题；二是制定完善的轴承钢标准体系，明确轴承钢的含氧量、Ti 含量等；三是开发先进的轴承钢冶金技术，包括精炼和连铸技术等，解决离散大尺寸夹杂物等问题，特别是对于大锭型的情况。近年来，采用外场强化精炼、连铸、凝固、重熔过程技术，如电磁精炼技术、新型电磁连铸技术、连铸重压下技术、大钢锭凝固外场调控技术、磁控电渣重熔技术等，有望实现轴承钢母材的高洁净、超细化和高均质化的制备，大幅提升轴承钢母材的冶金质量，最终将大幅提升轴承钢的服役性能。

（9）具有高适应性智能制造装备的智能材料与技术开发

智能制造装备是智能制造技术的重要载体，其融合了先进制造、数字控制、现代传感以及人工智能技术，具有感知、学习、决策和执行等功能。与传统制造装备相比，具有高适应性的智能制造装备能够实现定制化、多用途生产，在进行不同材料、不同种类和不同工序的加工时，能够主动接收外界信息并进行自主分析和执行以适应复杂的加工环境和工序，这就对设备的传感器与执行器件的数量、体积与功能提出了更高的要求。智能材料同时具有传感器与执行器件的功能，并且响应迅速，有助于

实现智能制造装备体积小型化、功能多样化和结构简单化，能够提升装备的适应性和可靠性。智能材料响应速度快，产生的驱动力大，可以根据需求进行定向设计其性能，并对包括温湿度、酸碱度、气体、机械力以及光照等外界刺激做出反应，使零件本身具有一定的“智能”。这一系列特性符合智能制造技术发展的要求，使其已经应用于高敏传感器、柔性机器人驱动、机械振动控制、装备结构件损伤自检测与自修复、设备工作状态检测等制造领域中。目前，应用在智能制造装备上智能材料的开发还处于初级阶段，需要进一步的研究。一方面，需要开发出具有更快响应速度、更大驱动力和驱动行程以及对工作环境要求更低的智能材料；另一方面，需要将多种智能材料结合形成智能结构，从工程设计角度提升智能材料的使用范围和工作性能。

（10）多元复合固废精细化分选技术及装备

以退役产品为主要来源的多元复合固废包括电子废弃物、退役电池、废旧有机复合材料、废旧纺织品、废旧包装物等，具有明显区别于传统工业废渣等固体废物的重要特征，包括物相组成与结构复杂、界面结合方式多样、兼具资源和环境双重属性等，这使得多元复合固废的精细化分选对其资源高效循环利用至关重要。现有技术多基于传统的选矿、冶金原理，耦合材料、环境、机械、智能控制等多学科理论，推进多元复合固废的精细化分选以实现资源短程循环与材料利用，推进产品全链条绿色制造与资源环境效率的显著提升，已经成为行业的重大需求。在多元复合固废的高效精细化分选、界面精准识别与解离等方面，需要重点解决的技术方向为：①多元复合固废表界面原位无损检测与精准识别技术；②复杂物料全谱系特性数据库及面向精准识别与分选的多维度算法；③机械–物理耦合强化的多形态界面高效解离与调控方法；④外场调控强化的复合固废分选技术及装备；⑤典型复合固废智能识别–界面解离–分选一体化处理技术与装备；⑥面向资源循环的产品绿色设计与全产业链技术–环境–经济绿色评价方法与标准，高度耦合智能化、绿色化、多相界面精准调控的全链条创新技术体系构建。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　废塑料降解与回收循环利用

自20世纪50年代人类开始大量生产塑料以来，全球塑料累计产量已达 8.3×10^9 t，其中 6.3×10^9 t 成为了废弃物，给生态环境造成极大危害。由于现有回收技术不成熟且成本高，目前全球仅有约9%的废弃塑料得以回收利用，其余多以直接焚烧、填埋或丢弃等方式处理，导致了严重的二次污染和资源浪费。因此发展绿色高效的废塑料降解与回收循环利用技术已成为亟待解决的重大问题。

一方面，可以开发和研究生物降解塑料。利用自然界的微生物降解作用，使废塑料最终以 CO_2 或水的形成回到自然界，这些技术适用于一些不易回收的一次性应用领域。另一方面，在现有4种塑料体系的回收技术中，物理回收由于热机械作用，往往导致材料力学性能下降，再生产品性能不佳，附加价值低；生物回收技术因生物酶效率低，尚不具备实用性；能量回收对设备投资大、回收过程可能产生二次污染，适合污染严重的废塑料；化学回收通过热解、溶剂解等方式将塑料降解为小分子或低聚物加以回收利用，是重点研究开发的方法，但存在反应条件苛刻、产物复杂、分离困难且难以再利用等不足。目前回收技术主要针对热塑性塑料，多以物理回收为主；而热固性塑料由于稳定的三维网络结构，降解难度大，多以回收复合材料中的增强纤维为主，树脂的回收尚停留在实验室研究阶段。废塑料降解与回收循环利用主要研究包括4个方面：①高效高选择性化学降解催化剂；②绿色温和溶剂体系及高效产物分离技术；③具有可回收单体或可逆动态键的新型可反复循环利用塑料；④低成本可完全生物降解塑料。

今后的发展应以应用为导向来设计高分子闭环和升级回收思路。对于不易回收的应用领域，使用生物降解塑料，应加强环境因素对降解的影响研究，发展在废弃环境条件下快速无害降解的生物降解塑料。对于易回收的应用领域，应当加强开发废塑料的高效清洁回收和高值化利用技术，如混杂塑料的直接回收循环利用技术、废塑料的升级循环利用技术和从废塑料到功能 / 高性能材料的直接转化新技术；同时大力开发具有良好热稳定性和力学性能的可反复循环利用塑料。

目前，热塑性塑料回收品种主要集中在聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚氯乙烯（PVC）、聚苯乙烯（PS）和聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）等，中国主要以物理回收为主，用于制备再生塑料，主要企业有金发科技有限公司、龙福环能科技股份有限公司等。一些发达国家的化学回收已部分商业化，日本三菱重工集团、川崎重工集团、加拿大 JBI 公司、英国的 SITA 公司等都已实现热裂解油化技术的商业化。PET 化学回收已有日本帝人株式会社、美国 Eastman 化学公司、美国 Dupont 公司等公司商业化。热固性树脂及其复合材料的工业化回收，中国企业主要采用物理法，化学法较少使用，主要用于回收增强材料。上海交通大学成功开发了中国第一项拥有完全自主知识产权的规模化的新型裂解回收技术和装备。日本三大碳纤维再生工业公司，日本东丽、东邦和三菱丽阳公司，美国 Carbon Conversions 公司、MIT LLC 公司均具有工业化回收碳纤维生产能力。生物降解塑料以聚乳酸（PLA）、聚对苯二甲酸-己二酸-丁二醇酯（PBAT）和聚丁二酸丁二醇酯（PBS）等产品为主，中国的金发科技有限公司和新疆蓝山屯河化工股份有限公司，美国 Natureworks、德国 BASF 等公司的技术和产品比较先进。近年来，中国和中国的企业在此领域的专利数量产出较多，但其被关注度（专利引用）并不高（见表 2.2.1 和 2.2.2）。

2.2.2　基于固态锂电池与锂电容器技术的全天候“功”“能”兼备的电化学储能系统

电化学储能具有一次投资额小、建设周期短等显著优势，已在峰谷电价套利、新能源并网以及电力系统辅助服务等领域得到高效开发和快速推广，电力市场化的储能政策将助力推动电化学储能市场份额迈入千亿级。当前，应用于新能源发电中最为成熟的电化学储能技术采用锂离子电池路线。然而，传统的锂离子电池低温放电性能较差，不易实现全天候使用，高温滥用条件下容易发生热失控。基于聚合物固态锂电池及锂电容器技术的全天候功能兼备的电化学储能系统具有高比能、高安全、宽温区、

表 2.2.1 “废塑料降解与回收循环利用”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	566	90.27%	409	63.02%	0.72
2	韩国	27	4.31%	14	2.16%	0.52
3	日本	11	1.75%	30	4.62%	2.73
4	奥地利	6	0.96%	76	11.71%	12.67
5	美国	6	0.96%	34	5.24%	5.67
6	印度	2	0.32%	17	2.62%	8.50
7	德国	1	0.16%	57	8.78%	57.00
8	卢森堡	1	0.16%	4	0.62%	4.00
9	土耳其	1	0.16%	4	0.62%	4.00
10	英国	1	0.16%	2	0.31%	2.00

表 2.2.2 “废塑料降解与回收循环利用”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	清远恒进塑料有限公司	中国	16	2.55%	4	0.62%	0.25
2	安徽国盛新材料有限公司	中国	12	1.91%	0	0.00%	0.00
3	江苏金沃机械有限公司	中国	9	1.44%	14	2.16%	1.56
4	张家港亿利机械有限公司	中国	8	1.28%	9	1.39%	1.13
5	江西丰迪新材料有限公司	中国	6	0.96%	0	0.00%	0.00
6	界首荣发再生资源有限公司	中国	6	0.96%	0	0.00%	0.00
7	EREMA Engineering Recycling Maschinen und Anlagen GmbH	奥地利	5	0.80%	70	10.79%	14.00
8	福建雄鹰礼品工艺品制作有限公司	中国	5	0.80%	3	0.46%	0.60
9	山东宇素管材有限公司	中国	5	0.80%	1	0.15%	0.20
10	安徽中路环保设备科技有限公司	中国	5	0.80%	0	0.00%	0.00

长寿命、快响应等显著特点，是理想的电化学储能技术。

聚合物固态锂电池采用固态电解质替代传统的液态电解液，既可有效避免商品化锂离子电池在短路、钉刺等异常使用时引发的起火、爆炸等安全隐患，也可匹配更高能量密度锂负极，具有实现更高能量密度的潜在优势，满足兼顾高能量密度、高安全的应用需求。聚合物固态电解质成膜性好、韧性高，与锂金属负极具有良好的相容性，且易于大规模生产和加工，其中聚环氧乙烷（PEO）体系已实现批量应用。2011 年，法国 Bollore 公司开发的 PEO 固态电解质的聚合物锂金属电池，能量密度可达 170 Wh/kg，安全性能良好，已经在 Bluecar 汽车应用并参与汽车共享服务。2015 年，中国科学院青岛生物能源与过程研究所开发出一种聚碳酸酯基聚合物固态电解质，该材料拥有更宽的电化学窗口（~4.5 V）、可以匹配更高电压的正极材料，大幅提升了固态锂电池的能量密度（300 Wh/kg），其综合性能正在稳步提升。

锂电容器（LIC，Lithium ion capacitor）是一种正极与负极充放电原理不同的非对称电容器，在设计上采用了双电层电容器和电化学储锂的原理，在构造上采用了锂离子电池的负极材料与双电层电容器的正极材料之组合，在保持高功率特性的同时大幅提高了传统双电层电容器的能量密度。目前，国内锂离子电容器正处于研究开发阶段，而国外以日本为代表的锂离子电容器生产商，目前已有日本 JM 能源、日本 FDK 能源、日本太阳诱电株式会社、日本 ACT 公司、新神户电机等几家企业开始批量试产。近期，美国 Maxwell 公司也研制出单体静电容量为 2200 F/3.8 V 锂离子电容产品，经测定其能量密度为 12 Wh/kg（24.2 Wh/L）。中国科学院青岛生物能源与过程研究所成功研制出单体容量最高达 3500 F、电压 4 V 型锂离子电容器，能量密度达 55.9 Wh/L（20.5 Wh/kg），设计建设了中国第一条锂离子电容器的中试生产线。

从表 2.2.3 来看，日本、中国和韩国的核心专利公开量是最多的，日本占到 43.28%。日本的核心专利不但数量多，平均被引用次数也高，达到 6.22 次。从表 2.2.4 看出，日本的公司拥有绝对的“专利话语权”，核心专利主要产出机构达到 6/10。从图 2.2.1 来看，中国的国际合作相对更多一些。

表 2.2.3 “基于固态锂电池与锂电容器技术的全天候‘功’‘能’兼备的电化学储能系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	日本	354	43.28%	2201	59.39%	6.22
2	中国	235	28.73%	562	15.16%	2.39
3	韩国	111	13.57%	322	8.69%	2.90
4	哥伦比亚	57	6.97%	271	7.31%	4.75
5	美国	39	4.77%	336	9.07%	8.62
6	德国	18	2.20%	40	1.08%	2.22
7	法国	3	0.37%	20	0.54%	6.67
8	比利时	3	0.37%	0	0.00%	0.00
9	肯尼亚	2	0.24%	9	0.24%	4.50
10	新加坡	2	0.24%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4 “基于固态锂电池与锂电容器技术的全天候‘功’‘能’兼备的电化学储能系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	TOYT	日本	76	9.29%	302	8.15%	3.97
2	IDEK	日本	56	6.85%	233	6.29%	4.16
3	DENK	日本	28	3.42%	185	4.99%	6.61
4	SMSU	韩国	28	3.42%	183	4.94%	6.54
5	GLDS	韩国	28	3.42%	70	1.89%	2.50
6	FURM	日本	22	2.69%	18	0.49%	0.82
7	MATU	美国	21	2.57%	92	2.48%	4.38
8	HITA	日本	19	2.32%	89	2.40%	4.68
9	SHIH	日本	16	1.96%	130	3.51%	8.13
10	KTEC	韩国	14	1.71%	14	0.38%	1.00

注：TOYT 表示 Toyota Jidosha KK；IDEK 表示 Idemitsu Kosan Co., Ltd.；DENK 表示 TDK Corp；SMSU 表示 Samsung Electronics Co., Ltd.；GLDS 表 示 LG Chem Ltd.；FURM 表 示 Furukawa Kikai Kinzoku KK；MATU 表 示 Panasonic Intellectual Property Manageme；HITA 表示 Hitachi Ltd.；SHIH 表示 Seiko Epson Corp；KTEC 表示 Korea Inst Ind Technology。

2.2.3 新一代舰船钢铁材料制造技术

舰船用钢是指军用的水面舰船（如驱逐舰、巡洋舰）和水下潜艇（如常规动力潜艇、核动力潜艇）以及扫雷艇等船体结构用钢。舰船用钢的特点是批量小、规格多、要求高、更新慢。舰船用钢必须具有足够的强度和韧性、良好的工艺性及耐海水腐蚀性。世界各国对舰船用钢质量要求都非常严格，不但对其化学成分、力学性能有严格的规定，还规定必须进行生产过程质量控制等。

随着超纯净冶炼、微合金化和控制轧制与控制冷却等制造技术的发展，同时为了提高舰船用钢的焊接性能并降低焊接成本，20 世纪 80 年代美国率先提出了新一代 HSLA 舰船用钢的开发计划，经过与日本的钢企合作开展 TMCP 和快速冷却（AC）

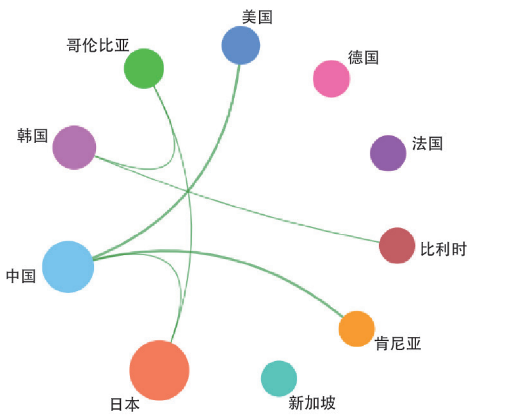

图 2.2.1 “基于固态锂电池与锂电容器技术的全天候‘功’‘能’兼备的电化学储能系统”工程开发前沿的主要国家间合作网络

工艺等工业试验，实现了 HSLA80 和 HSLA100 钢的工业化生产。20 世纪 90 年代初，为进一步满足新型航空母舰减轻重量和降低重心的需要，研制出了 HSLA65、HSLA115、HSLA130 钢并已分别应用于主壳体、飞机甲板及栈桥甲板、水面舰艇的关键结构部位。HSLA 船体钢是以低碳铁素体钢或超低碳贝氏体钢为基础发展起来的，与传统调质型船体钢相比，碳含量明显降低，具有优良的焊接性和良好的低温韧性，同时利用 Cu 元素时效处理，析出沉淀强化，弥补了降碳引起的强度损失，这类钢可以在 0 ℃焊接不预热，极大简化了造船工艺，代表了新一代船体结构钢的发展方向。世界其他先进国家也不断开发研制新的舰船用钢，俄罗斯研制出 1175 MPa 级的 AB 系列钢；日本研制出高强度 NS110，屈服强度达到 1078 MPa；法国开发的 HLES100 屈服强度达 980 MPa；英国和澳大利亚也研制了强度和韧性相当于美国 HY100 钢的低合金高强度钢。

新一代舰船用钢铁材料仍将高性能作为研发的主要方向，并注重提高钢材的总体性能，包括强度、塑形、韧性、抗爆性能、抗脆性破坏、耐海水腐蚀、抗疲劳特性等。船板用钢的规格、尺寸精度要求更高，需要钢材的成品质量进一步提高。表面质量要求高，不允许出现表面缺陷，表面氧化铁皮要致密均匀。注重高强度结构钢的成分设计，尤其是高强度结构钢的强化方式进行了大量的探索，在传统的合金化的基础上向纳米析出相沉淀强化方向发展，并完善相应的制备应用技术理论和方法。在追求高强韧性的同时，更加注重服役性能和焊接性能的均衡发展。

经过 30 年的发展，亚洲国家也开始注重这项技术的开发研究，尤其是中国近年军工舰船发展比较快，专利数量也快速增长。2014 年以来，“新一代舰船钢铁材料制造技术”核心专利主要产出国家 / 地区及机构分别见表 2.2.5 和表 2.2.6，主要国家 / 地区间的合作情况见图 2.2.2。从表 2.2.5 可以看出，本技术方向核心专利公开量排在前五名的国家分别为中国、日本、韩国、美国和德国。其中，中国核心专利的公开量占比为 40.67%，排名第 2 的日本核心专利公开量占比为 38.66%。被引专利数最多的国家是日本，达到 1374 次，被引数占比达到了 53.05%，遥遥领先于其他国家。法国和美国的专利平均被引数也排在世界前列。从表 2.2.6 可以看出，核心专利产出量排在前十的机构中，有 5 家中国企业、3 家日本企业、2 家韩国企业。这 10 家机构中，前 3 名均是日本企业。在“新一代舰船钢铁材料制造技术”工程开发研究方面，需要关注日本、美国、德国的研究动态，尤其是日本企业的研究动态。从图 2.2.2 可以看出，仅有德国和瑞典、德国和韩国之间开展了“新一代舰船钢铁材料制造技术”方面的合作。

表 2.2.5　“新一代舰船钢铁材料制造技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	242	40.67%	404	15.60%	1.67
2	日本	230	38.66%	1374	53.05%	5.97
3	韩国	40	6.72%	98	3.78%	2.45
4	美国	23	3.87%	231	8.92%	10.04
5	德国	17	2.86%	133	5.14%	7.82
6	俄罗斯	7	1.18%	3	0.12%	0.43
7	法国	6	1.01%	71	2.74%	11.83
8	英国	5	0.84%	5	0.19%	1.00
9	荷兰	3	0.50%	26	1.00%	8.67
10	瑞典	3	0.50%	21	0.81%	7.00

表 2.2.6　“新一代舰船钢铁材料制造技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	YAWA	日本	82	13.78%	582	22.47%	7.10
2	JFES	日本	74	12.44%	403	15.56%	5.45
3	KOBM	日本	50	8.40%	226	8.73%	4.52
4	BAOS	中国	22	3.70%	38	1.47%	1.73
5	POSC	韩国	17	2.86%	45	1.74%	2.65
6	FUXN	中国	12	2.02%	28	1.08%	2.33
7	ANSH	中国	12	2.02%	17	0.66%	1.42
8	HYMR	韩国	8	1.34%	29	1.12%	3.63
9	HBIS	中国	8	1.34%	4	0.15%	0.50
10	CHSB	中国	7	1.18%	3	0.12%	0.43

注：YAWA 表示 Nippon Steel & Sumikin Stainless Steel；JFES 表示 JFE Steel Corp；KOBM 表示 Kobe Seiko Sho KK；BAOS 表示宝山钢铁股份有限公司；POSC 表示 Posco Co., Ltd.；FUXN 表示南京钢铁集团有限公司；ANSH 表示鞍山钢铁集团有限公司；HYMR 表示 Hyundai Motor Co Ltd；HBIS 表示唐山钢铁集团有限责任公司；CHSB 表示中国船舶工业股份有限公司。

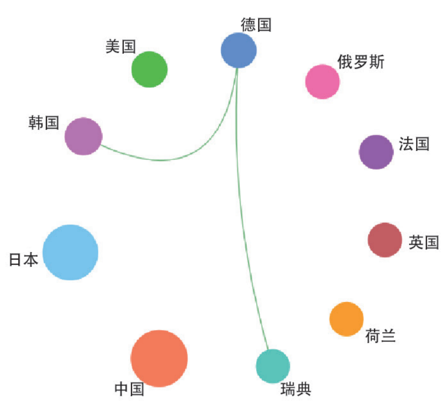

图 2.2.2　“新一代舰船钢铁材料制造技术”工程开发前沿的主要国家间合作网络

领域课题组人员

课题组组长 / 副组长：

组　长：王静康　刘炯天

副组长：

李言荣　刘中民　毛新平　聂祚仁　谭天伟

周　玉　屈凌波　元英进

课题组成员：

陈必强　邓　元　王　聪　闫裔超　杨治华

叶　茂　张会丽　李达鑫　王　静　王景涛

席晓丽　姚昌国　祝　薇　程路丽　高彦静

黄耀东　李艳妮　涂　璇　王爱红　张元晶

朱晓文

执笔组成员：

常　江　陈瑞润　李达鑫　祁　育　荣　倩

孙明月　孙　峙　汤新景　王　聪　王　强

王同敏　徐世美　闫裔超　姚昌国　钟云波

朱晓文　祝　薇

致谢人员：

中国宝武钢铁集团有限公司中央研究院

辜海芳　王　媛

北京航天航空大学

冯静静　韩广宇　王亚玲　张青青　周　杰

北京化工大学

马志勇　申　春　王　丹　王桂荣　王　萌

袁智勤

大连化学物理研究所

白　玉　高敦峰　胡雁鸣　李先锋　王　昱

章福祥

电子科技大学

李　颉　彭　波　齐静波　毕　磊　王显福

邬春阳

东北大学

刘　铁　王建峰　袁　双

哈尔滨工业大学

何培刚　贾德昌

四川大学

汪秀丽　王玉忠

天津大学

侯金健　乔建军

中南大学

田庆华

西北工业大学

王海鹏

昆明理工大学

张利波

重庆大学

吕学伟

四、能源与矿业工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 12 工程研究前沿发展态势

能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿涉及能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程4个学科方向（见表 1.1.1）。其中，新兴前沿包括可再生合成燃料、石油资源就地转化与高效利用研究、数字化反应堆及核电站智能化模拟研究；传统深入研究包括先进乏燃料后处理工艺研究、压裂裂缝诊断评估方法、地幔柱相关关键金属矿床研究、低浓度瓦斯安全直接燃烧利用理论与技术；颠覆性前沿是深地固体矿产资源流态化开采及其过程调控机制；融合交叉学科前沿包括智能钻井基础理论与方法、基于纳米相变材料的太阳能光伏 / 光热耦合系统、智能电网信息物理系统安全性研究、基于脉冲功率技术的 Z 箍缩驱动惯性约束聚变机理研究。

2014—2019 年各前沿相关的核心论文逐年发表情况见表 1.1.2。

（1）可再生合成燃料

随着能源安全与 CO_2 排放问题日益突出，可再生能源成为世界能源发展的必然趋势，也是各国应对能源短缺和气候变化、保持可持续发展的重要手段。近年来，风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源尽管获得快速发展，然而直接并网存在季节性、间歇性等不利因素，弃电问题依然突出，因此可再生能源的消纳与储能成为后续重点发展方向。可再生合成燃料是以风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源为主要能量供给，转化还原 CO_2 来合成稳定、可储存、高能量密度的碳氢燃料或醇醚燃料。这类燃料可用于内燃机、航空发动机、燃气轮机和发电机组，排出的 CO_2 再被捕集还原，理论上可实现“燃

表 1.1.1　能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	可再生合成燃料	87	14 388	165.38	2016.4
2	先进乏燃料后处理工艺研究	21	333	15.86	2016.0
3	石油资源就地转化与高效利用研究	10	579	57.90	2016.6
4	智能钻井基础理论与方法	44	257	5.84	2018.5
5	基于纳米相变材料的太阳能光伏 / 光热耦合系统	44	1753	39.84	2016.8
6	智能电网信息物理系统安全性研究	28	1182	42.21	2016.8
7	数字化反应堆及核电站智能化模拟研究	4	43	10.75	2016.2
8	基于脉冲功率技术的 Z 箍缩驱动惯性约束聚变机理研究	45	1433	31.84	2016.1
9	压裂裂缝诊断评估方法	98	3238	33.04	2016.0
10	地幔柱相关关键金属矿床研究	8	442	55.25	2015.4
11	低浓度瓦斯安全直接燃烧利用理论与技术	122	951	7.80	2017.5
12	深地固体矿产资源流态化开采及其过程调控机制	28	961	34.32	2016.2

表 1.1.2　能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	可再生合成燃料	0	26	23	20	14	4
2	先进乏燃料后处理工艺研究	0	9	5	5	2	0
3	石油资源就地转化与高效利用研究	0	2	2	4	2	0
4	智能钻井基础理论与方法	0	1	3	4	12	15
5	基于纳米相变材料的太阳能光伏 / 光热耦合系统	1	5	11	13	12	2
6	智能电网信息物理系统安全性研究	3	4	4	9	2	6
7	数字化反应堆及核电站智能化模拟研究	0	1	1	2	0	0
8	基于脉冲功率技术的 Z 箍缩驱动惯性约束聚变机理研究	0	17	14	8	5	1
9	压裂裂缝诊断评估方法	0	38	30	21	7	2
10	地幔柱相关关键金属矿床研究	2	3	1	2	0	0
11	低浓度瓦斯安全直接燃烧利用理论与技术	0	15	21	30	19	19
12	深地固体矿产资源流态化开采及其过程调控机制	0	9	8	9	0	2

料合成 – 燃烧 – 碳排放 – 燃料合成”的高效能源循环，即零碳排放。可再生合成燃料的技术路线有电催化还原 CO_2 制燃料、光催化还原 CO_2 制燃料、光电催化还原 CO_2 制燃料、化学还原等，进一步提高转化效率与产出率、丰富产物选择性是未来研究重点。

（2）先进乏燃料后处理工艺研究

全球面临能源生产与环境协调发展的重大挑战，节能减排形势严峻，核能作为清洁高效、可大规模应用的能源得到国际社会的高度重视。核能开发需要以核燃料为支撑，核能持续发展更需要通过后处理将核燃料循环利用起来，推动未燃尽燃料得到充分利用、新生成核燃料得以有效利用，其他有价核素得以广泛应用。核燃料从反应堆卸出后的各种处理过程称为核燃料循环后段，包括乏燃料中间贮存、核燃料后处理、回收燃料制备和再循环、放射性废物处理与最终处置。其中，核燃料后处理作为最为关键的环节，主要任务是采用化学处理方法分离乏燃料中的裂变产物，回收和纯化有价值的可裂变物质（如铀和钚），再将之制成燃料元件供核电站（热堆或快堆）使用；可提高核燃料的利用率，显著节约铀资源，也可提取超铀元素和裂变产物，拓宽同位素在医疗诊治、空间任务等方面的应用。乏燃料经过后处理，减少了放射性废物的毒性和体积，提高了最终地质处置的安全性，对于核能利用的可持续发展意义重大。核燃料后处理技术作为典型的军民两用技术，受到国际防核扩散机制的严格限制，反映了国家综合实力。

（3）石油资源就地转化与高效利用研究

综合热物理、热化学和材料学等多个学科的知识，突破高黏原油原位改质、油页岩原位转化等技术，在地下将低品位石油资源转化为高品位能源，大幅提升采收率或能源转化率，有效应对未来石油资源的结构性变化。稠油原位改质技术逐步由蒸汽吞吐向蒸汽驱、蒸汽辅助重力泄油（SAGD）、火驱转变，近年来发展的多介质蒸汽驱技术，旨在开发高活性和强普适性的催化剂体系，降低稠油改质降黏的反应温度，提高各类稠油的改质降黏效果。页岩油地下原位转化指利用水平井电加热轻质化方法，持续对富有机质页岩层段加热，使多类有机质发生轻质化转化的物理化学过程。这一技术突破将释放页岩油资源的开发利用潜力，促进原油长期稳

产甚至增产，推动石油资源就地转化与高效利用，实现商业化后对石油工业发展具有重大价值。

（4）智能钻井基础理论与方法

钻井是油气资源发现、探明和开采的关键环节，但现有钻井技术在经济、安全、高效、环保等方面无法满足复杂油气资源的开发需求，亟待发展新一代变革性钻井技术。目前将智能技术应用于油气勘探开发领域成为石油行业发展趋势，各国石油企业均积极布局油气勘探开发智能化战略。智能钻井指融合了大数据、人工智能（AI）、信息工程、井下控制工程等理论与技术的一项变革性技术，通过地面自动化钻机、井下智能执行机构、智能监控与决策的应用来实现钻井的超前探测、闭环调控、精准制导和智能决策，有望降低钻井成本并提高钻井效率和储层钻遇率，提升复杂油气藏单井产量和采收率。相关基础理论与方法方面主要涉及钻井环境智能表征、钻井工况智能感知、钻井方案智能决策、钻井参数智能调控。钻井环境智能表征可以精细刻画钻井环境工况、储层物性，是实现钻井智能监控、诊断、决策与调控的基础。钻井工况智能感知基于智能监测和数据传输技术，对地质－工程参数进行实时分析与采集，为钻井工程智能化提供动态数据支持。钻井方案智能决策是基于地质－工程数据的融合与处理，揭示钻速、成本、风险等目标函数与地质－工程参数之间的协同响应机制，支持实现工程参数和施工方案的优化与决策。钻井参数智能调控基于钻井参数之间的一体化协同机制，结合智能化控制理论，智能调控井眼轨迹、井筒压力、流体性能等钻井参数。

（5）基于纳米相变材料的太阳能光伏 / 光热耦合系统

根据光伏电池的温度特性，兼顾太阳能光伏发电和热能转换，在提高电池发电量的同时满足一定的热能生产需求，是已有太阳能转换利用效率最高的方法之一。在光伏 / 光热系统应用纳米相变材料，储能密度高、储放热速度快、可有效控制电池工作温度，成为太阳能高效规模化应用的重要方向。相关研究重点有：太阳能光伏电池电热联产微观机理及能量转换过程优化、新型太阳能光伏 / 光热组件及温度特性、纳米相变材料太阳能光伏 / 光热封装、纳米相变材料微观传热及储放热特性评价、基于纳米相变材料的光伏 / 光热耦合系统热电联产特性。纳米相变材料与光伏光热系统结合，是实现太阳能有序热电转换调节、提高能源效率的重要方向。发展集发电和供热于一体的高效太阳能光伏 / 光热组件及系统来满足建筑电热冷负荷需求，既是高效太阳能转换应用的趋势，又是未来低碳城市、绿色建筑、零能耗建筑重要的能源来源，将实现建筑能源有效调节和稳定供能。

（6）智能电网信息物理系统安全性研究

智能电网信息物理系统包括电力网络、信息网络、电网信息物理网络，依托广泛分布的智能传感器与通信网络来实现电网实时感知、动态控制与信息服务，进而优化电网运行状态。相关系统的安全问题分为虚拟信息网络安全、实体物理网络安全、两者耦合性风险。例如，攻击传感设备、注入虚假信息可达到攻击电网的不良目的，因此网络安全风险对电网正常运行构成潜在威胁。目前针对电网信息物理系统的安全性研究中，主要开展信息物理系统遭受的攻击类型、系统安全风险及脆弱性评估，建立网络安全测试平台来进行信息物理系统的安全性评估。信息物理系统中的安全风险具有动态传播的特征，在安全性评估的基础上，应深入研究传播与演化机理，提出先进的网络安全技术，强化信息网络的防御能力，控制安全风险传递，抵御网络攻击。未来可建设网络安全态势感知平台，识别风险事件并构建威胁传播网络，结合海量数据分析、态势预测技术，评估信息物理系统的安全态势，为实际生产环境下的智能电网信息物理系统安全防护提供可靠保障。

（7）数字化反应堆及核电站智能化模拟研究

依托高性能计算机系统，对反应堆运行工况进

行科学建模，研制高置信度的数值模拟软件系统，建立虚拟反应堆，为工程设计和性能优化、运行经济性 / 安全性 / 可靠性研究提供专家参考数据库。采用高保真数值方法和高精度模型，实现堆芯设计多物理场直接模拟，获得更精确的计算结果，从专业模型和专业间接口中释放设计裕量，提高设计方案的先进性和经济性，提升反应堆运行灵活性；优化试验项目与规模，缩短研发周期，降低试验成本；优化反应堆运行流程，提升核电在能源供应体系中的竞争力。构建集技术研发、工程设计、综合验证为一体的数字化设计体系，融入物联网、大数据、虚拟现实等智能技术，实现工程设计自动化、计算分析智能化、成果展示可视化，支持多专业、多项目、全流程协同的标准化数字化建造体系。围绕核电厂运行、维修、大修、退役、培训等业务场景，开展核电站运营中生产管理、配置管理、智能监测诊断与智能机器人等重点应用的研究；采用三维仿真和虚拟现实技术建设数字孪生电厂，映射核电厂全景空间与真实环境；建设覆盖核电站全生命周期的数据库，探索综合智慧核能，支持厂址内核能发电、核能供热、核能海水淡化、核能制氢等方面的智能化调度和智慧化管理。

（8）基于脉冲功率技术的 Z 箍缩驱动惯性约束聚变机理研究

可控核聚变能源被视为未来理想的清洁能源，作为主要技术途径的惯性约束聚变，将某种形式的能量直接或间接地加载到聚变靶上，压缩并加热聚变燃料，在内爆运动惯性约束下实现热核点火和燃烧。涉及的关键技术有：高功率、高重复频率、高稳定性的驱动源，内爆室和靶丸结构设计，点火方案优化设计，高效能量转换，氚循环和提取等。基于脉冲功率技术的快 Z 箍缩技术可实现驱动器电储能到 Z 箍缩负载动能或 X 射线辐射能的高效率能量转换，驱动器造价相对低廉、能量较为充足、可实现驱重频运行，将为驱动惯性约束聚变和惯性聚变能提供可用的能量源。作为复杂的多尺度多物理过程，聚变点火尚无法在现有的 Z 箍缩驱动惯性约束实验平台开展直接实验验证。数值模拟是研究 Z 箍缩驱动惯性约束核聚变物理问题的重要手段，未来将进一步发展和完善数值模拟工具，据此开展整体过程物理研究和关键问题研究。

（9）压裂裂缝诊断评估方法

裂缝是油气的主要储集和流通空间，水力压裂在低渗油气藏增产措施中占有很高比重，一直是提高油气采收率的主要方法。数十年来，在压裂裂缝的诊断评估方面尽管采用了压裂压力拟合、示踪剂、生产测井仪、微地震裂缝监测、微形变裂缝监测等方法，但仍难以掌握压裂裂缝的复杂形态，如长度、宽度、高度、导流能力分布等。准确掌握裂缝长度及其方位是低渗透率油田整体开发的重要工作，开展压裂裂缝的诊断评估方法研究，明确现今储层状况下的裂缝真实形态与参数是极为必要的。根据实际测试与理论评估的结果差别，调整水力压裂的设计准则，提高压裂模型计算的裂缝参数准确性，减少压裂投入，提高压裂改造效果；也有利于深化认识裂缝、校正裂缝预测模型，优化压裂设计及井网部署，实现油田和单井开发经济效益提升的目标。

（10）地幔柱相关关键金属矿床研究

地幔柱沟通地核、地幔、地壳各个圈层之间的物质与能量交换，为众多类型的关键金属成矿提供了长期、稳定的物质基础。一方面，由地幔柱形成的不同岩浆系列显示出特有的成矿专属性，如镁铁–超镁铁质层状岩体与钒钛磁铁矿（伴生钴、钪等），铜镍硫化物矿床（铂族元素），铬铁矿床，科马提岩与铜镍硫化物矿床，碱性岩–碳酸岩系列与铌–钽–锆–稀土矿床；另一方面，地幔柱产生的高热流驱动流体在地壳内大规模幕式运移和传输，使得地壳内金属元素活化、迁移和再富集，形成与地幔柱间接相关的矿床，如产在峨眉山大火成岩省与玄武岩伴生的锰钴矿、卡林型金矿、自然碲矿等。地幔柱形成关键金属矿床的关键控制因素有：地幔柱的结构、岩浆源区特征、结晶分异、

地壳混染和液态不混溶过程、深部岩浆补充与混合和岩浆侵位过程等。迄今为止，地幔柱关键金属成矿系统理论框架尚未建立，对关键控矿因素的认识仍待深化。我国发育两个二叠纪大火成岩省，相伴生的关键金属矿床种类多样且较为罕见，这为揭示地幔柱与关键金属成矿作用的关系、建立相关成矿系统理论提供了难得机遇。在以往单个矿床研究的基础上，着重开展地幔柱关键金属成矿序列研究，有助于建立完整的地幔柱相关关键金属矿床成矿系统理论。

（11）低浓度瓦斯安全直接燃烧利用理论与技术

瓦斯（主要成分为 CH_4）作为仅次于 CO_2 的第二大温室气体，排放量约占全球温室气体排放总量的 20%。大气中 CH_4 的浓度远低于 CO_2，但 CH_4 的温室潜能指数是等量 CO_2 的 25 倍。按照世界增温潜势计算，2018 年煤炭、石油能源行业的 CH_4 排放相当于 1.0×10^{10} t CO_2，能源行业 CH_4 减排对于保护环境具有重要意义。当前，低浓度（6%~30%）煤矿瓦斯的利用率仅约 28%，超低浓度（小于 6%）瓦斯（含通风瓦斯）的利用率仅为 2%，发展低浓度尤其是超低浓度瓦斯利用技术被视为关键措施。在超低浓度瓦斯及通风瓦斯燃烧（氧化）利用方面，各国开展了不同路线的蓄热氧化技术研究，如美国热逆流氧化技术，加拿大催化逆流氧化技术，澳大利亚催化燃气轮机技术，德国热再生氧化技术、整体蜂窝式催化氧化技术。然而，煤矿超低浓度瓦斯占比大（超过煤矿瓦斯排放总量的 70%）、浓度低、浓度波动大且跨爆炸界限范围、杂质种类（粉尘、水气、气体）多且含量高，实现爆炸性瓦斯气体的安全输送、杂质组分的高效脱除、超低浓度瓦斯高效直接燃烧（氧化）是相关工业应用亟待破解的关键课题。

（12）深地固体矿产资源流态化开采及其过程调控机制

针对深地固体资源开采“三高”特殊环境，将溶浸液经注液孔注入地下矿层，使溶浸液与目标矿物发生浸矿反应，可溶性金属离子进入溶液，经抽液孔提升至地表，经萃取 – 电积获得金属产品。这种方法革新现有模式，开采效率高，为深地固体资源的安全高效开采提供新路径。相关研究方向有：深地固体资源原位孔裂结构与有价矿物嵌布关联及深地开采环境透明化表征，深地高温高压条件下溶液多级渗流规律，多场耦合作用下金属矿物浸出反应机制，原位矿物溶蚀沉淀与孔裂结构演变的响应模型，深地固体矿产资源可浸性评价与过程预测模型，深地条件下溶液渗流调控及浸矿反应过程调控技术体系。未来研究重点内容包括深地流态化浸出过程多尺度孔裂结构无损探测，深地孔裂结构、溶液渗流与浸出反应关联耦合，深地流态化浸出井网布设与渗流智能控制等，聚焦发展以尽快实现深地固态资源流态化开采理论与装备水平的突破。

1.2　Top 4 工程研究前沿重点解读

1.2.1　可再生合成燃料

发展零碳和碳中性能源技术是全球可持续发展的必然要求。诺贝尔化学奖得主乔治·奥拉在《跨越油气时代：甲醇经济》（2006 年出版）中阐述了氢经济及其局限性，提出了利用可再生能源，将工业排放及自然界的 CO_2 转化为碳中性醇醚燃料的前瞻观点。2018 年，4 位中国科学院院士联合在《焦耳》杂志发文，提出人类要获取、储存及供给太阳能，关键在于如何将其转化为稳定、可储存、高能量的化学燃料。

可再生合成燃料的相关研究引起了众多国家关注。美国能源部 2009 年建立了 46 个能源前沿研究中心，其中支持了太阳能直接发电和转化为化学燃料的研究；2010 年在加利福尼亚州建立人工光合作用研究中心，集中力量开展（光）电催化水分解和 CO_2 固定方向的基础性科学研究，2020 年继续推进太阳能驱动 CO_2 还原至液体燃料的反应系统研

究。欧盟、韩国启动了 Energy-X、KCAP 等项目，探究以 CO_2 为介质的碳基能源循环利用。德国博世与欧洲应用经济研究中心发布报告，2050 年后欧洲将全面使用基于可再生能源的合成燃料，有望减少 CO_2 排放量 2.8×10^9 t（约为德国 CO_2 年排放量的 3 倍）。

中国科学技术协会发布了 2019 年度 20 个前沿科学问题和工程技术难题，“可再生合成燃料”位列其中，清华大学、中国科学技术大学、中国科学院大连化学物理研究所、上海交通大学为代表的国内科研院校长期致力于该研究领域。可再生合成燃料的技术路线有电催化还原 CO_2 制燃料、光催化还原 CO_2 制燃料、光电催化还原 CO_2 制燃料、化学还原等，但现有研究普遍处于实验探索阶段，多数制备方法距离产业化应用尚有一定差距；需要在反应机理、催化材料、反应器设计等层面进行深入探究，以提高转化效率、产物选择性与产出率。

“可再生合成燃料”工程研究前沿中，核心论文发表量排在前 3 位的国家是美国、中国、加拿大，篇均被引频次均超过 120 次（见表 1.2.1）。在发文量 Top 10 国家中，美国、中国、加拿大合作较多（见图 1.2.1）；核心论文发文量排在前列的机构是斯坦福大学和中国科学院（见表 1.2.2）。在发文量 Top 10 机构中，斯坦福大学与美国 SLAC 国家加速器实验室、多伦多大学，中国科学技术大学与中国科学院合作较多（见图 1.2.2）。施引核心论文量排在前 3 位的国家是中国、美国、日本（见表 1.2.3）。施引核心论文的主要产出机构是中国科学院、中国科学院大学、中国科学技术大学（见表 1.2.4）。

1.2.2 先进乏燃料后处理工艺研究

核燃料后处理流程按照是否在水介质中进行分为水法和干法两大类：前者指采用诸如沉淀、溶剂萃取、离子交换等在水溶液中进行的化学分离纯化过程，后者指采用诸如氟化挥发流程、高温冶金处理、高温化学处理、液态金属过程、熔盐电解流程等在无水状态下进行的化学分离方法。干法流程在处理高燃耗乏燃料，特别是快堆乏燃料方面具有优势，被视为下一代燃料循环的候选技术，但工程技术难度较大，后续仍需重点研究。

传统的乏燃料水法后处理（如 Purex 流程）应用广泛，研究方向为：针对核电站乏燃料的燃耗深、比放射性强、裂变产物含量高等特点，在确保高效分离铀、钚等关键元素基础上，力争分离高放核素，通过嬗变或者缩短放射性废物处理 / 处置容量及贮

表 1.2.1 “可再生合成燃料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	37	42.53%	6863	185.49	2016.7
2	中国	31	35.63%	6896	222.45	2016.6
3	加拿大	10	11.49%	1238	123.80	2017.3
4	日本	8	9.20%	1642	205.25	2015.1
5	韩国	7	8.05%	1044	149.14	2016.1
6	法国	6	6.90%	721	120.17	2015.8
7	荷兰	5	5.75%	1054	210.80	2015.2
8	沙特阿拉伯	4	4.60%	2011	502.75	2016.2
9	西班牙	3	3.45%	391	130.33	2015.7
10	德国	3	3.45%	277	92.33	2016.7

表 1.2.2 “可再生合成燃料”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	斯坦福大学	8	9.20%	1070	133.75	2017.4
2	中国科学院	6	6.90%	1314	219.00	2016.8
3	莱顿大学	5	5.75%	1054	210.80	2015.2
4	东京工业大学	5	5.75%	837	167.40	2015.2
5	美国 SLAC 国家加速器实验室	5	5.75%	604	120.80	2018.0
6	多伦多大学	5	5.75%	563	112.60	2017.6
7	中国科学技术大学	4	4.60%	1396	349.00	2015.8
8	美国布鲁克海文国家实验室	4	4.60%	1040	260.00	2016.0
9	特拉华大学	4	4.60%	643	160.75	2016.2
10	加利福尼亚大学伯克利分校	4	4.60%	394	98.50	2017.2

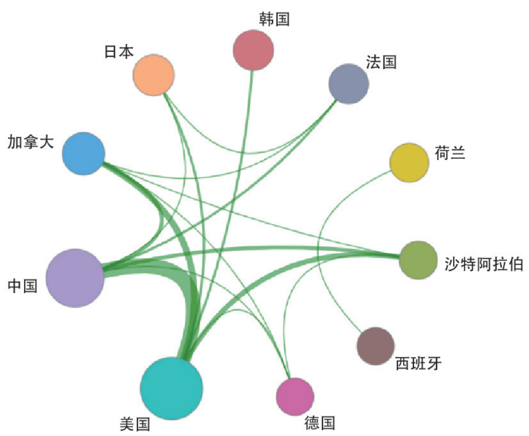

图 1.2.1 “可再生合成燃料”工程研究前沿主要国家间的合作网络

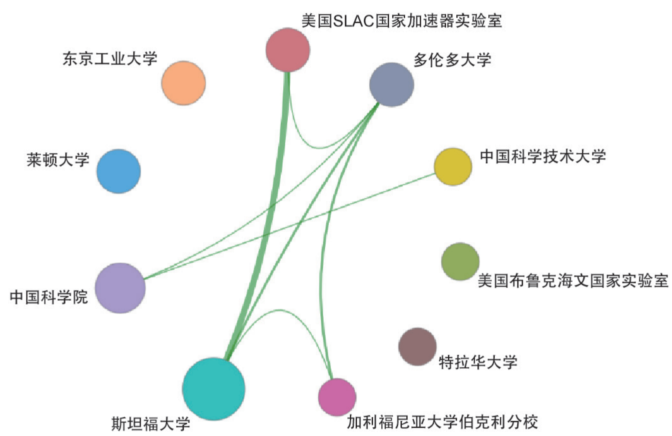

图 1.2.2 “可再生合成燃料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “可再生合成燃料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	4818	49.96%	2018.4
2	美国	1580	16.38%	2018.3
3	日本	523	5.42%	2018.1
4	德国	501	5.19%	2018.3
5	韩国	415	4.30%	2018.4
6	澳大利亚	392	4.06%	2018.5
7	加拿大	335	3.47%	2018.5
8	印度	326	3.38%	2018.4
9	英国	266	2.76%	2018.3
10	法国	253	2.62%	2018.3

表 1.2.4 “可再生合成燃料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	860	33.17%	2018.4
2	中国科学院大学	351	13.54%	2018.5
3	中国科学技术大学	239	9.22%	2018.4
4	天津大学	186	7.17%	2018.4
5	江苏大学	146	5.63%	2018.0
6	清华大学	140	5.40%	2018.4
7	北京化工大学	140	5.40%	2018.7
8	福州大学	138	5.32%	2018.0
9	南洋理工大学	137	5.28%	2018.4
10	武汉理工大学	132	5.09%	2017.9

存时间，实现更好的环境友好性；为适应未来热堆乏燃料后处理具有更高可靠性、安全性和经济性的要求，继续研发后处理的工艺、设备、控制手段，如改进 Purex 流程以简化工艺、降低费用，采用无盐试剂来减少废物产生量。法国阿海珐集团开发的 COEX 流程不产生纯钚产品，而产生钚 – 铀混合产品（铀含量为 20%~80%），有利于制造钚铀氧化物混合燃料。美国企业开发的 UREX+ 流程分离出铀、锝和碘，其余产品（包括钚）则进入高放废液开展进一步分离。分离 – 嬗变是实现核废物最少化的重要方式，首先要从乏燃料后处理产生的高放废物中将次锕系核素和长寿命裂变产物分离出来，再将其制成靶件，在嬗变器（快堆、加速器驱动次临界洁净核能系统）中进行嬗变，转化为短寿命或稳定的核素，降低高放废物的体积和长期毒性。俄罗斯重建和升级马雅克 RT-1 工厂，同时在 RT-2 工厂进行乏燃料的后处理。针对先进主工艺流程研发，中国原子能科学研究院基于“核燃料后处理放化实验设施”实验平台，于 2015 年成功完成先进工艺流程连续运行 100 h 热实验，获取工艺流程裂片净化、铀钚收率、铀钚分离等关键工艺指标，掌握工艺流程中镎、锝等关键元素的走向数据。针对高放废液分离工艺，清华大学完成 160 h 以上的 TRPO 流程台架热实验验证，具备中试条件，后续开展动力堆燃料后处理高放废液分离研究。近年来我国一些科研院所和高校完成不同分离技术的基础和应用研究，如锕系元素化学工艺、镎分离提取工艺、新锕镧分离和锶铯分离，针对钍基熔盐堆的干法后处理技术前期研究，电解精炼分离铀和稀土，离子液体分离稀土，超临界 CO_2 萃取分离铀等。

随着核燃料燃耗程度的进一步加深，乏燃料的放射性将更强，可能会导致水法后处理难以胜任。从增殖角度考虑，快堆目前采用的氧化物燃料可能会被氮化物或金属燃料等高密度燃料取代，针对高燃耗、高辐照和不同的核素构成，必须发展干法技术。作为“先进后处理”备选方法的干法分离流程成为国际性的发展趋势，目前美国、俄罗斯、日本、法国、印度、韩国等均积极开展相关研究。干法后处理作为一种高温化学过程，较有前景的方法是金属燃料和氧化物燃料的熔盐电解精炼法，相应优点是：采用的无机试剂具有良好的耐高温和耐辐照性能；工艺流程简单，设备结构紧凑，具有良好的经济性；试剂循环使用，废物产生量少；钚与次锕系核素一起回收，有利于防止核扩散。也要注意到，干法后处理的技术难度很大，如元件的强辐照要求

整个过程必须实现远距离操作，需要严格控制气氛以防水解和沉淀反应，结构材料必须具有良好的耐高温、耐辐照和耐腐蚀性能等。

“先进乏燃料后处理工艺研究”工程研究前沿中，发表核心论文数量排在前 5 名的国家是美国、英国、法国、德国、中国（见表 1.2.5）。核心论文产出数量较多的机构是法国原子能与可替代能源委员会、欧盟委员会联合研究中心、韩国原子能研究院（见表 1.2.6）。在发文量 Top 10 的国家中，法国、德国和英国合作频繁，中国和美国有所合作（见图 1.2.3）。在发文量 Top 10 机构中，法国原子能与可替代能源委员会和欧盟委员会联合研究中心、Cent Laboratory、德国尤里希研究中心、卡尔斯鲁厄理工学院，韩国原子能研究院和韩国科学技术联合大学院大学、韩国国立蔚山科学技术院等合作较多（见图 1.2.4）。施引核心论文的主要国家是美国、中国、印度、法国、德国（见表 1.2.7）。施引核心论文的主要机构是中国科学院、法国原子

表 1.2.5　“先进乏燃料后处理工艺研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	5	23.81%	92	18.40	2016.0
2	英国	4	19.05%	94	23.50	2016.2
3	法国	4	19.05%	78	19.50	2015.2
4	德国	4	19.05%	75	18.75	2016.5
5	中国	3	14.29%	67	22.33	2016.7
6	韩国	3	14.29%	39	13.00	2015.7
7	印度	3	14.29%	34	11.33	2016.7
8	日本	2	9.52%	29	14.50	2016.0
9	俄罗斯	1	4.76%	11	11.00	2015.0
10	西班牙	1	4.76%	11	11.00	2016.0

表 1.2.6　“先进乏燃料后处理工艺研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	法国原子能与可替代能源委员会	4	19.05%	78	19.50	2015.2
2	欧盟委员会联合研究中心	3	14.29%	61	20.33	2016.0
3	韩国原子能研究院	3	14.29%	39	13.00	2015.7
4	Cent Laboratory	2	9.52%	52	26.00	2015.5
5	德国尤里希研究中心	2	9.52%	52	26.00	2015.5
6	卡尔斯鲁厄理工学院	2	9.52%	52	26.00	2015.5
7	印度原子能部	2	9.52%	24	12.00	2017.0
8	犹他大学	2	9.52%	24	12.00	2015.5
9	韩国科学技术联合大学院大学	2	9.52%	23	11.50	2016.0
10	韩国国立蔚山科学技术院	2	9.52%	23	11.50	2016.0

能与可替代能源委员会、中国科技大学、东京大学、美国爱达荷国家实验室（见表 1.2.8）。

1.2.3 石油资源就地转化与高效利用研究

随着勘探开发程度的提高，石油资源品位劣质化趋势越发明显，百亿吨高含水老油田剩余油极度分散，百亿吨高黏原油的开发逼近效益极限，还有数百亿吨油页岩难以流动和采出，这些方面存在着资源高效利用的共性问题。综合热物理、热化学和材料学等多学科交叉方法，超前攻关高黏原油原位改质、油页岩原位转化技术，在地下将低品位资源

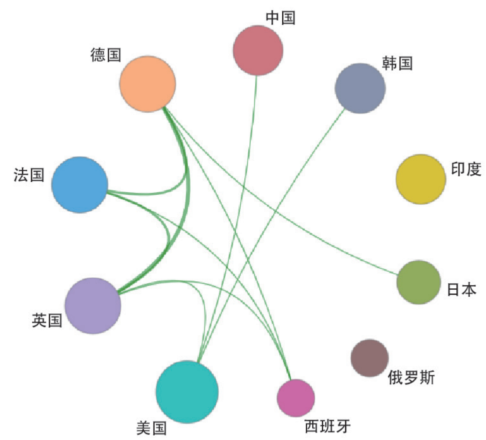

图 1.2.3 “先进乏燃料后处理工艺研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

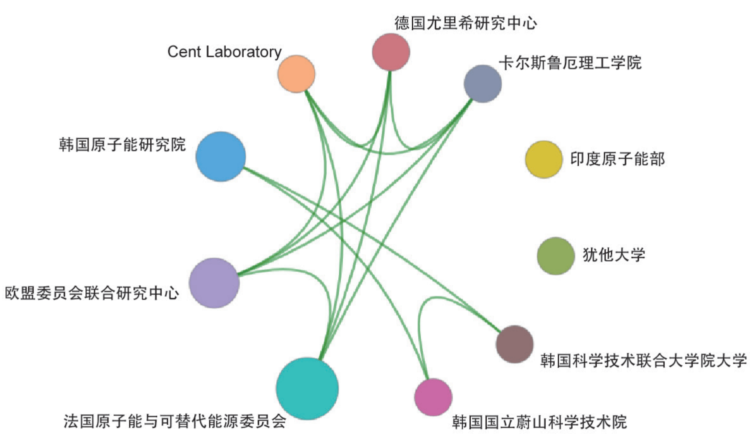

图 1.2.4 “先进乏燃料后处理工艺研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “先进乏燃料后处理工艺研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	78	21.91%	2018.5
2	中国	70	19.66%	2018.4
3	印度	38	10.67%	2018.4
4	法国	35	9.83%	2017.6
5	德国	31	8.71%	2017.9
6	日本	22	6.18%	2018.2
7	英国	22	6.18%	2017.9
8	俄罗斯	21	5.90%	2017.9
9	韩国	17	4.78%	2018.1
10	西班牙	15	4.21%	2018.1

表 1.2.8　“先进乏燃料后处理工艺研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	29	18.12%	2018.7
2	法国原子能与可替代能源委员会	17	10.62%	2017.0
3	中国科学院大学	17	10.62%	2018.7
4	东京大学	15	9.38%	2018.2
5	美国爱达荷国家实验室	15	9.38%	2018.2
6	印度巴巴原子研究中心	15	9.38%	2018.3
7	印度霍米巴巴国家研究所	14	8.75%	2018.5
8	印度英迪拉·甘地原子研究中心	13	8.12%	2018.2
9	华北电力大学	9	5.62%	2017.7
10	德国尤里希研究中心	9	5.62%	2017.6

转化为高品位能源，形成应对未来石油资源结构性变化的前沿技术体系，有望大幅提升原油采收率或能源转化率。

稠油原位改质技术由蒸汽吞吐朝着蒸汽驱、SAGD、火驱的技术方向发展，近年来又提出了多介质蒸汽驱技术，但高能耗、高成本等影响稠油油田开发效益的问题依然存在。进一步提高热效率、转变开发方式是关键，即开发高活性和强普适性催化剂体系，使稠油改质降黏反应在更低的温度条件下进行，同时针对不同品质的稠油均具有理想的改质降黏效果。

页岩油地下原位转化技术依托水平井电加热轻质化方法，持续对富有机质页岩层段加热，使多类有机质发生轻质化转化，如页岩中的滞留液态烃进一步热裂解形成轻质油和天然气、尚未转化的有机物发生人造热降解生成油气。相应技术突破将有效解放页岩油资源开发利用的巨大潜力，支撑我国原油长期稳产甚至上产。推动石油资源就地转化与高效利用，尽快实现商业化应用突破，对提高我国原油自给保障能力、引领石油工业未来发展都具有重要意义。

“石油资源就地转化与高效利用研究”工程前沿研究中，核心论文产出数量排在前例的国家是中国、美国、印度等（见表 1.2.9），相关机构主要是中国科学院、中国科学院大学、安那大学等（见表 1.2.10）。马来西亚和印度、加拿大和土耳其、美国和中国等国家之间具有较为紧密的合作关系（见图 1.2.5）；安那大学和马来西亚大学，嘉泉大学、韩国科学技术院和韩国能源研究所，中国科学院大学和中国科学院等机构之间交流合作密切（见图 1.2.6）。施引核心论文的主要国家是中国、美国、印度等（见表 1.2.11），相关机构主要是中国科学院、中国科学院大学、多伦多大学等（见表 1.2.12）。

1.2.4　智能钻井基础理论与方法

智能技术引领世界科技发展潮流，将智能技术应用于油气勘探开发领域成为石油行业发展趋势，国际各大石油公司均积极开展油气勘探开发智能化的战略布局。钻井是油气资源发现、探明和开采的关键环节，智能钻井技术融合大数据、AI、信息工程、井下控制工程等理论与技术，有望大幅度提高钻井效率和储层钻遇率，降低钻井成本，涉及多类基础理论与方法。

钻井环境智能表征用于钻井环境工况、储层物性的精细刻画，是实现钻井智能监控、诊断、决策与调控的基础。目前，挪威国家石油公司建

表 1.2.9 “石油资源就地转化与高效利用研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	3	30.00%	105	35.00	2017.0
2	美国	2	20.00%	68	34.00	2016.5
3	印度	1	10.00%	201	201.00	2016.0
4	马来西亚	1	10.00%	201	201.00	2016.0
5	韩国	1	10.00%	90	90.00	2015.0
6	德国	1	10.00%	49	49.00	2018.0
7	加拿大	1	10.00%	47	47.00	2017.0
8	土耳其	1	10.00%	47	47.00	2017.0
9	伊朗	1	10.00%	32	32.00	2015.0
10	西班牙	1	10.00%	28	28.00	2018.0

表 1.2.10 “石油资源就地转化与高效利用研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	2	20.00%	64	32.00	2017.0
2	中国科学院大学	2	20.00%	64	32.00	2017.0
3	安那大学	1	10.00%	201	201.00	2016.0
4	马来亚大学	1	10.00%	201	201.00	2016.0
5	嘉泉大学	1	10.00%	90	90.00	2015.0
6	韩国科学技术院	1	10.00%	90	90.00	2015.0
7	韩国能源研究所	1	10.00%	90	90.00	2015.0
8	德国马普协会	1	10.00%	49	49.00	2018.0
9	波鸿鲁尔大学	1	10.00%	49	49.00	2018.0
10	伊斯坦布尔科技大学	1	10.00%	47	47.00	2017.0

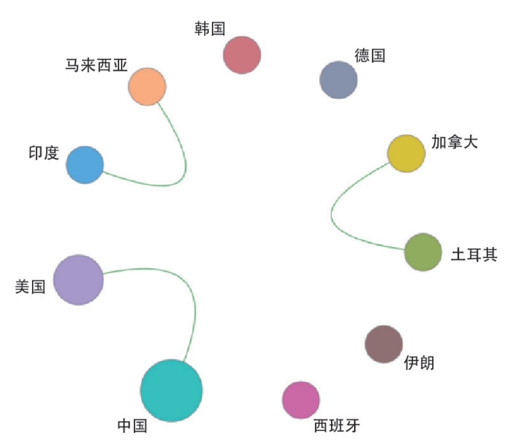

图 1.2.5 “石油资源就地转化与高效利用研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

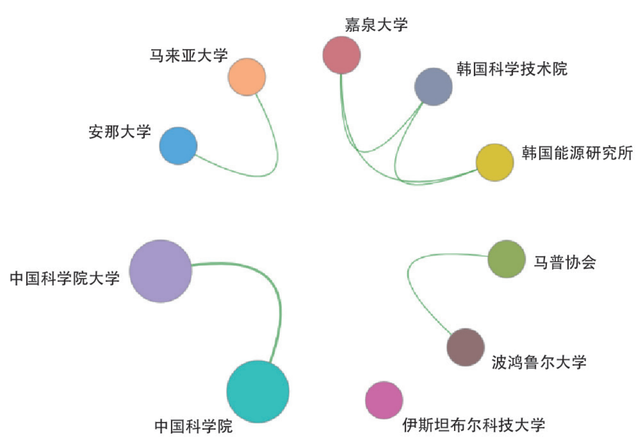

图 1.2.6 “石油资源就地转化与高效利用研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “石油资源就地转化与高效利用研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	199	38.72%	2018.8
2	美国	75	14.59%	2018.1
3	印度	37	7.20%	2018.5
4	韩国	35	6.81%	2017.8
5	加拿大	34	6.61%	2018.4
6	伊朗	29	5.64%	2018.1
7	西班牙	22	4.28%	2018.5
8	巴西	22	4.28%	2018.6
9	英国	21	4.09%	2017.9
10	日本	18	3.53%	2018.5

表 1.2.12 “石油资源就地转化与高效利用研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	59	32.24%	2018.8
2	中国科学院大学	39	21.31%	2018.7
3	多伦多大学	11	6.01%	2018.7
4	韩国科学技术院	10	5.46%	2016.9
5	厦门大学	10	5.46%	2018.9
6	郑州大学	9	4.92%	2019.4
7	大连理工大学	8	4.37%	2018.9
8	北卡罗来纳大学	8	4.37%	2016.9
9	德克萨斯 A&M 大学	8	4.37%	2017.6
10	哈尔滨工业大学	7	3.83%	2019.4

立了“虚拟井筒”，具有气侵和井涌的早期预警能力。中国石油化工集团公司通过 AVO 反演方法实现了岩石物性的直接表征。相关研究重点包括三维地质建模、钻井过程可视化、数字孪生仿真等。

钻井工况智能感知基于智能监测、AI 算法、数据传输，对地质 – 工程数据进行实时分析与采集并提供动态数据支持。沙特法赫德国王石油矿产大学采用神经网络方法开展了机械钻速高精度预测。东北石油大学利用改进的反向传播算法预测钻柱摩阻因数，消除钻柱个体差异的影响。相关研究趋势包括井下监测装置响应机理、井内风险自动诊断和预警理论等。

钻井方案对地质 – 工程数据进行智能化决策、融合和处理，为工程参数优化、施工方案决策提供支撑，最重要的目标函数是钻井效率、施工成本和钻井风险。沙特阿美石油公司实时分析了钻井参数随岩性变化的响应，通过梯度搜索等算法得到最优控制参数。中国石油集团工程技术研究院有限公司建立了钻头选型数据库，实现了基于地层信息的钻头优选。研究多源数据融合、地质 – 工程模型重构、钻井全工况智能协调控制策略，可推动钻井智能决策技术的发展。相关研究趋势包括海量数据双向高效实时传输、井下控制参数闭环优化理论等。

钻井参数智能调控应用钻井参数一体化协同机

制和智能化控制理论，对井眼轨迹、井筒压力、流体性能等钻井参数进行智能调控。美国哈利伯顿公司的压裂参数智能控制系统通过实时测量和自适应速率控制算法来智能调整泵速，实现了均匀压裂。钻井工程参数智能调控是实现智能钻井的关键环节，机械钻速、智能导向钻井、井筒稳定性等闭环调控是未来研究重点。

“智能钻井基础理论与方法”工程研究前沿中，核心论文发表量的优势国家是中国、伊朗、澳大利亚，其他国家核心论文比例均低于10%（见表1.2.13）；伊朗的核心论文被引频次最高，马来西亚的核心论文篇均被引频次最高。在核心论文产出机构方面（见表1.2.14），阿米尔卡比尔理工大学和西南石油大学的占比均超过10%；阿米尔卡比尔理工大学的核心论文被引频次最高，马来西亚理工大学的篇均被引频次最高。注重领域合作的国家有中国、伊朗、美国和澳大利亚（见图1.2.7），机构之间的合作研究集中在阿米尔卡比尔理工大学、德黑兰大学、伊朗石油科技大学、阿扎德大学、沙力夫理工大学（见图1.2.8）。施引核心论文产出数量的优势国家是中国、伊朗、越南，其中中国占比超过30%（见表1.2.15）；施引核心论文产出数量的优势机构是岘港维新大学、阿米尔卡比尔理工大学、马来西亚理工大学等（见表1.2.16）。

表 1.2.13 “智能钻井基础理论与方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	17	38.64%	66	3.88	2018.7
2	伊朗	15	34.09%	155	10.33	2018.1
3	澳大利亚	5	11.36%	31	6.20	2018.8
4	马来西亚	3	6.82%	45	15.00	2018.7
5	美国	3	6.82%	37	12.33	2019.3
6	沙特阿拉伯	2	4.55%	20	10.00	2018.5
7	法国	2	4.55%	18	9.00	2019.0
8	南非	2	4.55%	12	6.00	2018.5
9	英国	2	4.55%	11	5.50	2018.0
10	加拿大	2	4.55%	9	4.50	2019.5

表 1.2.14 “智能钻井基础理论与方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	阿米尔卡比尔理工大学	5	11.36%	79	15.80	2019.0
2	西南石油大学	5	11.36%	21	4.20	2018.8
3	德黑兰大学	4	9.09%	23	5.75	2017.5
4	伊朗石油科技大学	3	6.82%	43	14.33	2016.7
5	阿扎德大学	3	6.82%	26	8.67	2016.7
6	沙力夫理工大学	3	6.82%	21	7.00	2019.3
7	马来西亚理工大学	2	4.55%	38	19.00	2019.0
8	法赫德国王石油与矿业大学	2	4.55%	20	10.00	2018.5
9	千叶大学	2	4.55%	2	1.00	2019.0
10	中国地质大学	2	4.55%	2	1.00	2019.0

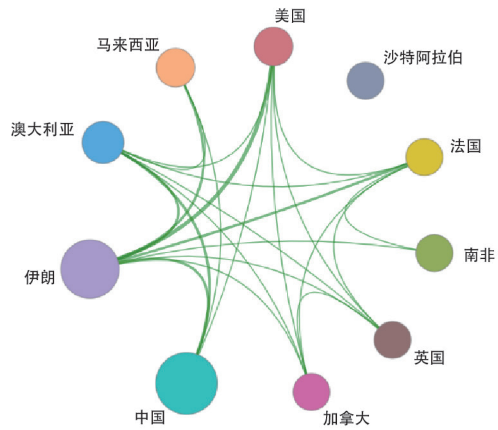

图 1.2.7　“智能钻井基础理论与方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

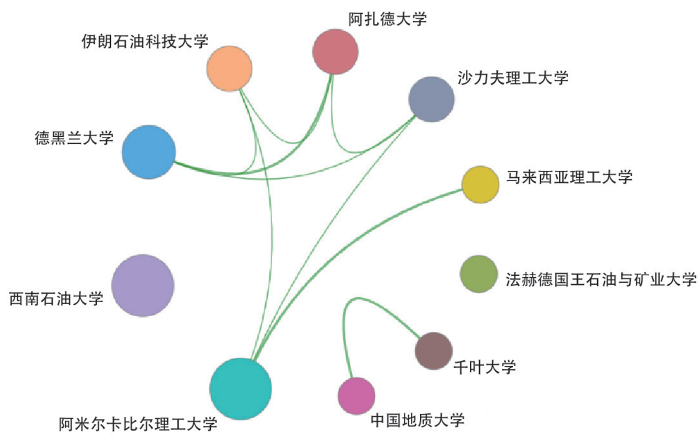

图 1.2.8　“智能钻井基础理论与方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.15　“智能钻井基础理论与方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	158	31.29%	2018.9
2	伊朗	98	19.41%	2018.8
3	越南	70	13.86%	2018.9
4	马来西亚	48	9.50%	2019.0
5	美国	36	7.13%	2019.2
6	沙特阿拉伯	32	6.34%	2019.3
7	英国	17	3.37%	2018.9
8	澳大利亚	16	3.17%	2018.9
9	加拿大	11	2.18%	2018.3
10	希腊	10	1.98%	2019.1

表 1.2.16 “智能钻井基础理论与方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	岘港维新大学	55	17.57%	2018.8
2	阿米尔卡比尔理工大学	47	15.02%	2018.8
3	马来西亚理工大学	42	13.42%	2019.0
4	孙德盛大学	36	11.50%	2019.2
5	中南大学	31	9.90%	2019.0
6	阿扎德大学	25	7.99%	2018.8
7	法赫德国王石油与矿业大学	24	7.67%	2019.4
8	西南石油大学	17	5.43%	2018.9
9	中国石油大学（华东）	16	5.11%	2018.7
10	沙尔鲁德理工大学	10	3.19%	2018.8

2 工程开发前沿

2.1 Top 12 工程开发前沿发展态势

能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿涉及能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程等学科方向（见表 2.1.1）。其中，新兴前沿包括三维立体对地勘查成像系统、高比例可再生能源未来电网关键技术；传统深入研究包括可控核聚变实验堆工程化关键技术、乏燃料后处理和核燃料循环、核电池系统和应用、基于压缩感知的地震数据采集和处理技术、深地开采过程多尺度孔裂结构无扰动探测系统；高能量密度、长寿命、界面可控全固态锂电池是颠覆性前沿；融合交叉学科前沿包括电动汽车与智能电网耦合关键技术、煤矿灾害智能监测预警信息采集系统、固体矿产资源立体找矿技术、油气智能钻井系统与工具研发。各个开发前沿涉及的核心专利 2014—2019 年公开情况见表 2.1.2。

（1）电动汽车与智能电网耦合关键技术

电动汽车采用动力电池和电机取代传统燃油汽车的动力系统，大规模应用可有效减少石油资源的消耗量、降低城市环境污染。电动汽车充电负荷具有一定的可调控性，可作为移动储能资源为智能电网提供支持。电动汽车与智能电网耦合，能够显著降低大规模电动汽车充电负荷对电网的冲击，降低电网投资和运行成本，提升智能电网消纳可再生能源发电的能力。主要技术研究方向包括：电动汽车一体化智能充（放）电设备与电站集成技术，考虑交通与电网融合的电动汽车充放电设施优化布局与评估技术，大规模电动汽车有序充电调控技术与电网安全智能管理，电动汽车与电网互动（V2G）的商业模型、通讯与数据安全防护、调度控制技术，基于数据挖掘与 AI 的大规模电动汽车充电行为分析与充电引导技术，电动汽车动力电池的梯次利用技术等。随着电动汽车保有量的快速增长，电动汽车充电运营商和电动汽车用户将通过智能充放电设施实现有序充电和 V2G，参与智能电网运行优化和电力市场竞争，为智能电网带来可观的调控资源。

（2）可控核聚变实验堆工程化关键技术

聚变能源具有清洁、安全、资源丰富等特点，被视为最可能从根本上解决未来能源需求的理想能源。世界聚变试验装置研究结果表明，基于超导托卡马克的磁约束聚变能开发利用具有充分的科学可行性；国际热核聚变实验堆（ITER）和中国聚变工程试验堆（CFETR）都采用了托卡马克技术路线。2020 年 7 月 ITER 装置启动安装，计划于 2025 年

表 2.1.1 能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	电动汽车与智能电网耦合关键技术	59	4228	71.66	2014.7
2	可控核聚变实验堆工程化关键技术	29	113	3.9	2016.7
3	三维立体对地勘查成像系统	35	400	11.43	2016.0
4	煤矿灾害智能监测预警信息采集系统	271	5438	20.07	2015.7
5	高比例可再生能源未来电网关键技术	473	1933	4.09	2016.6
6	高能量密度、长寿命、界面可控全固态锂电池	65	357	5.49	2016.8
7	乏燃料后处理和核燃料循环	56	118	2.11	2015.8
8	核电池系统和应用	139	1008	7.25	2015.9
9	固体矿产资源立体找矿技术	62	690	11.13	2016.0
10	基于压缩感知的地震数据采集和处理技术	224	2158	9.63	2015.7
11	油气智能钻井系统与工具研发	201	3836	19.08	2015.3
12	深地开采过程多尺度孔裂结构无扰动探测系统	352	5338	15.16	2015.7

表 2.1.2 能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	电动汽车与智能电网耦合关键技术	9	3	3	15	6	4
2	可控核聚变实验堆工程化关键技术	1	5	6	0	5	9
3	三维立体对地勘查成像系统	6	9	10	3	4	3
4	煤矿灾害智能监测预警信息采集系统	59	76	54	47	33	2
5	高比例可再生能源未来电网关键技术	35	33	50	107	84	113
6	高能量密度、长寿命、界面可控全固态锂电池	10	5	4	8	15	20
7	乏燃料后处理和核燃料循环	1	5	7	6	12	9
8	核电池系统和应用	7	18	18	23	27	22
9	固体矿产资源立体找矿技术	10	14	15	13	10	0
10	基于压缩感知的地震数据采集和处理技术	70	42	40	35	36	1
11	油气智能钻井系统与工具研发	84	46	30	17	23	1
12	深地开采过程多尺度孔裂结构无扰动探测系统	81	95	65	59	51	1

进行首次等离子体放电，代表了托卡马克装置的最新进展。我国继续执行 ITER 国际合作计划，力争消化吸收并掌握聚变实验堆技术。作为 ITER 与聚变示范堆之间的桥梁，我国正在自主设计和发展 CFETR。这些措施将使我国可控核聚变实验堆工程化关键技术进入国际研究前列。

（3）三维立体对地勘查成像系统

利用空间技术和地面勘查技术获取包含时空信息的勘查大数据，进而以三维立体图像方式呈现勘查大数据。对地观测大数据包含“从天到地”的多个层次，涵盖卫星遥感、卫星地球物理、航空物探、航空遥感、地面红外光谱、地面地球化学、地面物探等途径。通过计算机技术来呈现对地观测大数据（时空坐标），为地质勘查基础地质问题、矿产资源勘查与评价问题的研究提供依据。该方法在对地质勘查中应用对地观测大数据，体

现了数据的优选和整合过程；以三维立体成像方式显示对地勘查的成果，便于各类用户深入分析和使用。具有时间流的三维时空对地观测大数据系统是后续建设重点，能够追溯过去、分析现状，把握地质演变规律，为国土地质安全和国家资源能源安全提供重要支撑。

（4）煤矿灾害智能监测预警信息采集系统

系统用于对煤矿井下危险源进行可靠监测和预警，是煤矿企业安全生产和工人安全的重要保障，包括监测网络、预警系统、数据采集与处理 3 个模块，重点监测瓦斯、矿压和顶板、煤尘、水、火。技术发展趋势表现为：建立煤矿物联网，打造数字化、智能化矿山，智能感知重大危险源，准确预警；提供统一框架和数据标准格式；通过数据融合、数据挖掘、预测模型和空间分析，实现矿山安全隐患的识别预警与智能控制。

（5）高比例可再生能源未来电网关键技术

以化石能源为主的电网系统难以兼顾生态文明建设和未来经济增长。构建以高比例可再生能源为主要特征的新型电网，形成以风能、太阳能、水能等可再生能源为主的能源消费模式，已是大势所趋。未来电网面临的重大理论和技术挑战在于可再生能源存在波动性、间歇性和不确定性。为了提高电网消纳可再生能源能力，提升电力系统规划的灵活性与适应性，支持实现能源结构清洁化转型，主要技术研究方向包括：具有高比例电力系统灵活性的概率化理论体系、电力电子化电力系统稳定性分析理论、配电系统安全边界基础理论与规划方法、电网全景运行模拟及交直流输电网规划方法、交直流混联系统高效优化运行方法等。未来还可进一步细化研究场景，如送端高比例及受端高比例可再生能源并网、极高比例可再生能源并网等场景。鉴于新型可再生能源发电及储能技术可能对未来电力系统形态产生重要影响，太阳能光热发电技术和储能技术研究也是潜在的重大研究方向。

（6）高能量密度、长寿命、界面可控全固态锂电池

锂电池应用广泛，然而采用的易燃液态 / 凝胶电解质带来了使用安全隐患。全固态锂电池采用固态电解质替代液态电解液，可根本性消除或缓解使用安全性问题，并且具有应用高能量密度锂金属负极或硫 / 氧气正极材料的可能性，目前获得学术界和产业界的高度关注。固态电解质主要分为无机固态电解质、聚合物电解质和塑性晶体电解质。无机固态电解质（尤其是硫化物系电解质）在离子电导率方面已经达到与液态相当的水平，但界面阻抗大、稳定性差，制约了实际应用；聚合物系电解质发展较早，但离子电导率仍然偏低；塑性晶体电解质具有较高的离子电导率，可一定程度上改善电极 / 电解质界面，颇具应用前景。塑性晶体电解质和聚合物电解质是短期应用方向，而无机电解质则是终级应用目标。以聚合物为骨架，利用塑性晶体与高浓度的锂盐能够液化的特性来制备聚合物塑性晶体复合电解质；通过调整界面层锂盐的浓度，有望在保障电导率的同时，高效调控界面，进而开发出高能量密度、长寿命的固态电池。

（7）乏燃料后处理和核燃料循环

核燃料循环主要分为 3 个环节：核燃料使用前的工业过程，涉及铀（钍）矿开采、加工冶炼、浓缩和核燃料组件加工制造；燃料在反应堆中使用，获取核能或生产新的易裂变核素；对从反应堆卸出后的核燃料（乏燃料）的处理和处置过程，涉及乏燃料中间贮存和后处理、放射性废物处理、最终处置等。反应堆是核燃料循环的中心环节，快堆是核能发展的下一代优选堆型。在快堆中，易裂变核燃料消耗产生能量，不断地将更多的铀 –238 转换成钚 –239 来实现核材料的增殖；可以焚烧和嬗变压水堆乏燃料中的长寿命高放废物，显著降低高放废物长期地质贮存的环境风险。乏燃料后处理是核燃料循环后段的核心，包括对核电站卸出的乏燃料元件进行处理，分离和回收未烧尽的铀和新生成的钚，

对放射性废物进行处理以满足处置要求。水法萃取流程是目前唯一经济实用的后处理流程，如常用的Purex流程可以回收核燃料、除去裂变产物。干法后处理在高燃耗乏燃料，特别是快堆乏燃料处理方面具有一定优势，成为当前重要研究方向。

（8）核电池系统和应用

核电池系统（放射性同位素电源）将放射性同位素衰变过程中产生的能量转化为电能，具有工作寿命长、环境适应性好（无光、极寒、高压）、能量密度大、可靠性高、寿命期内免维护等优点，在空间探测、陆地极端环境地区监测、深海监控等领域具有广泛用途，成为开展深空探测、深远海布控等任务的关键技术。目前技术成熟、应用范围较广的是温差型核电池系统，相应技术研究方向集中在放射性同位素原料生产、模块化热源研制、高效温差电转换、热源安全性试验与评价、电源可靠性试验与评价等。放射性同位素原料是核电池系统研制、生产及应用的前提和基础，开发新型高效温差电转换材料体系和转换装置一直是温差型核电池系统的研究热点；不同壳层材料对电池内部热传导、热源安全性、电源可靠性等具有决定性影响，应在关键材料、结构设计、制备工艺等方面进行攻关。开发大功率高效温差型核电池系统一直是发展重点，主要途径有提高温差电转换装置效率，完善高效转换技术（如斯特林转换、热光电转换）成熟度。

（9）固体矿产资源立体找矿技术

采用卫星遥感、无人机高光谱、航空物探、地面和岩芯红外光谱、地面物探和化探、浅钻等现代化勘查手段，构建“天－空－地”一体化、快速高效的立体找矿技术，加快实施固体矿产找矿勘查的现代化变革。结合现代矿床学理论与现代化勘察手段，实现“天－空－地”技术融合应用，根据卫星遥感和地球物理信息来选定重要勘查区，在勘查区中利用无人机技术优选找矿靶区，在靶区中通过红外光谱、地面物探和化探来确定钻孔位置，利用浅钻技术进行验证，由此构建快速高效的矿产资源找矿评价技术体系。未来有望发展成为集合通信、AI、地物化遥综合找矿等多种技术于一体的智能化自动化找矿技术。

（10）基于压缩感知的地震数据采集和处理技术

传统地震数据采集和处理是基于规则采样的傅里叶变换，并不能对信息缺失严重的数据重构出理想的结果，同时还要满足采样率的要求，给实际生产增加了很大难度。压缩感知是一种基于信号稀疏性的非规则采样理论，基于压缩感知的地震数据采集和处理技术将实际工作中地震数据的采集和数据处理中的压缩有效结合；地震数据的采集点可以根据采样矩阵的设计进行灵活布置，突破了传统采样频率的限制，同时利用地震信号的稀疏特性，实现缺失数据的重构，显著降低了采样成本和时间、提升了工作效率，为高密度地震勘探的大规模实施提供了可行途径。利用压缩感知技术采集地震数据，大幅降低野外数据采集的工作量并节约成本支出，而且能够经由感知的方法恢复和重建高精度数据，完成勘探地质任务。未来重点开展基于压缩感知理论的相关方法推广应用，切实提升实际生产效率，并针对实际应用问题进行完善和改进。

（11）油气智能钻井系统与工具研发

油气智能钻井结合大数据、AI、井下控制工程等理论与方法，引入地面自动化钻机、井下智能执行机构装置、智能钻完井液、智能监控与决策系统，实现油气钻完井的超前探测、闭环调控、精准制导、智能决策；主要由智能地面装备、智能井下工具、智能完井压裂装备、智能钻完井一体化系统平台等组成。智能地面设备有效降低人力投入、提高钻井效率、降低钻井风险与成本，未来发展涉及自动化钻机、一体化司钻控制系统、钻台机器人、智能控压系统等。智能化井下工具为智能破岩、井下数据实时获取、数据高效传输、钻井精确制导和闭环调控等提供技术支持，未来发展重点包括智能钻头、智能钻杆、智能导向钻井系统、智能传感器、井下微芯片等。智能化完井压裂装备使得无限级压裂和

油气智能开发成为可能，未来发展重点包括无限级智能压裂装置、井下温压监测调控装置、无线通信智能压裂套管、井下生产动态监测系统等。智能钻完井一体化系统平台具有钻井工程智能监控、诊断与决策等功能，未来发展重点包括钻井数据管理系统、钻井数字孪生仿真系统、专家分析决策系统、远程作业支持系统等。

（12）深地开采过程多尺度孔裂结构无扰动探测系统

针对深地开采面临的高地应力、高渗透压、高温、强开采扰动的复杂环境，综合采用多类无扰动探测技术，开展深地矿岩孔裂结构精细化动态表征、可视化探测与灾变超前预警，保障深地开采作业的效率和安全。主要技术研究方向包括：深地矿岩结构动态精细表征理论，深部高应力积聚区实时精准定位与辨识方法，多采场区域孔裂精准定位与辨识模型，深地采动载荷下孔裂时域与频域无扰动识别，基于三维聚焦反演技术的矿层结构智能识别、深地矿岩智能化辨析与探测数据库。未来发展重点包括深地矿岩原位保真取芯与结构探测、深地孔裂结构与开采过程透明推演理论与技术、深地采动应力下多尺度孔裂结构动态无扰动探测方法、深地非常规岩石力学行为探测与表征等，将为我国深地矿产资源开采结构与过程透明提供更好的硬件支撑条件。

2.2　Top 4 工程开发前沿重点解读

2.2.1　电动汽车与智能电网耦合关键技术

电动汽车与智能电网耦合被认为是影响和推动电动汽车和智能电网发展的关键因素，在显著降低大规模电动汽车充电负荷对电网冲击的同时，降低电网投资和运行成本并提升智能电网消纳可再生能源发电的能力。

2019 年全球新能源汽车共售出约 2.2×10^6 辆（同比增长 10%），市场份额从 2.1% 提升至 2.5%；销售量中纯电动汽车占比为 74%（同比增长 5%），插电式混合动力汽车占比 26%（同比下降 5%）。2019 年中国新能源汽车产销分别完成 1.242×10^6 辆和 1.206×10^6 辆，其中纯电动汽车产销量分别为 1.02×10^6 辆和 9.72×10^5 辆，插电式混合动力汽车的产销量分别为 2.2×10^5 辆和 2.32×10^5 辆。根据预测，2020 年全国新能源汽车销量将过 2.0×10^6 辆，2025 年销量约为 8.07×10^6 辆。根据国际能源署数据，2019 年全球电动车公共充电点数量增长了 60%，超过电动车销量，其中 60% 的增长来自中国。2019 年中国公共充电桩和私人充电桩总计保有量为 1.219×10^6 台，同比增长 50.8%。

目前，本方向的核心专利产出数量较多的国家是美国、德国、日本，其中美国的占比达到 66.1%，德国和日本的占比分别为 10.17% 和 8.47%（见表 2.2.1）；核心专利产出数量较多的机构均来自美国，主要是蔚来美国公司、高通公司和 Witricity Corp.（见表 2.2.2）。注重领域合作的国家有德国、韩国、瑞士，其中德国开展的合作最多（见图 2.2.1）。相关机构中 Witricity Corp. 分别和高通公司、Delta Electronics Inc.，Better Place GmbH 和雷诺公司有较强的合作关系（见图 2.2.2）。

2.2.2　可控核聚变实验堆工程化关键技术

相比当前使用以及正在开发的清洁能源，聚变核能由于安全性、经济性、持久性和环境友好性的优点，被视为未来理想的战略能源。磁约束核聚变利用特殊形态的磁场，将氘、氚等轻原子核和自由电子组成并处于热核反应状态的超高温等离子体约束在有限的体积内，使其受控制地发生原子核聚变反应，释放出大量能量。世界磁约束核聚变装置主要有托卡马克、仿星器、反场箍缩 3 种类型，其中托卡马克型因更容易接近聚变条件而进展最快。

近年来，可控核聚变研究领域取得了重大阶段性进展。ITER 计划由欧盟、中国、韩国、俄罗斯、日本、印度和美国合作承担，将集成全球受控磁约束核聚变领域研究的主要成果，首次实现能与未来

表 2.2.1　“电动汽车与智能电网耦合关键技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	美国	39	66.10%	3684	87.13%	94.46
2	德国	6	10.17%	114	2.70%	19.00
3	日本	5	8.47%	124	2.93%	24.80
4	新西兰	3	5.08%	188	4.45%	62.67
5	瑞士	2	3.39%	113	2.67%	56.50
6	中国	2	3.39%	26	0.61%	13.00
7	韩国	1	1.69%	18	0.43%	18.00
8	瑞典	1	1.69%	10	0.24%	10.00
9	法国	1	1.69%	8	0.19%	8.00
10	英国	1	1.69%	3	0.07%	3.00

表 2.2.2　“电动汽车与智能电网耦合关键技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	蔚来美国公司	美国	19	32.20%	148	3.50%	7.79
2	高通公司	美国	7	11.86%	770	18.21%	110.00
3	Witricity Corp.	美国	5	8.47%	2789	65.96%	557.80
4	Auckland Uniservices Ltd.	新西兰	3	5.08%	188	4.45%	62.67
5	Better Place GmbH	瑞士	2	3.39%	344	8.14%	172.00
6	通用汽车公司	美国	2	3.39%	65	1.54%	32.50
7	丰田汽车公司	日本	2	3.39%	60	1.42%	30.00
8	日产汽车公司	日本	2	3.39%	31	0.73%	15.50
9	Delta Electronics Inc.	美国	1	1.69%	2086	49.34%	2086.00
10	雷诺公司	法国	1	1.69%	271	6.41%	271.00

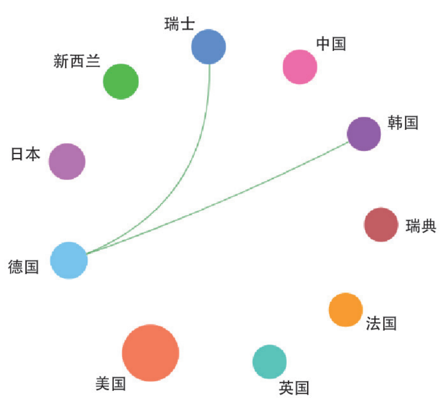

图 2.2.1　“电动汽车与智能电网耦合关键技术”工程开发前沿的主要国家间合作网络

实用聚变堆规模相比拟的受控热核聚变实验堆，探索通向聚变电站的关键技术问题。ITER 计划的稳步推进，将全面验证聚变能源开发利用的科学可行性和工程可行性，是全球受控热核聚变研究走向实用的关键一步。此外，美国、日本、欧盟、韩国等均制定了各自的聚变能源发展路线，谋划建设和发展自有的下一代装置。我国积极参加 ITER 的建设和实验，支持国内配套的物理和工程技术研究，力争自主设计以获取聚变能源为目标的 CFETR。目前 CFETR 完成了物理和工程概念设计，将适时启动全面建设。

目前，本方向的核心专利产出数量较多的国家是英国、中国、美国，其中英国、中国的核心专利占比均达到 37.93%（见表 2.2.3）；核心专利产出数量较多的机构是托卡马克能源有限公司、中国科学院合肥物质科学研究院、中国核工业集团有限公司（见表2.2.4）。注重领域合作的机构有中国核工业集团有限公司与北京利方达真空技术有限责任公司、Advanced Research Corp. 与西弗吉尼亚大学（见图2.2.3）。

2.2.3 三维立体对地勘查成像系统

三维立体成像技术起源于光学，伴随着计算机三维可视化建模技术而出现，得益于计算机图形学和图像处理技术的进步而快速发展。“天–空–地”多层次立体对地勘查成像系统逐步走向应用，依赖于成熟的空天遥感和地面勘查技术，卫星遥感、卫星地球物理、航空物探、航空遥感、地面红外光谱、地面地球化学、地面物探方面的数据快速获取能力。

20 世纪 50 年代，美国国家航空航天局利用雷达测量技术建立了全球三维高程模型。目前，谷歌公司基于基础卫星遥感影像和三维高程模型建立了全球三维地图，已经成为许多行业应用的重要基础。2017 年成立的中国科学院空天信息创新研究院是我国的优势空天技术研究机构。2019 年我国高分七号卫星发射入轨，具有绘制大比例尺三维立体图能力，2020 年 3 月成功获取了珠穆朗玛峰三维立体图。各国高度重视三维立体成像系统的发展，也纷纷开展了合作应用研究。航空物探在立体成像方面取得很大成就，成为三维立体勘查成像系统的基

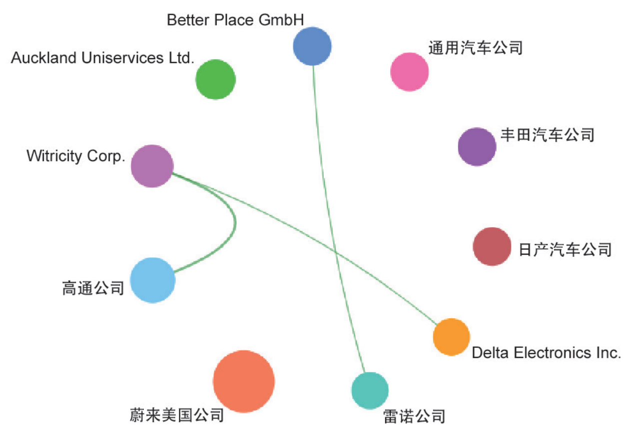

图 2.2.2 “电动汽车与智能电网耦合关键技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

表 2.2.3 “可控核聚变实验堆工程化关键技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	英国	11	37.93%	91	80.53%	8.27
2	中国	11	37.93%	10	8.85%	0.91
3	美国	2	6.90%	4	3.54%	2.00
4	韩国	2	6.90%	1	0.88%	0.50
5	俄罗斯	2	6.90%	1	0.88%	0.50
6	日本	1	3.45%	6	5.31%	6.00

表 2.2.4 “可控核聚变实验堆工程化关键技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	托卡马克能源有限公司	英国	11	37.93%	91	80.53%	8.27
2	中国科学院合肥物质科学研究院	中国	4	13.79%	2	1.77%	0.50
3	中国核工业集团有限公司	中国	2	6.90%	0	0.00%	0.00
4	日本原子能机构	日本	1	3.45%	6	5.31%	6.00
5	Advanced Research Corp.	美国	1	3.45%	3	2.65%	3.00
6	西弗吉尼亚大学	美国	1	3.45%	3	2.65%	3.00
7	中国科学院大连化学物理研究所	中国	1	3.45%	2	1.77%	2.00
8	首尔大学 R&DB 基金会	韩国	1	3.45%	1	0.88%	1.00
9	全俄自动化研究所	俄罗斯	1	3.45%	0	0.00%	0.00
10	北京利方达真空技术有限责任公司	中国	1	3.45%	0	0.00%	0.00

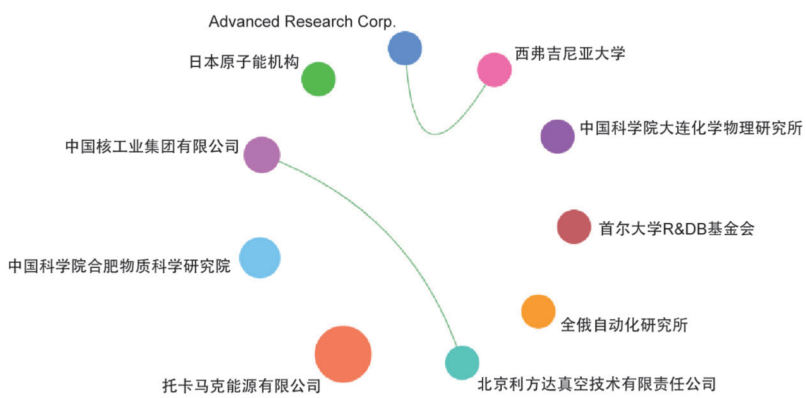

图 2.2.3 “可控核聚变实验堆工程化关键技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

础。多类数据的协调使用与精准成像是三维立体成像的技术难点，是未来重点研究方向。

目前，本方向的核心专利产出数量较多的国家是中国、美国、德国，其中中国的核心专利占比达到 60%，相应被引频次的排位也类似；平均被引频次排名前 3 位的国家是瑞典、美国、德国（见表 2.2.5）。核心专利产出数量较多的机构是北京理工大学、勒斯姆勒激光技术股份有限公司、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、南京理工大学、哈尔滨工业大学，被引频次排在前 3 位的是波音公司、勒斯姆勒激光技术股份有限公司、北京理工大学等（见表 2.2.6）。

2.2.4 煤矿灾害智能监测预警信息采集系统

煤矿灾害智能监测预警信息采集系统对煤矿井下危险源进行有效的监测以及预警。以工作面区域的水害、火灾、瓦斯、矿压、粉尘 5 种灾害为主线，利用信息化手段研究实时监测和分析预警问题。通过综合评判模型，进行工作面区域的安全指数分析预警，为综采工作面智能控制提供安全保障，为安全预警及管控提供灾害实时监测和分析数据。

尽管综采工作面成套设备技术取得长足发展，智能综采工作面也在逐渐增多，但相关环境安全监测及管理依然处在超限报警、人工对接、口口相传

表 2.2.5 “三维立体对地勘查成像系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	中国	21	60.00%	196	49.00%	9.33
2	美国	7	20.00%	116	29.00%	16.57
3	德国	4	11.43%	42	10.50%	10.50
4	日本	2	5.71%	19	4.75%	9.50
5	瑞典	1	2.86%	27	6.75%	27.00

表 2.2.6 “三维立体对地勘查成像系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	北京理工大学	中国	5	14.29%	27	6.75%	5.40
2	勒斯姆勒激光技术股份有限公司	德国	2	5.71%	28	7.00%	14.00
3	中国科学院长春光学精密机械与物理研究所	中国	2	5.71%	26	6.50%	13.00
4	南京理工大学	中国	2	5.71%	21	5.25%	10.50
5	哈尔滨工业大学	中国	2	5.71%	13	3.25%	6.50
6	波音公司	美国	1	2.86%	44	11.00%	44.00
7	通用电气公司	美国	1	2.86%	27	6.75%	27.00
8	浙江理工大学	中国	1	2.86%	27	6.75%	27.00
9	KLATencor Corp.	美国	1	2.86%	21	5.25%	21.00
10	Nova Measuring Instruments Inc.	美国	1	2.86%	17	4.25%	17.00

的阶段。工作面环境安全监测及预警的发展现状为：在分析基础数据来源方面，分析过程需要人工干预，基础数据无法自动获取，较难排除人为干扰的主观不可控性，分析结果缺乏实时性；在灾害分析方法方面，水、火、瓦斯、矿压、粉尘等孤立分析，未能从工作面区域整体布局出发，在各灾害监测基础上进行融合分析预警；在灾害监测分析成果方面，较多针对阶段性生产过程开展分析，提交成果多为研究报告形式，难以支持工作面全生产周期的安全分析、跟踪和保障。该前沿的发展趋势表现为：建立煤矿物联网，打造数字化、智能化矿山，智能感知重大危险源，准确预警；为煤矿危险源监测预警系统提供统一框架和数据标准格式；利用数据融合、数据挖掘、预测模型、空间分析等技术，推进矿山安全隐患识别预警与智能控制。

目前，本方向的核心专利产出数量较多的国家集中在美国和中国，两国占比之和达 94%；美国在总被引频次、被引频次比例方面也处于领先位置；中国以 39 件公开量居世界第 2 位（见表 2.2.7）。核心专利产出数量较多的机构是霍尼韦尔国际公司、江森自控有限公司，二者占比之和约 25%（见表 2.2.8）。美国、中国是本方向的主要研究国家，中国、美国、新西兰、印度、捷克之间建立了合作网络（见图 2.2.4）。

表 2.2.7 “煤矿灾害智能监测预警信息采集系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	美国	216	79.70%	4546	83.60%	21.05
2	中国	39	14.39%	660	12.14%	16.92
3	加拿大	5	1.85%	90	1.66%	18.00
4	荷兰	4	1.48%	96	1.77%	24.00
5	韩国	2	0.74%	28	0.51%	14.00
6	阿拉伯联合酋长国	1	0.37%	29	0.53%	29.00
7	捷克共和国	1	0.37%	29	0.53%	29.00
8	印度	1	0.37%	22	0.40%	22.00
9	德国	1	0.37%	19	0.35%	19.00
10	新西兰	1	0.37%	18	0.33%	18.00

表 2.2.8 “煤矿灾害智能监测预警信息采集系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	霍尼韦尔国际公司	美国	48	17.71%	1274	23.43%	26.54
2	江森自控有限公司	美国	22	8.12%	344	6.33%	15.64
3	美国艾默生电气公司	美国	16	5.90%	545	10.02%	34.06
4	谷歌公司	美国	15	5.54%	431	7.93%	28.73
5	EcoFactor Inc.	美国	14	5.17%	214	3.94%	15.29
6	Senseware Inc.	美国	10	3.69%	89	1.64%	8.90
7	特灵国际有限公司	美国	8	2.95%	131	2.41%	16.38
8	飞利浦照明控股有限公司	美国	4	1.48%	96	1.77%	24.00
9	珠海格力电器股份有限公司	中国	4	1.48%	80	1.47%	20.00
10	西门子集团	美国	3	1.11%	39	0.72%	13.00

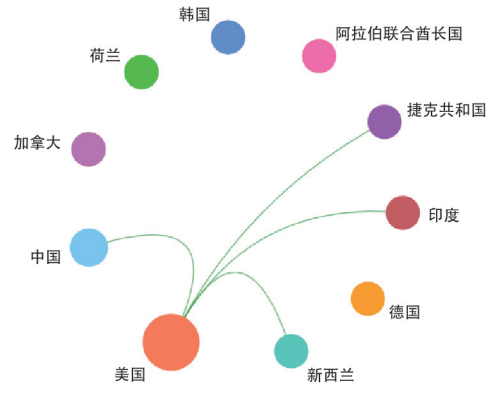

图 2.2.4 “煤矿灾害智能监测预警信息采集系统”工程开发前沿的主要国家间合作网络

领域课题组人员

课题组组长：翁史烈　倪维斗　彭苏萍　顾大钊

课题组副组长：黄　震　巨永林　刘　静

能源与矿业工程学部：王振海　宗玉生　解光辉

《Frontiers in Energy》编辑部：刘瑞芹

图书情报人员：陈天天　王　一

课题组成员：

能源和电气科学技术与工程学科组：

组　长：翁史烈　岳光溪

秘书长：巨永林　张海

参加人：代彦军　胡泽春　黄　震　鲁宗相
沈水云　沈文忠　王博翔　王　倩　翁一武
徐潇源　严　正　杨　立　易陈谊　张　海
章俊良　赵一新　赵长颖

执笔人：代彦军　胡泽春　鲁宗相　沈水云
徐潇源　严　正　杨　立　张　海　章俊良

核科学技术与工程学科组：

组　长：叶奇蓁　李建刚

秘书长：苏　罡　高　翔

参加人：郭英华　李思凡　苏　罡　师学明
李　鑫　李恭顺　郭　晴　田　林　苏汀郁

执笔人：郭英华　李思凡　苏　罡　师学明
李　鑫　李恭顺　郭　晴　田　林

地质资源科学技术与工程学科组：

组　长：毛景文　赵文智

秘书长：张国生　刘　敏

参加人：谢桂青　袁顺达　王佳新　王淑芳
王　坤　梁　坤　黄金亮　姚佛军　侯　通
简　伟

执笔人：姚佛军　侯　通　简　伟　王淑芳
王　坤

矿业科学技术与工程学科组：

组　长：袁　亮　李根生

秘书长：吴爱祥　张　农　周福宝　宋先知

参加人：江丙友　尹升华　时国庆　吴冬梅
辛海会　黄中伟　王海柱　梁东旭　宋国锋
王雷鸣　王高升　冯晓巍　贺顺泰

执笔人：李庆钊　尹升华　江丙友　时国庆
梁东旭　宋国锋　王雷鸣　贺顺泰

五、土木、水利与建筑工程

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

土木、水利和建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿汇总见表 1.1.1，涉及结构工程、土木建筑材料、交通工程、建筑学、暖通空调、市政工程、测绘工程和水利工程等学科方向。其中，“基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”“风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”“基于大数据的城市空间分析和优化方法”“面向适应性热舒适与室内空气品质营造的通风理论”“地下工程的动力灾变跨尺度预测”是非纯数据挖掘前沿，为专家提名前沿或者是基于数据挖掘前沿凝练而成的前沿。“纳米改性土木工程材料”“减缓城市热岛效应的规划原理”“道路、轨道材料与结构的性能演变及耐久性设计原理”“极端水文事件的形成机理与演变规律”和“深部能源开采灾变效应与力学行为调控”是数据挖掘前沿。各个前沿所涉及的核心论文自 2014 年至 2019 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

1.1.1 基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知

综合感知是实现智慧城市和智慧流域的重要基础。在智慧城市和智慧流域中，无处不在的智能传感器对物理城市与物理流域实现全面、综合的感知，并实时感测城市运行和流域管理的核心系统，把数字城市、数字流域与物理城市、物理流域无缝连接起来，进而利用云计算等技术对实时感知获得的地理时空大数据进行即时处理，为用户提供智能化服务。当前的主要研究内容有：①智慧城市与智慧流域综合感知基础体系的构建方法，实现监测资源大规模互联互通和多源异构感知资源协同；②基于综合感知基础体系的城市与流域综合感知方法；③智慧城市与智慧流域地理时空大数据的集成管理与实时分析方法。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数

表 1.1.1 土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知	36	924	25.67	2017.0
2	风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理	40	1271	31.78	2016.3
3	基于大数据的城市空间分析和优化方法	58	2461	42.43	2017.1
4	面向适应性热舒适与室内空气品质营造的通风理论	544	16 740	30.77	2016.6
5	地下工程的动力灾变跨尺度预测	93	2297	24.70	2017.5
6	纳米改性土木工程材料	74	3995	53.99	2017.2
7	减缓城市热岛效应的规划原理	188	6975	37.10	2016.9
8	道路、轨道材料与结构的性能演变及耐久性设计原理	56	1584	28.29	2017.5
9	极端水文事件的形成机理与演变规律	238	9287	39.02	2016.5
10	深部能源开采灾变效应与力学行为调控	105	3319	31.61	2017.3

表 1.1.2　土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知	2	5	5	10	8	6
2	风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理	11	5	4	6	8	6
3	基于大数据的城市空间分析和优化方法	5	5	4	20	12	12
4	面向适应性热舒适与室内空气品质营造的通风理论	69	97	88	102	92	96
5	地下工程的动力灾变跨尺度预测	6	7	6	19	24	31
6	纳米改性土木工程材料	3	6	11	19	20	15
7	减缓城市热岛效应的规划原理	21	23	30	44	29	41
8	道路、轨道材料与结构的性能演变及耐久性设计原理	6	3	5	5	16	21
9	极端水文事件的形成机理与演变规律	26	46	46	41	50	29
10	深部能源开采灾变效应与力学行为调控	5	14	10	22	27	27

为 36，被引频次为 924，篇均被引频次为 25.67。

1.1.2　风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理

海港码头、防波堤、采油平台、海底管线、跨海桥隧、海上风电基础等海洋工程结构运行环境恶劣，安全风险大。在风、浪、流和地震等作用下，海床地基土体内孔隙水压力增加、有效应力降低，导致海床地基土体出现强度弱化、液化问题；同时波流作用使海床地基出现冲刷破坏。此外，动力荷载作用产生的结构运动也会引起海床地基内孔隙水压力和有效应力的变化，使海床地基承载力问题更加复杂。在风、浪、流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理，是海洋工程结构安全性和耐久性有待解决的关键问题。需研究解决的主要问题包括：①在波浪、地震及结构运动等不同周期循环荷载作用下，不同海床地基土体（碎石、砂土和软黏土等）的强度弱化、液化机理及其演化规律；②考虑循环荷载作用下海床地基土体强度弱化、液化、液化后超孔压消散固结及再次液化过程的弹塑性本构模型；③在波浪、水流作用下，考虑渗流效应的不同海床地基（碎石、砂土和软黏土等）冲刷模型；④动力作用 – 海工结构 – 海床地基系统非线性动力分析的耦合数值模型及有效数值模拟方法；⑤动力作用 – 海工结构 – 海床地基系统承载特性研究的物理模型试验基础理论和试验技术。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 40，被引频次为 1271，篇均被引频次为 31.78。

1.1.3　基于大数据的城市空间分析和优化方法

互联网技术发展衍生的手机信令、公交刷卡、社交网站签到等地理位置大数据带来了城市空间分析方法的变革。与传统数据相比，具有大样本、高精度、长时间记录的优势，可动态、精准地记录城市各类活动的时空信息，为人们观察、认知城市空间及其发展趋势提供了新途径。基于大数据的城市空间分析和优化是当下与未来城市研究的前沿领域。相关研究机构主要集中在美国、英国、欧洲等发达国家或地区以及以中国为代表的快速发展中国家和地区。西方发达国家拥有完善的科研体系和良好的研究基础；而以中国为代表的发展中国家拥有庞大的时空感知数据源、日新月异的感知途径和场

景以及良好的软硬件基础。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 58，被引频次为 2461，篇均被引频次为 42.43。

1.1.4 面向适应性热舒适与室内空气品质营造的通风理论

面向适应性热舒适与室内空气品质营造的通风理论是指利用自然通风和人体热适应，营造具有良好空气品质并平衡节能舒适的室内环境设计理论和方法。主要研究方向包括：建筑环境中人体热适应性形成生理学和心理学机理，环境暴露经历产生的热适应对热舒适影响及预测模型，自然通风环境和被动式建筑环境中通风量计算及空气品质评估，自然通风环境和被动式建筑环境设计理论等。该前沿一直保持着相当高的活跃度，研究者在全球各气候区开展了大量的现场调查，丰富和完善了适应性热舒适理论，更合理的表达在自然通风建筑中的人体热舒适，使用自然通风、人工气流、个性化热舒适装备在特定时间和空间上替代传统的空调采暖设备，从而减少建筑对传统能源的依赖，实现人与自然的和谐发展。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 544，被引频次为 16 740，篇均被引频次为 30.77。

1.1.5 地下工程的动力灾变跨尺度预测

目前地下工程建设规模宏大、所处环境介质复杂，面临着强地震、活动断裂带、地震液化等灾害的威胁，对岩土和地下工程防灾减灾科学技术提出了严峻的挑战。地下工程的动力灾变跨尺度预测是指交叉融合岩土地震工程学、结构动力学、多尺度科学等学科，构建基于宏观、细观等多个空间尺度和时间效应尺度的多尺度动力分析模型，揭示强震作用下地下工程的整体宏观动力响应特征和细观损伤动态演化机理，实现对高烈度区、不利场地条件下地下工程动力灾变全过程的跨尺度预测，为提升地下结构的防灾减灾水平提供科学依据和技术支撑。其主要研究方向包括：长大隧道纵向抗震设计理论、大规模非线性地震响应多尺度分析方法、强震非一致空间效应物理实验模拟、复杂变刚度地下结构动力响应分析、液化场地 / 穿越活动断裂带等不利场地条件下地下工程动力灾变模拟等。未来发展趋势包括加强对地下工程强震灾变机制及设计对策的研究，加强对地下结构抗减震技术及抗震构造措施的研究工作，形成合理统一的抗震性能概念设计。此外，如何将抗震减震措施优化组合，并使其适应复杂不利地质条件下地下工程的地震响应特性仍是当前亟待解决的主要问题之一。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 93，被引频次为 2297，篇均被引频次为 24.70。

1.1.6 纳米改性土木工程材料

现代土木工程对混凝土材料提出了更高的要求，传统意义上混凝土宏观结构复合与单一性能提升，很难满足此目标。基于多尺度理论指导下纳米层面的微观结构调控、功能优化提升是混凝土材料自我提升的可行性道路之一。通过纳米材料掺杂，形成胶凝材料的纳米尺度优化，实现水泥微观结构调控。掺杂有机官能基团分子，实现与水泥材料的化学配位与杂化；或加入非反应性纳米粒子，调节实现水泥水化产物凝胶分子结构；或引入表面活性纳米粒子，与水泥凝胶间搭建具有高延展性的纳米桥。通过水泥凝胶纳米尺度的优化与调控，实现低纳米粒子掺量下显著提高混凝土韧性和耐久性的目标。通过纳米材料引入，赋予或拓展传统混凝土材料无法拥有的性能，实现混凝土功能优化提升。通过纳米掺杂或表面涂覆，形成混凝土材料如导电性、自清洁性等特性；亦可通过压电等纳米粒子添加，实现混凝土材料自感知的能力；或通过修复功能纳米粒子设计，实现混凝土物理 / 化学的修复功能。通过纳米材料引入，实现混凝土材料的功能化提升，确保其满足现代土木工程对结构 – 功能一体化的苛刻要求。通过理论分析和仿真模拟方法的引入，实

现纳米改性混凝土的理性设计。综合运用计算化学等手段，建立混凝土微观结构的纳米优化策略；通过大数据分子模型的指导，解析纳米粒子对混凝土材料的影响规律。实现高性能、多功能纳米改性混凝土的顶层设计和理性掺杂。以理论分析和数值模拟指导的纳米改性混凝土材料设计，结合先进的纳米颗粒分散技术；实现水泥胶凝材料微结构调控，赋予混凝土材料功能化特征；是纳米改性混凝土材料发展趋势。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 74，被引频次为 3995，篇均被引频次为 53.99。

1.1.7　减缓城市热岛效应的规划原理

城市发展出现市区地表和冠层气温明显较邻近乡村地区高的现象，称为城市热岛效应。热岛效应受城市形态、下垫面、大气污染和人为热等诸多因素影响。在全球气候变化背景下，热岛效应进一步加剧了热浪等异常天气现象及城市人群呼吸性困难、中暑等健康风险，对城市气候及人体舒适度产生不利影响，健康舒适导向的城市规划与设计研究受到高度重视。应对城市热岛及微气候的研究课题涉及建筑、规划与景观领域，主要技术措施的问题通常划分为宏观尺度和微观尺度进行探讨。宏观尺度的研究包括：基于土地利用及开发强度的城市风廊道规划分析方法，基于高分辨率遥感技术的热岛效应定量研究，地理信息系统的减缓城市热岛的绿地生态规划。微观尺度的研究包括：应用风热模拟计算流体动力学（CFD）技术优化城市空间规划与建筑设计研究，公园绿地与城市街道的树木景观设计对于人体舒适度与热风险改善。城市街区网格精细度的温热环境研究方法，解决宏观尺度与微观尺度的分辨率降尺度的关键技术。其他城市热岛应用层面研究包含：可持续城市发展的城市气候战略和创新，热风险管理的城市形态与绿化设计，城市开发强度对于污染扩散与城市群能耗的影响与预测等。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 188，被引频次为 6975，篇均被引频次为 37.10。

1.1.8　道路、轨道材料与结构的性能演变及耐久性设计原理

道路材料与结构的性能演变及耐久性设计原理是指道路材料与结构在服役期间承受交通荷载与环境因素的反复作用，引起其内部损伤逐渐累积、服役功能逐渐退化，基于对损伤累积及功能退化规律的揭示，开展道路材料性能提升、结构组合优化的研究，建立道路耐久性设计的理论与方法。主要研究方向包括：采用多尺度的理论分析、数值模拟以及室内外试验的方法，揭示道路材料与结构的性能演化规律，客观表征道路材料与结构的服役行为；采用材料改性技术，提高道路材料的耐久性；考虑道路材料与结构的实际工作条件与拉压特性不同的本质特征，采用更加精准的结构设计方法提高道路耐久性设计的精度；通过道路长期性能的研究，提出更加科学的道路结构设计模型；通过耐久性道路的结构优化，以及采用科学的预防性养护技术，提高道路的使用寿命。未来发展趋势包括：基于道路长期性能跟踪观测以及加速加载试验，揭示多因素耦合作用下道路材料与结构的性能演变规律；开发高效材料改性技术，以提升道路材料的力学特性以及胶结料与矿料之间的界面黏结特性；针对道路材料与结构的实际服役行为，建立道路材料力学指标与道路结构力学响应预测的协调性分析方法及一体化设计方法。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 56，被引频次为 1584，篇均被引频次为 28.29。

1.1.9　极端水文事件的形成机理与演变规律

极端水文事件是指在特定地区和一定时间尺度内，发生的水文要素明显偏离常态均值的水文事件，其发生的概率较小但具有较强的破坏作用。极端水文事件是一个多维的非线性系统，受气候、下垫面、人类活动等多种因素的影响和制约，其形成机理十分复杂。近年来，全球气候变化导致极端水文事件发生的强度与频率呈现加剧的趋势，随之增加的水旱灾害风险正成为人类生存所面临的重大挑战。全

球变化背景下极端水文事件的形成机理与演变规律是当前研究的热点与难点问题。主要研究方向包括：①气候–植被–水文–人类活动相互作用对极端水文事件的影响机理；②自然气候变率和人类活动影响下极端水文事件演变的检测、归因与未来趋势预测；③变化环境下气候–水文双向耦合模型与多尺度极端水文过程模拟；④极端水文事件的风险评估、多维调控与综合应对。未来主要发展趋势为：基于全要素立体监测与科学实验、多源数据融合与同化、物理模型与人工智能集合模拟等新技术，从气候、水文、地理、管理等多学科交叉的视角，系统开展复杂环境下的极端水文事件形成机理与演变规律研究。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 238，被引频次为 9287，篇均被引频次为 39.02。

1.1.10 深部能源开采灾变效应与力学行为调控

人类社会的快速发展对能源的需求日益增长，伴随着各种工程技术体系的进步和完善，能源开采正逐步向地球的深部发展。近年来页岩气、干热岩、煤层气、可燃冰等非常规资源的开发在全世界范围内掀起了一股热潮。然而深部地层岩体处于一个高温高应力的复杂地质环境中，其力学行为比浅层的岩体更为复杂，受影响的因素也更多。深部岩体在流–固–热–化学的共同耦合作用下，其破坏强度、变形机理、渗透特征等一系列重要的参数均难以用传统的理论来解释。与此同时，近年来在深部能源开采过程中遇到了岩爆、诱发地震、软岩大变形、复杂地层井壁失稳等一系列的灾变问题，其灾变机理需要进一步的探究。因此，为了更好地研究深部能源开采灾变效应以实现对深部岩体力学行为的调控，需要重点关注以下几方面的研究内容：①复杂裂隙岩体的多场耦合作用机理；②深地动力灾害发生机理、过程和评价；③深部岩体物理力学特性、变形与破坏特征；④深地复杂构造对岩体物理力学特性的影响。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 105，被引频次为 3319，篇均被引频次为 31.61。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知

综合感知是实现智慧城市和智慧流域的重要基础。在智慧城市和智慧流域中，无处不在的智能传感器对物理城市与物理流域实现全面、综合的感知，并实时感测城市运行和流域管理的核心系统，把数字城市、数字流域与物理城市、物理流域无缝连接起来，进而利用云计算等技术对实时感知获得的地理时空大数据进行即时处理并提供智能化服务，实现数字城市与数字流域的智能化。随着智慧城市与智慧流域的发展，城市感知和流域感知已经从行业孤立的在线感知逐步发展为多网融合的综合感知。

当前，该前沿的主要研究课题有：

（1）智慧城市与智慧流域综合感知基础体系的构建方法包括：①城市与流域监测资源大规模互联互通的新技术，如海量传感器组网通信、异构传感器接入、传感网资源管理、传感网服务组合、流式数据挖掘分析和地理信息互操作等技术；②多源异构感知资源协同的新方法，如传感器信息建模、观测能力评价、协同监测、点面观测数据融合和按需聚焦服务等方法。

（2）基于综合感知基础体系的城市与流域综合感知方法包括：①多尺度综合感知指标、共性技术与标准体系，城市群和流域地表要素空间无缝感知方法；②多尺度智能光场视频成像与分析方法；③精细场景时空感知与在线监测方法；④城市与流域多尺度综合感知服务方法。

（3）智慧城市与智慧流域地理时空大数据的集成管理与实时分析包括：①多源实时地理信息的集成表达方法；②实时地理信息的融合组织方法；

③实时地理信息的弹性服务方法；④地理时空大数据的深度挖掘方法。

基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知的核心论文数为 36 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引频次为 25.67。核心论文产出排名前 5 的国家为中国、美国、马来西亚、伊朗和澳大利亚（见表 1.2.1），其中中国发表论文占比为 27.78%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前 5 的国家为韩国、美国、土耳其、马来西亚和瑞士，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 19.80，说明中国学者在该前沿的研究工作还有进一步上升的空间。从排名前 10 的核心论文产出国家合作网络（见图 1.2.1）来看，论文数量排名前 10 的国家之间有较为密切的合作关系。

根据核心论文的产出机构情况（见表 1.2.2），该前沿排名前 5 的产出机构为中国科学院、中国水利水电研究院、土耳其 Canik Basari 大学、马来西亚国民大学和中国香港大学。排名前两名的机构分别为中国科学院与中国水利水电科学研究院。这两个机构的前沿科学领域主要是将人工智能等技术与传统水文方法相结合，用于城市洪涝预警及流域突发洪水预报等方面，以达到实现延长预见期、提高

表 1.2.1 “基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	10	27.78%	198	19.80	2017.4
2	美国	6	16.67%	299	49.83	2016.7
3	马来西亚	5	13.89%	234	46.80	2017.0
4	伊朗	5	13.89%	124	24.80	2017.2
5	澳大利亚	5	13.89%	111	22.20	2017.2
6	英国	4	11.11%	59	14.75	2018.2
7	土耳其	3	8.33%	148	49.33	2016.0
8	韩国	2	5.56%	148	74.00	2016.0
9	瑞士	2	5.56%	72	36.00	2016.0
10	伊拉克	2	5.56%	64	32.00	2018.0

表 1.2.2 “基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	中国	3	8.33%	98	32.67	2018.0
2	中国水利水电研究院	中国	3	8.33%	38	12.67	2017.0
3	Canik Basari 大学	土耳其	2	5.56%	140	70.00	2015.5
4	马来西亚国民大学	马来西亚	2	5.56%	68	34.00	2017.0
5	香港大学	中国	2	5.56%	54	27.00	2015.5
6	德黑兰大学	伊朗	2	5.56%	52	26.00	2016.5
7	拉齐大学	伊朗	2	5.56%	49	24.50	2018.5
8	南昆士兰大学	澳大利亚	2	5.56%	47	23.50	2018.0
9	伊斯兰阿扎德大学	伊朗	2	5.56%	39	19.50	2018.5
10	华中科技大学	中国	2	5.56%	38	19.00	2018.5

预报精度等目的。从排名前 10 的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.2）来看，各机构间有一定的合作关系。

施引核心论文产出前 5 的国家为中国、伊朗、美国、越南和澳大利亚（见表 1.2.3），施引核心论文产出前 5 的机构为越南的孙德盛大学、越南的维新大学、伊朗的德黑兰大学、伊朗的大不里士大学和澳大利亚的南昆士兰大学（见表 1.2.4）。

根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前 5 的施引核心论文数也比较多，其中中国的发表论文数和施引论文数均排名第 1，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

综合以上统计数据，在“基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知” 研究前沿，与国外同行相比，中国学者略具优势，并逐步发展到领先地位。建议中国政府继续加大对这一研究领域的支持力度，加快向世界领先水平发展。

1.2.2 风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理

海港码头、防波堤、采油平台、海底管线、跨

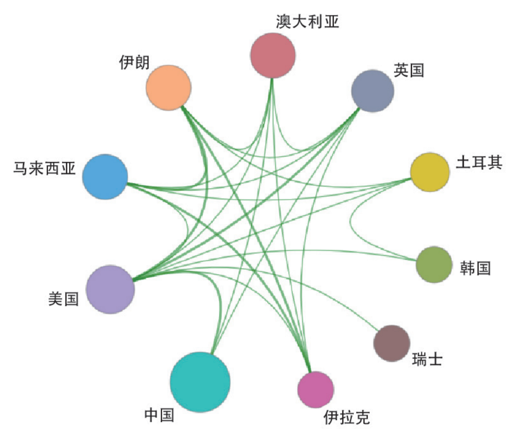

图 1.2.1 “基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿主要国家间的合作网络

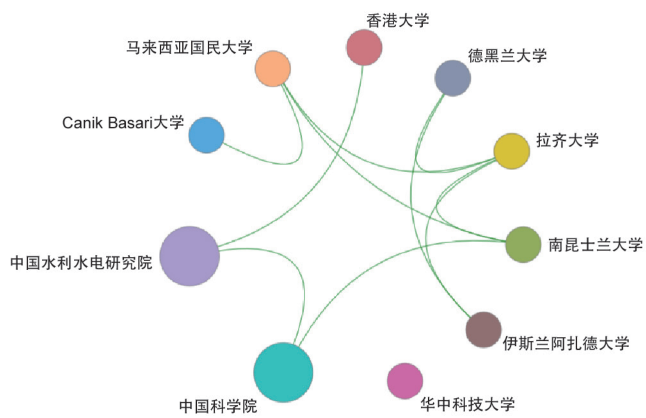

图 1.2.2 “基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	258	24.86%	2018.7
2	伊朗	165	15.90%	2018.8
3	美国	151	14.55%	2018.4
4	越南	84	8.09%	2019.3
5	澳大利亚	73	7.03%	2018.8
6	印度	63	6.07%	2018.5
7	韩国	62	5.97%	2018.5
8	土耳其	50	4.82%	2018.3
9	马来西亚	47	4.53%	2018.6
10	加拿大	46	4.43%	2018.7

表 1.2.4 “基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	孙德盛大学	越南	63	17.36%	2019.2
2	维新大学	越南	47	12.95%	2019.5
3	德黑兰大学	伊朗	40	11.02%	2018.3
4	大不里士大学	伊朗	33	9.09%	2018.8
5	南昆士兰大学	澳大利亚	31	8.54%	2018.4
6	中国科学院	中国	27	7.44%	2018.3
6	华中科技大学	中国	27	7.44%	2018.7
8	加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校	美国	25	6.89%	2018.0
8	河海大学	中国	25	6.89%	2019.0
10	伊利亚州立大学	格鲁吉亚	23	6.34%	2019.1

海桥隧、海上风电基础等海洋工程结构运行环境恶劣，安全风险大。在风、浪、流和地震等作用下，海床地基土体内孔隙水压力增加、有效应力降低，导致海床地基土体出现强度弱化、液化问题；同时波流作用也会使海床地基出现冲刷破坏。此外，动力荷载作用产生的结构运动也会引起海床地基内孔隙水压力和有效应力的变化，使海床地基承载力问题更加复杂。在风、浪、流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理，是海洋工程结构安全性和耐久性有待解决的关键问题。

海床地基的动力响应及其与结构的耦合作用是风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统耦合响应的核心问题。关于海床地基响应模型，主要有拉普拉斯方程、扩散方程和 Biot 固结方程三类。拉普拉斯方程和扩散方程均假设土骨架不可变形，孔隙流体分别考虑为不可压缩和可压缩，这两类模型均没有考虑土骨架与孔隙流体的耦合作用。Biot 固结方程假设土骨架可变形，孔隙流体可压缩，流体运动满足达西定律，并且考虑了固液相加速度。Biot 固结模型可考虑土骨架与孔隙流体的耦合作用，但海床土的本构主要限定在弹性范围。关于风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应问题，大都将各种动力作用作为荷载施加在结构上，没有考虑动力作用下海床地基的响应效应。

需研究解决的主要问题包括以下几方面：

（1）在波浪、地震及结构运动等不同周期循环荷载作用下，不同海床地基土体（碎石、砂土和软黏土等）的强度弱化、液化机理及其演化规律。

（2）考虑循环荷载作用下海床地基土体（碎石、砂土和软黏土等）强度弱化、液化、液化后超孔压消散固结及再次液化过程的弹塑性本构模型。

（3）在波浪、水流作用下，考虑渗流效应的不同海床地基（碎石、砂土和软黏土等）冲刷模型。

（4）动力作用 – 海工结构 – 海床地基系统非线性动力分析的耦合数值模型及有效数值模拟方法。

（5）动力作用 – 海工结构 – 海床地基系统承载特性研究的物理模型试验基础理论和试验技术。

风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理的核心论文数为 40 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 31.78。核心论文产出排名前 5 的国家为中国、澳大利亚、丹麦、英国和荷兰（见表 1.2.5），其中中国发表论文比例为 57.50%，是该前沿的最主要研究国家之一。篇均被引频次排名前 5 的国家为荷兰、美国、丹麦、英国和墨西哥，其中中国作者所发表的论文

篇均被引频次为 26.87，说明中国学者在该前沿的研究工作也逐步受到了关注。从排名前 10 的核心论文产出国家合作网络（见图 1.2.3）来看，中国、澳大利亚和英国间的合作相对频繁。

根据核心论文的产出机构情况（见表 1.2.6），该前沿排名前 5 的产出机构为澳大利亚的格里菲斯大学、丹麦技术大学、中国的河海大学、中国科学院和中国的上海交通大学。近年来，澳大利亚格里菲斯大学相关研究人员在波浪、水流作用下海床地基动力响应方面开展了深入系统的研究工作，丹麦技术大学相关研究人员主要在波浪、水流作用下海底管线和直立桩周围海床冲刷方面开展了一些研究工作。从排名前 10 的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.4）来看，产出机构之间有着较为密切的合作关系。

施引核心论文产出前 5 的国家为中国、英国、澳大利亚、挪威和美国（见表 1.2.7），施引核心论文产出前 5 的机构为中国的河海大学、中国的上海交通大学、澳大利亚的格里菲斯大学、丹麦技术大学和中国海洋大学（见表 1.2.8）。根据论文的

表 1.2.5 “风－浪－流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	23	57.50%	618	26.87	2016.7
2	澳大利亚	19	47.50%	491	25.84	2016.8
3	丹麦	12	30.00%	458	38.17	2015.7
4	英国	10	25.00%	350	35.00	2016.5
5	荷兰	5	12.50%	230	46.00	2014.8
6	比利时	3	7.50%	80	26.67	2017.7
7	美国	2	5.00%	79	39.50	2014.0
8	土耳其	2	5.00%	33	16.50	2017.0
9	墨西哥	1	2.50%	28	28.00	2016.0
10	挪威	1	2.50%	17	17.00	2018.0

表 1.2.6 “风－浪－流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	格里菲斯大学	澳大利亚	16	40.00%	411	25.69	2016.8
2	丹麦技术大学	丹麦	12	30.00%	458	38.17	2015.7
3	河海大学	中国	10	25.00%	224	22.40	2017.6
4	中国科学院	中国	7	17.50%	241	34.43	2015.6
5	上海交通大学	中国	7	17.50%	185	26.43	2016.6
6	荷兰三角洲研究院	荷兰	5	12.50%	230	46.00	2014.8
7	布拉德福德大学	英国	5	12.50%	125	25.00	2017.6
8	浙江大学	中国	3	7.50%	54	18.00	2018.7
9	宁波大学	中国	3	7.50%	52	17.33	2017.7
10	邓迪大学	英国	2	5.00%	86	43.00	2014.5

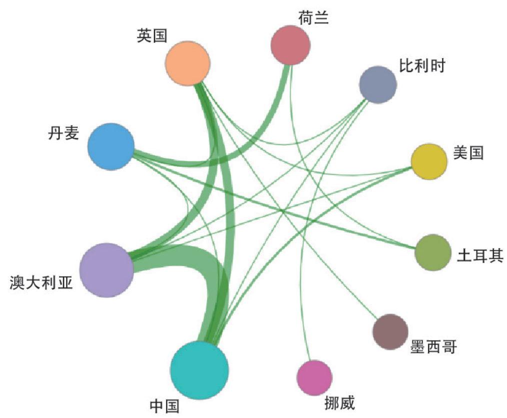

图 1.2.3 “风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿主要国家间的合作网络

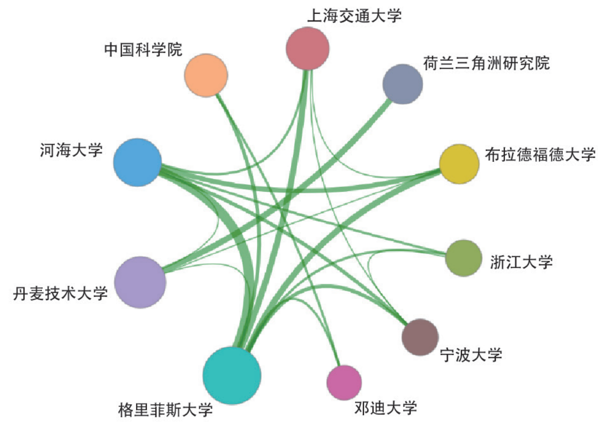

图 1.2.4 “风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	327	38.97%	2018.3
2	英国	109	12.99%	2018.0
3	澳大利亚	101	12.04%	2017.7
4	挪威	68	8.10%	2018.3
5	美国	62	7.39%	2018.2
6	丹麦	61	7.27%	2017.6
7	荷兰	27	3.22%	2016.7
8	意大利	25	2.98%	2018.5
9	法国	20	2.38%	2018.3
10	西班牙	20	2.38%	2017.7

表 1.2.8 “风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	河海大学	中国	70	17.07%	2018.4
2	上海交通大学	中国	60	14.63%	2017.8
3	格里菲斯大学	澳大利亚	52	12.68%	2017.9
4	丹麦技术大学	丹麦	41	10.00%	2017.4
5	中国海洋大学	中国	37	9.02%	2018.2
6	西澳大学	澳大利亚	32	7.80%	2017.3
7	中国科学院	中国	30	7.32%	2017.4
8	浙江大学	中国	26	6.34%	2018.6
9	大连理工大学	中国	24	5.85%	2017.8
10	挪威科技大学	挪威	20	4.88%	2018.2

施引情况来看，核心论文产出国排名前 5 的国家施引核心论文数也比较多，其中中国的发表论文数和施引论文数均排名第 1，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

1.2.3　基于大数据的城市空间分析和优化方法

互联网技术发展衍生的手机信令、公交刷卡、社交网站签到等地理位置大数据带来了城市空间分析方法的变革。与传统数据相比，具有大样本、高精度、长时间记录的优势，可动态、精准地记录城市各类活动的时空信息，为人们观察、认知城市空间及其发展趋势提供了新途径。基于大数据的城市空间分析和优化是当下与未来城市研究的前沿领域。

迄今为止，三个方面的城市研究得到了发展。一是基于居民活动更深入地认识城市各个系统要素的时空分布与结构性特征，提升对居住、就业、公共服务、交通网络等系统要素运行状态的感知能力；此类研究最先得到发展，成果丰硕。二是对城市空间的问题进行识别与绩效评估，活动反映了人们对空间的实际利用情况，基于此，从效率、公平等价值观出发，对通勤行为与职住关系、人口分布与公共服务供给等空间问题进行研判；此类研究最终面向城市空间优化，但目前处于问题识别与优化技术方法的探索阶段，研究成果与优化应用存在差距。三是基于海量数据挖掘城市空间的发展规律，对未来城市发展的趋势进行推演，综合、动态地理解城市这一复杂系统，并推动城市空间研究的理论发展；此类研究尚处于起步阶段，但却是未来的研究核心。

大数据为城市科学研究带来了契机，在对城市各个系统时空特征深入认识的基础上，面向应用的空间问题识别与优化技术方法是当前研究重点；最终目标是建立智慧化的城市运行系统，并实现城市科学研究的理论创新。

相关研究机构主要集中在美国、英国、欧洲等发达国家或地区以及以中国为代表的快速发展中国家和地区。西方发达国家拥有完善的科研体系和良好的研究基础；而以中国为代表的发展中国家拥有庞大的时空感知数据源、日新月异的感知途径和场景以及良好的软硬件基础。

国际领军的机构包括：美国麻省理工学院（媒体实验室等）；英国伦敦大学学院（高级空间分析中心、动态城市实验室等）、瑞士苏黎世高工 ETH、英国图灵实验室、ETH- 新加坡未来城市实验室、谷歌公司、推特、微软公司等；国内领先的机构如同济大学（长三角协同创新中心）、中国科学院大学、清华大学、北京大学、阿里巴巴集团、腾讯、华为技术有限公司、京东世纪贸易有限公司等。

高等院校基于传统学科优势，如城乡规划学、地理学、地理信息科学等优势迅速发展智慧城市背景下的地理时空大数据理论与方法研究，不仅领先所在地区领跑全球相关研究。企业机构依托自身海量数据、存储与计算优势也不断完善相关工程研究落地与应用场景搭建，成为相关科研的补充力量。

相关方向的国际合作频繁、模式多样。主要类型包括但不限于：多高校 – 政府 – 企业 – 行业协会多主体合作（如长三角城市群智能规划协同创新中心）、跨高校合作（如英国图灵实验室等）、行业机构 – 企业横向合作（如中规院·阿里巴巴未来城市实验室）。

基于大数据的城市空间分析和优化方法的核心论文数为 58 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 42.43。核心论文产出排名前 5 的国家为中国、美国、挪威、澳大利亚和英国（见表 1.2.9）。其中中国发表论文占比为 41.38%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前 5 的国家为英国、瑞士、新加坡、挪威和美国。其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 49.54，略高于平均水平。从排名前 10 的核心论文产出国家合作网络（见图 1.2.5）来看，国际间有较为密切的合作关系，

尤其是美国和中国之间。

根据核心论文的产出机构情况（见表 1.2.10），该前沿排名前 5 的产出机构为中国的武汉大学、挪威科技大学、中国的中山大学、中国的北京大学和美国的亚利桑那州立大学。武汉大学前沿领域集中在大数据应用于空间分析，特别是城市结构与规律属性表征、计算与再认识方向成果显著。挪威科技大学的主要研究领域则集中在环境感知、物联网以及相关技术支持下的城市化议题。从排名前 10 的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.6）来看，除了挪威科技大学外，其他机构之间有一定的合作。

施引核心论文产出前 5 的国家为中国、美国、英国、西班牙和澳大利亚（见表 1.2.11），施引核心论文产出前 5 的机构为中国科学院、中国的武汉大学、美国的麻省理工学院、中国的中山大学和中国的北京大学（见表 1.2.12）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前 5 的国家施引核心论文数也比较多，其中中国的发表论文数和施引论文数均排名第 1，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

表 1.2.9 “基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	24	41.38%	1189	49.54	2017.4
2	美国	14	24.14%	856	61.14	2016.5
3	挪威	6	10.34%	425	70.83	2017.0
4	澳大利亚	6	10.34%	110	18.33	2018.0
5	英国	5	8.62%	704	140.80	2015.2
6	荷兰	5	8.62%	106	21.20	2017.4
7	西班牙	4	6.90%	215	53.75	2016.2
8	日本	4	6.90%	158	39.50	2016.5
9	瑞士	3	5.17%	244	81.33	2014.7
10	新加坡	3	5.17%	217	72.33	2016.3

表 1.2.10 “基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	武汉大学	中国	5	8.62%	180	36.00	2017.4
2	挪威科技大学	挪威	4	6.90%	333	83.25	2017.5
3	中山大学	中国	4	6.90%	183	45.75	2017.2
4	北京大学	中国	3	5.17%	172	57.33	2016.3
5	亚利桑那州立大学	美国	3	5.17%	114	38.00	2015.3
6	德克萨斯州立大学	美国	3	5.17%	67	22.33	2017.0
7	中国科学院	中国	3	5.17%	49	16.33	2017.7
8	伦敦大学学院	英国	2	3.45%	593	296.50	2014.0
9	庆北大学	韩国	2	3.45%	237	118.50	2016.5
10	南洋理工大学	新加坡	2	3.45%	199	99.50	2016.0

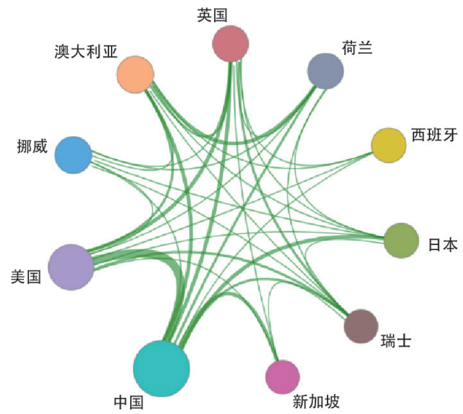

图 1.2.5　“基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

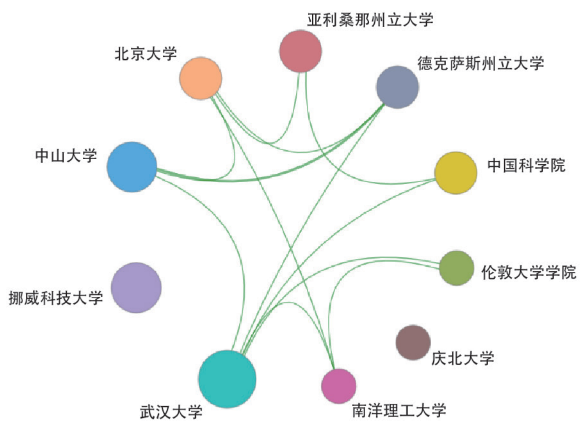

图 1.2.6　“基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	842	35.56%	2018.4
2	美国	510	21.54%	2018.1
3	英国	208	8.78%	2018.2
4	西班牙	144	6.08%	2018.2
5	澳大利亚	131	5.53%	2018.2
6	意大利	129	5.45%	2018.0
7	法国	114	4.81%	2018.1
8	德国	78	3.29%	2018.1
9	日本	74	3.13%	2017.9
10	加拿大	70	2.96%	2018.1

表 1.2.12 “基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	中国	101	19.77%	2018.0
2	武汉大学	中国	79	15.46%	2018.5
3	麻省理工学院	美国	45	8.81%	2017.5
4	中山大学	中国	42	8.22%	2018.5
4	北京大学	中国	42	8.22%	2018.3
6	中国科学院大学	中国	39	7.63%	2018.3
7	浙江大学	中国	35	6.85%	2018.5
8	清华大学	中国	33	6.46%	2018.4
9	微软亚洲研究院	美国	32	6.26%	2016.4
10	西安电子科技大学	中国	32	6.26%	2018.1

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

土木、水利和建筑工程领域的 Top 10 工程开发前沿及统计数据见表 2.1.1，上述前沿涉及了结构工程、城乡规划与风景园林、交通工程、岩土及地下工程、桥梁工程、土木建筑材料、市政工程、水利工程、测绘工程等学科方向。其中，“应对突发公共卫生事件的规划与设计技术”“水利工程隐患深水探测与处理技术”“城市信息模型（CIM）技术”“极端环境下水泥基材料性能及微结构调控技术”“可调控超高性能混凝土设计”“城市给排水管网漏损监控与原位修复技术和装备”和“对地观测与地理空间信息区块链处理技术”是非纯数据挖掘前沿，为专家提名前沿或者基于数据挖掘前沿凝练而成的前沿。“极端条件下地下工程智能建造技术与装备”“地震可恢复功能结构体系设计与建造技术”“高速列车精确定位与安全导航技术”是数据挖掘前沿。各个前沿所涉及的专利自 2014 年至 2019 年的逐年施引专利数见表 2.1.2。

2.1.1 应对突发公共卫生事件的规划与设计技术

城市发展影响着传染性疾病的传染源接触、传播方式和过程、易感人群规模等方面，这些影响都在城市空间中通过生态过程和社会过程得以实现。因此，城市规划与设计能够在从空间干预角度应对突发公共卫生事件方面起到重要作用。目前尚未有完全针对突发公共卫生事件而研发的规划与设计技术，但是包括土地使用及城市生态辨识、城市三维物质空间与环境模型建构、环境污染监测与评估等既有技术能够在隔离传染源和切断传播途径方面起到一定作用。这些技术方法在传染性疾病针对性、揭示传播机制、提供精准预测，以及规划设计适用性等方面的作用或能力仍需提升。另外，为了提高城市空间应对突发公共卫生事件的能力、更好地促进健康城市的规划与建设，制定更为科学合理的规划和设计策略，仍有待在基于大数据的居民时空出行及交通组织分析、公共健康单元综合建构，以及基于社会公平的健康设施综合空间布局三方面进行技术研发拓展。随着 COVID-19 的全球流行，城市空间的“健康性”将受到更为广泛关注，应对突发公共卫生事件的规划与设计技术亟待进一步研发与应用检验，以更好促进健康城市的规划与建设。从 2014 年至 2019 年，专利公开量为 38，被引频次为 22，平均被引频次为 0.58。

表 2.1.1　土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	应对突发公共卫生事件的规划与设计技术	38	22	0.58	2017.4
2	极端条件下地下工程智能建造技术与装备	274	578	2.11	2017.5
3	水利工程隐患深水探测与处理技术	90	181	2.01	2016.8
4	地震可恢复功能结构体系设计与建造技术	509	1711	3.36	2016.2
5	城市信息模型（CIM）技术	150	418	2.79	2017.0
6	极端环境下水泥基材料性能及微结构调控技术	473	977	2.07	2016.5
7	可调控超高性能混凝土设计	15	17	1.13	2017.1
8	高速列车精确定位与安全导航技术	24	84	3.50	2017.0
9	城市给排水管网漏损监控与原位修复技术和装备	177	233	1.32	2017.1
10	对地观测与地理空间信息区块链处理技术	10	34	3.40	2018.8

表 2.1.2　土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	前沿名称	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	应对突发公共卫生事件的规划与设计技术	2	5	3	7	8	13
2	极端条件下地下工程智能建造技术与装备	15	20	31	50	76	82
3	水利工程隐患深水探测与处理技术	14	17	7	11	21	20
4	地震可恢复功能结构体系设计与建造技术	54	57	79	90	85	95
5	城市信息模型（CIM）技术	8	15	19	29	38	33
6	极端环境下水泥基材料性能及微结构调控技术	62	46	77	80	87	87
7	可调控超高性能混凝土设计	2	2	3	0	1	7
8	高速列车精确定位与安全导航技术	3	1	1	2	3	12
9	城市给排水管网漏损监控与原位修复技术和装备	13	13	34	28	30	53
10	对地观测与地理空间信息区块链处理技术	0	0	0	1	0	9

2.1.2　极端条件下地下工程智能建造技术与装备

极端条件下地下工程智能建造技术与装备是指在高海拔、高地温、高地应力、高水压等极端自然环境或极端复杂地质条件下，通过数字化与智能化的设计、生产加工、施工与运营维护技术研发，以及自动化与智能化装备研制，实现极端条件下地下工程的快速、工业化、少人甚至无人建造。极端自然环境下，人员和装备耐受限度、机械设备工作效率急剧下降，生态环境保护要求也极为苛刻；极端复杂地质条件下，极易发生链式地质灾害，引发重大事故。通过极端条件地下工程智能建造技术基础理论、关键核心技术和人机协调、自主学习的智能装备研发，可大幅提升极端条件下的工业化建造能力，实现快速、少人甚至无人建造。其主要研究方向包括：①地下工程采集–设计–施工一体化智能建造基础理论；②数字化设计基础平台和集成系统、智能化的设计体系；③数字化和智能化的衬砌结构生产加工；④极端条件下地质灾害预报、智能化施工控制和工程质量监测检测；⑤极端条件下人机协调、自主学习的智能装备；⑥极端条件下地下工程在线监控、智能诊断和自动化维护。目前地下工程智能建造技术与装备的发展重点是研究形成地

下工程智能建造基础理论、开发极端条件下地质灾害预报技术和研制极端条件下的智能建造装备。从2014年至2019年，专利公开量为274，被引频次为578，平均被引频次为2.11。

2.1.3 水利工程隐患深水探测与处理技术

水利工程是调控水资源时空分布、优化水资源配置的重要工程措施，也是江河防洪工程体系的重要组成部分。由于水利工程结构老化和性能劣化加剧，变化环境影响，加之地震、地质灾害等，险情时有发生。隐患深水探测与处理技术已成为本领域大力发展的前沿技术之一。其核心是水下检测设备、潜水技术与水下作业技术等。深水探测技术主要包括水下渗漏检测、水下结构缺陷检测、金属结构检测及水下勘查技术等；技术设备指用于水下工程的运载、检测与施工等专用装备，主要包括有人潜水技术及其装备、载人潜水器、无人潜水（水下机器人）及水下检测、清理、切割、焊接等水下专用装备等；水下隐患处理技术主要包括渗漏处理、结构加固与缺陷处理、金属结构防腐处理及有关施工技术，此外，工程运行和加固施工时还需经常对泄输水建筑物等进行水下检查与清淤、闸门封堵等处理技术。其开发重点主要包括深水复杂条件下水利工程隐患探测装备研发、深水环境水下探测与作业高精度定位技术、低能见度环境下高分辨力解析技术、深水环境修补加固材料与工艺等。水利工程隐患深水探测与处理技术将是确保水利工程长效安全的重要保障，服务于水库大坝、水闸与堤防工程、长距离引调水工程等，具有广阔的发展前景。从2014年至2019年，专利公开量为90，被引频次为181，平均被引频次为2.01。

2.1.4 地震可恢复功能结构体系设计与建造技术

工程结构是组成抗震韧性城市的最重要基本元素，抗震韧性城市建设要求工程结构不仅具有抵御地震、防止破坏的能力，而且应具有震后的可恢复能力。地震可恢复功能结构（Earthquake-resilient Structure）也称为抗震韧性结构，其将传统体系的材料非线性问题转化为可恢复功能结构的几何非线性问题，形成强震下损伤可控、弹塑性变形集中，具有更大的变形能力和更小残余变形的可恢复功能新体系。地震可恢复功能结构体系主要包括三大类：设置摇摆构件的结构体系、自复位结构体系、设置可更换构件的结构体系。目前，围绕地震可恢复功能结构体系设计与建造的开发前沿主要集中在：质量–刚度–阻尼协同的地震可恢复功能新体系，地震四水准设防目标与多性能指标，地震可恢复功能结构直接基于位移设计方法，非结构构件防震韧性提升技术，地震可恢复功能结构快速建造与震后恢复技术。从2014年至2019年，专利公开量为509，被引频次为1711，平均被引频次为3.36。

2.1.5 城市信息模型（CIM）技术

城市信息模型（CIM）是在建筑信息模型（BIM）基础之上向城市级进化而来的数字平台。其特征是将微观建筑信息模型BIM、宏观地理空间数据（GIS）、物联网数据（IoT）进行融合，基于多尺度在数字空间构建成能够全景展现真实城市的三维城市空间模型与城市信息的有机综合体。以GIS展示空间属性，以BIM反映最基本的精细单元构造特征，以IoT实时感知城市运行态势，实现覆盖更广的地上、地表、地下的数据模型和信息的集成融合。它不仅具有三维仿真的可视化表达能力，还承载了随时随地可获取的有关城市全方位要素的属性信息。CIM具有可感知、可分析、可共享、能判断、会计算的能力，可模拟城市运行，仿真城市管理规则，评估城市的发展决策。在信息化的基础之上综合应用人工智能（AI）、大数据分析、高精度城市三维仿真等多项智能技术支持城市规划、建设和治理的智能化。CIM是智慧城市建设与精细化综合管理的基础和中枢。从2014年至2019年，专

利公开量为150，被引频次为418，平均被引频次为2.79。

2.1.6 极端环境下水泥基材料性能及微结构调控技术

工程结构的极端服役环境包括超低温、极高温、强腐蚀、强辐射、强磁场、超高压、高真空及复杂荷载等多类复杂环境。这类极端环境作用可对正常服役的水泥基材料性能造成显著的劣化后果，严重威胁工程结构的安全性。随着人类探索领域的拓展延伸以及现代建造技术的不断发展，世界主要国家对极端环境工程建设的需求逐渐增加，极端环境下水泥基材料具有广阔的应用前景。因此，有必要针对极端环境下水泥基材料力学性能与耐久性能演变规律开展研究。水泥基材料的微结构与其性能密切相关，针对特定的极端服役环境，基于水泥基材料性能需求，发展水泥基材料共性微结构调控技术，是提高其极端环境服役安全性及寿命的有效手段。为此，需利用先进测试表征手段并结合计算机模拟技术从多尺度角度研究极端环境下水泥基材料微结构特征演变，揭示其深层次劣化损伤机理，而后从原材料优化筛选、配合比优化设计、微结构构建设计等角度提出相应的多尺度复合结构调控技术。针对不同极端环境下的结构性能需求，重点着眼于发展水泥基材料水化进程及水化产物时空分布调控、水化硅酸钙微纳性状设计、孔结构优化、界面过渡区结构增强等几类微结构调控技术。从2014年至2019年，专利公开量为473，被引频次为977，平均被引频次为2.07。

2.1.7 可调控超高性能混凝土设计

超高性能混凝土（UHPC）是近20年发展起来的最具创新性的一种水泥复合基材料。它的设计和制备主要基于颗粒最紧密堆积理论，通过减小孔隙率、改善微观结构、增加匀质性、提高韧性获得。相较于普通水泥基材料，UHPC具有超高强度、高韧性和优异的耐久性，能很好满足土木工程轻量化、高层化、大跨化和高耐久化的需求，在桥梁工程、抗爆结构、薄壁结构、建筑装饰、海洋工程、修复和加固工程等领域具有广泛的应用前景。通过调控超高性能混凝土的组分设计和制备工艺，可以调控它的一些重要性能，包括韧性、抗冲磨性、弹性模量、修复相容性、电阻率等，最终实现它在土木工程领域中的不同应用。在充分认识UHPC材料和微观结构特性的前提下，根据工程需求，定能实现它在不同工程领域的广泛精准应用，显著提高结构的安全性、使用寿命和社会可持续性。从2014年至2019年，专利公开量为15，被引频次为17，平均被引频次为1.13。

2.1.8 高速列车精确定位与安全导航技术

中国铁路已进入高速时代，增加高速列车运行密度、提高运输效率并保障运输安全具有重要意义。高速列车精确定位与安全导航技术是确保高速铁路运输安全与效率的首要技术手段。该技术利用多传感器融合方法对列车实时位置、速度、加速度及姿态信息进行可靠的精确测量，以保障高速列车的安全导航和移动闭塞。高速列车精确定位与安全导航技术首先需要保证精确性和实时性。由于高速列车的周边环境复杂多变，使用全球导航卫星系统、惯性导航系统、车载测速雷达、车轮速度编码器或应答信标等单一传感器，无法保证列车的精确定位在全域范围都具有足够的时空分辨率。比如全球导航卫星系统在峡谷地区精度无法保障，在隧道内甚至无法定位；惯性导航系统的定位误差随时间累积；应答信标定位的空间分辨率不足。为使列车在全域范围的定位精度均满足要求，首先，需要选择观测精度和采样率足够高的传感器，例如网络实时动态（RTK）定位可达厘米级精度，其次，需要上述多种传感器在统一时空参考框架下进行联合观测，最关键的是需要有效的数据融合处理方法，比如卡尔曼滤波及其衍生方法。该技术还要满足可靠性。可

靠性需要冗余的通信通道和观测信息提供基础保障，运用观测异常探测方法识别传感器故障和粗差，通过状态异常探测方法感知列车位置、速度、加速度和姿态的异常跳变，利用抗差估计等方法可靠解算列车的上述精确状态信息。未来该领域的重点研究方向有：高动态多传感器深组合精确定位、高速列车弹性定位导航授时（PNT）、高动态多传感器观测及状态异常探测及处理等方向。从 2014 年至 2019 年，专利公开量为 24，被引频次为 84，平均被引频次为 3.5。

2.1.9　城市给排水管网漏损监控与原位修复技术和装备

管网漏损监控与原位修复技术旨在通过较强的时效性和高效的实时监测技术和设备缩短漏损的平均持续时间，从而避免相应的经济损失和社会危害。基于数据采集与监视控制系统（SCADA）提供的城市给水管网压力、流量实时监测数据，可从数据驱动和模型驱动两方面建立面向管网漏损问题的全流程诊断体系，进行漏损识别、定位、修复技术的全方位技术研究。其中，基于数据驱动的漏损监控技术主要问题在于如何基于一定数量与质量的管网历史监测数据进行高精度漏损诊断；而基于稳态或瞬态的模型驱动的漏损监控技术则主要面临水力模型校核、监测点优化布局、监控区域内监测值诊断特征提取等难点。随着物联网和人工智能技术的飞速发展，耦合数据驱动模型技术与高效的漏损检测设备开发是今后发展的趋势。排水管网的漏损监控技术受限于监控设备应用维护困难、液位与流量数据采集不稳定、水力模型精度低等因素，该项技术发展仍处于起步阶段，前沿关键科学问题包括漏损监控设备研发、基于监测数据统计分析的漏损识别与定位技术、高精度水力模型构建与校核等。原位修复技术需配合管道修复配套机具装备，主要包括局部及井口修复、聚烯烃材料为主体的修复、原位固化修复、液体凝固材料的修复技术。其中，非开挖修复技术因其显著的经济、社会效益逐渐受到重视。从 2014 年至 2019 年，专利公开量为 177，被引频次为 233，平均被引频次为 1.32。

2.1.10　对地观测与地理空间信息区块链处理技术

对地观测与地理空间信息区块链处理技术是测绘工程领域的开发前沿之一，它面向对地观测数据与地理空间信息的分布式处理需求，采用块链式数据结构、分布式节点共识算法、加密数据传输与访问技术、智能合约数据操作方式等区块链核心技术为对地观测数据与地理空间信息提供了一种新的分布式处理基础架构与计算范式。当前发展的主要方向包括：①基于区块链技术的对地观测遥感数据共享技术，以防止对遥感影像的非法篡改、传播并实现对遥感影像的控制使用；②基于区块链技术的用户参与型地理空间信息生成与更新技术；③基于区块链技术的分布式地理信息服务系统，为汽车、无人机等交通工具提供位置服务。从 2014 年至 2019 年，专利公开量为 10，被引频次为 34，平均被引频次为 3.4。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　应对突发公共卫生事件的规划与设计技术

随着城市化的不断推进，生态环境的变化和人口高密度聚集极大提高了城市中传染性疾病的发生和传播可能。其中，土地利用变化、城市热岛效应和食物生产特征改变等生态影响过程，以及人口、物质建成环境、生活方式等变化所带来的社会影响过程共同决定了传染性疾病的流行。城市规划与设计能够在从空间干预角度起到包括隔离传染源、切断传播途径和保护易感人群等关键性作用。

虽然目前尚未有完全针对突发公共卫生事件而研发的规划与设计技术，但是包括土地使用及城市生态辨识、城市三维物质空间与环境模型建构、环境污染监测与评估等既有技术能够在隔离传染源和

切断传播途径方面起到一定作用。但总体而言，这些技术方法的适用性有待进一步探索，应对突发公共卫生事件的分析针对性以及规划设计干预的科学性有待提升。具体而言：

（1）土地使用及城市生态辨识技术。目前已形成了基于数据采集和归类、分析与总结，以及存储和监控的城市土地使用与生态要素辨识系统。该类技术能够为识别传染性疾病病原体可能存在的区域提供线索，但精准度和预测能力不足。未来有必要从历史演变视角，采用机器学习方法分析土地使用的演变过程，并结合生态学分析方法，共同揭示由于城市扩展和生态环境变化可能造成的病原体接触风险影响，预测突发公共卫生事件发生风险。

（2）城市三维物质空间与环境模型建构技术。当下已有针对城市整体或特定空间对象（如校园）的三维空间虚拟建构技术，能够清晰地展现多时相、多层次的城市空间形态和环境特征，并为相关城市活动或工程的管控（如旅游导览、市政工程、火灾预警）提供基础支持。这一技术也能够为传染病的传播特征研究和空间阻断方案的制定提供重要基础。

（3）环境污染监测与评估技术。目前相关分析技术重点关注土壤、水体和空气污染等方面，多由检测或识别、分析、评估、预警等几个模块组成。未来的技术研发还需纳入对传染病健康风险重点场所（如医院、超市、活禽交易市场、交通枢纽）的考虑，综合多维因素的交互影响，共同为空间规划和设计提供积极思路。

另外，为了提高城市空间应对突发公共卫生事件的能力、更好地促进健康城市的规划与建设，制定更为科学合理的规划和设计策略，还有待在三方面进行技术研发拓展：①基于大数据的居民时空出行及交通组织分析技术，这将为不同交通组织管理模式下疾病的传播扩散模式进行预测，进而为提出城市防疫分区策略提供支持；②公共健康单元综合建构技术，以“15 min 社区生活圈”为基础，形成“平疫结合”的社区功能节点；③基于社会公平的健康设施综合空间布局技术，强调对传染病易感人群（如老人、儿童）的关注，健康设施的配置考虑向这部分人群合理倾斜。

“应对突发公共卫生事件的规划与设计技术”工程开发前沿的核心专利公开量为 38 篇，平均被引频次为 0.58（见表 2.1.1），排名前 3 的国家或地区为中国、韩国、日本（见表 2.2.1），申请专利量最多的国家为中国，占比达到了 86.84%，平均被引频次为 0.52，是该工程开发前沿的重点研究国家之一。

根据核心专利的产出机构情况（见表 2.2.2），该前沿排名前 5 的产出机构为韩国的 GEOTWO 公司、中国的西安科技大学、中国的三亚中科遥感研究所、中国石油天然气集团公司和中国的安徽科技学院。GEOTWO 公司是一家韩国的地理信息技术公司，其研发重点之一是关于城市土地使用监测和评估的技术；西安科技大学聚焦于土地使用监测和城市碳排放测量相关技术的开发；三亚中科遥感研究所关注于绿色植被的净初级生产力测度，开发的关键技术多基于遥感数据和机器学习算法；中国石油天然气集团公司聚焦石油开发和运输领域，开发了石油气长输管道可能造成的环境影响风险进行评估技术，为相关事故对生态环境的影响提供了一套有效评价方法；安徽科技学院研发的相关专利技术也主要针对土地利用状态，能够仿真模拟土地利用的格局演替。虽然这些机构所研发的技术未直接针对应急性突发公共卫生事件，但是能对规划与设计的干预提供一定技术基础，并为未来相关分析方法和技术工具的研发提供思路与参考。

2.2.2 极端条件下地下工程智能建造技术与装备

极端自然环境下，人员和装备耐受限度、机械设备工作效率急剧下降，生态环境保护要求也极为苛刻；极端复杂地质条件下，极易发生链式地质灾

表 2.2.1 “应对突发公共卫生事件的规划与设计技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	33	86.84%	17	77.27%	0.52
2	韩国	4	10.53%	5	22.73%	1.25
3	日本	1	2.63%	0	0.00%	0.00

表 2.2.2 “应对突发公共卫生事件的规划与设计技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	韩国 GEOTWO 公司	韩国	2	5.26%	5	22.73%	2.5
2	西安科技大学	中国	2	5.26%	5	22.73%	2.5
3	三亚中科遥感研究所	中国	1	2.63%	3	13.64%	3.0
4	中国石油天然气集团公司	中国	1	2.63%	2	9.09%	2.0
5	安徽科技学院	中国	1	2.63%	2	9.09%	2.0
6	广州地理研究所	中国	1	2.63%	1	4.55%	1.0
7	全日空航空公司	韩国	1	2.63%	0	0.00%	0.0
8	安徽川佰科技有限公司	中国	1	2.63%	0	0.00%	0.0
9	安徽环境科学研究院	中国	1	2.63%	0	0.00%	0.0
10	中国科学院地理科学与资源研究所	中国	1	2.63%	0	0.00%	0.0

害，引发重大事故。以川藏铁路、公路为例，工程隧道占比高、埋深大，穿越多条极活跃断裂带，高地应力、岩爆及软岩大变形问题异常突出，滑坡、落石和泥石流风险极高；海拔落差极大，高原地区冬季气温极低，地温非常高，沿线生态环境敏感脆弱，因而在建造过程中智能建造技术与装备的需求十分迫切。“进藏高速公路智能建造及工程健康保障技术”列为中国科协 2020 年十大工程技术难题之一。

通过极端条件下地下工程智能建造技术与装备研发，有助于形成覆盖设计、生产加工、施工与装备、运营维护等全产业链融合一体的智能建造产业体系，催生新产业、新业态、新模式，为地下工程跨领域、全方位、多层次的产业深度融合提供支撑。

当前全球地下工程行业发展态势良好，但仍存在标准化、信息化、智能化水平偏低等问题，与先进建造方式相比还有很大差距。随着新一轮科技革命和产业变革向纵深发展，以人工智能、大数据、物联网和 5G 等为代表的新一代信息技术加速向地下工程行业全面融合渗透。目前，极端条件下地下工程智能建造技术与装备的研究方向有：

（1）建造方法，传统的新奥法、新意法等是一种在地质信息不完备条件下首先半经验半理论设计、再在施工过程中不断监测与调整的动态反馈式建造方法，随着地下工程新型感知、数据传输、BIM/GIS 和信息集成等技术的发展，建造方法正在向“采集－设计－施工”一体化、智能化方向发展。

（2）设计体系，包括基于 BIM/GIS 的数字化设计体系和全过程信息集成平台，实现设计、制造、施工协同，并与运营维护一体化。

（3）生产加工，包括推进工艺流程数字化和机器人应用，实现地下工程衬砌结构生产数字化和智能化，实现少人甚至无人工厂。

（4）智能施工，包括极端条件下地下工程地质灾害智能预报和控制研究，推动灾害防控的精细探测和智能控制；作业现场信息智能采集与反馈、自动立体感知与定位、数字孪生平台、专家远程诊断、工程质量智能检测与控制，实现隧道施工自动化，减少现场人员数量和工作量。

（5）智能装备，包括人机协调和自主学习的智能装备、智能施工机器人和自动作业类脑控制器，极端条件下风险环境感知和精准作业控制的机器人化装备、高可靠智能互联装备、全类别地质环境风险识别处理的智能互联装备，实现提高装备的性能、效率和智能化程度。

（6）智能运维，包括极端条件下地下工程运行环境和结构健康的在线监控、结构服役性能智能诊断和智能维护，事故预防及救援，以及灾害预警与控制。

“极端条件下地下工程智能建造技术与装备”工程开发前沿的核心专利为 274 篇，平均被引频次为 2.11（见表 2.1.1），排名前 3 的国家为中国、美国、加拿大（见表 2.2.3）。中国机构或个人所申请的专利占比达到了 91.97%，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为 1.62。从核心专利产出国家之间的合作网络（见图 2.2.1）来看，各个国家之间合作较少。

根据核心专利的产出机构情况（见表 2.2.4），该前沿排名前 5 的产出机构为中国中铁股份有限公司、中国矿业大学（北京）、中国交通建设股份有限公司、中国的国家电网有限公司和中国的山东大学。从核心专利产出机构排名前 10 的合作网络（见图 2.2.2）来看，机构之间合作较少。

2.2.3 水利工程隐患深水探测与处理技术

深水探测与作业技术的研发起源并大规模应用于海洋工程领域，传统工业强国在此类装备的研发和工业化生产方面技术领先。水利工程深水探测与水下作业、修复等技术应用环境与海洋环境差异较大，海洋环境适用的水下探测与修补加固作业技术引进后无法简单移植应用，需根据水库大坝的特殊水域环境和边界条件进行改进及研发创新。水下机器人（ROV）作为人类探索深海环境的主要工具之一，在海洋资源开发、深海科学探测等方面发挥了重要作用，一直以来受到各国重视。近年来，水下机器人目前主要应用于水库搜查、大坝探测、安全检查等方面。因水库环境的特殊性，水利行业目前应用的以观察级水下机器人为主。

结构异常渗漏是水利工程运行中面临的常见病害，现有的水利工程水下渗漏检测定位技术多为试验性应用，准确性不高，应用受到限制，是目前水利工程检测技术研究的首要技术难点。人工潜水作业是水下修复加固难以替代的手段，常规空气潜水最大作业水深仅为 60 m，无法满足水利工程的大深度水下作业；虽然最先进的常规人工潜水已能实

表 2.2.3 “极端条件下地下工程智能建造技术与装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	252	91.97%	408	70.59%	1.62
2	美国	15	5.47%	170	29.41%	11.33
3	加拿大	2	0.73%	11	1.90%	5.50
4	巴西	1	0.36%	0	0.00%	0.00
5	日本	1	0.36%	0	0.00%	0.00
6	韩国	1	0.36%	0	0.00%	0.00
7	沙特阿拉伯	1	0.36%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4 “极端条件下地下工程智能建造技术与装备”工程开发前沿的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中铁股份有限公司	中国	19	6.93%	16	2.77%	0.84
2	中国矿业大学（北京）	中国	9	3.28%	12	2.08%	1.33
3	中国交通建设股份有限公司	中国	7	2.55%	7	1.21%	1.00
4	国家电网有限公司	中国	6	2.19%	6	1.04%	1.00
5	山东大学	中国	5	1.82%	12	2.08%	2.40
6	中国矿业大学（徐州）	中国	5	1.82%	10	1.73%	2.00
7	东南大学	中国	4	1.46%	16	2.77%	4.00
8	中国煤炭科工集团有限公司	中国	4	1.46%	5	0.87%	1.25
9	长安大学	中国	4	1.46%	3	0.52%	0.75
10	同济大学	中国	3	1.09%	12	2.08%	4.00

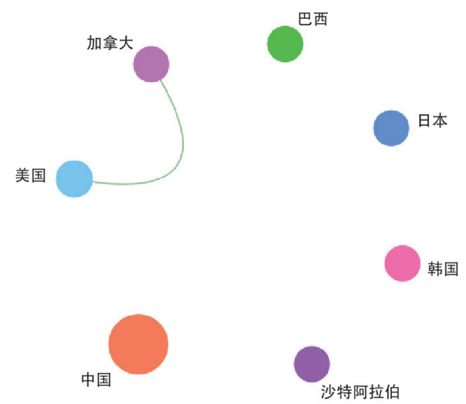

图 2.2.1 “极端条件下地下工程智能建造技术与装备”工程开发前沿的主要国家间合作网络

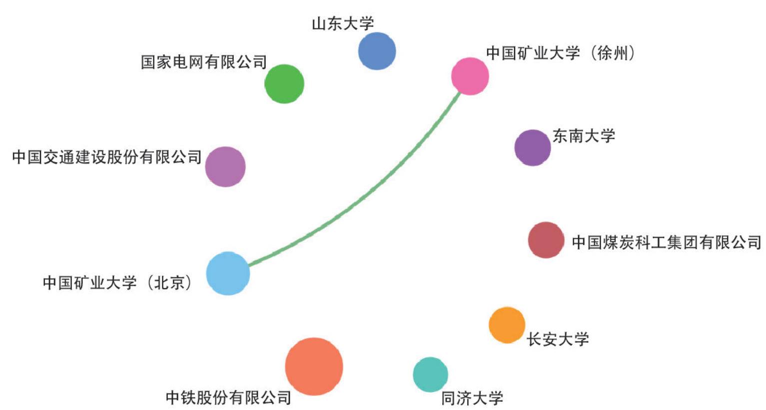

图 2.2.2 “极端条件下地下工程智能建造技术与装备”工程开发前沿的主要机构间合作网络

现百米级深水环境水下检测与作业，但人工作业效率低、成本高、风险大；超过 120 m 的常规人工潜水作业由于效率及成本不具备实用价值且须改用饱和潜水技术，目前仅在瑞士一座高坝中进行了试验，适应性的装备技术亟待突破。利用水下机器人、载人潜水器等深水作业平台开发能满足多种水下工程需求的无人作业技术，或开发潜水作业效率更高、成本与安全风险更低的适用水利工程特殊水域环境的专用饱和潜水技术，已成为优先发展方向。深水、高水头、高流速环境下施工作业难度大、效率低、成本高，水下灌浆和修复材料适用性差、工艺复杂、质量难以保障，必将影响修复效果。故根据深水环境特殊条件和用途，研发方便水下施工、质量可靠、经济合理的新型水下修补材料及施工工艺，是亟待开发的前沿重点。水利工程长期运行后或遭遇突发灾害情况下带来的深水坝前淤积问题给水下结构检测、保养维护及闸门检修和启闭运行带来极大困难，国内外现有清淤和疏浚装备和技术主要适用于水深较浅的宽阔水域泥沙或小粒径骨料清理，对作业环境狭窄的坝前闸门、流道口等区域的复杂淤积物难以有效施展，故有必要研发适用于 100 m 级以上水深、满足狭小空间运行、能清理层（沉）积复杂淤积物的多功能清淤装备和技术，确保水利工程长效安全运行。

“水利工程隐患深水探测与处理技术”工程开发前沿的核心专利 90 篇，平均被引频次为 2.01（见表 2.1.1），排名前 5 的国家为中国、美国、巴西、英国、挪威（见表 2.2.5），其中中国机构或个人所申请的专利占比达到了 90%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为 2.21。

根据核心专利的产出机构情况（见表 2.2.6），该前沿排名前 5 的产出机构为中国电力建设集团有限公司、中国海洋石油集团有限公司和中国的上海库克莱生态科技有限公司、中国的浙江省水利河口研究院和中国的山东大学。上述核心专利产出机构排名来看，中国电建集团是中国唯一提供水利电力工程及基础设施规划、勘测设计、咨询监理、建设管理、投资运营为一体的综合性建设集团，已将“水利工程隐患深水探测与处理技术”作为其核心技术。中国海洋石油总公司已将深水探测与作业技术的研发大规模应用于海洋工程领域。

表 2.2.5　“水利工程隐患深水探测与处理技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	81	90.00%	179	98.90%	2.21
2	美国	2	2.22%	0	0.00%	0.00
3	巴西	2	2.22%	0	0.00%	0.00
4	英国	1	1.11%	1	0.55%	1.00
5	挪威	1	1.11%	1	0.55%	1.00
6	日本	1	1.11%	0	0.00%	0.00
7	墨西哥	1	1.11%	0	0.00%	0.00

表 2.2.6 “水利工程隐患深水探测与处理技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国电力建设集团有限公司	中国	4	4.44%	6	3.31%	1.5
2	中国海洋石油集团有限公司	中国	3	3.33%	3	1.66%	1.5
3	上海库克莱生态科技有限公司	中国	2	2.22%	8	4.42%	4.0
4	浙江水利河口研究院	中国	2	2.22%	6	3.31%	3.0
5	山东大学	中国	2	2.22%	3	1.66%	1.5
6	中国交通建设股份有限公司	中国	2	2.22%	1	0.55%	0.5
7	上海海洋大学	中国	2	2.22%	0	0.00%	0.0
8	河海大学	中国	2	2.22%	0	0.00%	0.0
9	广东茂名金阳热带海珍养殖有限公司	中国	1	1.11%	14	7.73%	14.0
10	广东梅县梅雁矿业有限公司	中国	1	1.11%	12	6.63%	12.0

领域课题组人员

课题组组长：崔俊芝　张建云　陈以一

课题组成员：

院士：

江　亿　欧进萍　王　浩　杨永斌　张建云
刘加平　缪昌文　杜彦良　钮新强　彭永臻
郑健龙　王建国　孔宪京　陈湘生　张建民
吴志强　岳清瑞　彭建兵　张喜刚　马　军
冯夏庭　李术才

专家：

艾剑良　蔡春声　蔡　奕　陈　鹏　陈　庆
陈求稳　陈　欣　陈以一　陈志光　戴晓虎
董必钦　董楠楠　樊健生　高　军　高　亮
葛耀君　顾冲时　韩继红　韩　杰　胡春宏
黄介生　贾良玖　蒋金洋　蒋正武　焦文玲
金君良　李安桂　李　晨　凌建明　刘　芳
刘飞香　刘加平　刘　京　刘曙光　刘廷玺
刘志勇　穆兴民　潘海啸　庞　磊　钱　锋
邵益生　史才军　舒章康　孙　剑　孙立军
孙　智　谈广鸣　谭忆秋　谭　峥　唐辉明
童小华　汪双杰　王爱杰　王发洲　王华宁
王国庆　王建华　王　伟　王亚宜　王元战
夏圣骥　肖飞鹏　杨大文　杨　敏　杨仲轩
姚俊兰　叶　蔚　张　锋　张尚武　张　松
张　旭　郑百林　郑　刚　仲　政　周伟国
周　翔　朱合华　朱　能　朱若霖　庄晓莹
周宏俊

执笔组成员：

郑健龙　吴志强　鲍振鑫　曹布阳　陈　鹏
陈　庆　董必钦　顾冲时　郝蔚祺　蒋希冀
李晓军　刘　芳　刘飞香　吕松涛　沈　尧
史才军　孙立军　陶　涛　王　德　王国庆
王　兰　王元战　吴泽媚　向　衍　谢俊民
姚俊兰　叶　蔚　禹海涛　张丰收　周乐韬
周　翔　周　颖

六、环境与轻纺工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

环境与轻纺工程领域（以下简称环境领域）所研判的 Top 10 工程研究前沿见表 1.1.1，涉及环境科学工程、气象科学工程、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程以及轻工科学工程 6 个学科方向。其中，各个前沿 2014 年至 2019 年的逐年核心论文发表情况见表 1.1.2。

（1）环境中抗生素抗性基因的微界面行为与共选择机制

环境中抗生素耐药基因的污染直接威胁着人类的健康，但大多数环境类型，包括人类和动物，缺乏关于抗生素耐药基因的大规模定量数据，以及潜在的共选择试剂（如杀菌剂和金属）的抗性基因数据，而这种匮乏妨碍了对环境风险的有效识别。因此，需要对抗生素耐药基因开展详细研究，为降低环境风险提供支撑。其中，最重要的部分是抗生素耐药基因在环境介质微粒与其接触的环境表面的迁移、转化、归宿等行为（微界面行为），以及抗生素耐药基因与其他抗性基因的相互作用关系（共选择机制）。现有研究表明，自然背景和人为活动对环境中抗生素抗性基因分布有显著影响，重金属抗性基因在某些抗生素抗性基因的传播过程中可能起着至关重要的作用；污水处理厂是抗生素耐药基因释放到环境中的主要来源之一。目前，环境中抗生素抗性基因的微界面行为与共选择机制还有待进一步研究，以更好地为降低环境风险的行动提供指导。

（2）复合污染过程的微界面行为

随着煤炭、石油等能源的不断消耗，工业集聚地的持续增多以及化肥农药的广泛施用，污染物不断排放到环境中，威胁着农产品的安全和人类的健康。由于污染源多样，污染物往往也不是单一存在的，呈现出无机 – 有机污染复合、多介质污染等特性。污染物进入环境后，可经历一系列物理 / 化学 / 生物界面过程，如吸附 / 脱附、挥发、氧化 / 还原、化学沉淀 / 络合 / 降解、生物跨膜、吸附 / 转运、

表 1.1.1　环境与轻纺领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	环境中抗生素抗性基因的微界面行为与共选择机制	15	1478	98.53	2015.7
2	复合污染过程的微界面行为	57	3400	59.65	2015.9
3	纳米复合材料在废水处理中的催化性能及机理研究	66	3083	46.71	2017.9
4	微塑料对环境水体的污染与毒理	83	14 173	170.76	2015.9
5	热岛效应与城市规划	55	3772	68.58	2015.8
6	气象与可持续发展	26	1172	45.08	2016.1
7	海洋生物固氮的新空间格局和调控机制	26	1326	51.00	2015.2
8	基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术	80	12 040	150.50	2015.0
9	染料基工业污染物降解潜力的研究	274	20 097	73.35	2016.4
10	制浆造纸污染超低排放技术	2	105	52.50	2015.5

表 1.1.2 环境与轻纺领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	环境中抗生素抗性基因的微界面行为与共选择机制	3	2	8	1	1	0
2	复合污染过程的微界面行为	16	10	10	10	8	3
3	纳米复合材料在废水处理中的催化性能及机理研究	0	2	8	11	18	27
4	微塑料对环境水体的污染与毒理	15	19	19	18	11	1
5	热岛效应与城市规划	12	9	15	14	5	0
6	气象与可持续发展	6	4	7	2	5	2
7	海洋生物固氮的新空间格局和调控机制	13	5	2	4	1	1
8	基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术	20	14	13	8	6	2
9	染料基工业污染物降解潜力的研究	0	71	88	63	38	14
10	制浆造纸污染超低排放技术	0	1	1	0	0	0

生物转化 / 降解等。由于真实环境介质具有高度异质性，污染物常发生多界面、多过程的耦合作用，单一线性模型难以准确预测污染物的形态分布、迁移转化和生物 / 生态效应，亟须研究复合污染过程的微界面行为，揭示多介质、多过程耦合的界面行为机制，厘清环境中污染物的迁移转化过程及生物效应。近年来，国内外关于复合污染过程的微界面行为研究逐渐从土 – 水 – 气界面深入到植物及微生物界面，污染物在土 – 水 – 气 – 生物 / 微生物等微界面上的迁移转化及生物有效性研究进展迅速，但仍缺乏基础、系统、全面的过程调控。污染物在生物界面上的迁移转化和降解修复仍是未来研究的重点。

（3）纳米复合材料在废水处理中的催化性能及机理研究

随着社会经济的发展，水污染情况愈发严重。基于环境和健康考虑，当务之急是发展高效的废水处理技术。纳米材料的高比表面积可以暴露更多的活性位点，提供更多的反应位点，在力学、热学、光学、电学等方面均表现出优异的性能。纳米复合材料将多种纳米材料的优点结合在一起，通过对原材料、各组分分布以及工艺条件等方面的设计，实现各组分优势互补，最大限度发挥优势，利用协同作用提高其催化性能。对于纳米复合材料催化机理的研究目前主要集中在三个方面：一是如何制备出具有强氧化性自由基的复合材料，增强其氧化还原活性；二是加强复合材料微结构与性能方面的研究；三是多种纳米材料之间的界面作用机理研究。纳米复合材料在环境修复和太阳能存储方面应用广泛，如光催化处理持久性有机污染物、重金属离子氧化还原、病原体氧化分解、水裂解制 H_2 和 CO_2 还原等。随着科学技术的进一步发展，纳米复合材料还将被用于太阳能电池和生物传感器等新兴领域。因此，未来需要所有研究者共同努力，开发出更合适的纳米复合材料，并大规模应用于环境保护和清洁能源的生产中，最终实现真正的可持续发展。

（4）微塑料对环境水体的污染与毒理

微塑料是一类粒径小于 5 mm 的塑料颗粒的总称，是一种新型有机污染物，来源于各种塑料制品，易于在环境中迁移。微塑料具有较强的毒害作用，还可以吸附其他污染物。微塑料存在于水体环境中时，容易吸附其他污染物并产生较强的复合毒性。由于微塑料粒径小，易被浮游动物误食或沿着食物链传递，在生物体内累积转移，对机体产生不可逆转的毒害作用。微塑料已成为一类新型污染物遍布

全球各个角落，由此产生的环境问题日趋严峻。随着塑料生产工业的迅猛发展，塑料性能不断改善，全球的塑料产量、用量和应用领域也不断扩大。限于塑料的特殊理化性质，其不仅能向水环境释放有毒的添加剂，吸附疏水性有机物，增加水体毒性，还能通过生物捕食在食物链中进行传递。富集在微塑料表面的污染物也能够在食物链中进行传递，在食物链不同营养级间不断富集和放大，最终对人体健康产生危害。因此，对微塑料对环境水体的污染与毒理的研究有其必要性，对微塑料的治理刻不容缓。

（5）热岛效应与城市规划

热岛效应指受城市下垫面（大气底部与地表的接触面）特性影响，改变了下垫面的热力属性，在气温上表现为城区气温高、郊区气温低的现象。在气象学近地面大气等温线图上，城市郊外的广阔地区气温变化很小，如同一个平静的海面；而城区则是一个明显的高温区，如同突出海面的岛屿，所以被形象地称为城市热岛。城市热岛的形成，与城市化发展密不可分。人类改变城市地表而引起的小气候变化这一综合现象，在冬季最为明显，夜间也比白天明显，是城市气候最明显的特征之一。城区大量的建筑物和道路构成了以砖石、水泥和沥青等材料为主的下垫层，这些材料的热容量、导热率比郊区自然界的下垫层要大得多，且对太阳光的反射率低、吸收率大，因此在白天，城市下垫层的表面温度远远高于郊区。热岛效应使城市年平均气温比郊区高 1 ℃，甚至更多；夏季的城区局部气温甚至比郊区高 6 ℃以上。此外，城市密集高大的建筑物阻碍了气流的通行，使城市市区的风速减小，在一定程度上加剧了空气污染。

该研究前沿聚焦城市规划中城市热岛效应的影响。城市热岛强度随城市的发展不断加强，热岛效应对城市规划设计的影响重大。在城市发展的同时，既要考虑城市人口和建筑物密度，又要考虑气象因素。如为调节市区气候增加环市水系，在大气循环过程中，环市水系可起到二次降温的作用，达到减缓城市热岛效应的目的。因此，就我国而言，在扩建新市区或改建旧城区时，应适当拓宽南北走向的街道，以加强城市通风，减小城市热岛强度。综上所述，正确利用已有技术，控制城市过快发展，合理规划城市，在规划中充分考虑和利用气象因素非常重要。

（6）气象与可持续发展

可持续发展是既能满足当代需求而又不危及后代需求能力的发展，核心是世世代代的经济繁荣、社会公平和生态安全。气象在实现全面、协调、可持续发展中具有独特的地位。在合理开发利用气象资源及其他自然资源、保护生态环境中更是起着不可替代的作用。

“气象资源”的理念就是要合理开发气象资源，加强气象领域的研究，确定气象要素的最佳值和极限值（或者承载力），如合理开发和利用风能、太阳能以及空中水资源等气象资源，强化风能、太阳能和空中水资源等气象资源的评价和承载力研究分析工作，开发研制相关的关键和适用技术等。目前，常规能源面临枯竭，且资源在使用过程中引发的环境污染和生态恶化问题对人类社会的生存环境已产生严重影响，这就促使各国在制定发展规划时必须认真考虑能源的可持续发展问题。中国在气象与可持续发展方面已经开展了多方面的工作，也非常重视可再生能源技术的研究和开发利用，并将这些领域的科学技术研究列为科技发展的优先领域，强调在可续发展中需重视气候资源的优化调整，如研究对气候资源分布、数量和质量朝着有利于人类开发利用方向转化的技术方法等。

（7）海洋生物固氮的新空间格局和调控机制

海洋生物固氮指海洋微生物将 N_2 还原成能被生物利用氨的过程。海洋生物固氮能够提供“新”氮源，驱动海洋碳的同化和封存，对维持海洋初级生产力和海洋碳氮收支平衡至关重要。

目前该研究前沿主要的研究方向包括：研究全球开阔大洋、近岸海域水体生态系统中固氮生物的种群和固氮活性的时空分布格局及调控机制；探讨全球环境变化（海洋暖化、酸化等）以及人类活动影响（大气氮沉降、地表径流等）的背景下，海洋生物固氮的变化趋势及其对海洋生产力的贡献和对碳氮收支平衡的影响，进而全方位地认识海洋生物固氮对未来环境变化的响应以及在海洋生物地球化学中的作用。该领域的前沿方向包括：加强对近海典型生态系统，如红树林、海草床、珊瑚礁、海藻场等固氮生物的氮贡献、地理分布格局及对海岸带、海域海洋初级生产力驱动与持续性贡献的研究，完善海洋生物固氮的时空格局。此外，在深海生态系统中，尤其是冷泉、热液生态系统中，化能合成作用与深海生物固氮的耦合研究，将是海洋生物固氮的研究热点。组学技术、同位素示踪和机器学习等技术手段将发挥重要作用，同时固氮微生物生态菌剂的研发和在海洋生态工程中的应用是未来的研究趋势。

（8）基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术

肠道菌群是肠道系统中栖息的微生物总称，它与人体的健康和疾病密切相关。健康的肠道菌群不仅可以保护人体免受病原菌的侵袭，还可以参与人体多项生理过程，如生物活性代谢、免疫调节、糖脂代谢等。膳食中的脂肪、蛋白质和碳水化合物等作为主要营养素，在为人类机体提供能量的同时，也对肠道菌群的组成产生重要影响。不合理的膳食结构会导致肠道菌群失衡，肠道菌群失衡与肥胖、抑郁症、糖尿病及相关代谢疾病的发生发展存在显著关联。同时，个体基因、生活习惯和生活环境等差异导致人体的肠道菌群也不尽相同。因此，基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术，加强对改善人体健康状况的研究具有重要意义。基于肠道菌群干预的精准膳食调控旨在结合膳食指南，根据不同个体对营养需求以及自身肠道菌群的差异，提供科学的个性化膳食建议，以期实现对疾病的预防和控制。

（9）染料基工业污染物降解潜力的研究

染料基工业污染物的大肆排放导致资源过度浪费，造成严重的水体污染和环境恶化，威胁人类的生存环境和身体健康。因此，发展染料基工业污染物高效低成本降解与回用技术具有显著的现实意义和应用价值。纺织品印染产生的废水含有以染料等为主的多种有害物质，此类废水排放后，染料能吸收光线降低水体透明度，影响水生生物和微生物生长，不利于水体自净。酞青铜盐类和部分偶氮类等染料具有严重毒性，可直接或通过水体生物食物链间接危害人类身体健康。因此，染料基工业污染是一项亟须解决的全球性问题。染料基工业污染物主要以水的混合物形式存在，由于染料和水体污染物种类多样，目前主要运用的物理吸附法、化学氧化法和好氧生物处理法等降解方法普遍存在处理效率低、降解成本高、废水回收利用难等突出问题。当下世界各国都将染料基工业污染物降解与回用技术作为研究重点，该领域的研究方向集中在纤维基高效低成本染料污染物降解膜的设计与制备、新型高效降解染料基污染物材料的合成与微生物的筛选、物理–化学–生物联用降解体系的构建与工程化等方面。

（10）制浆造纸污染超低排放技术

制浆造纸过程中会产生大量废水，这对生态环境保护带来严峻挑战。近年来，由于水资源紧缺，环境压力加剧，国家和地方相关标准相继出台，对制浆造纸行业提出了更高的环保要求。因此，制浆造纸污染超低排放技术成为制浆造纸行业实现清洁化、绿色化生产的重要研究方向。

传统处理技术难以对造纸废水实现达标排放处理，而制浆造纸污染超低排放则可通过深度处理技术来实现造纸过程中污染物的超低排放。目前，多种技术已应用于制浆造纸污染的超低排放，包括膜分离与膜生物反应器技术、活性炭吸附技术、高级氧化技术、砂滤技术、磁整理及磁化–仿酶催化缩合技术、氧化塘和人工湿地技术等。然而，现有的

超低排放技术仍然面临生产成本高、维护难度大、传质效率低、再生困难、运行不稳定等挑战。未来，该研究前沿的发展趋势是重点研究高效、低成本，且运行更为稳定的深度处理技术，实现清洁化、绿色化的制浆造纸先进生产。

1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1　复合污染过程的微界面行为

环境中的污染物种类繁多，具有区域性、复合性特征，不同污染物在介质间发生交互作用，并影响各自的迁移转化和生物有效性。由于复合污染不是污染效应的简单叠加与放大，无法对其环境风险进行准确预测和开展过程调控与污染阻控，导致当前复合污染修复难度大、成本高、效果差，威胁农产品安全和人体健康。当前针对污染物微界面行为的研究大多集中在复合毒性效应，特别是重金属之间的协同或拮抗作用，复合污染在土–水–气–生物 / 微生物微界面上的行为及迁移转化机制尚不明确，亟须探明复合污染的微界面行为，为生物有效性调控及污染阻控修复提供理论支撑。

近几年来，国内外学者对复合污染的微界面行为进行了深入研究，针对复合污染在水–土–气–生物 / 微生物微界面上的污染物特征、迁移转化、原位表征技术、生物有效性等开展了一系列创新工作。“复合污染过程的微界面行为”工程研究前沿核心论文方面（见表 1.2.1），共有 57 篇论文，其中来自中国的核心论文有 21 篇，占比 36.8%，排名第 1 位；其次为美国和韩国，核心论文分别为 18 篇和 5 篇。该研究前沿中，67% 的论文以有机污染物为对象，重金属与重金属–有机污染物复合污染的研究相对较少；大部分关注污染物在纳米材料–水界面上的催化转化，其次为矿物材料上的复合微界面行为，涉及的介质相对较少，仅 1 篇关注生态系统中植物 / 生物微界面上行为及转化。

从篇均被引频次上看（见表 1.2.1），篇均被引频次区间为 55.00~136.75，中国核心论文的篇均被引频次为 56.76，针对复合污染的微界面行为的研究原创性及创新性仍有待加强，在该领域的影响力尚需提升。从论文相关度来看（见图 1.2.1），各国已开展较为全面广泛的协作，其中中国与美国的关联度最强；从论文内容上看，来自美国、日本等发达国家的核心论文主要集中于污染物的降解催化、膜处理、复合污染物之间的相互作用、胶体在污染物迁移转化中的作用等；来自中国的核心论文集中于纳米材料促进污染物迁移转化的机制、微界面行为的原位表征技术等。中国在复合污染过程微界面行为领域内的基础研究较少，方向较单一，尚处于探索与发展阶段。

从 Top 10 的核心论文产出机构来看（见表 1.2.2），来自中国的机构最多（6 个）。其中，中国科学院与华北电力大学、武汉理工大学的核心论文数量最多，为 3 篇。中国科学院主要研究污染物在微界面上的迁移与表征，华北电力大学与武汉理工大学主要研究纳米材料对污染物迁移、转化、降解的影响。从论文篇均被引频次上看，香港理工大学最高，为 87.00，两篇核心论文分别关注石墨烯材料对污染物的去除以及污染物在纳米复合材料存在条件下的去除机制；其次为阿卜杜勒阿齐兹国王大学与中国科学院，篇被引频次分别为 85.50、71.67。该研究前沿中施引核心论文的主要国家方面（见表 1.2.3），中国排在第 1 位，其次为美国和印度；施引核心论文 Top 10 主要产出机构中，来自中国的机构有 9 个，其中中国科学院、中国科学院大学和同济大学名列前茅。

该研究前沿主要产出高校 / 研究所之间存在较强的合作关系，中国科学院与其他单位的协作关系更为全面，其次为香港理工大学，但中国高校、研究所的国际合作交流尚有欠缺，应针对复合污染过程的微界面行为，进行更为深入的基础研究，为发展相应污染阻控技术提供理论支撑（见图 1.2.2）。

表 1.2.1 “复合污染过程的微界面行为”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	21	36.84%	1192	56.76	2016.3
2	美国	18	31.58%	1076	59.78	2015.8
3	韩国	5	8.77%	377	75.40	2017.8
4	沙特阿拉伯	5	8.77%	349	69.80	2016.0
5	印度	4	7.02%	547	136.75	2015.8
6	德国	4	7.02%	301	75.25	2015.5
7	英国	4	7.02%	258	64.50	2017.2
8	西班牙	4	7.02%	230	57.50	2015.2
9	加拿大	3	5.26%	211	70.33	2016.7
10	法国	3	5.26%	165	55.00	2016.3

表 1.2.2 “复合污染过程的微界面行为”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	中国科学院	中国	3	5.26%	215	71.67	2015.3
2	华北电力大学	中国	3	5.26%	211	70.33	2016.7
3	武汉理工大学	中国	3	5.26%	148	49.33	2017.3
4	香港理工大学	中国	2	3.51%	174	87.00	2018.0
5	阿卜杜勒阿齐兹国王大学	沙特阿拉伯	2	3.51%	171	85.50	2015.5
6	西班牙国家研究委员会	西班牙	2	3.51%	146	73.00	2014.5
7	上海交通大学	中国	2	3.51%	143	71.50	2017.0
8	西安交通大学	中国	2	3.51%	142	71.00	2015.5
9	阿卜杜拉国王科技大学	沙特阿拉伯	2	3.51%	137	68.50	2016.0
10	科罗拉多矿业大学	美国	2	3.51%	108	54.00	2016.5

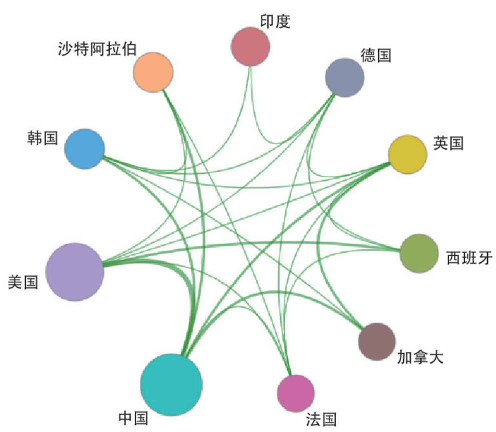

图 1.2.1 “复合污染过程的微界面行为”工程研究前沿主要国家间的合作网络

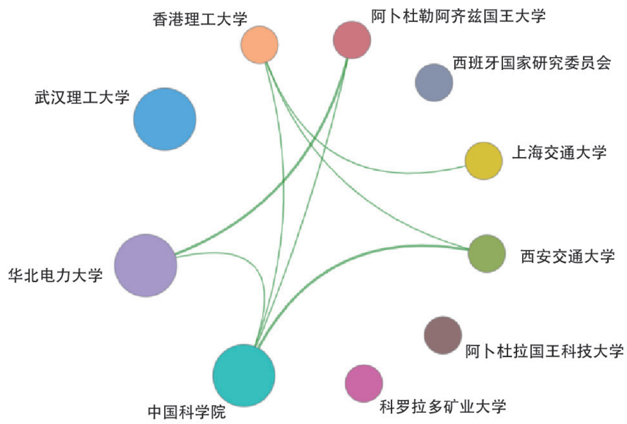

图 1.2.2　“复合污染过程的微界面行为”工程研究前沿的主要机构间合作网络

表 1.2.3　“复合污染过程的微界面行为”工程研究前沿中施引核心论文主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	177	51.01%	2019.7
2	美国	39	11.24%	2019.7
3	印度	28	8.07%	2019.4
4	韩国	16	4.61%	2019.8
5	澳大利亚	14	4.03%	2019.4
6	英国	14	4.03%	2019.8
7	法国	13	3.75%	2019.5
8	意大利	12	3.46%	2019.8
9	日本	12	3.46%	2019.5
10	德国	11	3.17%	2019.5

表 1.2.4　“复合污染过程的微界面行为”工程研究前沿中施引核心论文主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	中国	21	23.08%	2019.3
2	中国科学院大学	中国	12	13.19%	2019.0
3	同济大学	中国	9	9.89%	2019.7
4	华南理工大学	中国	8	8.79%	2020.0
5	南开大学	中国	7	7.69%	2019.6
6	马来西亚理工大学	马来西亚	6	6.59%	2020.0
7	浙江大学	中国	6	6.59%	2020.0
8	江苏大学	中国	6	6.59%	2020.0
9	香港理工大学	中国	6	6.59%	2019.0
10	哈尔滨工业大学	中国	5	5.49%	2020.0

1.2.2 海洋生物固氮的新空间格局和调控机制

氮素是生命的关键要素，特别是在营养贫乏的大洋环境。通常以 Redfield Ratio（f 比）6.6 作为碳氮比（C/N）标准，作为判别海洋生产力的限制性营养元素的依据。然而，对大西洋和东太平洋真光层的相关研究表明，仅从 NO_3^- 的消耗外推，会严重低估海洋有机碳输出；实际上，另有 34%~77% 的新生产力应归因于海洋生物固氮。从此，拓展了海洋生物固氮的新空间格局，提高了海洋初级生产力的估算，解决了困扰科学家多年的碳氮收支平衡中“漏失的汇”问题。

海洋生物固氮能够提供“新”氮源，驱动海洋碳的同化和封存。迄今为止，海洋生物固氮量约为 140 Tg N/yr。然而关于生物固氮作用的时空特性、种类识别、遗传能力、适应性及其生长所需营养物质的获取等调控机制尚未明确。之前普遍认识的海洋优势固氮类群只有束毛藻和胞内植生藻。随着从基因和基因组水平到整个生态系统水平研究的加深，新发现了更多的固氮物种，如海洋中广泛分布的海洋微型浮游生物（UCYN-A、UCYN-B 和 UCYN-C），因此，固氮生物远比之前所预期的要广得多。目前研究表明生物固氮主要受温度、磷、铁等环境因素控制，同时也受全球气候环境变化和人类活动的影响，如在厄尔尼诺与南方涛动事件年份发现的不同于常年的全球海洋生物固氮空间格局。

近年来，通过建立生物地球化学–生态学模型，综合研究了海洋固氮作用及其控制因素。然而，近年海域现场观测结果却显著不同于模型的推测，关于大洋固氮作用的空间格局仍存在显著争议。因此，需要联合现场观测、实验室分析（基因组学、转录组学和同位素等）、卫星遥感监测等方法开展更加全面的研究，并结合全球及区域环境变化，构建生物地球化学模型，更深层次地研究海洋生物固氮空间分布规律和调控机制。同时，在海洋陆架和沿岸典型湿地生态系统中，生物固氮活性研究的时空拓展和新的固氮物种、联合固氮方式的不断发现，均大大扩展了海洋生物固氮新空间格局的认知，为海洋生物多样性、海洋初级生产力评估和碳氮循环提供了新的研究方向，推动了其在海洋生态工程、海洋水产养殖和地球工程等领域的应用。此外，深海冷泉和热液生态系统中化能生物固氮的耦合研究，也为海洋生物固氮的新时空格局认知开启了新的研究视角。

“海洋生物固氮的新空间格局和调控机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家方面（见表 1.2.5），美国的核心论文数和被引频次均位于第 1 位，研究优势明显。在主要产出国家合作网络方面（见图 1.2.3），Top 10 国家间的合作密切。在主要产出机构方面（见表 1.2.6），核心论文数 Top 10 的机构主要集中在美国。在主要机构间的合作网络中（见图 1.2.4），各个机构之间均有密切合作。在施引核心论文的国家排名中（见表 1.2.7），中国位于第 3 位，中国科学院和厦门大学在施引核心论文的机构排名（见表 1.2.8）中分别位于第 3 位和第 9 位。总之，该工程研究前沿各国家以及各机构间存在广泛的合作关系。我国在该领域仍需加快发展，进一步推进与其他国家和机构间的交流合作。

1.2.3 基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术

人体肠道中栖息着数万亿计的微生物群落，这些微生物群落既是人体重要的消化吸收场所，又是重要的免疫器官。肠道菌群与人体处于共生关系，肠道菌群及其代谢产物直接影响宿主健康，肠道菌群在肠道疾病、肥胖症、糖尿病、免疫系统疾病等致病机制中发挥潜在作用。肠道菌群的组成和功能是由人类遗传背景和外部因素共同决定的，而膳食是最关键的外部因素之一。膳食主要通过营养元素的种类、数量及平衡状态影响肠道菌群的组成及其代谢产物，控制机体微生态的稳定性，从而影响人体健康。肠道微生物群的个体差异很大，每个个体

表 1.2.5 “海洋生物固氮的新空间格局和调控机制”工程研究前沿中核心论文主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	17	65.38%	946	55.65	2015.3
2	德国	6	23.08%	269	44.83	2016.0
3	荷兰	4	15.38%	249	62.25	2016.5
4	英国	4	15.38%	220	55.00	2016.5
5	日本	4	15.38%	180	45.00	2015.0
6	南非	2	7.69%	166	83.00	2016.0
7	瑞士	2	7.69%	145	72.50	2014.0
8	加拿大	2	7.69%	109	54.50	2017.0
9	意大利	2	7.69%	109	54.50	2017.0
10	印度	2	7.69%	99	49.50	2015.5

表 1.2.6 “海洋生物固氮的新空间格局和调控机制”工程研究前沿中核心论文主要产出机构

序号	机构	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	加州大学圣克鲁兹分校	美国	4	15.38%	188	47.00	2014.8
2	东京大学	日本	4	15.38%	180	45.00	2015.0
3	南加州大学	美国	3	11.54%	154	51.33	2015.0
4	加州大学欧文分校	美国	3	11.54%	132	44.00	2017.0
5	华盛顿大学	美国	2	7.69%	157	78.50	2014.5
6	伍兹霍尔海洋研究所	美国	2	7.69%	119	59.50	2014.5
7	夏威夷大学马诺阿分校	美国	2	7.69%	118	59.00	2017.5
8	利物浦大学	英国	2	7.69%	111	55.50	2017.0
9	乌得勒支大学	荷兰	2	7.69%	109	54.50	2017.0
10	加州大学洛杉矶分校	美国	2	7.69%	99	49.50	2015.5

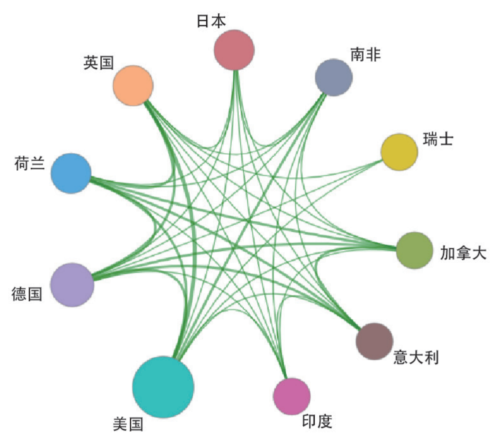

图 1.2.3 “海洋生物固氮的新空间格局和调控机制”工程研究前沿主要国家间的合作网络

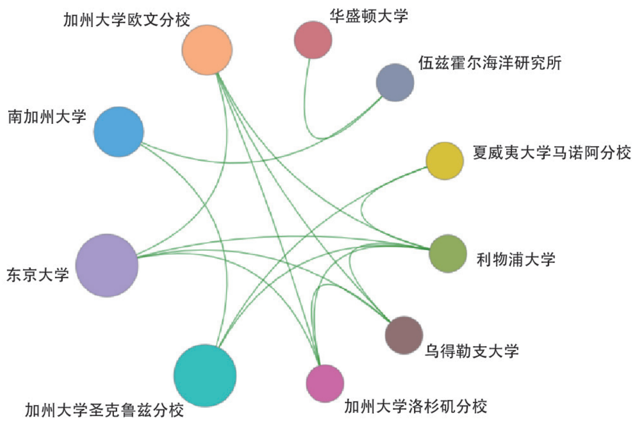

图 1.2.4 “海洋生物固氮的新空间格局和调控机制”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “海洋生物固氮的新空间格局和调控机制”工程研究前沿中施引核心论文主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	473	32.51%	2017.8
2	德国	174	11.96%	2017.6
3	中国	148	10.17%	2018.1
4	英国	147	10.10%	2017.8
5	法国	129	8.87%	2017.8
6	澳大利亚	109	7.49%	2018.1
7	加拿大	72	4.95%	2018.1
8	日本	71	4.88%	2018.0
9	西班牙	47	3.23%	2017.8
10	印度	45	3.09%	2018.0

表 1.2.8 “海洋生物固氮的新空间格局和调控机制”工程研究前沿中施引核心论文主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	加州大学圣克鲁兹分校	美国	50	12.92%	2017.0
2	华盛顿大学	美国	46	11.89%	2017.7
3	中国科学院	中国	41	10.59%	2017.6
4	南加州大学	美国	35	9.04%	2017.7
5	不来梅大学	德国	32	8.27%	2017.9
6	伍兹霍尔海洋研究所	美国	32	8.27%	2017.3
7	马普学会海洋微生物研究所	德国	31	8.01%	2017.7
8	普林斯顿大学	美国	31	8.01%	2017.9
9	厦门大学	中国	30	7.75%	2018.1
10	土伦瓦尔大学	法国	30	7.75%	2017.6

的最适饮食需根据其肠道菌群来制定。目前，主要通过鉴定人体不同时期肠道菌群的差异情况及不同地域人群肠道菌群的普适性，阐明肠道菌群特定干预策略的生物学影响。同时，通过深入研究食物对肠道微生物群的影响及其互作的特定微生物群，研究人类的肠道菌群与膳食模式、结构以及疾病发生发展的深层次关联。

随着社会经济的发展，人类已经进入一个可以通过饮食调节肠道菌群及其代谢谱而实现健康的时代。构建食物中不同成分与肠道菌群的互作网络图，实现精准营养目标的关键基础性工作，揭示微生物群“结构–功能”的关系，促进“肠道菌群指导食物”（microbiota-directed foods）的研发。未来，利用肠道菌群与膳食的互作关系，发展安全、可靠、营养、健康有益且经济实惠的精准膳食调控技术，具有广阔的应用前景。

“基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家方面（见表 1.2.9），在核心论文数和被引频次上，美国居于第 1 位。在主要产出国家合作网络中（见图 1.2.5），多个国家间的合作频繁。在核心论文的主要产出机构方面（见表 1.2.10），荷

表 1.2.9 “基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	25	31.25%	4180	167.20	2015.4
2	英国	18	22.50%	3328	184.89	2014.7
3	意大利	15	18.75%	2123	141.53	2015.4
4	荷兰	13	16.25%	2334	179.54	2014.2
5	比利时	9	11.25%	1477	164.11	2014.8
6	法国	8	10.00%	1877	234.62	2014.8
7	瑞典	6	7.50%	1669	278.17	2015.0
8	丹麦	6	7.50%	1317	219.50	2014.5
9	德国	6	7.50%	1013	168.83	2015.5
10	中国	6	7.50%	747	124.50	2016.0

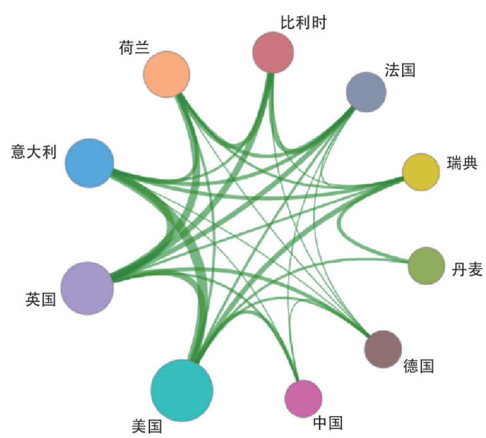

图 1.2.5 “基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

兰瓦格宁根大学的核心论文数和论文比例排在第 1 位。从主要机构间合作网络（见图 1.2.6）可以看出，华盛顿大学倾向于独立研发，而其他机构则存在相对密切的合作关系。在施引核心论文主要产出国家方面（见表 1.2.11），中国的施引核心论文数和施引核心论文比例位居第 2 位。在施引核心论文的主要产出机构方面（见表 1.2.12）。哈佛大学的施引核心论文数和施引核心论文比例明显高于其他机构，位居第 1 位。中国科学院在施引核心论文的机构排名中位于第 3 位。

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

环境领域组所研判的 Top 10 工程开发前沿（见表2.1.1），涉及环境科学工程、气象科学工程、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程以及轻工科学工程 6 个学科方向。其中，各工程开发前沿 2014 年至 2019 年的逐年核心专利公开量情况如表 2.1.2 所示。

（1）土 – 水污染协同修复技术

土壤和地下水之间存在密切的物质交换，土壤

表 1.2.10 “基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	瓦格宁根大学	荷兰	8	10.00%	1193	149.12	2014.0
2	法国国家农业科学研究院	法国	7	8.75%	1781	254.43	2014.6
3	哥本哈根大学	丹麦	6	7.50%	1317	219.50	2014.5
4	天主教鲁汶大学	比利时	6	7.50%	1189	198.17	2014.8
5	博洛尼亚大学	意大利	6	7.50%	860	143.33	2014.7
6	哥德堡大学	瑞典	4	5.00%	1528	382.00	2015.0
7	华盛顿大学	美国	4	5.00%	713	178.25	2015.5
8	雷丁大学	英国	4	5.00%	661	165.25	2013.8
9	赫尔辛基大学	芬兰	4	5.00%	555	138.75	2014.2
10	阿伯丁大学	英国	3	3.75%	759	253.00	2013.7

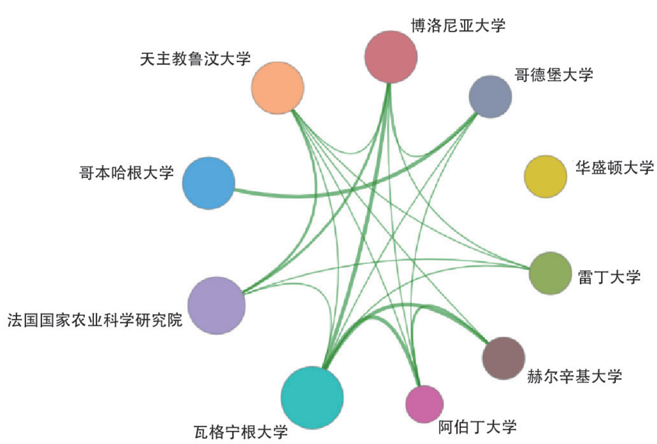

图 1.2.6 “基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	2566	28.14%	2017.8
2	中国	1710	18.75%	2018.4
3	英国	762	8.36%	2017.6
4	意大利	752	8.25%	2017.7
5	西班牙	575	6.31%	2017.8
6	德国	549	6.02%	2017.8
7	法国	514	5.64%	2017.5
8	加拿大	487	5.34%	2017.5
9	荷兰	471	5.17%	2017.5
10	澳大利亚	422	4.63%	2017.9

表 1.2.12　“基于肠道菌群干预的精准膳食调控技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	哈佛大学	美国	227	16.31%	2017.8
2	哥本哈根大学	丹麦	175	12.57%	2017.8
3	中国科学院	中国	149	10.70%	2018.3
4	科克大学	爱尔兰	127	9.12%	2018.0
5	伦敦国王学院	英国	116	8.33%	2017.4
6	瓦格宁根大学	荷兰	106	7.61%	2016.9
7	博洛尼亚大学	意大利	104	7.47%	2017.5
8	哥德堡大学	瑞典	100	7.18%	2017.2
9	上海交通大学	中国	100	7.18%	2017.9
10	伊利诺伊大学	美国	95	6.82%	2017.9

表 2.1.1　环境领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	土–水污染协同修复技术	357	635	1.78	2017.1
2	用于废水处理的微生物制剂	711	845	1.19	2017.2
3	多介质污染协同治理	1000	3293	3.29	2016.5
4	空气传播病原体探测器系统和方法	1000	29 308	29.31	2013.6
5	自然灾害预防预警和恢复决策工程	1000	13 830	13.83	2016.0
6	纳米复合海洋防污涂料	214	384	1.79	2017.2
7	离岸式波浪发电技术	250	648	2.59	2016.4
8	食品智能制造技术	624	4506	7.22	2016.0
9	碳基纤维材料电子器件	1000	12 138	12.14	2015.8
10	制浆造纸污染超低排放技术	1000	3263	3.26	2017.2

表 2.1.2　环境领域 Top 10 工程开发前沿的逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	土–水污染协同修复技术	23	29	34	124	63	76
2	用于废水处理的微生物制剂	45	55	89	123	158	215
3	多介质污染协同治理	79	93	127	185	190	231
4	空气传播病原体探测器系统和方法	93	97	97	93	86	103
5	自然灾害预防预警和恢复决策工程	102	96	150	171	173	162
6	纳米复合海洋防污涂料	3	9	30	56	76	34
7	离岸式波浪发电技术	41	26	21	36	39	63
8	食品智能制造技术	42	68	60	108	138	109
9	碳基纤维材料电子器件	75	80	73	176	104	266
10	制浆造纸污染超低排放技术	14	42	146	250	254	247

与地下水污染协同防治是推进新时代生态文明建设的必然要求。石油、化工、冶炼等重点行业聚集区场地容易发生土壤–地下水–地表水多重污染，土–水污染协同修复技术是保障土壤与地下水安全重要的开发方向。在该开发前沿的主要专利中，原位修复技术占 67.3%，异位修复技术占 32.7%。开发的原位协同修复的技术方向主要包括：修复药剂的注入与混合装置、植物吸收 / 植物–蚯蚓 / 植物–微生物联合修复工艺、电动力–可渗透反应墙联合修复技术、活性炭 / 生物炭吸附、生物通风等。药剂注入与混合装置是原位协同修复技术方向最主要的开发热点，涉及高压喷注、振动、抛撒等技术。开发的异位协同修复技术通常为多种技术组合，主要包括：土壤开挖 / 输送 / 分选 / 粉碎 / 混料 / 搅拌装置、土壤淋洗 / 过滤与淋洗水处理、热脱附与吸附 / 冷凝处理、化学氧化与高级氧化、生物滤池等。原位和异位协同修复处理针对的主要污染物包括石油烃、卤代烃、重金属等。在该开发前沿中，中国申请的专利占 99% 以上，这表明近年来我国对土–水污染协同修复技术开发的重视。其中，大多数专利是针对土、水的修复技术，相对独立，以组合型装置或系统为主，仍缺乏土–水高度协同修复的实用技术。未来，基于不同污染物的土–水分配与迁移转化特性的高效协同修复技术是重要的开发方向。

（2）用于废水处理的微生物制剂

微生物制剂指利用自然界中已经存在或经人工培育、具有特定代谢功能的微生物，通过菌群构建等方法，以强化废水处理系统为目标，得到的微生物菌液制剂或干粉制剂。针对人类活动产生的大量新兴及难降解污染物，传统的生化法很难将其有效去除。通过向废水处理体系中投加特定的微生物制剂，可实现目标污染物的快速降解，具有操作方便、经济高效、应用范围广、无二次污染等明显优势，并且与现有水处理设施兼容性良好。目前，单组分微生物制剂的研究已颇具成效，并在生活污水、富营养化水体、养殖废水、垃圾渗滤液和工业废水等处理过程中得到应用。与常规单组分微生物制剂相比，复合型微生物制剂由多种功能菌群组成，具有更好的处理效果和更高的应用潜力。然而，由于各微生物间代谢产物的相互作用，复合微生物制剂的稳定性面临较大挑战。因此，探究各微生物种群间相互作用机理，筛选最优的菌种组合、增强群落稳定性，是拓展其在废水处理中应用发展的必由之路。当前，微生物制剂产业仍存在产品标准化程度低、实际应用效果不稳定、理论研究不够深入等问题。

今后应根据污水处理领域的实际需求，进一步开发特异高效、价格低廉的复合微生物菌剂，同时注重产品的系列化、标准化，提高微生物制剂的适用性与经济性。

（3）多介质污染协同治理

不同介质环境污染的复合效应及协同控制是当前环境领域的前沿科学技术问题。区域环境质量问题与气－水－土 3 个介质不可分割，区域环境质量改善的核心是多介质复合污染的协同控制。区域复合污染的源排放、环境浓度及效应之间存在非常复杂的非线性关系。多介质复合污染物的暴露水平普遍较高，具有复杂的健康效应机制和暴露－效应关系。大气中的氮磷沉降会加重水体的富营养化程度，燃煤过程中产生的汞沉降会对整个生态系统带来健康风险。污水和污泥在处理过程中，释放的恶臭气体、生物气溶胶以及温室气体等多种污染物会对空气环境造成不利影响。土壤中氮肥的过度施用及施用方法不当会导致氮肥以氨和氮氧化物的形式进入大气，不仅能够产生恶臭气味，同时还会引发温室效应。化肥施用和禽畜养殖是氨排放的重要来源，而氨排放与 $PM_{2.5}$ 污染和雾霾的形成之间有复杂的关系。此外，农业面源污染是湖泊水体富营养化的重要来源。因此，亟须开展大气－地表水－土壤－地下水等多介质污染协同治理，集中攻关，解决限制理论创新、技术突破和工程技术实施的关键难题，构建大尺度环境过程的监测、模拟技术，提升清洁生产、全过程风险管控技术，形成区域尺度上环境综合治理技术与系统解决方案，构建多介质污染协同控制理论技术体系和智慧监管体系，实现多介质环境安全新格局。

（4）空气传播病原体探测器系统和方法

空气传播病原体是对能通过空气侵入新的易感宿主，并引起疾病的微生物和空气传播病原体的统称，主要包括病毒（甲型 H1N1 流感、严重急性呼吸综合征、新型冠状病毒肺炎等）和细菌（结核杆菌、肺类链球菌等）。近几十年来，由于空气传播病原体传播范围广、速度快等特性，人类一直面临着此类传染病的威胁。目前病原体的检测主要依靠临床观察和对病人样本的精确检测，这些进程花费时间长、检测范围小，滞后于对疾病快速控制和预防的需求。从空气中直接检测病原体是空气传播疾病防控的理想手段之一。但气溶胶中存在的病原体往往水平极低，需要探测器具有极高的灵敏度。为实现对空气传播疾病的迅速防控，需要创建一个探测器系统和相关方法来检测空气中的病原体，为此，亟须开发并融和多种检测方法，以及整合一体化、自动化的检测流程和数据智能传输系统。

（5）自然灾害预防预警和恢复决策工程

全球自然灾害在 21 世纪前 20 年明显增加，特别是与气候相关的灾害数量增长迅速。具体来看，2000 年至 2019 年期间，全球共记录自然灾害 7 348 起，造成 123 万人死亡，受灾人口总数高达 40 亿，经济损失高达 3 万亿美元。中国自然灾害频发、分布广、损失大，是世界上自然灾害最为严重的国家之一。就目前来看，气候变化引起的极端天气气候事件（如厄尔尼诺、干旱、洪涝、雷暴、冰雹、风暴、高温天气和沙尘暴等）出现频率与强度明显上升，危及我国的国民经济发展。随着我国经济的快速增长，天气气候灾害造成的损失绝对值越来越大，尤其是 2020 年大范围的洪涝严重影响了人民生活。因此，自然灾害预防预警以及灾后恢复决策工程的开发在防灾减灾中尤为重要，是今后的研究热点。

（6）纳米复合海洋防污涂料

海洋生物污损对海防、海运交通、沿海工业和渔业等造成了极大危害。据统计，美国每年因生物污损引起的经济损失达 7 亿美元，英国的损失每年达 5000 万英镑。近年来，纳米复合海洋防污材料因其能够解决有机锡防污涂料的环境污染问题，引起了各国新型防污涂料研究者的重视。纳米复合海洋防污材料指利用纳米材料具有的超疏水性、低表面能以及极性能等性能改性的海洋防污涂料。目前纳米复合海洋防污涂料的研究热点和主要方向

包括：含耐沾污性纳米组分的海洋防污涂料、含紫外线屏蔽和光催化杀菌纳米组分的海洋防污涂料、含有阻止生物附着纳米组分的海洋防污涂料，以及其他特殊作用纳米组分的海洋防污涂料。当今，解决纳米材料在涂料中的稳定分散及与防污涂料相容性问题是未来纳米复合海洋防污材料的重要发展方向，也是世界发展海洋防污涂料、纳米复合海洋防污涂料的突破口。

（7）离岸式波浪发电技术

波浪发电技术指利用波浪能装置将波浪能转换为机械能，最终转换成电能的技术。由于离岸的波浪能远大于岸边的波浪能，且离岸式发电装置比岸基式发电装置具有更强的生存能力，因此，波浪发电技术正朝着离岸式的方向发展。离岸式波浪发电机以液压式和直驱式为主。其中，直驱式波浪发电机能够直接发电，能量转换过程无须变速器，具有可靠性高、维护成本低的优势，在离岸大功率并网应用中发展前景广阔。目前，离岸式波浪发电技术的主要技术方向包括：直驱式波浪转换装置的结构设计、直驱式波浪转换装置功率捕获控制技术以及直驱式波浪发电功率波动处理技术。直线发电机是直驱式波浪发电系统的核心能量转化装置。提高发电机的可靠性和能量转化效率、简化复合直线电机结构和降低装置体积是当前全球直驱式波浪发电技术的重要发展方向。研制适用于波浪发电低速大推力场合的高性能直线发电机，是推广发展直驱式波浪发电系统需克服的关键技术。另外，超导材料在波浪发电领域也具有较大的应用前景。

（8）食品智能制造技术

食品工业是重要的传统民生产业，是国民经济的支柱产业。随着信息技术的迅速发展，大数据、云计算、物联网等新兴技术在食品工业领域得到快速应用，引发了食品工业从研发、生产到销售的整个产业链发展模式的深刻变革。尤其是近年来智能制造在食品工业领域的广泛应用，为促进食品工业转型升级提供了途径和方向。智能制造在保障产品质量安全、提高产品质量等方面取得了明显成效。具体来看，一是智能化助力食品安全。智能工厂利用物联网技术和监控技术加强信息管理服务，提高生产过程可控性、减少生产线人工干预，同时，智能工厂具有自主采集数据、分析数据的能力，实现了人与机器的相互协调合作，保障食品的安全生产。二是智能化推动产品优化。智能化车间通过对各生产环节的关键指标进行数据采集和分析，可以生成数字化指标，并根据中间物料状态和最终产品口感体验不断优化指标，使生产过程的可控性、产品的稳定性和品质大大提高。三是智能化提高生产效率。智能化生产系统采用集成化的设计理念，能够对复杂的加工过程进行流程优化，压缩生产环节，并通过信息技术、调度算法、自动识别等技术实现自动化生产，具有高速度和高精度等特点。

（9）碳基纤维材料电子器件

碳基纤维材料电子器件是以碳基纤维作为基本单元，以纤维膜、纱线、织物等纺织结构构建的一系列电子器件，具有柔性可集成的特点。碳基纤维的直径范围从几百纳米到几十微米，可以实现器件从微观到宏观的结构定制。目前，碳基纤维电子器件的主要技术方向是柔性纤维基储能器件、柔性纤维基传感器、柔性智能可穿戴纺织器件等。具体包括碳基纤维太阳能电池、碳基纤维超级电容器、柔性燃料电池、碳基压电纤维传感器、碳基纳米纤维摩擦发电机等。得益于碳基纤维材料高效的离子和电子传输性能以及杰出的柔性，碳基纤维电子器件正朝高性能、轻薄化、柔性化、高集成和可穿戴方向发展。因其应用领域的广泛性和先进性，碳基纤维材料电子器件的发展令人期待。

（10）制浆造纸污染超低排放技术

制浆造纸工业是国民经济重要的基础原材料产业。然而，随着制浆造纸工业的飞速发展，其引发的环境污染问题也日益严重。因此，开发制浆造纸污染超低排放技术是满足社会需求和绿色可持续发展的关键。制浆造纸污染超低排放技术主要是指利

用深度处理技术来实现污染物的超低排放，以解决传统常规处理技术难以达到排放标准的问题。现有的超低排放技术包括高级氧化技术、膜分离技术与膜生物反应器（MBR）技术、活性炭吸附技术及其综合运用砂滤技术、磁整理及磁化–仿酶催化缩合和氧化塘及人工湿地等技术。然而，当前制浆造纸污染超低排放技术仍面临着实用性和经济性不足的挑战。因此，开发成熟稳定、经济高效的制浆造纸污染超低排放技术，实现制浆造纸污染超低排放，是目前制浆造纸领域的重要研究方向。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　空气传播病原体探测器系统和方法

空气传播类疾病一直不断威胁着人类的健康，如甲型 H1N1 流感、严重急性呼吸综合征、新型冠状病毒肺炎等。空气传播病原体是对能通过空气侵入新的易感宿主，并引起疾病的微生物和空气传播病原体的统称，主要包括病毒和细菌等，传播方式主要有经飞沫、飞沫核和尘埃传播。目前病原体的检测主要依靠临床观察和对病人样本的精确检测，这些进程花费时间长、检测范围小，远远滞后于对疾病快速控制和预防的需求。从空气中直接检测病原体是空气传播疾病防控的理想手段之一。但气溶胶中存在的病原体往往水平极低，需要探测器具有极高的灵敏度。同时，气溶胶中存在的如唾液、粉尘颗粒等样品的干扰，分散而异质。这些气溶胶颗粒大小随排出方式的不同而变化：说话排出的为 33.5 ± 5 μm，呼吸为 1270.3 ± 20 μm，咳嗽为 1~40 μm，打喷嚏则为 2~16 μm，这对病原体的精确检测带来了挑战。空气传播病原体检测的另一主要障碍是样品处理和自动化，检测过程主要有空气采样、传感器检测两个主要组成部分，目前针对两个独立部分已有较多研究，但少有研究将其作为统一的整体进行一体化、自动化的研究。另外，从采样到检测的加载工作往往由人工来完成，从而难以实现连续采样、自动化工作和实时反馈的完整体系。

为实现对空气传播疾病的迅速防控，需要创建一个完整、灵敏、低成本的探测器系统和相关方法来快速、精确、广泛地检测空气中的病原体。这一目标的实现亟须开发并融和多种检测方法，例如实时聚合酶链式反应检测（PCR）、核酸检测、质谱法（MS）、胶体金检测、激光粒子计数、环介导等温扩增技术（LAMP）、酶联免疫吸附法（ELISA）、实时石英晶体微平衡（QCM）技术等。此外，还需要设计一体化、自动化检测流程以及数据智能传输系统以实现空气传播病原体的连续和实时检测。

从国际范围来看，“空气传播病原体探测器系统和方法”核心专利的主要产出国家中（见表 2.2.1），美国在专利公开量和平均被引数方面均排在第 1 位。中国核心专利公开量仅次于美国，位于第 2 位，被引比例为 2.01%，排在第 6 位。英国、德国、加拿大等国家专利公开量小于中国，但平均被引数超过中国。这表明，中国在空气传播病原体检测方面的研究和创新数量不断上升，影响力仍需提高，研究的开创性有待提高。该工程前沿国家间合作网络方面（见图 2.2.1），国际间合作较为广泛而紧密，中国除与美国合作最为紧密外，与瑞士、英国的学者也均有合作。

该工程开发前沿中核心专利的主要产出机构方面（见表 2.2.2），韩国 Bizmodeline 公司的核心专利公开量为 28 项，排在第 1 位，但核心专利平均被引数仅为 0.04；而公开核心专利平均被引比例最高的机构为美国艾伯维公司，公开量占比为 1.70%，但被引比例达到了 5.78%，而相同专利公开数的美国 Parion Sciences 公司平均被引比例仅有 0.68%；美国雅培公司公开的核心专利也具有较高影响力，平均被引数达到 104.13。另外，平均被引数最高的机构为美国丹娜法伯癌症研究院，虽然公开专利数比例仅占 1.10%，但平均被引数达到了 138.64。国际主要机构的合作关系网络方面（见图 2.2.2），

表 2.2.1 “空气传播病原体探测器系统和方法”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	美国	620	62.00%	23 736	80.99%	38.28
2	中国	72	7.20%	589	2.01%	8.18
3	韩国	56	5.60%	155	0.53%	2.77
4	英国	48	4.80%	1758	6.00%	36.63
5	德国	47	4.70%	2508	8.56%	53.36
6	加拿大	40	4.00%	783	2.67%	19.58
7	瑞士	32	3.20%	856	2.92%	26.75
8	日本	31	3.10%	506	1.73%	16.32
9	澳大利亚	19	1.90%	198	0.68%	10.42
10	印度	16	1.60%	541	1.85%	33.81

表 2.2.2 “空气传播病原体探测器系统和方法”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	韩国 Bizmodeline 公司	28	2.80%	1	0.00%	0.04
2	美国艾伯维公司	17	1.70%	1695	5.78%	99.71
3	美国 Parion Sciences 公司	17	1.70%	200	0.68%	11.76
4	美国雅培公司	16	1.60%	1666	5.68%	104.13
5	美国百时美施贵宝公司	14	1.40%	1376	4.69%	98.29
6	美国丹娜法伯癌症研究院	11	1.10%	1525	5.20%	138.64
7	美国 ICU 医疗公司	10	1.00%	336	1.15%	33.60
8	哈佛大学	8	0.80%	913	3.12%	114.13
9	瑞士诺华公司	8	0.80%	425	1.45%	53.13
10	美国 3M 创新有限公司	8	0.80%	311	1.06%	38.88

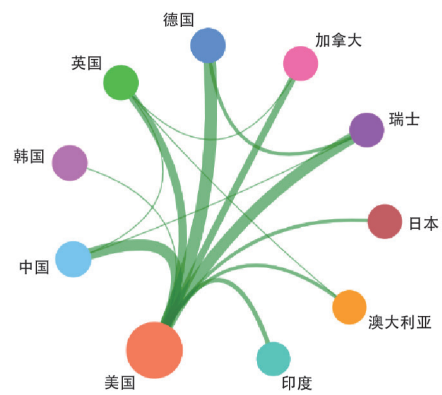

图 2.2.1 “空气传播病原体探测器系统和方法”工程开发前沿主要国家间的合作网络

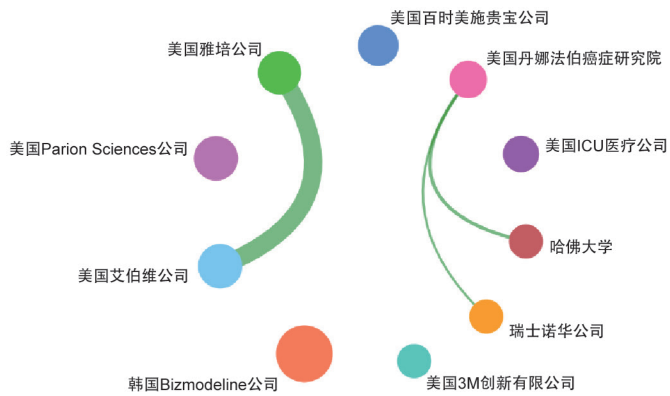

图 2.2.2　“空气传播病原体探测器系统和方法”工程开发前沿主要机构间的合作网络

合作关系最为紧密的机构是美国艾伯维公司与美国雅培公司，美国丹娜法伯癌症研究院与美国哈佛大学、瑞士诺华公司也分别有合作。今后，中国在该研究前沿应需进一步深化与国际机构的合作，除美国外，还可与英国、德国、印度、瑞士等核心专利影响力较大的国家加强合作。在技术开发方面也应破除“唯数量论”，增加科研产出影响力的相关评估，激励科研机构注重研究的质量与影响力，促进学科领域的长足发展。

2.2.2　自然灾害预防预警和恢复决策工程

近几十年来，气候变化引起的极端天气气候事件（如厄尔尼诺、干旱、洪涝、雷暴、冰雹、风暴、高温天气和沙尘暴等）出现频率与强度明显上升，给社会、经济和人民生活造成了严重的影响和损失。据估计，1991—2000 年，全球每年受气象水文灾害影响的平均人数为 2.11 亿，是因战争冲突受到影响人数的 7 倍。亚洲是遭受自然灾害袭击最频繁的地区，全球气候变化以及相关的极端气候事件所造成的经济损失在过去 40 年平均上升了 10 倍。我国每年因各种天气气候灾害造成的农田受灾面积为 3.4×10^7 hm^2，受干旱、暴雨、洪涝和热带风暴等重大灾害影响的人口约达 6 亿人次，平均每年因受天气气候灾害造成的经济损失约占国内生产总值的 3%~6%。天气气候灾害引发的生态、环境、地质、社会、人文、经济等继发性灾害带来的经济损失更为严重。

在与自然共存的长期实践中，人类形成了许多行之有效的预防和减轻自然灾害的措施。具体来看，在防灾减灾中应坚持“预防为主”的基本原则，把灾害的监测预报预警放到突出位置，高度重视和做好面向全社会的预警信息发布。气象灾害是可以有较长预警时效、较高预测预报准确率的一类突发公共事件，加强灾害性天气的短时、临近预报，加强突发气象灾害预警信号制作工作，加强气象预警信息发布工作，是提高防灾减灾水平的重要科技保障。要依靠科技，提高防灾减灾的综合素质。通过加强防灾减灾领域的科学研究与技术开发，采用与推广先进的监测、预测、预警、预防和应急处置技术及设施，充分发挥专家队伍和专业人员的作用，提高应对自然灾害的科技水平，在国家经济发展的灾后恢复决策工程中提供气象保障。

“自然灾害预防预警和恢复决策工程”核心专利的主要产出国家方面（见表 2.2.3），中国的核心专利公开量排名位于第 1 位，韩国排在第 2 位，美国则是第 3 位。然而来自中国的公开专利平均被引数仅为 1.78，从侧面说明我国在该领域虽然拥有不少的核心专利，但影响力仍需进一步提高。中国在该领域的技术水平仍有待提高。国家间的合作网络方面（见图 2.2.3），美国和瑞士两个国家存在

一定的合作关系，中国与其他国家合作较少。

核心专利主要产出机构方面（见表 2.2.4），来自中国的机构最多，被引数排名前 2 位的机构分别为成都理工大学和美国全国农场共同汽车保险公司。图 2.2.4 给出了该开发前沿各个机构间的合作网络情况，可以看出各个机构或者企业之间的研发合作关系很弱，只有成都理工大学和江西省气象台、江西省地质灾害应急中心存在合作关系。这说明我们应该进一步加强创新以及和其他国家、机构间的交流合作，以提升中国在这一领域的影响力。

2.2.3 碳基纤维材料电子器件

柔性的使用需求促进了碳基纤维材料电子器件的发展。碳基纤维材料因其良好的弯曲性、导电性和强力能够适应不同的工作环境和使用需求。新一代便携电子设备、人体检测器、环境传感器可以充

表 2.2.3 “自然灾害预防预警和恢复决策工程”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

排名	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	218	60.56%	387	47.43%	1.78
2	韩国	85	23.61%	73	8.95%	0.86
3	美国	20	5.56%	299	36.64%	14.95
4	日本	20	5.56%	40	4.90%	2.00
5	哥伦比亚	16	4.44%	7	0.86%	0.44
6	瑞士	1	0.28%	24	2.94%	24.00
7	比利时	1	0.28%	10	1.23%	10.00
8	瑞典	1	0.28%	2	0.25%	2.00
9	加拿大	1	0.28%	1	0.12%	1.00
10	德国	1	0.28%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4 “自然灾害预防预警和恢复决策工程”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

排名	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	成都理工大学	中国	7	1.94%	11	1.35%	1.57
2	美国全国农场共同汽车保险公司	美国	7	1.94%	7	0.86%	1.00
3	黑龙江真美广播通讯器材有限公司	中国	6	1.67%	6	0.74%	1.00
4	报知机株式会社	日本	5	1.39%	0	0.00%	0.00
5	国家电网有限公司	中国	4	1.11%	7	0.86%	1.75
6	成都万江港利科技股份有限公司	中国	4	1.11%	5	0.61%	1.25
7	韩国电子通信研究院	韩国	4	1.11%	1	0.12%	0.25
8	江西省气象台	中国	4	1.11%	0	0.00%	0.00
9	江西省地质灾害应急中心	中国	4	1.11%	0	0.00%	0.00
10	中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所	中国	3	0.83%	3	0.37%	1.00

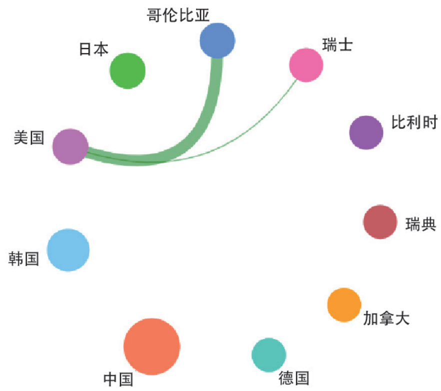

图 2.2.3 “自然灾害预防预警和恢复决策工程”工程开发前沿主要国家间的合作网络

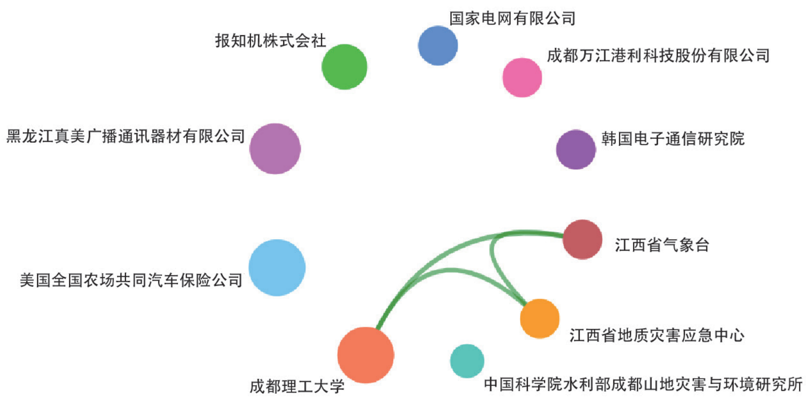

图 2.2.4 “自然灾害预防预警和恢复决策工程”工程开发前沿主要机构间的合作网络

分利用柔性碳基材料的特性，制成完全柔性化的器件，在未来可穿戴电子设备和智能服装中发挥重要作用。

“碳基纤维材料电子器件”工程开发前沿的核心专利主要产出国家方面（见表 2.2.5），主要研究国家为中国、日本和美国，其中中国公开的核心专利数最多，占全球所有地区的 32.30%，篇均被引频次为 1.42；美国公开的核心专利数占全球所有地区的 15.60%，篇均被引频次为 44.56；日本、加拿大、法国、美国、新西兰在该领域合作较为密切，而中国在该领域具有较强的独立研发能力（见图 2.2.5）。在核心专利的产出机构方面，韩国 LG 化学公司、日本东丽株式会社、荷兰沙特基础工业公司占据核心专利产出数量前 3 位，篇均被引频次前 3 位的机构则是加拿大魁北克水电公司、沙特基础工业公司、日本东丽株式会社（见表 2.2.6）；主要研发机构更倾向于独立研发，只有加拿大魁北克水电公司、法国阿科玛公司、日本昭和电工株式会社 3 家机构进行过合作研发（见图 2.2.6）。

表 2.2.5 “碳基纤维材料电子器件”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	中国	323	32.30%	459	3.78%	1.42
2	日本	261	26.10%	2368	19.51%	9.07
3	美国	156	15.60%	6952	57.27%	44.56
4	韩国	99	9.90%	696	5.73%	7.03
5	德国	41	4.10%	336	2.77%	8.20
6	法国	30	3.00%	223	1.84%	7.43
7	加拿大	24	2.40%	309	2.55%	12.88
8	荷兰	22	2.20%	237	1.95%	10.77
9	瑞士	16	1.60%	303	2.50%	18.94
10	英国	16	1.60%	267	2.20%	16.69

表 2.2.2 “碳基纤维材料电子器件”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	韩国 LG 化学公司	36	3.60%	250	2.06%	6.94
2	日本东丽株式会社	32	3.20%	556	4.58%	17.38
3	沙特基础工业公司	19	1.90%	408	3.36%	21.47
4	日本帝人株式会社	15	1.50%	151	1.24%	10.07
5	加拿大魁北克水电公司	12	1.20%	270	2.22%	22.50
6	日本三菱化学株式会社	11	1.10%	80	0.66%	7.27
7	法国阿科玛公司	10	1.00%	156	1.29%	15.60
8	日本昭和电工株式会社	10	1.00%	101	0.83%	10.10
9	日本信越化学株式会社	10	1.00%	83	0.68%	8.30
10	日本旭化成株式会社	10	1.00%	46	0.38%	4.60

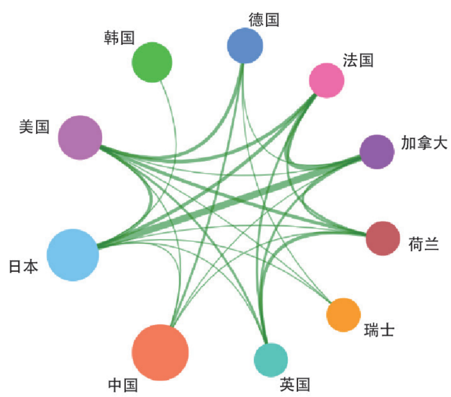

图 2.2.5 “碳基纤维材料电子器件”工程开发前沿的主要国家间合作网络

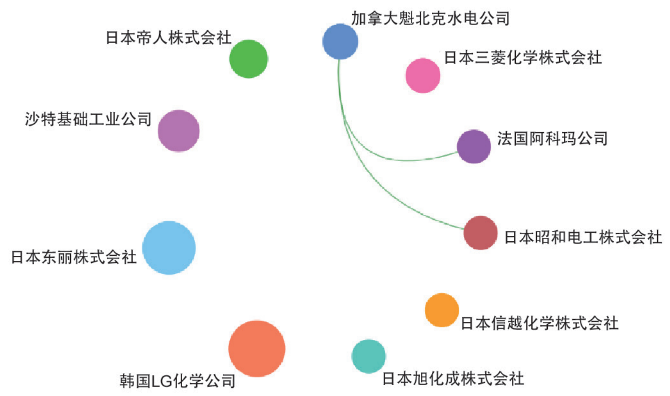

图 2.2.6　“碳基纤维材料电子器件”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

领域课题组组长：郝吉明　曲久辉

专家组：

贺克斌　魏复盛　张全兴　侯立安　杨志峰
张远航　吴丰昌　朱利中　潘德炉　丁一汇
徐祥德　侯保荣　张　偲　蒋兴伟　孙宝国
庞国芳　孙晋良　俞建勇　陈克复　石　碧
瞿金平　岳国君　陈　坚

工作组：

黄　霞　鲁　玺　胡承志　王　旭　许人骥
胡　敏　裴元生　陈宝梁　潘丙才　席北斗
徐　影　宋亚芳　白　雁　马秀敏　李　洁
王　静　刘元法　刘东红　范　蓓　覃小红
黄　鑫

办公室：

王小文　朱建军　张向谊　张　姣　郑　竞

执笔组成员：

黄　霞　鲁　玺　胡承志　王　旭　李　彦
潘丙才　单　超　席北斗　贾永峰　姜永海
古振澳　盛雅琪　王猷珂　徐　楠　李　晓
许人骥　徐　影　石　英　王知泓　白　雁
李　洁　马秀敏　杨　键　马　峥　王　静
范浩然　覃小红　张弘楠　黄　鑫　李会芳

七、农业

1 工程研究前沿

1.1 Top 11 工程研究前沿发展态势

农业领域工程研究前沿 Top 11 主要分为两类：一是传统深入研究前沿，包括动物重要病毒与宿主相互作用，动植物精准设计育种，作物功能性基因组结构的挖掘，农业资源高效利用与循环经济，土壤生物多样性与生态系统功能，病原菌与作物相互作用机制，动物病毒的溯源、进化、遗传变异，森林土壤碳循环微生物驱动机制，水产养殖生物性别和发育的分子基础与调控机制；二是新兴研究前沿，包括农业生物信息、环境信息的智能感知，农业机器人作业对象识别与定位。

农业领域工程研究前沿的核心论文数区间为 8~109 篇，平均为 50 篇；篇均被引频次区间为 7.13~86.83 次，平均为 43 次；核心论文出版年度较早，以 2015 年和 2016 年为主，但“农业资源高效利用与循环经济”和“土壤生物多样性与生态系统功能”两条前沿的核心论文出版以近 3 年为主，且呈上升趋势（见表 1.1.1 和表 1.1.2）。

（1）动物病毒的溯源、进化、遗传变异

动物病毒的溯源过程是寻找病毒最原始的自然生存宿主、中介储存宿主 / 中介过渡宿主、终末感染宿主的过程。通过动物病毒的溯源研究，可以了解病毒感染的源头宿主、媒介宿主、跨物种过渡储藏适应宿主和终末宿主，在切断传染源、避免病毒长期在不同宿主中循环与传播、从源头防控传染病等方面具有重大的生物学意义。病毒溯源的核心科学问题是在源头宿主中找到满足科赫法则的病原体，解析病毒的基因组特征以及病毒感染的源头宿主、媒介宿主、终末宿主的生物学表征。进化与遗传变异是病毒为拮抗、逃逸、躲避宿主的复杂免疫系统以维持复制生命周期、适应新宿主的一种自然选择，是一种异常复杂的生命现象。目前，病毒进化与遗传变异的诸多奥秘仍未破解，如病毒进化与遗传变异的驱动力、方式，病毒突破物种屏障的传播机制和方式，宿主影响病毒遗传变异与进化的途径，病毒与宿主的生存环境是否影响病毒的遗传变

表 1.1.1　农业领域 Top 11 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	动物病毒的溯源、进化、遗传变异	58	4480	77.24	2015.4
2	农业生物信息、环境信息的智能感知	89	3370	37.87	2015.9
3	农业机器人作业对象识别与定位	77	2879	37.39	2016.7
4	动植物精准设计育种	109	8871	81.39	2015.4
5	作物功能性基因组结构的挖掘	39	655	16.79	2016.5
6	农业资源高效利用与循环经济	8	57	7.13	2018.1
7	土壤生物多样性与生态系统功能	55	2189	39.80	2017.4
8	动物重要病毒与宿主相互作用	61	740	12.13	2016.5
9	病原菌与作物相互作用机制	31	1934	62.39	2016.8
10	森林土壤碳循环微生物驱动机制	12	1042	86.83	2015.3
11	水产养殖生物性别和发育的分子基础与调控机制	10	180	18.00	2016.3

表 1.1.2　农业领域 Top 11 工程研究前沿逐年核心论文数

序号	工程研究前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	动物病毒的溯源、进化、遗传变异	15	20	10	9	4	0
2	农业生物信息、环境信息的智能感知	16	23	21	15	8	6
3	农业机器人作业对象识别与定位	0	10	23	26	14	4
4	动植物精准设计育种	23	37	31	16	2	0
5	作物功能性基因组结构的挖掘	10	2	7	5	9	6
6	农业资源高效利用与循环经济	0	0	0	1	5	2
7	土壤生物多样性与生态系统功能	3	4	9	9	13	15
8	动物重要病毒与宿主相互作用	11	8	15	6	8	13
9	病原菌与作物相互作用机制	3	5	6	6	3	7
10	森林土壤碳循环微生物驱动机制	2	6	3	1	0	0
11	水产养殖生物性别和发育的分子基础与调控机制	1	4	1	1	1	2

异等。解析病毒的进化与遗传变异规律具有重大的流行病学意义，有助于了解病毒应对宿主的复杂免疫系统而维持生命、突破种间屏障以实现跨物种传播的奥秘，有助于掌握动物在疫苗免疫后（病毒或传染病）间断性反复发生的规律。

（2）农业生物信息、环境信息的智能感知

农业生物信息、环境信息的智能感知指通过物理、化学和生物等传感机理，实现动植物生命信息、植物生长中环境信息以及动物养殖中环境信息的原位、快速和实时测量。该前沿主要包括两个研究方向：①动植物生命信息感知机理。近几年的研究前沿主要是基于核酸适配体、免疫传感器等新型生物感知器件，运用机器视觉、成像光谱等方法，实现对动植物活体状态下的行为、早期性别、激素、代谢物，以及作物生化组分、病虫害等各种生物与化学量的精确测量，并在此基础上探索作物表型的高通量快速获取方法。②动植物生长环境感知机理。随着新型物理测量机理的不断涌现和激光器等器件单色性、功率、波段的不断发展，近几年的研究前沿主要包括土壤氮素、土壤重金属、土壤微生物等微量物质的原位感知和养殖环境中的感知重点，如基于金属氧化物、红外吸收、质谱等多种不同原理的畜禽舍有害气体电子鼻的探索研究。

可以预见，农业生命和环境的感知技术将随着基础科学的进步而迅速发展。在感知机理上，光电、化学、纳米科学等方法将进一步推动感知范围、精度和灵敏度的不断提高。在感知对象上，常规方法不能原位测量的、更加微观和重要的指标将是未来的研究热点。

（3）农业机器人作业对象识别与定位

农业机器人作业对象识别与定位重点解决机器人识别作业对象与环境，并快速计算作业对象距离的问题。主要包括目标对象信息采集和信息处理两个部分。①农业机器人作业对象识别技术。主要用于解决农业机器人准确区分作业对象与作业环境的问题，尤其是在复杂环境下的作业对象识别方法优化。例如，基于多特征和图像融合的作物、杂草、作物病虫害识别算法，基于多光谱成像的病害感知算法等，提高作业对象识别准确率。②农业机器人作业对象定位技术。光学元器件被广泛应用于农业机器人的作业对象定位与感知技术中。例如，使用双目、深度相机等设备，获得作业对象的立体信息，优化作业对象的大小、距离和位置的计算方法，设计避免机械臂触碰采摘对象的优化算法等。

农业机器人作业对象识别与定位技术的发展趋势是研发与使用低成本信息采集设备，优化改进识别与定位方法，使农业机器人在复杂、非结构化的农业生产环境中可以稳定、准确地识别与定位作业对象。

（4）动植物精准设计育种

动植物精准设计育种已经成为未来动植物种质资源创新、国际农业科技竞争和种业竞争的战略核心。设计育种的概念在 2003 年首次提出，主要技术环节包括基因定位、筛选优良等位基因，将分散在不同个体中的优良基因聚合在一起，最终实现设计育种的目标。随着多组学技术、大数据平台和基因编辑等新兴技术的发展，为解析生物复杂性状的遗传调控网络带来了机遇，为动植物定向分子设计育种奠定了科学基础，为创制高产、优质、抗病动植物新品种提供了精准解决方案。目前，动植物精准设计育种的主要技术环节包括：①发掘控制育种性状的关键功能基因、数量性状基因座（QTL）和调控模块，明确基因型、表型与环境之间的相互关系；②利用大数据生物信息学平台和技术，面向高效繁殖、优质及抗病等育种目标，分析和设计具有特定育种目标的基因型；③分析达到目标基因型的途径，制定生产品种的育种方案，利用设计育种方案开展育种工作，培育优良品种。

（5）作物功能性基因组结构的挖掘

作物重要农艺性状主要是由该性状的有关基因所决定的。基因功能不仅受自身结构影响，其表达调控还取决于基因组的结构，包括基因所在染色体的开放程度、基因表观修饰以及基因所在区段的空间结构等。这些因素不仅能影响基因的表达量，还可能影响基因的可变剪切，从而产生不同的功能。转座子是基因组的主要组成部分，通过插入基因的不同部位影响基因的结构与功能。转座子也与基因的表观修饰、开放状况及远程互作关系密切，对基因的结构变异与表达均会产生重要影响。多倍体指基因组中含有两套或两套以上的染色体组的生物。植物中 70% 以上的物种是多倍体，如小麦、棉花、油菜等主要农作物。与二倍体相比，多倍体具有明显的产量与适应性优势，被称为多倍体优势。

作物种质资源存在着丰富的基因组变异。通过构建突变体库、作物种质资源基因组变异库、转录组变异库、表观组变异库、表型组变异库与代谢组变异库等，可以建立挖掘作物功能基因的技术、信息与材料平台。利用上述平台，结合连锁分析与关联分析方法，获得高产、高效、优质、抗病、抗逆的优异候选基因，并通过突变体、转基因或基因编辑进行验证；阐明目标基因的分子机制、等位基因的数量与功能，明确其育种利用价值与高效利用途径；揭示多倍体优势的分子机理，促使多倍体优势的开发与利用取得突破性进展。

（6）农业资源高效利用与循环经济

农业资源高效利用指以水土、生物、肥料、技术和气候等农业生产资源为核心，以农业生产活动为主体，围绕品种资源、土地利用与耕作制度、农业节水技术与应用、土壤肥力与肥料施用、农业废弃物资源化利用以及饲料与畜禽管理、种养一体化等环节开展科学研究，达到资源节约和高效利用的目的。循环经济是以资源节约和循环利用为特征，实现与生态环境和谐共赢的经济发展模式，强调把农业生产与经济发展组织成为“资源投入 – 产品生产 – 再生资源”的反馈循环式流程，通过加强循环利用促进物质和资源的合理和持续利用，将经济活动对自然环境的不利影响降到最低。农业资源高效利用与循环经济是从全链条的角度出发，实现资源投入源头控制、资源利用过程提升、终端废弃物循环利用，实现资源利用效率最大化、废弃物排放量最小化，是资源效益、经济效益和生态效益的有机统一，是实现农业绿色发展与全球可持续发展目标的重要前提。

（7）土壤生物多样性与生态系统功能

土壤生物多样性指土壤生态系统中的动物、微生物、植物等生命体之间的变异性与多样性以及生

物与环境之间相互作用的多样化程度，包括物种多样性、遗传多样性、结构多样性和功能多样性等。生态系统功能是土壤生物多样性价值的具体体现。土壤生物多样性在凋落物降解、养分转化等生物地球化学循环方面起着不可替代的作用，同时还提供土壤发育、土壤侵蚀控制、土壤污染修复、农业病虫害防治、气候调节和初级生产力维持等多种生态系统服务功能。对人类社会而言，土壤生物多样性还能提供食物、净水、药物、工业原料、燃料等多种供应服务功能。土壤生物多样性的维持是土壤健康和生产力持续提高的基本保障，是人类社会赖以生存和可持续发展的基础。当前，各国政府和有关国际组织都高度重视土壤生物多样性的保护与健康土壤的培育。总之，全面深入开展土壤生物多样性保护基础研究，建立土壤生物多样性检测网络与生态系统功能评价体系，制定科学合理的土壤生物多样性保护策略，对确保人类福祉和社会可持续发展具有重要意义。

（8）动物重要病毒与宿主相互作用

病原与宿主相互作用的外在表现是感染与免疫。病原通过感染宿主而生存，宿主需要清除病原感染以保持健康。一些动物病原在长期进化中获得了规避宿主免疫应答的能力，产生了免疫逃逸，造成持续性感染或引发动物疫病大流行，威胁食品安全甚至引发严重经济损失。尤其是近年来动物病毒性疫病的暴发和流行影响着养殖业的发展，带来了严重的经济损失，如非洲猪瘟、高致病性蓝耳病、猪病毒性腹泻、伪狂犬病、禽流感、传染性法氏囊病、传染性支气管炎、口蹄疫、小反刍兽疫等动物疫病。传统方法研制的疫苗对某些动物疫病保护效果欠佳，要研制新型高效的保护性疫苗须了解病毒的致病机理，而只有通过研究病毒与宿主相互作用才能解析病毒的致病机理。因此，以解决问题为导向的动物重要病毒与宿主相互作用研究一直是研究的热点和前沿。病毒通过结合细胞表面特定的受体入侵细胞，进入细胞后在蛋白和核酸两个层面上与宿主细胞相互作用。在蛋白层面上，病毒通过表达某些蛋白抑制宿主抗病毒免疫信号转导，为自身复制创造条件。然而，宿主则通过模式识别受体（PRRs）识别病原特征结构（病原相关分子模式，PAMPs）启动天然免疫应答产生抗病毒分子，抑制病毒复制。在核酸层面上，某些脱氧核糖核酸（DNA）病毒可以直接编码小分子核糖核酸 (micro-RNA)，而核糖核酸（RNA）病毒则巧妙调控宿主表达 micro-RNA，抑制宿主抗病毒免疫信号转导，而宿主在识别 PAMPs 后通过表达特定的 micro-RNA 直接靶向作用于病毒基因组或免疫负调控分子抑制病毒复制。只有通过研究动物重要病毒与宿主相互作用解析病毒的致病机理，才能利用反向遗传学或基因编辑技术制备新型高效的动物疫苗，为有效防控重大动物疫病奠定基础。

（9）病原菌与作物相互作用机制

病原菌与作物互作机制是发展绿色农业病害防治的重要基础。近年来，病原菌与作物相互作用机制这一研究方向实现了一批重大理论突破，发展了若干重要的作物抗性调控技术。科研人员在水稻、小麦等重要作物以及重大病原物的全基因组、群体基因组研究的基础上，克隆了多个具有重要理论与应用价值的作物抗病相关基因和病原菌的致病、变异关键基因；揭示了一批重要作物抗病基因的分子作用机制；获取了植物抗病相关蛋白的晶体结构，破解了抗病基因的工作原理，提出了抗病小体这一突破性概念；提出了作物免疫与产量平衡的关键机制及改良作物综合性状的路径；利用基因编辑技术创制了一批综合抗性优良的作物品种；深入研究了多种病原物感知作物，并利用代谢产物、效应蛋白、小 RNA 等调节寄主免疫的致病机理，提出了诱饵模式等致病新理念；阐明了病原物逃避农作物抗性的多种遗传与表观遗传机制。此外，植物和病原菌互作过程中鉴定的生物源诱抗和抗菌物质，为开发新型作物病害绿色防控策略提供了理论和应用支撑。

（10）森林土壤碳循环微生物驱动机制

森林中 70% 的碳储存在土壤中。森林土壤碳的来源主要有植物凋落物分解、根系分泌物及周转、微生物和土壤动物等，森林土壤碳的输出主要包括淋溶和有机质分解等。为应对全球气候变化，如何更好地维持森林生态系统土壤碳固持功能的稳定需要进一步了解特定功能微生物群落的调控作用及驱动机制。具体来看，土壤微生物通过活性微生物群落（异化代谢）和微生物死亡残体（同化代谢）调控并影响土壤有机碳的积累。根际微生物群落具有比土壤微生物群落更高的有机碳固持效率。外生菌根和菌丝通过对氮素的竞争优势降低了腐生分解者的活性和酶的生产，从而减少了土壤呼吸并增加了土壤碳储量；而丛枝菌根真菌不仅可以通过菌丝的作用形成土壤团聚体阻止有机质分解，还能外渗易被分解者利用的糖类物质促进腐生微生物接近根际土壤并加快有机质分解。随着土壤微生物高通量测序和土壤有机碳分子生物地球化学结构分析等方法的应用，调控土壤有机质中不同碳组分分解所对应的微生物功能基因及其编码的蛋白质得以不断被发现。然而，由于森林生态系统土壤微生物多样性丰富，环境变化对土壤微生物与土壤碳循环的影响过程极为复杂，因此，未来仍需整合多学科的理念和方法进一步明确森林土壤碳循环过程中微生物的调控机制。

（11）水产养殖生物性别和发育的分子基础与调控机制

性别决定与发育是生命科学研究领域的热点。水产养殖生物的性别决定机制与哺乳动物相比更加复杂多样，例如，具有 XX / XY、ZZ / ZW、XO / XX 等多种性别决定系统。许多水产养殖生物在雌雄同体、性反转等方面具有独特性，可为研究动物性别决定机制提供独特材料，同时对水产养殖生物的性别与发育研究也是水产养殖过程中亟须解决的产业问题。黄鳝、石斑鱼具有天然性反转性状，高温会导致尼罗罗非鱼的遗传雌性发育为生理雄性，半滑舌鳎、褐牙鲆、泥鳅等的雌性个体比雄性个体生长快。目前，针对水产生物种质创制中面临的性别决定、性腺发育的分子机制及其调控机理等关键科学问题，主要研究：鱼、鳖、虾蟹、贝、参等生物性别决定与分化的分子机制；发掘性别决定的关键基因及调控元件，阐明相关分子功能及其调控网络；研究性别发育与重要生产性状的相互关系，解析性别转换与环境因子互作响应的规律与机制；筛查性别特异分子标记，研究具有经济价值新种质的繁殖特性并阐明其调控机理。

利用具有两性异形的生产性状表型的鱼、鳖、虾蟹、贝、参等水产养殖动物，研究水产养殖动物性别决定、性腺发育与环境互作的机制及其演化进程。运用基因组学、转录组学和表观遗传学分析，对各类水生动物性别决定、发育情况进行研究，确定性别分化、发育的关联因子及其表达特征和表观遗传学修饰特性。该领域未来的研究热点将聚焦于水产养殖动物基因组解析与性别连锁遗传标记鉴定、性别决定与发育的调控机制、性别转换与环境因子的互作机制、基因组倍性对性别和育性的作用机制、性别发育与生产性状的关联机制等方向。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 动物病毒的溯源、进化、遗传变异

自 2000 年以来，人类已经历多次重大病毒性传染病：2002—2004 年的严重急性呼吸综合征，2009 年的甲型 H1N1 流感，2009—2010 年在西非发生的大面积传染性脑膜炎，2012 年至今的中东呼吸综合征，2013—2016 年的埃博拉病毒病以及 2019 年新发的新型冠状病毒肺炎等。经济动物的病毒性疾病也是老病新发、新病不断。

对动物病毒溯源，解析其进化及遗传变异规律是预防和控制传染病传播的有效手段，是多年来流行病学领域备受关注的研究热点。在病毒溯源研究中，传统方法主要有充分的流行病学调查和对动物

及其环境中的病毒进行的全方位分布调查；新兴方法得益于生物信息学技术的应用，通过基因同源性比对和进化树的拓扑结果来确定不同病毒间亲缘关系的远近。对动物病毒的准确溯源和病毒遗传变异规律的全面掌握，可以及时切断传染源，有效监测、预防及控制传染病的发生。事实上，病毒溯源工作难度大，研究过程较为复杂，存在许多不确定性。如2019年底出现的新型冠状病毒，自出现以来迅速在全球蔓延，全球科学家都在积极探寻该病毒的起源，但至今仍是未解之谜。相关研究表明，新型冠状病毒在人群中出现的时间可能比设想的更早，在隐秘传播期间逐渐获得了关键突变位点，适应了人类。回顾性的呼吸道感染血液检测或亚基因组研究也许能帮助破解这种判断是否正确。在源头探索上，通过对2003年暴发的SARS病毒进行流行病学和生物信息学研究，取得了很大进展，研究发现蝙蝠是该病毒的自然宿主而野生动物市场的果子狸是该病毒进入人群前的中间宿主，但仍需进行深入研究。

传统的病毒溯源方法，流行病学调查一般是从首例患病者的接触史开始，即所谓的“零号病例”，但有时“零号病例”很难追溯，如患有艾滋病病毒患者的追溯；对动物和环境中的病毒分布调查在溯源过程中是最直接、最重要的方法，并成功应用于猴免疫缺陷病毒的研究。与传统方法相比，生物信息学技术通过基因组序列与计算流行病学相结合，采用分子钟理论来推算病毒的演化时间，推测病毒间的亲缘远近关系。如新型冠状病毒与蝙蝠携带的蝙蝠冠状病毒的基因组比对结果表明，新型冠状病毒完成从蝙蝠到人的进化传播，至少需要一个中间宿主作为传播载体。在病毒溯源过程中存在诸多不可控因素，任一环节都可能是重中之重，因此，在“唯一健康（One Health）”背景下，需加大动物病毒的流行病学监测力度，有效预防及控制新发传染病的出现和传播。

达尔文进化理论中的优胜劣汰，同样也适用于病毒的生存，也就是说，病毒只有在不断地突变进化中才能使其优秀突变体存活下来。病毒可以通过多种机制发生变异，使基因组能够发生重排，这可以让新复制出的病毒表现出与上一代不同的特征。另外，病毒遗传物质上的碱基会随机发生突变，这种遗传漂变现象也会引起病毒的突变。研究表明，RNA病毒更容易发生遗传变异，因为与DNA病毒相比，RNA病毒在复制过程中更容易出错、稳定性更低，如禽流感病毒的跨宿主传播事件时有发生。犬流感病毒H3N2亚型于2005年左右在亚洲的犬中出现，起源于禽类，该病毒可以分为7个主要谱系，一些突变位点提供了适应性进化的证据；该病毒的主要谱系显示了相似的基因组进化速率，但与其他禽类病毒相比，在每个位点上始终按比例显示更多的非同义替换，这表明选择压力有大规模的改变。根据进化速率和氨基酸位点突变分析发现，禽流感在进入哺乳动物犬之后进行着相对快速的进化变异，以更加适应哺乳动物宿主之间的传播。

病毒尤其是RNA病毒，容易发生变异且进化速率较高，因此，掌握病毒的遗传演化规律成为控制病毒传播的关键所在。为解决相关问题，将基因组序列以及相关信息与依靠高性能计算机的生物信息学和统计学方法相结合，通过大数据更好地解析病毒的遗传变异规律和传播规律。在研究病毒的溯源、进化、遗传与变异规律中，流行病学知识、统计科学以及计算机算法相结合形成了一门新兴学科，能够更好地服务于病毒预防与控制策略的指定。

在动物病毒的溯源、进化、遗传变异这一研究前沿中，核心论文发表的国家分布方面（见表1.2.1），位于前3位的是美国、英国和法国，中国位于第5位；此研究前沿的核心论文篇被引频次分布在50.75~109.00。研究机构分布方面（见表1.2.2），来自牛津大学、美国疾病控制和预防中心的核心论文及被引次数较多。国家间的合作网络方面（见图1.2.1），国家间的研究合作较为普遍，其中英国、美国、法国之间的合作相对更为紧密。

产出主要机构间的合作网络方面（见图1.2.2），各机构间均存在一定的合作关系。施引核心论文的主要产出国家是美国、中国和英国，美国占比为36.29%；中国和英国占比超过10%，且平均施引年较晚，表现出较强的研发后劲（见表1.2.3）。施引核心论文的主要产出机构方面（见表1.2.4），美国疾病控制和预防中心和法国巴斯德研究所位居前两位，中国科学院的施引论文量排在第6位。

1.2.2 动植物精准设计育种

动植物精准设计育种已成为未来动植物种质资源创新、国际农业科技竞争和种业竞争的战略核心。2018年，美国发布《到2030年推动食品与农业研究的科学突破》（*Science Breakthroughs to Advance Food and Agricultural Research by 2030*），将基因组学与生物精准育种列为未来农业发展的重大方向之一。精准设计育种这一概念，源于2003年Peleman和Van der Voot提出的设计育种（Breeding by Design）概念。设计育种主要针对植物育种，技术环节包括基因定位、筛选优良等位基因，把分散在不同个体中的优良基因聚合在一起，从而实现设计育种的目标。目前，精准设计育种已经扩展到动物

表1.2.1 "动物病毒的溯源、进化、遗传变异"工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	36	62.07%	3292	91.44	2015.5
2	英国	17	29.31%	1648	96.94	2015.2
3	法国	12	20.69%	609	50.75	2015.3
4	澳大利亚	10	17.24%	873	87.30	2015.4
5	中国	8	13.79%	743	92.88	2016.0
6	比利时	6	10.34%	547	91.17	2015.2
7	德国	6	10.34%	449	74.83	2015.5
8	荷兰	5	8.62%	540	108.00	2014.4
9	西班牙	4	6.90%	205	51.25	2015.8
10	印度	3	5.17%	327	109.00	2014.3

表1.2.2 "动物病毒的溯源、进化、遗传变异"工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	牛津大学	7	12.07%	861	123.00	2015.3
2	美国疾病控制和预防中心	7	12.07%	823	117.57	2016.0
3	福瑞德·哈金森癌症研究中心	6	10.34%	1007	167.83	2015.8
4	美国国立卫生研究院	6	10.34%	639	106.50	2015.2
5	悉尼大学	6	10.34%	468	78.00	2016.0
6	法国巴斯德研究所	6	10.34%	318	53.00	2015.8
7	美国国立医学图书馆	5	8.62%	287	57.40	2016.6
8	爱丁堡大学	4	6.90%	790	197.50	2015.8
9	哈佛大学	4	6.90%	495	123.75	2016.2
10	墨尔本大学	4	6.90%	451	112.75	2015.3

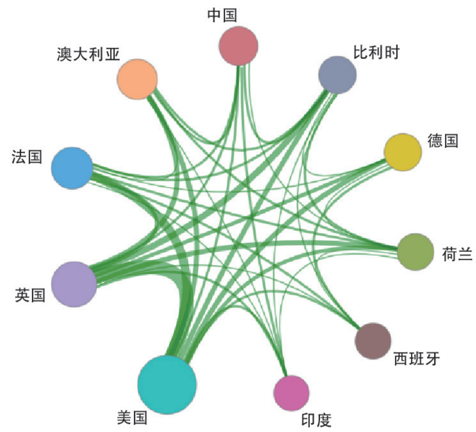

图 1.2.1 “动物病毒的溯源、进化、遗传变异”工程研究前沿主要国家间的合作网络

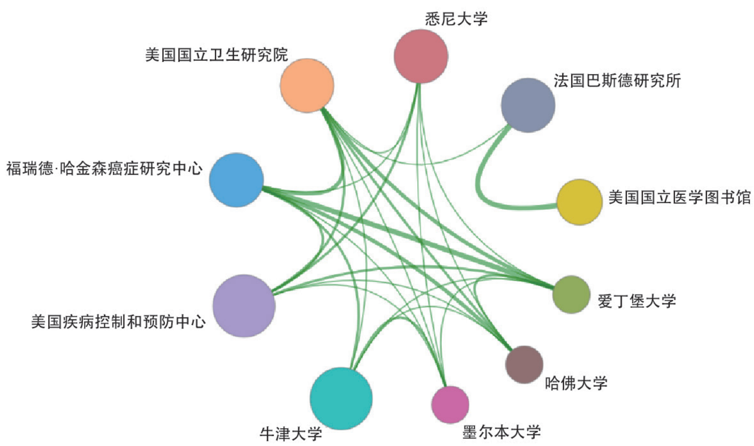

图 1.2.2 “动物病毒的溯源、进化、遗传变异”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “动物病毒的溯源、进化、遗传变异”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	1724	36.29%	2017.8
2	中国	613	12.90%	2018.5
3	英国	513	10.80%	2017.8
4	法国	374	7.87%	2017.6
5	德国	319	6.71%	2017.9
6	澳大利亚	279	5.87%	2017.9
7	加拿大	213	4.48%	2018.0
8	巴西	197	4.15%	2018.2
9	西班牙	181	3.81%	2017.9
10	意大利	181	3.81%	2018.3

表 1.2.4 “动物病毒的溯源、进化、遗传变异”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国疾病控制和预防中心	170	14.66%	2018.0
2	法国巴斯德研究所	134	11.55%	2017.6
3	牛津大学	121	10.43%	2018.0
4	哈佛大学	115	9.91%	2017.9
5	悉尼大学	108	9.31%	2017.6
6	中国科学院	104	8.97%	2018.3
7	美国国家过敏症和传染病研究所	99	8.53%	2017.7
8	美国国立卫生研究院	82	7.07%	2017.2
9	德克萨斯大学医学部	79	6.81%	2017.2
10	剑桥大学	77	6.64%	2017.6

育种研究领域，全球在植物、哺乳动物、水生动物等领域已经开展了深入研究，取得了显著成效。农业生物精准设计育种技术的不断创新，正在颠覆传统农业生产模式，并向现代农业飞速迈进。

近年来，基因组、功能基因组、表观组、转录组、蛋白组和代谢组等多组学技术的突飞猛进式发展，使得对动植物重要性状相关的功能基因、QTL 和调控模块的解析不断深入，基因、表型与环境相互作用的机制不断被阐明，为动植物精准设计育种奠定了理论基础。同时，生物信息学、全基因组选择和基因编辑等技术的快速发展，为动植物性状精准设计育种提供了技术支撑。以各种组学数据库为基础，利用生物信息学技术和计算机辅助对育种过程进行模拟，根据育种目标来设计育种材料，培育符合育种目标的新品种。具体来说，全基因组选择技术，基于高通量的基因型分析和预测模型，在全基因组水平上聚合优良基因型以改良动植物重要性状。基因编辑技术，已成为精准育种的重要手段之一，它不但可以对基因组内源目标基因进行定点删除、替换和插入等精确改造，而且还可以打破物种界限实现跨物种基因定向转移，特别是 CRISPR-Cas9 系统的开发显著提高了基因编辑的效率和准确性。综合运用多组学群体遗传信息、全基因组选择和基因编辑技术，使动植物育种更加高效、精准、可控，从而实现从传统育种到精准育种的跨越，解决常规方法不能解决的重大生产问题。

传统的杂交育种方法难以将多个优良基因组合到一个品种上，且选择效率低、周期长。动植物精准设计育种针对定向培育高产、优质和抗病动植物新品种的重大需求，以植物、水生动物、哺乳动物（家畜）等为对象，阐明重要经济性状基因协同调控网络，创建新一代动植物精确设计育种技术体系，培育了一批具有重要价值的动植物新品种和育种材料。2018 年，全球转基因作物种植面积已达 1.917×10^{8} hm²，全球 70 个国家和地区已批准种植或进口转基因作物及其产品。转基因作物的推广应用显著提高了作物单产，减少了农药用量，产生了巨大经济和社会效益。例如，耐旱玉米、抗除草剂磷高效玉米、耐低温贮存土豆、高油酸大豆等基因编辑产品的产业化进程加快；小麦和水稻全基因组测序完成，在主要农艺性状基因功能明确的基础上，通过有利基因的剪切、聚合，培育出多种产量、品质及抗性较高的新品种。动物的生理条件比植物复杂，现阶段的研究主要是依据分子标记技术进行基因聚合、基因渗入以及利用基因编辑技术进行新品种培育，获得了如 CD163 基因编辑猪、Polled 基

因替换无角奶牛、MSTN 敲除双肌家畜等高产或抗病家畜。2015 年，美国 AquaBounty 公司培育的鲑鱼 AquAdvantage 正式获准上市销售，加速了基因编辑动物的商业化进程。农业生物精准设计育种技术产品不断创新，正在颠覆传统生产模式。

“动植物精准设计育种”工程研究前沿领域，核心论文发表量排在前 3 位的国家分别为美国、中国、英国；篇均被引频次排在前 3 位的国家依次为德国、日本、法国（见表 1.2.5）。在发文量 Top 10 的国家中（见图 1.2.3），美国与墨西哥、肯尼亚、英国、中国、法国、德国、印度、澳大利亚均有合作，日本与其他国家没有合作。核心论文发文量排在前 3 位的机构分别为康奈尔大学、美国农业部农业研究局、国际玉米和小麦改良中心（见表 1.2.6），其中康奈尔大学 Spindel Jennifer 等发表的“Genomic selection and association mapping in rice (Oryza sativa): Effect of trait genetic architecture, training population composition, marker number and statistical model on accuracy of rice genomic selection in elite, tropical rice breeding lines”一文被引频次最高（205 次），该文评价了基因组选择在水稻自交系育种中的效果。在发文量 Top 10 的机构中（见

表 1.2.5　“动植物精准设计育种”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	美国	48	44.04%	4004	83.42
2	中国	28	25.69%	2120	75.71
3	英国	14	12.84%	1155	82.50
4	墨西哥	13	11.93%	1090	83.85
5	德国	10	9.17%	922	92.20
6	法国	9	8.26%	775	86.11
7	印度	8	7.34%	641	80.12
8	肯尼亚	7	6.42%	435	62.14
9	澳大利亚	6	5.50%	389	64.83
10	日本	5	4.59%	452	90.40

表 1.2.6　“动植物精准设计育种”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	康奈尔大学	12	11.01%	1018	84.83
2	美国农业部农业研究局	12	11.01%	953	79.42
3	国际玉米和小麦改良中心	11	10.09%	908	82.55
4	堪萨斯州立大学	8	7.34%	549	68.62
5	中国农业科学院	7	6.42%	660	94.29
6	明尼苏达大学	7	6.42%	345	49.29
7	杜邦先锋公司	5	4.59%	740	148.00
8	亚利桑那大学	5	4.59%	604	120.80
9	中国科学院	5	4.59%	578	115.60
10	塞恩斯伯里实验室	5	4.59%	485	97.00

图 1.2.4），康奈尔大学、美国农业部农业研究局、国际玉米和小麦改良中心、堪萨斯州立大学之间的合作较多。施引核心论文发文量排在前三的国家分别为美国、中国、印度（见表 1.2.7）。施引核心论文的主要产出机构分别为美国农业部农业研究局、中国农业科学院、中国科学院等（见表 1.2.8）。

1.2.3 土壤生物多样性与生态系统功能

健康的土壤中含有丰富的生物，包括细菌、真菌、放线菌、线虫、脊椎动物、蚯蚓、螨虫、昆虫等多种生物，这些土壤生物在土壤生态系统中发挥着促进植物生长、保护土壤肥力、促进有机质分解、维持生态系统稳定和抑制害虫、寄生虫与病菌的重要作用。当前，人类活动对土壤生物多样性和生态系统功能带来的压力与日俱增。砍伐森林、集约化耕作、过度使用化肥农药等加剧了土壤生物数量和种类的减少，生态系统的稳定性越来越脆弱，危害着土壤生产力的可持续发展和土壤生态系统功能的发挥。面对生物多样性的丧失，联合国最早于 2001 年正式启动“千年生态系统评估”项目，对全世界生态系统及其提供的服务功能状况与趋势进行了科学评估，提出了恢复、保护或改善生态系统

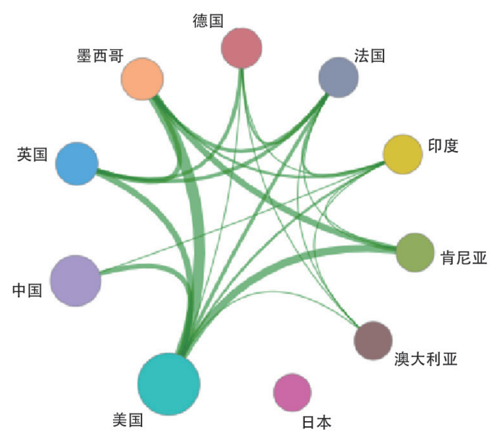

图 1.2.3 “动植物精准设计育种”工程研究前沿主要国家间的合作网络

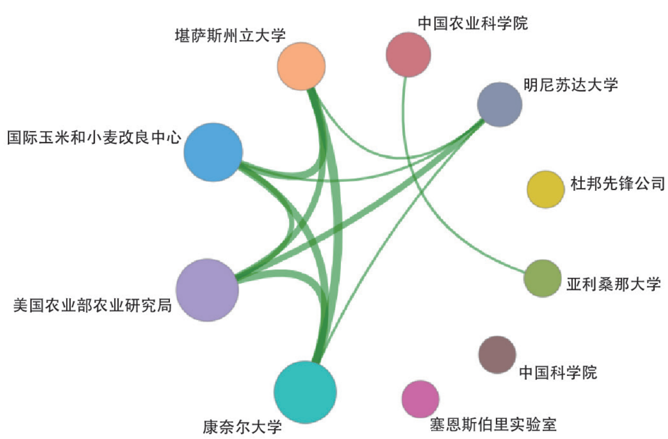

图 1.2.4 “动植物精准设计育种”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “动植物精准设计育种”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	1640	29.39%	2017.8
2	中国	1413	25.32%	2018.0
3	印度	400	7.17%	2018.0
4	德国	384	6.88%	2017.8
5	英国	333	5.97%	2017.8
6	澳大利亚	323	5.79%	2017.7
7	巴西	252	4.52%	2018.2
8	法国	247	4.43%	2017.6
9	日本	223	4.00%	2017.9
10	墨西哥	190	3.40%	2017.8

表 1.2.8 “动植物精准设计育种”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国农业部农业研究局	262	16.18%	2017.8
2	中国农业科学院	253	15.63%	2018.1
3	中国科学院	194	11.98%	2017.8
4	国际玉米和小麦改良中心	137	8.46%	2017.6
5	康奈尔大学	133	8.21%	2017.6
6	华中农业大学	131	8.09%	2018.0
7	佛罗里达大学	120	7.41%	2018.1
8	爱荷华州立大学	101	6.24%	2017.5
9	中国农业大学	98	6.05%	2018.2
10	明尼苏达大学	97	5.99%	2017.6

可持续利用状况的各种对策。2012 年，在联合国环境规划署的主导下，正式成立了生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台（IPBES），是继联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）之后又一个政府间全球性环境评估计划。土壤中蕴含着世界 1/4 的生物多样性，土壤生物多样性的保护对土壤健康、土壤生产力以及粮食安全都至关重要。

近 40 年来，土壤生物多样性和生态系统功能关系的研究发展迅速，已成为生态学、农学、微生物学、环境学、经济学等多学科交叉的重要研究方向。该研究前沿从最开始关注物种丧失对生态系统结构和功能的影响，逐渐发展到利用试验或理论模型，研究生物多样性对初级生产、生物地球化学循环、环境净化、气候调节、有害生物控制、经济价值等多种服务与功能的贡献大小和作用机制。目前，针对土壤生物多样性和生态系统功能的研究，基本形成了 5 个方面的共识：①生物多样性能够提高生态系统生产力和资源利用效率；②生物多样性提高了生态系统稳定性，且时间越长，效应越显著；③生物多样性对单一生态系统过程或功能的影响具有非线性和饱和性特征；④不同营养级之间物种丧失对生态系统功能的影响比营养级内部物种丧失

造成的影响大；⑤生物体的功能性状对生态系统功能发挥具有重要影响。在前期大量研究的基础上，出现了 4 个新兴的研究方向：①全球变化背景下的土壤生物多样性和生态系统功能。除了生物多样性本身，气候和环境条件的变化如干旱、增温、土壤酸化等均可能影响生态系统功能的发挥。因此，剖析土壤生物多样性、气候、环境因素对生态系统功能的影响和贡献大小，以及全球气候变化如何影响土壤生物多样性和生态系统功能，是应对未来全球可持续发展面临的重大挑战。②土壤生物多样性和生态系统服务功能的时空尺度特征。当前研究多集中在小范围、短时间尺度，对于更大范围的景观尺度以及随时间尺度的变异性研究较少。因此，明确土壤生物多样性和生态系统服务的时空尺度特征对景观层次的保护、土地合理利用等具有重要意义。③土壤生物多样性与生态系统多功能性。维持多种生态功能比一种生态功能需要更多物种的参与，因此，当前土壤生物多样性与生态系统中多功能性的实现成为近年来的研究热点。④土壤生物多样性的生态效益与物种进化的关系。随着分子分析技术的发展，相关研究表明物种间系统发生距离越大，越有利于生态系统功能的发挥，这可能与物种间遗传多样性导致的功能性状增加有关。

核心论文发表的国家分布方面（见表 1.2.9），主要是美国、中国和西班牙，被引次数占优的是瑞士和荷兰。研究机构分布方面（见表 1.2.10），西班牙胡安卡洛斯国王大学、中国科学院、美国科罗拉多大学博尔德分校产出的核心论文较多，而瑞士 Agroscope 研究所和苏黎世大学的被引次数较多。高被引代表论文有 2014 年在《美国国家科学院院刊》（*PNAS*）上发表的“Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality”，是由瑞士 Agroscope 研究所和苏黎世大学等单位的科学家合作完成的，被引频次达 544 次。该文章研究了土壤生物多样性和土壤群落组成对生态系统多功能性的影响，表明了土壤生物多样性的降低及群落组成的简化会降低植物多样性，同时影响着土壤中有机质降解、养分固持和转化能力，从而降低了生态系统的多功能性。

主要国家间的合作网络方面(见图 1.2.5),美国、澳大利亚、西班牙和中国间有较为紧密的相互合作关系。产出主要机构间的合作网络方面(见图 1.2.6),各机构间均有一定的合作关系。施引核心论文的主要产出国家以中国和美国为主，且平均施引年较晚，表现出较强的研发后劲（见表 1.2.11）。施引核心论文的主要产出机构方面（见表 1.2.12），中国科学院遥遥领先，相关论文的平均施引年为 2018 年。

表 1.2.9 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿中核心论文主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	24	43.64%	450	18.75	2017.5
2	中国	18	32.73%	241	13.39	2018.2
3	西班牙	17	30.91%	368	21.65	2017.4
4	澳大利亚	14	25.45%	276	19.71	2017.4
5	德国	11	20.00%	260	23.64	2017.3
6	瑞士	10	18.18%	1506	150.60	2016.4
7	荷兰	5	9.09%	1359	271.80	2016.4
8	法国	5	9.09%	618	123.60	2017.0
9	瑞典	5	9.09%	173	34.60	2017.0
10	英国	5	9.09%	142	28.40	2016.8

表 1.2.10 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿中核心论文主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	胡安卡洛斯国王大学	15	27.27%	302	20.13	2017.5
2	中国科学院	10	18.18%	176	17.60	2018.0
3	美国科罗拉多大学博尔德分校	8	14.55%	95	11.88	2018.4
4	西悉尼大学	7	12.73%	79	11.29	2018.0
5	北亚利桑那大学	6	10.91%	162	27.00	2016.0
6	明尼苏达大学	6	10.91%	114	19.00	2017.5
7	苏黎世大学	5	9.09%	1349	269.80	2016.4
8	Agroscope 研究所	5	9.09%	1106	221.20	2017.2
9	瑞典农业科学大学	5	9.09%	173	34.60	2017.0
10	中国林业科学研究院	5	9.09%	152	30.40	2017.6

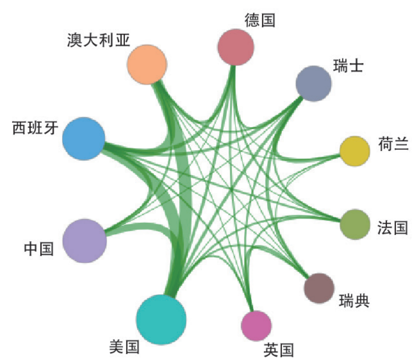

图 1.2.5 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿主要国家间的合作网络

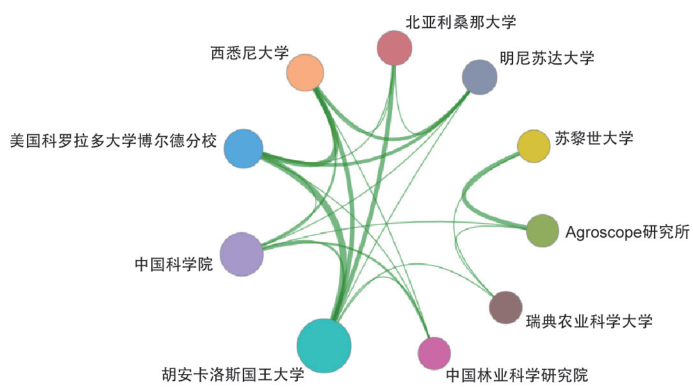

图 1.2.6 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿主要机构的合作网络

表 1.2.11 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿的施引核心论文主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	520	19.62%	2018.6
2	美国	475	17.92%	2018.0
3	德国	279	10.52%	2018.0
4	英国	207	7.81%	2018.1
5	法国	201	7.58%	2017.9
6	西班牙	195	7.36%	2017.9
7	瑞士	186	7.02%	2017.7
8	澳大利亚	177	6.68%	2018.0
9	荷兰	169	6.38%	2017.8
10	加拿大	130	4.90%	2018.4

表 1.2.12 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿的施引核心论文主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	203	25.47%	2018.5
2	中国科学院大学	84	10.54%	2018.6
3	苏黎世大学	73	9.16%	2017.4
4	瑞典农业科学大学	71	8.91%	2018.1
5	德国整合生物多样性研究中心	61	7.65%	2018.2
6	胡安卡洛斯国王大学	59	7.40%	2017.8
7	中国船舶集团有限公司	55	6.90%	2017.6
8	莱比锡大学	50	6.27%	2018.2
9	Agroscope 研究所	48	6.02%	2017.3
10	乌得勒支大学	47	5.90%	2016.9

2 工程开发前沿

2.1 Top 9 工程开发前沿发展态势

农业领域工程开发前沿 Top 9 主要分为三类：①与农业生产装备相关的开发前沿，包括无人农场智能装备、农业先进传感机理与技术、植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药；②与环境治理相关的开发前沿，包括农业农村有机废弃物绿色资源化利用、土壤有机污染物修复；③与促进农产品生产及保障食品安全相关的开发前沿，包括人工智能辅助育种、经济林高产株型构建、水产人工配合饲料开发应用、高效安全动物疫苗与诊断试剂研制。

农业领域 Top 9 工程开发前沿的概况如表 2.1.1 所示。从中可以看出，来自无人农场智能装备、土壤有机污染物修复、经济林高产株型构建 3 个开发前沿的核心专利较多，均在 100 项以上；植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药的平均被引数最高，为 9.31，远高于其他开发前沿；农业农村有机废弃物绿色资源化利用、人工智能辅助育种的开核心专利平均公开年最新，这表明这两个开发前沿近几年的专利申请量较大，技术发展较快。

农业领域 Top 9 工程开发前沿核心专利的公开

趋势（见表 2.1.2）表明，无人农场智能装备、农业农村有机废弃物绿色资源化利用、人工智能辅助育种的核心专利自 2017 年起出现较大涨幅，增长势头强劲。

（1）无人农场智能装备

无人农场是智慧农业的一种生产方式，是实现智慧农业的一种途径。无人农场有五个特点，一是耕种管收生产环节全覆盖；二是机库田间转移作业全自动；三是自动避障异况停车保安全；四是作物生产过程实时全监控；五是智能决策精准作业全无人。无人农场主要依托生物技术、智能装备和信息技术的支持。生物技术主要为无人农场生产提供适应机械化作业的品种和栽培模式；智能装备主要为无人农场生产提供智能感知、智能导航、智能作业（精准作业）和智能管理；信息技术主要为无人农场生产的信息获取、传输和处理，农机导航与自动作业，农机远程运维管理提供支持。

无人农场智能装备前沿技术主要包括智能感知、智能导航、智能作业、智能管理和系统集成。智能感知主要包括农业传感器、环境信息感知、动植物信息感知和数据智能处理。智能导航包括农场高精度地图构建技术、路径智能规划技术、复杂农田环境下农机导航精准定位技术、路径跟踪控制技术和多智能装备协同作业技术。智能作业包括精准播种、变量施肥、施药和灌溉等。智能管理包括智能装备状态监测和远程运维管理等。

表 2.1.1 农业领域 Top 9 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	无人农场智能装备	206	990	4.81	2017.2
2	高效安全动物疫苗与诊断试剂研制	80	67	0.84	2016.8
3	农业先进传感机理与技术	49	50	1.02	2017.4
4	农业农村有机废弃物绿色资源化利用	90	45	0.50	2018.3
5	土壤有机污染物修复	116	421	3.63	2017.4
6	人工智能辅助育种	56	15	0.27	2018.4
7	植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药	45	419	9.31	2017.5
8	经济林高产株型构建	142	402	2.83	2016.9
9	水产人工配合饲料开发应用	65	88	1.35	2016.3

表 2.1.2 农业领域 Top 9 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	无人农场智能装备	11	16	34	48	47	50
2	高效安全动物疫苗与诊断试剂研制	15	8	11	12	10	24
3	农业先进传感机理与技术	6	4	3	6	14	16
4	农业农村有机废弃物绿色资源化利用	2	0	0	14	28	46
5	土壤有机污染物修复	12	18	5	13	9	59
6	人工智能辅助育种	0	0	3	9	17	15
7	植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药	6	2	2	7	11	17
8	经济林高产株型构建	13	20	23	27	30	29
9	水产人工配合饲料开发应用	16	5	5	12	8	15

（2）高效安全动物疫苗与诊断试剂研制

动物疫苗指将病原微生物（病毒、细菌等）及其代谢产物，经过人工减毒、灭活或利用基因工程技术等制成的用于预防动物传染病的制剂。传统灭活疫苗具有成本高、免疫效果有限、弱毒疫苗毒株存在毒力返强等问题与风险，因此，研制高效安全的基因工程动物疫苗，如DNA疫苗、基因缺失疫苗、活载体疫苗、病毒样颗粒疫苗、合成肽疫苗等，是今后发展的重要方向。目前，国内已上市的动物新型疫苗包括禽流感DNA疫苗、口蹄疫合成肽疫苗、伪狂犬基因缺失疫苗等。

有效诊断试剂是动物疫病准确诊断、预防控制和扑灭的关键前提。诊断试剂研制主要包括：检测样本前处理技术研究；基于免疫反应的抗原抗体检测技术研究，例如单克隆抗体、酶联免疫吸附试验（ELISA）、胶体金诊断试剂条、免疫荧光技术、纳米抗体技术等；基于核酸的分子生物学检测，如聚合酶链式反应（PCR）、荧光定量PCR、等温环介导扩增（LAMP）、荧光标记适配体技术、全基因组测序等。未来，诊断试剂研制的发展方向是简便、快速、敏感、准确、高通量和在线检测。

（3）农业先进传感机理与技术

农业先进传感机理与技术是农业传感器的支撑性技术。农业传感器是实现对农业作业中环境信息、生命信息、农机状态信息进行监测的器件，由新型敏感元件、处理芯片和核心算法组成，并由新型物理机理支撑的复合系统。

该领域主要包括两个研究方向：一是农业传感器的新原理、原创性方法研究。近年来，新型物理、化学和生物传感方法与农业对象不断融合，涌现出多种新原理传感器，有望实现土壤氮素/土壤重金属/水质的原位传感、作物养分/离子/代谢物的无损检测、动物发情/泌乳生化指标的在线监测。二是农业传感器的高集成化工艺设计。目前农业传感器技术研究的一大热点是运用微机电系统（MEMS）等技术，实现传感器芯片的高度集成化。一些国家、研究机构和企业已在布局生产农业环境多参数MEMS芯片传感器、微纳动物瘤胃传感器等。通过芯片式设计和流片，实现了农业传感器器件的免维护、高可靠、低功耗和低成本。

农业先进传感器的发展趋势为新型传感机理将迅速发展，以往很多必须在实验室分析的指标，将可能实现在线、原位检测；实现农业传感器产业化应用的必行之路是打造传感器芯片设计、生产、测试、中试的产业链路。

（4）农业农村有机废弃物绿色资源化利用

属于资源生态科学学科，是传统深入开发前沿。农业农村有机废弃物是农业生产和农村生活所产生的有机废弃物总和，主要包括畜禽粪便、秸秆等农产品副产物，稻壳、果皮（渣）、下脚料等农产品加工副产物以及家庭厨余等生活垃圾。农业农村有机废弃物面广量大，具有分散性、复杂性、多样性等特点，其资源化利用难度大、潜在环境风险高，严重制约着美丽乡村的建设与农业的绿色发展。农业农村有机废弃物的资源化利用主要依赖还田改土、厌氧发酵、好氧堆肥、焚烧发电以及生物质碳化等技术途径，但仍存在关键技术不成熟、资源化收益低、无害化不彻底等绿色发展瓶颈。鉴于农业农村有机废弃物对农村生态环境的破坏及其对农业绿色发展的制约，其绿色资源化利用是当前需要重点关注的前沿技术问题。

（5）土壤有机污染物修复

土壤有机物污染直接影响农业生产、粮食安全和农产品质量，已成为亟待解决的全球性问题之一。农田土壤有机污染物主要包括有机氯杀虫剂（OCPs）、多环芳烃（PAHs）、多氯联苯（PCBs）和邻苯二甲酸酯类（PAEs）化合物。这些有机污染物具有较强的环境持久性、一定的毒性和潜在的致癌性，危害生态环境和人体健康。因而，土壤有机污染物的修复研究和治理技术开发是当前全球土壤健康保护工作的重点。土壤有机污染物修复指通过技术手

段使遭受有机物污染的土壤恢复正常功能的过程。目前土壤有机污染物修复的技术方法有物理法、化学法、生物法和联合修复法。物理法主要是通过物理手段将土壤中的有机污染物去除的方法，包括蒸汽抽提法和热脱附法。化学法指利用化学物质的氧化还原性和催化性，将土壤有机污染物转化为无毒或者低毒物质，主要方法有化学氧化法和催化降解法。生物法指利用特定动物、植物和微生物对有机污染物的降解作用，达到净化土壤的目的，主要有动物修复、植物修复和微生物修复方法。联合修复法，将以上 3 种方法有效结合起来，实现低成本和高效率修复土壤的目的，是目前土壤有机物污染修复的重要手段。

（6）人工智能辅助育种

近年来，人工智能技术不断向育种的各个环节深度渗透融合，使育种变得更加精准高效。面临新的机遇和挑战，人工智能技术正在支撑和酝酿新一轮绿色革命，具体体现在 4 个方面：①基于人工智能的精准杂交育种。杂交育种的本质是通过种质资源的有性杂交和人工选择，实现有利等位变异的富集和有害等位变异的清除。通过人工智能技术从自然变异中高效发掘有利和有害等位变异，可以指导精准杂交育种。②基于人工智能的基因编辑育种。基因编辑技术将成为未来育种的重要工具。人工智能技术可以解决在基因组哪些位点编辑、如何编辑，以获得理想农艺性状这一瓶颈问题。人工智能技术通过设计自然界不存在的有利等位变异，为基因编辑这一“导弹”提供“制导”。③基于人工智能的合成生物学。人工智能领域的生成模型技术可以用于设计自然界不存在的具有特定功能的基因组元件、蛋白质、甚至基因和基因调控网络，为动植物的智能设计提供蓝图。④基于人工智能的表型组学。随着传感器、无人机、田间机器人等的普遍应用，人工智能技术已广泛用于从多尺度、多维度图像数据中精准提取表型，有力支撑了育种模型的构建和育种流程的决策。综上所述，人工智能技术正在引领育种进入新一轮革命，人工智能辅助育种正在成为世界各国抢占的科技制高点。

（7）植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药

植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药系统主要由遥感系统、地理信息系统、精准导航系统、变量喷施系统组成。病虫害智能识别，以无人驾驶飞机为探测平台，搭载各种传感器获取农田图像，通过对数据进行后期处理、挖掘和建模，对农作物病虫草害信息进行判别。农田遥感影像采集包括数码相机成像遥感、高光谱相机成像遥感、多光谱相机成像遥感、红外热成像遥感、激光雷达成像遥感等方法。遥感图像解译方法可以分为经典统计分析方法和基于模式识别和机器学习的解译方法。植保无人飞机变量喷雾系统尚缺少较为成熟的技术，处于试验阶段的两种方法是基于脉宽调制的变量喷雾技术和改变液泵转速的变量喷雾技术。为了能够按照处方图进行精准对靶作业，还需要植保无人飞机飞行控制系统结合风速、风向等气象信息对飞行轨迹进行实时调整，以确保将准确的喷施农药量精准的投放在确定的区域内。

（8）经济林高产株型构建

株型是构成经济林丰产的重要影响因子之一，经济林产量主要是由光合产物转化而来，树体结构决定了获取的碳、水及养分在树体各部分的分配，进而影响产量和品质。经济林高产株型，指树体高度适宜，主干、主枝及枝组等具有一定的数量关系和明确的主从关系，营养枝和结果枝比例平衡，枝叶密度和分布方向合理，树体通风透光条件良好，树冠有效光合面积达到最大限度的树体结构类型。提高经济林产量的根本途径是改善植物的光合性能，其中高产株型主要是通过增加光合面积实现增产的目的，即为高光效树形。经济林高产株型的构建主要通过良种选育和培育两个途径实现。理想株型的良种选育是从遗传层面调控构建经济林高产株型；株型培育则采用整形、修剪等树体管理措施调

控经济林高产株型的构建。今后，经济林高产株型构建的研发核心是选育光能利用率高的高产株型新品种；利用天文学太阳视运动理论和数学球面三角相关理论，研究经济林光能高效利用的最佳树体参数，构建高产株型模型等。

（9）水产人工配合饲料开发应用

在传统的水产养殖中，饲料原料如谷类和鲜杂鱼等的直接投喂非常普遍。这种投喂方式不但会产生营养物质的浪费对养殖水环境造成压力，而且还会导致病原菌从饲料原料向水产养殖动物的传播。人工配合饲料是按照特定水产养殖动物的营养需要，使用现代化生产设备生产的营养全面、易于储存和运输的颗粒或粉状饲料。按照工艺方法的不同，人工配合饲料有膨化饲料、硬颗粒饲料和粉料等形式。高效人工配合饲料的开发依赖对水产养殖动物营养素精准需求量的深入全面研究，包括对不同生长阶段、不同养殖环境条件、不同生产模式下的需求差异等的研究。养殖户片面看重水产动物的生长速度阻碍了人工配合饲料在水产养殖中的全面应用，亟须政府政策的指导来推进其推广应用。水产动物开口饲料和亲体繁育期配合饲料的推广落后于养成期人工配合饲料的推广，需要营养学研究与生产工艺的协同配合研发。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 无人农场智能装备

无人农场是智慧农业的一种生产方式，是实现智慧农业的一种途径。无人农场有 5 个特点：①耕种管收生产环节全覆盖，即覆盖农作物生产中的耕整、种植、田间管理（水、肥、药）和收获的各个环节；②机库田间转移作业全自动，即农机自动从机库转移到田间，完成田间作业后自动回到机库；③自动避障异况停车保安全，即在农机转移和作业过程中能实现自动避障，遇到异常情况能自动停车，以确保安全；④作物生产过程实时全监控，即能对作物生产过程中的长势和病虫草害情况进行实时监控；⑤智能决策精准作业全无人，即能根据作物的长势和病虫草害情况及时做出决策并自动进行精准作业，包括精准灌溉、精准施肥和精准施药等。

无人农场主要依托生物技术、智能装备和信息技术的支持。生物技术主要为无人农场生产提供适应机械化作业的品种和栽培模式；智能农机主要为无人农场生产提供智能感知、智能导航、智能作业（精准作业）和智能管理；信息技术主要为无人农场生产的信息获取、传输和处理，农机导航与自动作业，农机远程运维管理提供支持。

智能装备指具有感知、分析、推理、决策和控制功能的生产装备，是先进制造技术、信息技术和智能技术的集成和深度融合。无人农场智能装备是农业生产整个过程中所用到智能装备和机器人等设备的统称，采用物联网、第五代移动通信（5G）、大数据、云计算和人工智能等新一代技术构成的智能化系统，通过远程智能管控实现设施、智能农机装备和农业机器人等全程自动控制或自主控制，完成农场所有生产作业。传感器、物联网和 5G 技术实现了农场农业生产信息感知和传输，并与智能装备互联；大数据与云计算技术完成了农业信息存储、分析和处理；人工智能、智能装备和机器人技术实现了智能学习、智能决策以及装备和机器人自主精准作业。

无人农场智能装备前沿技术主要有智能感知、智能导航、智能作业、智能管理和系统集成。①智能感知主要包括农业传感器、环境信息感知、动植物信息感知和数据智能处理。②智能导航包括农场高精度地图构建技术、路径智能规划技术、复杂农田环境下农机导航精准定位技术、路径跟踪控制技术和多智能装备协同作业技术。③智能作业包括精准播种、变量施肥、施药和灌溉等。④智能管理包括智能装备状态监测和远程运维管理等。⑤系统集成方面包括智能装备线控技术、底盘通信技术和农机具通信技术。

该前沿领域今后的发展热点为通过运用动植物表型及生长优化调控模型、智能装备技术与先进种养农艺融合以及无人大田、无人温室、无人果园、无人牧场和无人渔场等无人农场应用实践，为种植业、畜牧业和渔业等提供全过程无人化生产模式形成无人农场智能装备的解决方案。

相关核心专利公开量和被引数排前 2 位的是中国与美国，韩国与哥伦比亚并列第 3 位（见表 2.2.1）。其中，中国在专利公开量上位居第 1。被引排名前五的核心专利（见表 2.2.2），主要集中在农机智能感知、智能控制与智能导航方面，是无人农场智能装备研究的重点方向。国家间的合作网络较少，仅美国与哥伦比亚间有少量的合作（见图 2.2.1）。核心专利主要产出机构排名前 3 位的是 AUTONOMO 公司、凯斯纽荷兰工业美国公司和 Rowbot 系统公司，不同机构之间合作较少（见图 2.2.2）。

2.2.2　人工智能辅助育种

人工智能技术带来了诸多领域的变革性发展，

表 2.2.1　“无人农场智能装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	102	49.51%	218	22.02%	2.14
2	美国	67	32.52%	668	67.47%	9.97
3	哥伦比亚	8	3.88%	76	7.68%	9.50
4	韩国	8	3.88%	3	0.30%	0.38
5	俄罗斯	6	2.91%	8	0.81%	1.33
6	日本	5	2.43%	39	3.94%	7.80
7	荷兰	4	1.94%	17	1.72%	4.25
8	德国	4	1.94%	10	1.01%	2.50
9	瑞士	3	1.46%	6	0.61%	2.00
10	以色列	2	0.97%	20	2.02%	10.00

表 2.2.2　“无人农场智能装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	AUTONOMO 公司	美国	14	6.80%	39	3.94%	2.79
2	凯斯纽荷兰工业美国公司	美国	11	5.34%	23	2.32%	2.09
3	Rowbot 系统公司	美国	8	3.88%	86	8.69%	10.75
4	无锡卡尔曼导航技术有限公司	中国	6	2.91%	14	1.41%	2.33
5	迪尔公司	美国	5	2.43%	39	3.94%	7.80
6	爱科国际公司	瑞士	5	2.43%	9	0.91%	1.80
7	江苏大学	中国	5	2.43%	5	0.51%	1.00
8	AgJunction 公司	美国	4	1.94%	95	9.60%	23.75
9	国家农场相互汽车保险公司	美国	4	1.94%	37	3.74%	9.25
10	Kinze 制造公司	美国	4	1.94%	34	3.43%	8.50

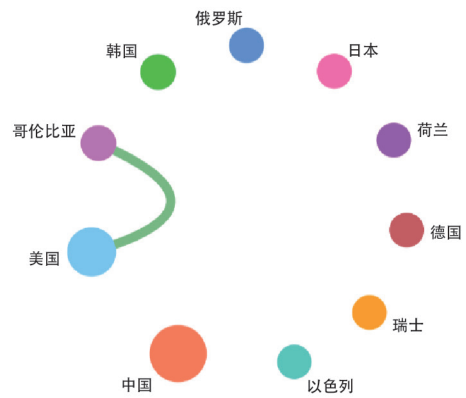

图 2.2.1 “无人农场智能装备”工程开发前沿主要国家间合作网络

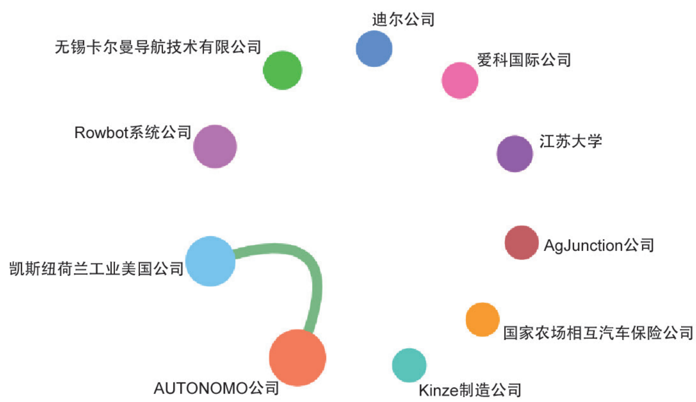

图 2.2.2 “无人农场智能装备”工程开发前沿主要机构间合作网络

已成为世界各国抢占的科技制高点。人工智能指研究开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用的一门新科学。人工智能最核心的一个分支学科是机器学习，机器学习指由计算机替代人找到问题的解决方案。在机器学习技术中，发展最为迅猛的是基于深度神经网络算法的深度学习技术。目前，人工智能技术，尤其是深度学习技术，已开始应用于动植物育种的 4 个方向。

发掘功能变异，指导杂交育种。动植物群体中存在着海量的自然变异，但是只有极少一部分变异可以影响表型，称为功能变异。在杂交育种中，育种家通过有性杂交和选择，实现有利等位变异的富集（即有害等位变异的清除），从而实现动植物遗传改良。那么，如何从海量的自然变异中发掘影响分子表型的功能变异？功能变异通过影响不同层次的分子表型（如 micro-RNA 与蛋白质水平的表达量或蛋白质生化活性），进而影响最终表型（如人类疾病、畜禽品质等）。因此，可以构建从基因组序列预测分子表型的深度学习模型，然后利用该模型扫描自然变异，从而系统精准发掘功能变异。深度学习技术不依赖于自然群体，具有成本更低、不受等位基因频率影响、可以从高度连锁的变异位点中发掘功能变异和可以实现知识在不同位点、不同群体、不同物种间的迁移等优点。深度学习技术已被广泛用于预测控制人类疾病的功能变异，在动植物育种领域也开始蓬勃发展。

设计优异等位变异，指导基因编辑育种。杂交育种依赖自然产生的功能变异。但是，功能变异自

然发生的速度非常缓慢，其表型效应具有随机性，且常存在遗传累赘。未来的作物育种能否突破自然变异的限制，实现功能变异的理性设计和创制？随着基于CRISPR-Cas9系统的基因编辑技术的出现（如高通量碱基敲除、单碱基编辑、先导编辑等），未来可以根据育种目标，对功能变异进行定向设计，然后利用基因编辑技术将功能变异导入动植物基因组。但在基因组哪些位点编辑、如何编辑，才能实现性状改良，将成为基因编辑育种的关键问题，从生物学序列预测分子表型的深度学习模型可以系统高效地解决上述问题。

创制新型功能元件，指导合成生物学。目前，深度学习领域的生成模型技术（generative models），已经广泛用于合成生物学。该技术能够通过对海量生物数据的学习，设计出新的具有特定生物学功能的基因组元件，如具有优异生化活性的蛋白质、顺式元件等。利用基因编辑技术将这些新元件定点敲入基因组，可以实现农艺性状的改良。人工智能指导下的合成生物学将为动植物遗传改良带来新的思想和技术变革。

智能分析图像，提取表型特征。近年来，新型高通量表型组学迅速发展。搭载近红外和可见光传感器的无人机、田间机器人等仪器产生大量图像数据。利用机器学习尤其是深度学习技术从图像数据中精准获取表型特征（如光合效率、冠层温度等），已经成为表型组学领域的常用技术。

“人工智能辅助育种”工程开发前沿中相关核心专利的主要产出国家方面（见表2.2.3），共有56项专利，最主要的产出国是中国（47项），其次是韩国（5项），再次是澳大利亚、德国、印度和日本各有1项专利，中国的平均被引数为0.32次。核心专利TOP 10产出机构方面（见表2.2.4），研发机构主要为企业和高校，但研发机构之间缺少合作。另外，专利产出机构较为分散，仅安徽省东昌农业科技有限公司产出数量是2项，其他机构均为1项；祥创科技北京有限公司的平均被引较高，为4次。

2.2.3 植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药

农业生产正从粗放、高消耗走向精细、节约化，未来农业生产将呈现高度区域化、一体化、机械化和智能化的特点，智能植保机械和精准施药将成为植保作业的发展方向。植保无人飞机可在空中实时获取农田地理位置、作物长势、病虫草害等信息，再将农田分为作业网络，结合气象和历年数据等多源信息对病虫害进行精准预报和监测，并制定作业处方图，通过精准对靶施药系统，实现网格化的农作物精准施药。该工程前沿的主要研发点包括：①农田遥感影像获取。农作物信息采集传感器主要有数码相机、多光谱相机、高光谱相机、热成像仪、激光雷达等。数码相机可获取RGB可见光图像，

表2.2.3 “人工智能辅助育种”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	47	83.93%	15	100.00%	0.32
2	韩国	5	8.93%	0	0.00%	0.00
3	澳大利亚	1	1.79%	0	0.00%	0.00
4	德国	1	1.79%	0	0.00%	0.00
5	印度	1	1.79%	0	0.00%	0.00
6	日本	1	1.79%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4 “人工智能辅助育种”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	安徽省东昌农业科技有限公司	中国	2	3.57%	0	0.00%	0.00
2	祥创科技北京有限公司	中国	1	1.79%	4	26.67%	4.00
3	云南农业大学	中国	1	1.79%	3	20.00%	3.00
4	北京奥金达农业科技发展有限公司	中国	1	1.79%	1	6.67%	1.00
5	苍南博雅科技有限公司	中国	1	1.79%	1	6.67%	1.00
6	青海大学	中国	1	1.79%	1	6.67%	1.00
7	安徽省雷氏农业科技有限公司	中国	1	1.79%	0	0.00%	0.00
8	旭水农事组合法人	日本	1	1.79%	0	0.00%	0.00
9	中农致远（北京）农业科技发展有限公司	中国	1	1.79%	0	0.00%	0.00
10	Bigstone House	韩国	1	1.79%	0	0.00%	0.00

成本低，但是光谱分辨率也低。多光谱相机光谱分辨率为 0.1 mm 数量级，可根据病虫害的特征光谱进行量身定做，基本满足农情信息和病虫害识别要求，在农业生产中已有商业化产品。高光谱相机光谱在可见光和近红外区域有几个到数百个波段，光谱分辨率可达纳米级，波段信息丰富、分辨率高，能准确反映田间各种作物之间的光谱差异，因而在农作物病虫害监测上更显优势，但其价格较高，主要用于科研领域。激光雷达是近年出现的新型遥感技术，可获取高精度的三维数据，目前主要应用于农作物株高、生物量、叶面积指数等农情监测，未来可与光谱成像结合，作为多源遥感，对农作物病虫害进行全方位解析，从而提高农作物病虫害识别准确度。②遥感图像解译。图像解译指对遥感图像进行处理、挖掘和建模，以便对农作物和病虫草害信息进行判别，主要方法有经典统计分析方法和基于模式识别和机器学习的解译方法。基于模式识别和机器学习的图像解译所需样本和设备性能要求低，模型更容易理解。深度学习和机器学习是一个新兴领域，具有特征学习和深层结构两个显著特点，有利于遥感图像分类精度的提升。当前农作物病虫害智能识别主要是针对特定农作物、特定试验园区以及特定病害监测进行的可行性研究，未来需要进一步与农学、植保、病理等紧密结合，实现大规模生产应用。③精准变量喷施。植保无人飞机按照作业处方图对确定的区域精准投放施药量需要有农药变量喷施系统和精准投放技术的支持。农药变量喷施系统尚未应用于生产，在科研中主要采用两种方法：一种是基于脉宽调制的变量喷雾技术，此技术主要针对液力雾化喷头；另外一种是通过改变液泵转速来改变喷头流量，此技术主要针对离心雾化喷头。农药精准投放技术指植保无人飞机在飞行过程中，根据风速、风向并结合飞行高度、飞行速度、雾滴大小、作物特征等因素，对飞行轨迹进行实时调整，以确保农药雾滴能够精准地沉积到指定区域。

植保无人飞机是近年来的新型植保作业方式，因此，对雾滴的沉积与飘移机理研究还不够深入，这是未来植保无人飞机精准投放技术的主攻点之一。

该前沿相关核心专利共 45 项，最主要的产出国是中国（37 项），其次是美国和韩国，分别有 7 项和 1 项。美国的平均被引数为 36.29 次，中国的

平均被引数为 4.46 次（见表 2.2.5）。产出较多的机构有广州极飞科技有限公司、无锡同春新能源科技有限公司、仲恺农业工程学院等中国机构，而美国的 Working Drones 公司和 Elwha 公司各公开 1 项（见表 2.2.6）。其中 Working Drones 公司的利用移动终端对无人飞机进行导航和控制的专利被引数为 242 次，是本前沿最有影响的专利，也是无人飞机研究的重点方向之一。由于中国是全球植保无人机应用最多的国家，而中国又是专利的主要产出国，其他国家在植保无人机方面的专利相对较少，因此在查询范围之内的专利不存在国家之间的合作。中国植保无人飞机市场竞争激烈，各单位之间的竞争大于合作，加之植保无人飞机的开发涉及商业机密，因此在机构之间也没有发现合作关系。

表 2.2.5　“植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	37	82.22%	165	39.38%	4.46
2	美国	7	15.56%	254	60.62%	36.29
3	韩国	1	2.22%	0	0.00%	0.00

表 2.2.6　“植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	广州极飞科技有限公司	中国	5	11.11%	51	12.17%	10.20
2	无锡同春新能源科技有限公司	中国	4	8.89%	34	8.11%	8.50
3	仲恺农业工程学院	中国	3	6.67%	5	1.19%	1.67
4	北京农业信息技术研究中心	中国	2	4.44%	29	6.92%	14.50
5	深圳市道通智能航空技术有限公司	中国	2	4.44%	10	2.39%	5.00
6	成都优力德新能源有限公司	中国	2	4.44%	0	0.00%	0.00
7	华南农业大学	中国	2	4.44%	0	0.00%	0.00
8	Working Drones 公司	美国	1	2.22%	206	49.16%	206.00
9	Elwha 公司	美国	1	2.22%	25	5.97%	25.00
10	北京艾森博航空科技股份有限公司	中国	1	2.22%	13	3.10%	13.00

领域课题组成员

课题组组长：

张福锁

专家组成员：

郭世伟　李新海　林　敏　刘录祥　刘少军　刘世荣　刘学军　刘英杰　卢　琦　罗锡文　马文奇　马有志　谯仕彦　沈建忠　万建民　王光州　王桂荣　王红宁　王军辉　王　锴　王小艺　王晓武　王源超　吴孔明　吴普特　杨　宁　张　斌　张福锁　张守攻　张　涌　赵春江　周继勇　朱齐超

课题组成员：

郜向荣　焦小强　李红军　李云舟　刘德俊
刘　军　刘治岐　师丽娟　孙会军　汤陈宸
王桂荣　姚银坤　臧　英　张晋宁　赵　杰
周丽英　朱齐超

执笔组成员：

艾庆辉　曹光乔　陈松林　丁艳峰　董莎萌
郭世伟　胡　炼　胡　炜　李　谷　李新海
刘　军　刘录祥　刘少军　刘学军　刘英杰
刘治岐　罗锡文　马有志　宋坚利　汪　海
汪阳东　王光州　王红宁　王　晖　王　锴
王晓武　王源超　乌云塔娜　赵春江　张涌
郑世军　周继勇　朱齐超

八、医药卫生

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

医药卫生领域 Top 10 工程研究前沿涉及公共卫生与预防医学、基础医学、临床医学、医学信息学与生物医学工程、中药学等学科方向(见表 1.1.1)。相关前沿包括：完善公共卫生防疫体系和应急机制，新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究，肠道微生态失衡与疾病，干细胞疗法临床转化，医用机器人与智能医学，类脑智能研究，人类单细胞图谱构建，基于大数据的真实世界研究支持药物研究及临床应用，中药活性成分的新靶标发现与转化研究，中国人群遗传性肿瘤的发病机制、精准诊疗技术与新药研发。

Top 1 和 Top 2 研究前沿因与新型冠状病毒有关，为更加客观地描述其发展态势，数据采集时间为 2014 年 1 月—2020 年 8 月。Top 3 至 Top 10 研究前沿数据采集时间为 2014 年 1 月—2019 年 12 月。各研究前沿的核心论文逐年发表情况见表 1.1.2。

（1）完善公共卫生防疫体系和应急机制

公共卫生防疫体系和应急机制指，针对传统和新发突发传染病进行预防和控制的机构、人员、管理运行机制，出现突发公共卫生事件时通过调配医疗卫生资源共同应对的机制。现代化、科学、完善的公共卫生防疫体系是国家治理体系和治理能力现代化的具体实践。随着新型冠状病毒肺炎（COVID-19）疫情在全球的暴发流行，完善公共卫生防疫体系和应急机制的研究需求剧增，研究思路日益清晰。一方面，传染病仍是威胁人类健康的重大因素，对生产生活秩序的冲击、对经济社会的危害获得国际社会共识，需要高度重视传染病防治工作，保障人民群众的健康和生命安全，促进经济建设和社会和谐稳定。另一方面，公共卫生安全成为国家安全的重要组成部分，疾病预防控制体系作为公共卫生体系核心力量的地位进一步明确。疾病预防控制服务属于由政府提供的公共卫生服务职能，需要公共财政和体制机制给予有力保障。

表 1.1.1　医药卫生领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	完善公共卫生防疫体系和应急机制	240	2558	10.66	2017.2
2	新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究	2707	195 743	72.31	2016.8
3	肠道微生态失衡与疾病	197	29 028	147.35	2015.9
4	干细胞疗法临床转化	531	46 376	87.34	2015.3
5	医用机器人与智能医学	3272	218 591	66.81	2015.7
6	类脑智能研究	509	43 834	86.12	2015.7
7	人类单细胞图谱构建	118	17 262	146.29	2016.4
8	基于大数据的真实世界研究支持药物研究及临床应用	105	3828	36.46	2016.6
9	中药活性成分的新靶标发现与转化研究	91	3986	43.80	2015.6
10	中国人群遗传性肿瘤的发病机制、精准诊疗技术与新药研发	594	6893	11.60	2016.6

表 1.1.2 医药卫生领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文数

序号	工程研究前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
1	完善公共卫生防疫体系和应急机制	21	18	48	49	41	23	40
2	新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究	486	408	454	387	311	95	566
3	肠道微生态失衡与疾病	32	47	57	41	19	1	—
4	干细胞疗法临床转化	195	115	113	80	24	4	—
5	医用机器人与智能医学	882	827	596	526	342	99	—
6	类脑智能研究	130	119	101	95	55	9	—
7	人类单细胞图谱构建	11	21	30	27	22	7	—
8	基于大数据的真实世界研究支持药物研究及临床应用	7	14	32	25	20	7	—
9	中药活性成分的新靶标发现与转化研究	22	24	20	15	10	0	—
10	中国人群遗传性肿瘤的发病机制、精准诊疗技术与新药研发	99	91	95	107	83	119	—

（2）新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究

新型冠状病毒暴发引发了全球性危机，其他潜在新发高致病病毒的威胁同样不容忽视。面对人类未知的新型冠状病毒，世界科学家通力合作、共同应对，取得了一系列重要成果，极大加深了人们对病毒及所致疾病的认识。中国科学界发挥举国体制优势，率先鉴定并分离出病原体，在第一时间与全球共享新型冠状病毒基因组序列；快速解析新型冠状病毒及其编码关键蛋白的结构，建立了可靠的细胞和动物模型并用于疫苗与药物研发，促进多种候选疫苗和药物进入临床Ⅲ期试验阶段，做出了应有贡献。当前的关键科学问题有：新型冠状病毒的起源、进化和跨种传播机制，病毒生活周期调控机制，病毒感染导致重症的作用机制等；研究热点有：病毒蛋白结构与功能，临床进展与转归，感染与免疫保护机制，新型疫苗和抗病毒药物的筛选与评价等。后续将更加注重综合利用单细胞测序、系统生物学、反向遗传学、大数据、人工智能（AI）等技术手段，深入研究新型冠状病毒的感染、致病、传播机制，推动更多基于理性设计的下一代疫苗和药物进入临床研究阶段。

（3）肠道微生态失衡与疾病

肠道微生态相当于一个人体“重要器官”，对人体健康和疾病治疗具有不可或缺的重要作用。人体肠道含有大量细菌、真菌、病毒等。其中，仅细菌种类就有 1000 余种，数量约是人体细胞的 10 倍；它们所编码的基因数量是人体自身基因数量的 50~100 倍，相当于人体的“第二个基因组”，包含了重要的遗传信息。肠道微生物与其生存环境共同构成肠道微生态，是宿主消化吸收、免疫反应、物质能量代谢的重要维持者。随着个人年龄的增长，肠道微生态不断变化，与人的衰老、寿命息息相关。肠道微生态失衡与疾病研究，更新了医学上关于感染、肝病、肿瘤、代谢等重大疾病的传统认识，为疾病预防诊断和治疗带来了革命性变化。肠道微生态与疾病研究已引起各国政府、科技界、企业和公众的高度关注，发达国家均在国家科技战略规划中将之列为重点发展领域。

（4）干细胞疗法临床转化

干细胞疗法指应用干细胞或其衍生物的临床治疗方法。干细胞是一类具有自我复制和多向分化能力的原始细胞，存在于胚胎、胎体组织、围产期组织以及成体大多数组织中，按发生学来源的不

同分为三大类：胚胎干细胞、围产期组织干细胞、成体干细胞。干细胞也可按其功能分类，如造血干细胞、神经干细胞、间充质干细胞等。基因操作技术的发展促使诱导多能干细胞和基因编辑干细胞等新型干细胞的产生。干细胞除通过分化能力去行使细胞替代治疗外，还可通过旁分泌机制发挥治疗作用。基于治疗机制，干细胞疗法实际分为两大类：细胞替代性治疗、基于干细胞的组织功能与结构改善性治疗。

干细胞疗法临床转化的关键科学问题与技术难题包括：治疗用干细胞种类的最佳选择，大规模、高质量、低成本的干细胞及其衍生物的规模化制备、标准化生产及质控体系，干细胞作用机制和生物学效应分析，基因编辑干细胞技术，基于干细胞的基因治疗、联合疗法以及干细胞应用于疾病的大样本多中心临床研究及其长期效果随访等。

造血干细胞移植是最早应用于临床的干细胞替代疗法，在血液病、免疫性疾病和遗传性疾病的治疗中发挥了重要作用。由于造血和血管存在密切关联，造血干细胞近年来也用来治疗重度下肢缺血等血管性疾病，取得良好效果。自体组织干细胞、诱导多能干细胞分化的组织干细胞、人类白细胞抗原配型相合的异基因造血干细胞、基因编辑干细胞主要用于替代性干细胞疗法。间充质干细胞是一类具有很强的免疫炎症调节和血管生成活性的多能干细胞，主要用于病变组织细胞功能和结构改善性治疗，临床适用范围很广，在皮肤组织和器官损伤修复、自身免疫性疾病和炎症性疾病的治疗中呈现良好效果。自体间充质干细胞异位移植可看作是细胞替代性治疗，但多种组织来源的异基因间充质干细胞在临床应用上疗效良好，且未出现明显的免疫排异反应。替代性治疗和改善性治疗的联合使用可产生很好的协同疗效，如造血干细胞和间充质干细胞共移植能提高造血干细胞移植成功率、降低移植物抗宿主病。

（5）医用机器人与智能医学

AI 是一种用于模拟和延展人类智能的理论、方法与应用的技术科学，智能医学即利用 AI 方法，辅助或替代人类进行医疗行为的科学，如开展医学数据驱动下的健康筛查与预警、疾病诊断与治疗、康复训练与评估、医疗服务与管理、药物筛选与评估、基因测序与表型等典型生物医药领域的精准、智能、安全应用，其中医用机器人是智能医学的一个重要分支。

医用机器人与智能医学的研究现状集中在六方面。健康筛查与预警，主要涉及疾病筛查、慢性疾病管理、穿戴式健康监测等，如利用深度神经网络和模糊控制等方法，开展阿尔茨海默病分类、高血压管理、糖尿病识别（糖尿病分型、糖尿病性视网膜病变等并发疾病筛查）等，实现慢病的及时预警和有效管理。疾病诊断与治疗，主要涉及病灶自动识别、治疗智能决策、疗效科学评估、机器人辅助手术及远程手术等，如通过深度学习等方法将定量化诊断、疾病预后有机结合，已用于肺癌、宫颈癌、乳腺癌、胃肠癌、鼻咽癌、皮肤癌等疾病的病理诊断，可用于影像筛查，降低误诊率、降低人力成本；智能机器人技术在腔镜外科、骨科、神经外科、整形外科等方向获得了广泛应用。康复训练与评估，主要涉及认知障碍康复、失能和残疾人康复、机器人护理、智能假肢与矫形器（含外骨骼辅具）等；将虚拟现实、智能机器人联合 AI 技术应用于残障康复，出现了智能假肢、康复训练机器人、外骨骼辅具和矫形器、陪护机器人、智能床椅、虚拟现实康复系统、电子人工喉等。医疗服务与管理，主要涉及电子病历管理、智能自动送药、医学物联网服务等，如电子病例录入及管理的智能化已经在临床逐渐实施，极大减少医务人员的工作强度、显著提高工作效率。药物筛选与评估，主要涉及药物靶点确认、药物筛选、药物有效性测试、药物安全性评估与不良反应数据管理等；AI 技术已经在药物靶

点确认、药物筛选、药物安全性评估、药物有效性测试、数据收集等方面得到较多应 用，并开始用于中医药的药理学评估。基因测序与表型，主要涉及基因筛查、基因组测序、基因编辑、个体化精准医疗等；整合患者病理样本特征提取和基因组测序数据，采用基因筛查、基因组测序和基因编辑等手段来进行疾病预测和检测，进而结合临床指南和循证医学开展个体化治疗。

医用机器人与智能医学市场需求巨大，发展趋势表现为：AI 在生物医药方面的应用正从病理诊断向临床治疗发展，AI 与机器人、第五代移动通信（5G）等前沿技术的融合正在变革现代治疗理念和手段，AI 在药物研发和基因工程中的应用成为热点。医用机器人与智能医学的应用研究，通过弥补人类能力短板的智能辅助形式，推动现代医学进入新的发展阶段，促进医疗健康进入量化分析、个体化规划、实时监控等新的层次。

（6）类脑智能研究

类脑智能研究是借鉴大脑的信息处理方式，模拟大脑动态演化的神经系统和高级认知功能，建立具有生物和数学基础的计算与理论模型，据此开发新一代类脑智能算法，形成自主学习能力。通过脑机交互将算法与生命个体、群体动态交融，构建脑机一体化的信息处理终端，最终建立新型的计算结构与智能形态，实现智能增强和群体智能应用。

类脑智能研究的关键科学问题涵盖神经科学理论、数学理论方法、计算系统构架与芯片实现等，具体包括：基于神经形态学、神经生理学与多尺度脑影像的知识体系神经元生物物理脉冲动力学，轴突–突触网络数学模型动力学行为分析与数据同化方法；以通讯为核心的计算、存储、通信一体化非冯诺依曼计算体系构架，高速自适应路由通信系统；针对感知、融合记忆、情感、语言与奖惩，实现判断、决策与控制，具有多模式与多通路的整体性智能系统新理论与新方法。

欧盟、美国、日本等积极推动高校、研究机构、企业在此领域开展竞争性研究。在“欧洲脑计划”支持下，曼彻斯特大学团队利用 ARM 处理器构建 Spinnaker 平台，可实现 10 亿个神经元的形态计算。国际商业机器公司与美国空军合作开发了模仿人脑运作机制进行工作的芯片，可实现 6400 万个神经元 /160 亿个突触的形态计算。Neuralink 公司开发了可实际运作的植入式脑机接口设备和植入大脑手术设备。我国在类脑智能方面起步稍晚，但拥有世界一流的大脑实验设施、大规模人群样本数据，主要研究机构有清华大学、北京大学、浙江大学、复旦大学等，研究内容集中在视 / 听觉芯片与脉冲神经网络动力学方面。

（7）人类单细胞图谱构建

单细胞技术分析利用数字矩阵来描述机体中每一个细胞的基因表达特征，对其进行系统性分类与整合，据此提出人类细胞图谱构建概念。人类细胞图谱主要依赖于单个细胞的转录组数据，实施构建需要整合单个细胞基因组、蛋白质组、代谢组等一系列组学数据，进而达到可视化与共享的目的。人体细胞共有 30 万亿个，在其生命周期过程中呈现出基因表达的可变性，从而产生细胞类型或者细胞状态的多样性特征，形成细胞异质性。在正常情况下，多种类型的细胞有序地结合在一起，执行组织器官功能，形成了有机整体；但在受到内外环境刺激时，机体内细胞更多地出现异质性改变，导致各种疾病的发生。因此人类单细胞图谱研究更为重要的目标是构建人类疾病，尤其是严重危害人类健康的重大疾病的单细胞图谱。

自 2016 年起，研究人员完成了神经系统、免疫系统等多种器官组织的人类单细胞图谱构建。2020 年，浙江大学研究团队构建了跨越胚胎和成年两个时期、涵盖八大系统的人类细胞图谱。未来细胞图谱研究将建立结合临床观察、实验研究、计算生物学等数据，产生包含三维空间特征、时间演变特征、与发育和疾病相关的人类细胞图谱，从而在疾病发生与演化过程中鉴定新的疾病生物标志

物，发现与治疗密切相关的细胞类型、细胞状态、细胞作用的分子调控网络特征。人类肿瘤图谱网络是美国国家癌症研究所“癌症登月”计划的一部分，旨在通过可视化肿瘤发生中的不同时间点的细胞结构和细胞成分变化以及细胞相互作用特征等来建立包含空间和时间演变规律的肿瘤图谱。构建完整的人类细胞图谱，将丰富发育、疾病等过程中的细胞动态分化与疾病演变路径，促进对生命过程和疾病过程的认识。未来相关研究将更好结合系统生物医学的进展，多学科融为一体，以全方位、立体化、多视角的形式来研究生命全过程和疾病全过程，揭示疾病发生发展机制；研究重大疾病的个体发病机制、共性发病机制，推动临床精确诊断、个性化治疗、靶向治疗的发展，最终推动医学走进大健康时代。

（8）基于大数据的真实世界研究支持药物研究及临床应用

真实世界证据指传统临床试验以外的医疗保健信息，可从各种来源获得，包括电子病历、保险索赔和账单数据、产品和疾病登记数据、个人设备收集的数据、观察性研究数据等。2018 年，美国食品药品监督管理局发布了真实世界证据评估方面的规范性文件。2020 年 1 月，中国国家药品监督管理局发布了《真实世界证据支持药物研发与审评指导原则（试行）》，明确了真实世界研究、数据等各项基本定义，提出将真实世界证据应用于支持药物监管决策，涵盖上市前临床研发、上市后再评价等多个环节；8 月补充发布了《用于产生真实世界证据的真实世界数据指导原则（征求意见稿）》《真实世界研究支持儿童药物研发与审评的技术指导原则（试行）》。

真实世界证据的价值在于对传统临床试验中获得的信息进行完善和补充。尽管随机、双盲、对照临床试验被认为是评估疗效和安全性的“金标准”，但仍有局限性。高质量的真实世界证据可以用于：为新药注册上市提供有效性和安全性的证据，为已获批产品修改说明书提供证据（包括增加或修改适应证、增加安全性信息等），为修改已批准药物的适应证或安全性信息提供证据，为药物上市后要求或再评价提供证据，指导临床试验设计和实施。

科学的内部和外部真实性是医学研究的终极目标。随机、对照临床试验具有最高的内部真实性，但仅有相对较弱的外部真实性；真实世界数据具有多源性和人群多样性的特点，可将研究拓展到更大范围的人群。值得注意的是，从真实世界数据到真实世界证据的过程，一定是源于可靠的研究设计和实施、严格的数据清理和分析，对偏倚和混杂的考虑和控制需贯穿始终，而这些也都是观察性研究的关键所在。因此，随机、对照临床试验和真实世界研究是相辅相成、不可隔离的。仅凭借观察性的真实世界研究并不能得出确切结论，但两者结果可以相互补充，并为后续随机对照临床试验的设计和实施提供重要线索。从技术层面来说，真实世界数据庞大且混乱，应进行信息挖掘，尽可能全面地采集信息并进行整合。大数据技术可以整合和分析这些高维度的复杂数据，对原始数据进行溯源和清错，成为开展真实世界研究的基础和必需工具。

真实世界证据相关的政策法案和实施落地仍然存在较多的法律性和执行性问题。在数据获取与共享方面，存在行政、地域等限制，也存在信息安全、使用权限、伦理等诸多实际问题。在数据质量方面，标准、完整、准确、真实、可溯源性尚需统一要求和标准。在数据管理和分析方法方面，针对不同类型数据持续开展方法学创新。另外，相关领域的优秀专家和人才培养面临迫切需求。

（9）中药活性成分的新靶标发现与转化研究

中药活性成分的新靶标发现指在中医药理论的指导下，采用某种物理、化学、生物技术手段，使药物处理的细胞或动物模型产生期望的生物学表型变化；支持发现作用靶标并探索新靶标功能，将之转化到临床疾病诊断、防治、预后评估、新药研发。

中药作为复杂体系，具有“多成分、多途径、多靶点”整合调节作用，关键科学问题包括中药活性成分的确定以及模型靶细胞的选择、交叉学科技术手段高效应用于中药活性成分新靶标的发现及验证、新靶点与疾病模型之间的关系、成分及靶点之间协同作用、基于新靶点的活性成分及组合成药性与临床应用。新靶标的发现指针对具有一定药理活性基础的中药活性成分，采用相关技术手段进行挖掘，新靶点与疾病表型之间的关联性是这类研究的重点。将新靶标转化为临床上治疗疾病的靶点，开发出针对该靶标的活性成分，是新药研发的关键。

近年来，中药活性成分以其独特的优势在预防与治疗诸如慢性和病毒性疾病等多种疾病方面发挥着重要作用。基于中药活性成分发现新靶标的相关研究起步较晚，但以质谱–细胞热转变分析为代表的无标志药物靶标鉴定发展迅速。传统中药活性成分为现代药物研发提供了丰富且宝贵的资源，将传统中药活性成分转化为既具有现代药物作用靶标明确的特点，又有传统中药优势的创新药物，成为现代中药研究的热点。

（10）中国人群遗传性肿瘤的发病机制、精准诊疗技术与新药研发

遗传性肿瘤指由于某些基因的胚系突变引起的一类遗传性疾病，约占人类肿瘤的 5%~10%。遗传性肿瘤种类繁多、分类方法复杂，发病机制尚未明确，二次打击学说、染色体不平衡假说、单 / 多基因假说是目前学界较公认的。随着测序技术的广泛应用，精准基因检测为遗传性肿瘤的诊断、新药研发、个体化治疗提供了更多可能。

关键科学问题包括：利用分子生物学方法对肿瘤发生发展的基因学、遗传学机制进行探究，识别未知遗传易感基因，明确意义未知的显著性基因变异的价值；多学科交叉合作进行数据综合分析，促进精准分子病理学的发展，构建完整的遗传性肿瘤家系临床和基因信息库以及综合图谱；解析基因型与表型的相关性，针对遗传性肿瘤的关键变异基因，筛选现有药物实现“老药新用”，开发新型分子靶向药物。超过 50% 的符合临床诊断的患者或家系无法找到明确的分子致病机制，需要大规模的全基因组关联研究来鉴定新的易感基因座。相较常见遗传性肿瘤，罕见遗传性肿瘤的病因更为复杂、研究相对滞后，发现患者的共同突变基因、揭示罕见遗传性肿瘤的致病机制也很重要。基因检测技术配合遗传咨询，在遗传风险评估、早期筛查、分子诊断、风险管理、长期随访等癌症全周期管理方面的规范化应用，在遗传性肿瘤这一学科的发展中尤为重要。

中国人群遗传性肿瘤的检测诊断及精准治疗虽已起步，但尚有一定局限性，缺乏核心性指南，遗传学咨询存在不足，发病机制了解有限，对应的分子靶向药物研发滞后。目前，基于基因组研究和系统遗传学筛查，已经确定了数种由关键基因异常驱动的通路改变；针对基因突变的肿瘤细胞，合理构思了包括诱导铁死亡、促进氧化应激、代谢改变等的治疗策略；某些遗传性肿瘤对免疫治疗的良好反应也是治疗的重要方向。随着遗传性肿瘤分子生物学特征的深入研究，这些治疗策略也在不断完善，如考虑将实验治疗策略安全地转化为临床实践、预防遗传性肿瘤患者发病的精准基因编辑技术等。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 完善公共卫生防疫体系和应急机制

公共卫生就是组织社会共同努力，改善环境卫生条件，预防控制传染病和其他疾病流行，培养良好卫生习惯和文明生活方式，提供医疗服务，达到预防疾病、促进人民身体健康的目的。公共卫生需要集体、合作、有组织地行动，需要可持续的政策支持，目的是改善全人群健康、减少健康不平等现象。公共卫生防疫体系和应急机制指针对传统与新发突发传染病进行预防和控制的机构、人员、管理运行机制，出现突发公共卫生事件时通过调配医疗卫生资源来共同应对的机制。疾病控制与预防体系

是公共卫生服务体系的重要组成部分，是国家公共卫生服务与人民健康保障的主要提供者，工作范围包括环境卫生、控制传染病和非传染性疾病、进行个体健康教育、组织医护人员对疾病进行早期诊断和治疗。发展社会体制，保证每个人都享有足以维持健康的生活水平，实现健康地生产和长寿，贯穿于生命的全过程。

现代化的公共卫生防疫体系主要包括：预防为主的思想理念、权责清晰的管理体制、统一高效的应急指挥调度工作机制、坚强有力的法治保障体系、训练有素的专家队伍体系、缜密完善的疾病监控体系、准确快速的实验室检测技术体系、快速响应的应急应对和物资保障体系、科学先进的信息化体系和切实到位的公共卫生服务体系。这些模块相辅相成，配套建设，协调发展。

中国在 COVID-19 疫情防控方面取得了良好成效，但也要注意到，疫情防控暴露了传染病防控体系和卫生应急机制方面的一些不足，如疫情预警理念和模式落后，医疗救治、疾病防控、医疗保障协同不够，公共卫生专业机构现代化技术应用不充分，卫生技术部门法律地位不明确等。

完善公共卫生防疫体系和应急机制方面的科学问题有：完善国内、国际公共卫生相关法律法规，提高我国疫情防控制度的可实施性、科学性，积极参与全球防控行动和卫生应急事务，推动世界卫生组织领导力和资源协调能力的提高；完善平战结合的公共卫生应急管理体系，建立传染病应对的科学规范路径，建立统一的应急指挥调度系统与平战转换机制，完善统一的公共卫生战略物资保障体系；建立传染病智慧化预警多点触发机制、多渠道监测预警机制，构建多学科协作数据共享云平台，提升传染病监测预警能力、决策科学性和效率；推动传染病防控和卫生应急技术现代化，实现传统理论知识与现代化信息技术、AI、大数据等技术的结合。相关研究热点有：重大疫情医疗救治体系改革、基层传染病防控能力建设、突发公共卫生事件与疫情防控政策措施与建议、各国针对传染病防控措施比较、国家公共卫生安全体系构建方案。

“完善公共卫生防疫体系和应急机制”工程研究前沿中，发表核心论文数量排名靠前的国家来自北美洲、欧洲、亚洲、非洲，美国、英国、中国位居前 3 位（见表 1.2.1）。中国作者发表的论文数量不少，篇均被引频次仍有提升空间。在核心论文产出国的合作网络方面，核心论文数量排名靠前的国家之间都有着较为密切的合作关系（见图 1.2.1）。本工程研究前沿核心论文发文量排在前列的机构中，有 3 个来自美国，3 个来自英国，2 个来自非洲，1 个来自世界卫生组织，1 个来自中国；其中排列前 3 位的是美国疾病预防控制中心、哈佛大学、世界卫生组织，复旦大学排在第 10 位（见表 1.2.2）。在核心论文产出机构合作网络方面，排名靠前的机构之间都有合作关系（见图 1.2.1）。综合以上统计分析结果，“完善公共卫生防疫体系和应急机制”研究成果集中于美国疾病控制与预防中心、哈佛大学、世界卫生组织等机构，我国研究和国际合作仍有一定提升空间。

1.2.2　新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究

新型冠状病毒是目前已知的第 7 种对人类致病的冠状病毒，自然界中还存在数量众多的其他冠状病毒。为有效应对 COVID-19 疫情的威胁，需系统研究病毒增殖、感染、致病的作用机制，揭示传播、流行、暴发的特点，阐明其在自然界中起源、进化、变异的规律，研发安全有效的疫苗和药物，为疫情防控提供科技支撑。面对人类未知的新型冠状病毒，全球科学家通力合作、共同应对，在新型冠状病毒的基础和应用研究方面取得一系列重要成果，极大加深了对病毒及其所致疾病的认识。尤其是中国科学界，充分发挥举国体制优势，率先鉴定并分离出病原体，证实可在人间传播，第一时间与全球共享新型冠状病毒基因组序列；迅速解析新型冠状病毒

表 1.2.1 “完善公共卫生防疫体系和应急机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	美国	138	57.50%	1674	12.13
2	英国	29	12.08%	644	22.21
3	中国	28	11.67%	412	14.71
4	瑞士	16	6.67%	398	24.88
5	澳大利亚	16	6.67%	294	18.38
6	法国	13	5.42%	302	23.23
7	荷兰	10	4.17%	238	23.80
8	德国	9	3.75%	152	16.89
9	塞拉利昂	9	3.75%	107	11.89
10	意大利	7	2.92%	118	16.86

表 1.2.2 “完善公共卫生防疫体系和应急机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	美国疾病预防控制中心	65	27.08%	718	11.05
2	哈佛大学	18	7.50%	512	28.44
3	世界卫生组织	18	7.50%	447	24.83
4	约翰·霍普金斯大学	9	3.75%	37	4.11
5	牛津大学	8	3.33%	292	36.50
6	伦敦卫生与热带医学院	6	2.50%	236	39.33
7	塞拉利昂卫生部	5	2.08%	73	14.60
8	艾克斯－马赛大学	4	1.67%	178	44.50
9	利比里亚卫生部	4	1.67%	51	12.75
10	复旦大学	4	1.67%	18	4.50

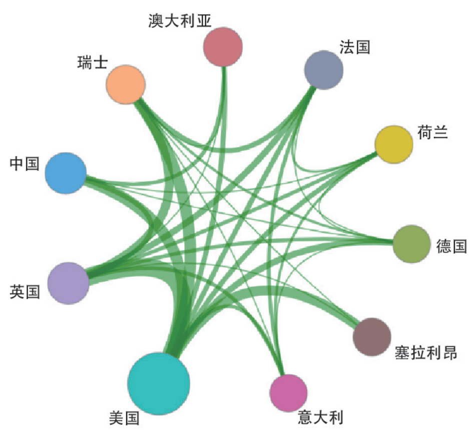

图 1.2.1 “完善公共卫生防疫体系和应急机制”工程研究前沿的主要国家间合作网络

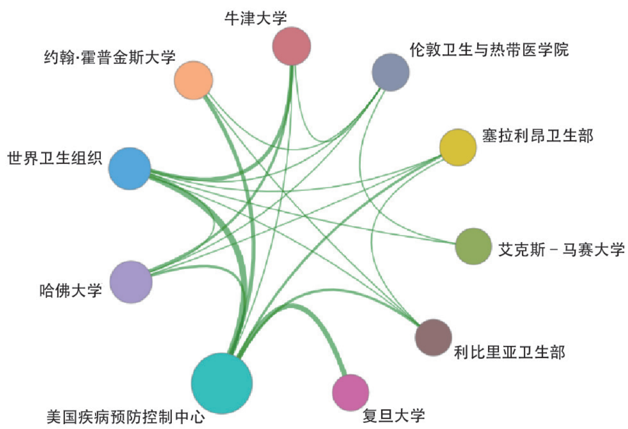

图 1.2.2 “完善公共卫生防疫体系和应急机制” 工程研究前沿的主要机构间合作网络

及其编码关键蛋白的结构，建立了可靠的细胞和动物模型用于疫苗和药物研发，目前多个候选疫苗和药物进入临床Ⅲ期试验阶段，使得境内疫情在短期内得到有效控制，凸显了中国贡献。

新型冠状病毒、潜在新发高致病病毒研究的关键科学问题有：新型冠状病毒从动物中跨越种属屏障实现在人间传播的分子机制仍不不清楚，对于不同动物来源冠状病毒在自然生态系统中的分布、演化、重组变异规律亟需持续深入研究；新型冠状病毒入侵宿主细胞完成复制、翻译、装配、释放等关键环节尚未完全阐明，迫切需要综合运用结构生物学、生物信息学、分子生物学等技术手段，系统解析新型冠状病毒及其基因组编码蛋白的结构与功能；病毒感染人体后激活机体的免疫系统，导致急性肺损伤、多脏器衰竭的作用机制；特异的诊断标志物、重症风险预警标志物、免疫保护标志物的完全鉴定。

新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究热点包括：动物来源冠状病毒的起源、进化与遗传变异研究，新型冠状病毒基因组及编码蛋白的结构、功能与作用机制研究，新型冠状病毒感染所致疾病的临床表现、诊断与治疗研究，新型冠状病毒免疫保护和病理损伤机制，新型冠状病毒传播模型及干预策略，新型冠状病毒免疫保护机制和疫苗研究，新型冠状病毒抗病毒药物的筛选与评价研究。在整体趋势上，未来将更加注重利用单细胞测序、系统生物学、反向遗传学、大数据、AI 等技术手段，在新型冠状病毒的感染、致病、传播机制方面进行深入研究，推动更多基于理性设计的下一代疫苗和药物进入临床研究阶段，在实践中验证更为精准有效的防控措施与管理理念。

“新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究”工程研究前沿中，核心论文发表位于前 5 位的国家是美国、中国、英国、德国、法国（见表 1.2.3）。从核心论文产出国家的合作网络来看，核心论文数量排名前 10 位的国家之间都有紧密的合作关系（见图 1.2.3）。核心论文发文量排名前列的机构主要来自美国、中国、英国（见表 1.2.4）；来自美国的 5 个机构分别是美国疾病控制与预防中心、哈佛大学、美国国家过敏症和传染病研究所、德克萨斯大学医学院、北卡罗来纳大学，来自中国有 4 个机构分别是中国科学院、香港大学、华中科技大学、复旦大学，来自英国的 1 个机构是牛津大学。核心论文产出排名前 10 位的机构之间均有密切合作关系（见图 1.2.4）。在本工程研究前沿方面，中国目前处于与国外同类研究“并跑”的态势，在病原体分离鉴定和动物模型研究方面处于领先地位，但存在着研究队伍体量较小、国际协作不充分等问题。

1.2.3 肠道微生态失调与疾病

肠道微生态失衡与疾病研究更新了医学上关于感染、肝病、肿瘤、代谢等重大疾病的传统认识，为疾病预防诊断和治疗带来了革命性变化。疾病的发生发展大多与免疫和代谢相关，肠道是机体最大的免疫和代谢器官，肠道微生物及其产物可以通过肠道直接或间接影响疾病的发生发展和预后。正常微生物之间及正常微生物群与其宿主之间的微生态平衡，在外环境影响下，由生理性组合转变为病理性组合的状态称为微生态失衡。近年来研究发现，肠道微生态失衡在感染、肿瘤、心血管疾病、肝病、肥胖症、糖尿病、炎症性肠病、自身免疫性疾病、神经和精神系统疾病的发生和发展中扮演着重要角色，成为攻克重大疾病发病机制难题的新突破口。基于肠道微生态变化的新型诊断方法，成为快速精准诊断不明原因感染、疑难杂症的全新方向。调控肠道微生态能够防治许多疾病，甚至为一些目前通过其他方法很难有效治疗的疾病（如艰难梭菌感染、炎症性肠病等）提供了新的防治思路。肠道微生态失衡与疾病研究，催生了药物研发新靶点和应用新途径。众多口服和注射药物的疗效甚至治疗成败都与肠道微生态的结构和功能密切相关，肠道微生态

表 1.2.3 “新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	美国	1309	48.36%	92 353	70.55
2	中国	650	24.01%	64 924	99.88
3	英国	348	12.86%	31 554	90.67
4	德国	249	9.20%	22 021	88.44
5	法国	217	8.02%	22 860	105.35
6	加拿大	161	5.95%	16 315	101.34
7	意大利	154	5.69%	14 037	91.15
8	巴西	148	5.47%	17 307	116.94
9	瑞士	137	5.06%	15 805	115.36
10	荷兰	122	4.51%	12 971	106.32

表 1.2.4 “新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究”工程前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	美国疾病控制与预防中心	233	8.61%	28 131	120.73
2	中国科学院	127	4.69%	24 128	189.98
3	哈佛大学	100	3.69%	12 249	122.49
4	香港大学	92	3.40%	11 535	125.38
5	美国国家过敏症和传染病研究所	88	3.25%	6931	78.76
6	德克萨斯大学医学院	88	3.25%	5448	61.91
7	牛津大学	75	2.77%	10 257	136.76
8	华中科技大学	71	2.62%	13 079	184.21
9	北卡罗来纳大学	70	2.59%	10 201	145.73
10	复旦大学	64	2.36%	8696	135.88

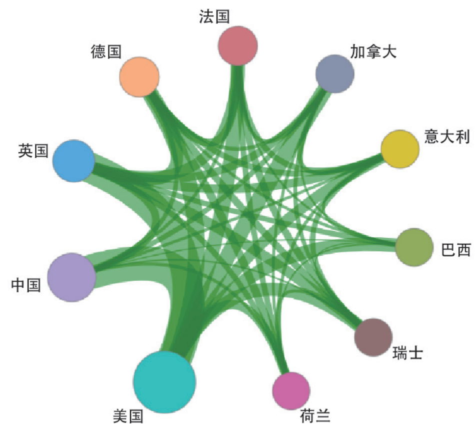

图 1.2.3 “新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究”工程研究前沿的主要国家间合作网络

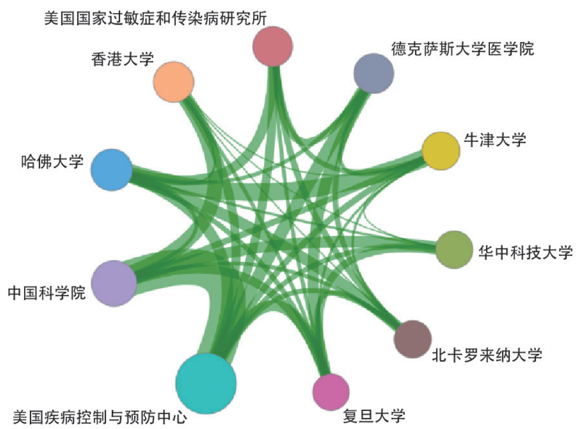

图 1.2.4 “新型冠状病毒及潜在新发高致病病毒的全球研究”工程研究前沿主要机构间合作网络

研究为我国中医中药的机制阐释开辟了新天地。

肠道微生态与疾病研究已引起各国政府、科技界、企业和公众的高度关注，发达国家均在科技战略规划中将之作为重要发展领域。从 2008 年设立“人类微生物组计划”“人类肠道微生态宏基因组计划”，到 2016 年设立“国家微生物组计划”，世界各国已经设立了数十个系统的“微生态”计划，投资额达数十亿美元，在肠道微生态结构解析、肠道微生态失衡与重大疾病、微生态与生物安全、微生态临床应用等方向进行了重点部署；旨在通过肠道微生态领域的基础研究，解决肠道微生态重大科学问题，撬动相关联的医药、机械、信息等行业发展，甚至成为科技和经济新的增长点。

肠道微生态失衡和疾病研究涉及的关键科学问题有：从肠道微生态与人体相互作用机制的角度以及高度集成生命科学、现代医学、信息科学等理论基础和技术手段，深入揭示疾病发生发展与肠道微生态失衡的因果关系和机制；精准挖掘基于肠道微生态的疾病预警、预测、诊断和治疗靶点；全面解析肠道微生态在传统药物代谢中的作用、在微生物耐药发生发展中的机制；系统研发纠正肠道微生态失衡、预防疾病发生发展的新药物和新技术。

肠道微生态失衡和疾病研究方面的发展趋势为，由疾病发生发展过程中肠道微生态结构功能变化及其与疾病的关联研究，转向肠道微生态变化与疾病发生发展的因果机制研究以及相关药物和疗法

开发。相关研究热点有：疾病发生发展中的肠道微生态失衡规律及其与疾病关联，肠道微生态失衡与疾病发生发展的因果机制，基于肠道微生态失衡的疾病诊断和治疗靶点挖掘，肠道微生态影响疾病治疗效果的免疫学机制及临床应用，肠道微生态影响口服药物代谢及疗效的作用和机制，纠正肠道微生态失衡防治疾病的新药物、新策略、新方法。

“肠道微生态失衡与疾病研究”工程研究前沿中，核心论文产出排名靠前的国家中美国处于领先位置，中国、法国位列第 2、3 位（见表 1.2.5）；核心论文篇均被引频次分布范围为 117.67~232.60，中国核心论文篇均被引频次为 138.00，影响力仍有提升空间。在核心论文产出国家的合作网络方面，核心论文数量排名前 10 位的国家之间都有合作关系（见图 1.2.5）。核心论文发文量排在前列的机构主要来自美国、法国，如哈佛大学、法国国家农业科学研究院、加利福尼亚大学圣迭戈分校，中国科学院、上海交通大学也进入前 10 位（见表 1.2.6）。在核心论文产出机构合作网络方面，部分机构之间存在合作关系（见图 1.2.6）。“肠道微生态失衡与疾病”工程研究前沿中，中国目前处于与国外同类研究“并跑”的态势。

2　工程开发前沿

2.1　Top 10 工程开发前沿发展态势

医药卫生学领域 Top 10 工程开发前沿涉及基础医学、临床医学、药学、医学信息学与生物医学工程、公共卫生与预防医学等学科方向（见表 2.1.1）。其中，新兴前沿是人体类器官芯片技术、5G + 健康医疗、人体微生物组诊断预防及干预技术；作为传统研究深入的是突发重大传染病疫苗与药物研发、突发重大传染病诊断试剂与设备研发、新型抗耐药菌抗生素的研发、肿瘤免疫治疗小分子药物开发、基于 AI 的临床诊断决策支持系统、新型基因编辑技术脱靶效应与对策、针对实体瘤的嵌合抗原受体 T 细胞（CAR-T）免疫治疗技术。

各前沿相关的核心专利 2014—2019 年施引情况见表 2.1.2。

（1）突发重大传染病疫苗与药物研发

突发重大传染病指严重影响社会稳定、对人类健康构成重大威胁、需要对其采取紧急处理措施、新发生的国家重点防治急性传染病和不明原因疾病；在短时间内发生，波及范围广泛，出现大量的病人或死亡病例，发病率远超常年情况。随着 COVID-19 疫情的暴发和持续，全球对控制和治疗

表 1.2.5　“肠道微生态失调与疾病”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	美国	99	50.25%	16 866	170.36
2	中国	33	16.75%	4554	138.00
3	法国	26	13.20%	4468	171.85
4	加拿大	15	7.61%	3140	209.33
5	西班牙	15	7.61%	2217	147.80
6	比利时	14	7.11%	2217	158.36
7	瑞典	12	6.09%	2260	188.33
8	日本	12	6.09%	1412	117.67
9	德国	11	5.58%	2046	186.00
10	丹麦	10	5.08%	2326	232.60

表 1.2.6 “肠道微生态失调与疾病”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	哈佛大学	16	8.12%	3035	189.69
2	法国国家农业科学研究院	11	5.58%	2713	246.64
3	加利福尼亚大学圣迭戈分校	9	4.57%	1881	209.00
4	哥本哈根大学	8	4.06%	2118	264.75
5	埃默里大学	8	4.06%	1831	228.88
6	博德研究所	8	4.06%	1812	226.50
7	中国科学院	7	3.55%	1362	194.57
8	贝勒医学院	7	3.55%	951	135.86
9	上海交通大学	7	3.55%	724	103.43
10	法国国家健康与医学研究院	6	3.05%	1545	257.50

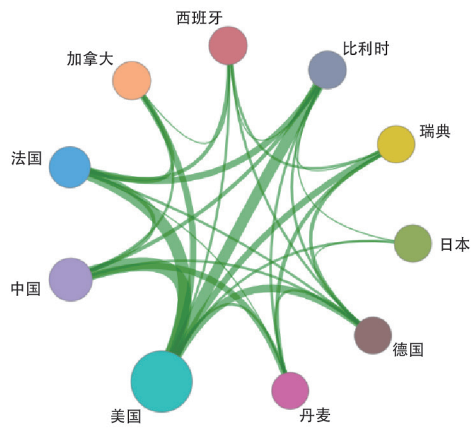

图 1.2.5 “肠道微生态失调与疾病” 工程研究前沿的主要国家间合作网络

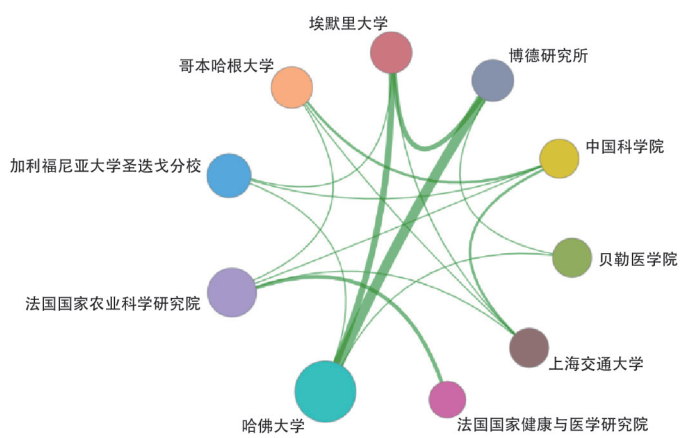

图 1.2.6 “肠道微生态失调与疾病”工程研究前沿的主要机构间合作网络

新型冠状病毒感染的药物与疫苗需求迫切性前所未有。全球化使得传染病传播速度加快、范围趋广，开发突发重大传染病疫苗与药物迫在眉睫，关键技术问题有：快速明确未知病原体，寻找安全有效的疫苗类型，克服病原体遗传变异，避免和应对病原体耐药性出现，高效监测可疑传染病并及时有效应对等。

（2）突发重大传染病诊断试剂与设备研发

突发重大传染病指由新种或新型病原微生物引发的传染病，也可是重新发生的古老传染病，对人类健康构成重大威胁，严重影响社会稳定。全球一体化的经济格局，人类居住的城市化，大规模应用生活公用设施，现代交通尤其是铁路和航空客运的普及，使得传染病的发生频率更高、疫情传播速度更快。为了及时有效应对新发突发传染病，全球对诊断试剂与设备的需求日益提高。重大新发突发传染病诊断试剂及诊断设备的快速研发对于防控重大新发突发传染病、保障人民健康、促进经济社会发展具有重要意义。本领域拟解决的关键问题有：收集全球不同地区的病原体毒株，丰富病原体资源库和基因信息库，为新发突发传染病的病原体快速鉴定与变异监测提供基础条件；

表 2.1.1　医药卫生领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	突发重大传染病疫苗与药物研发	2537	30 145	11.88	2014.6
2	突发重大传染病诊断试剂与设备研发	842	7777	9.24	2015.6
3	人体类器官芯片技术	108	463	4.29	2017.1
4	新型抗耐药菌抗生素的研发	600	3093	5.16	2015.2
5	肿瘤免疫治疗小分子药物开发	1918	31 621	16.49	2014.7
6	5G + 健康医疗	326	5256	16.12	2015.9
7	基于 AI 的临床诊断决策支持系统	6416	26 796	4.18	2017.6
8	新型基因编辑技术脱靶效应与对策	196	2947	15.04	2017.4
9	针对实体瘤的 CAR-T 治疗技术	1764	16 923	9.59	2017.0
10	人体微生物组诊断预防及干预技术	2754	31 741	11.53	2014.6

表 2.1.2　医药卫生领域 Top 10 工程开发前沿的逐年施引专利数

序号	工程开发前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	突发重大传染病疫苗与药物研发	160	187	291	353	384	352
2	突发重大传染病诊断试剂与设备研发	40	60	103	163	156	150
3	人体类器官芯片技术	6	9	10	19	29	28
4	新型抗耐药菌抗生素的研发	74	54	66	66	101	100
5	肿瘤免疫治疗小分子药物开发	167	205	236	226	280	274
6	5G + 健康医疗	21	22	38	45	60	80
7	基于 AI 的临床诊断决策支持系统	185	248	398	771	1524	2924
8	新型基因编辑技术脱靶效应与对策	11	14	15	35	54	62
9	针对实体瘤的 CAR-T 治疗技术	57	83	203	344	393	549
10	人体微生物组诊断预防及干预技术	215	236	274	370	393	419

研制设备关键技术部件，实现设备集成化、小型化、便捷式，提高检测速度、通量、灵敏度，满足不同场景下集中化检测与个体化检测的应用需求；研究诊断试剂的新型关键材料和方法原理，提高检测灵敏度和特异度。

（3）人体类器官芯片技术

人体类器官芯片技术是一类基于微流控芯片的体外三维细胞培养技术，旨在将具有干细胞潜能的细胞培养形成具有器官特异性的细胞团；通过模拟、研究、控制细胞在体外培养过程中的自我更新、自我组装、特异性分化等生物学行为，形成与来源组织相似的空间结构，进而在芯片上再现器官的部分关键功能；提供高度生理相关的系统，实现药物筛选评价、遗传疾病建模、细胞治疗等多方向应用。类器官芯片研究在国际上尚处于初期阶段，但因其良好的发展前景和市场潜力获得了广泛关注。相关研究热点方向有：智能生物材料，基底材料－器官细胞相互作用，细胞共培养体系构建，类器官实时监测，芯片内环境调控，多个类器官功能关联及协同，药物筛选、毒性分型及模型建立等。

（4）新型抗耐药菌抗生素的研发

抗生素是微生物在生命活动过程中所产生的具有抗病原体或其他活性的一类天然产物，通过阻断或干扰微生物（如细菌、真菌等）的蛋白质合成、脱氧核糖核酸（DNA）复制、细胞壁合成等重要生命活动进程，干扰细胞膜的完整性或通透性，从而抑制微生物的生长、细胞分裂，或者导致微生物死亡。然而，抗生素的滥用给微生物带来了巨大的选择压力，使越来越多的病原微生物对原本敏感的抗生素产生高度耐受性，即抗生素耐药。

抗生素耐药性问题日益严峻，临床亟须新型抗菌药物。但目前，人类对环境微生物来源的抗生素发现技术和能力非常有限；对抗生素互补及替代疗法，如抗生素佐剂、抗致病力策略、噬菌体疗法以及调节人体微生物菌群技术等的研究仍处于早期概念验证阶段；新型抗菌药物的发现、设计、合成、优化也受到有效靶标的制约，尤其是那些具有新颖作用机制的新类型的抗菌活性物质。抗菌药物的临床应用使得许多复杂的医疗手段得以顺利实现，而耐药菌的出现给人类治疗感染性疾病带来了巨大的挑战。开发新型抗菌药物能够解决多药耐药病原菌导致的因缺乏有效抗菌药物所带来的治疗困难、疗效降低、病死率增加等问题，显著降低医疗费用。多药耐药菌株与日俱增，与之矛盾的是市场对新型抗菌药的研发热情却极低。主要原因是传统抗生素仍然是目前治疗临床感染的首选策略，新型抗菌药物研发利润低下，加之抗菌药物研发产出难、投入收益不协调，导致大型制药企业纷纷退出抗菌药物研发。解决抗生素耐药以及抗菌药物研发是一个综合性问题，需要多部门多方面共同支撑，例如开拓新的抗菌药物发现方法，合理规范抗菌药物的临床使用，抗菌药物的开发流程和管理的优先政策，争取政府、医药企业、慈善机构的资金支持等。在抗生素耐药的时代背景下，通过对特定微生物致病机制、生物学研究、与宿主相互作用的深入理解，实现细菌感染疾病的快速检测、精准诊断、个性化医疗，将会减少抗菌药物对微生物的脱靶效应、减弱耐药性的发展，促使抗菌药物从广谱向窄谱转变，进而显著拓宽抗菌药物的靶点多样性并推动新型抗菌药物的发展。

（5）肿瘤免疫治疗小分子药物开发

小分子药物免疫治疗可通过靶向先天免疫系统或肿瘤免疫微环境来作用于天然 / 适应性免疫细胞分子或通路，解除肿瘤免疫抑制状态，恢复机体抗肿瘤免疫功能；弥补生物大分子的局限性分布，提高抗肿瘤疗效并降低全身免疫性毒性，成为免疫疗法的主要研发方向。小分子靶向免疫药物可以及时地“开 / 关”给药，达到精准控制疗效和毒性的目的。不同于单克隆抗体的高特异性，小分子靶向免疫细胞药物非特异性结合、低口服生物利用度、分布不均等都会影响化合物的成药性；但小分子药物容易进入细胞，由于靶标在不同免疫细胞的结合受

体不同，引起的免疫效应不同，分子结构的微小改变可能带来疗效和毒性的巨大差异。因此迫切需要模拟分子结构与免疫细胞上各激活、抑制靶点的相互作用以及带来的疗效和毒性，即“免疫小分子药物结构–效应图”。相较基于生物学抗体的免疫治疗，口服小分子药物对肿瘤微环境有更好的渗透性，可同时针对细胞内外靶标来增强抗肿瘤疗效；通过筛选穿越生理屏障的小分子药物（如血脑屏障），可使其应用于更多肿瘤患者；可提供最佳的药代动力学和药效学参数，避免单克隆抗体的全身免疫原性导致的免疫相关不良事件。小分子药物单独或与单克隆抗体互补或协同的疗法，可解决临床反应低和耐药的问题。近年来，小分子免疫疗法研究取得显著进展，如针对程序性细胞死亡受体 1/ 程序性细胞死亡受体–配体 1，吲哚胺 2,3- 双加氧酶，干扰素基因刺激蛋白，TLR，A2A 以及更多新发现的多类共抑制和共刺激靶点的小分子免疫疗法取得突破，部分小分子药物已进入临床试验阶段。未来研究将重点发现具有独特化学类型和更高效能的新型小分子，确定可精确进行患者分类的生物标志物。

鉴于较低的生产和开发成本，小分子药物有望让更多的肿瘤患者获益。小分子免疫治疗可与生物制剂或传统癌症疗法，如与免疫检查点抑制剂、靶向治疗或化疗结合来增强抗肿瘤疗效，并且可提供优于生物免疫疗法的固有优势，如进入更广泛的分子靶标、减少生物治疗的免疫相关不良事件等。通过探索小分子靶向免疫细胞的分子机制，优化小分子药物联合治疗的方案和时机以最大限度地发挥其作用，将实现从基础发现到临床应用的有效转化，开启肿瘤免疫精准治疗的新篇章。

（6）5G＋健康医疗

5G＋健康医疗依托 5G 具有的高速率、低延时、低功耗、大容量等特点，充分发挥大型医院的有限医疗资源和医疗技术优势，围绕诊前、诊中、诊后环节来提供数字化、移动化、远程化的健康医疗服务。利用智能手机、平板电脑、虚拟现实 / 增强现实设备、可穿戴设备、多媒体通信设备等互联网终端，手术机器人、医学影像设备、体外诊断设备等智能医疗设备，接入包括无线接入网、承载网、核心网在内的 5G 医疗专网，实现血压、血糖、心率等生命体征数据的实时、动态、持续监测，影像资料、检查报告、电子病历等资料的远程传输和调阅，超高清视频通话、实时信息反馈等远程通信，进而支持医患之间、医师之间的实时、高质量交互。5G＋健康医疗应用广泛、日趋成熟，主要类型有：无线监护、移动输液、移动护理、患者定位等基于医疗设备数据无线采集的医疗监测与护理类应用，移动查房、远程诊断、远程会诊、移动急救等基于视频与图像交互的医疗诊断与指导类应用，远程机器人超声检查、远程机器人内镜检查、远程机器人手术等基于视频与力反馈的远程操控类应用。5G＋健康医疗是未来健康医疗的重要组成部分，信息化基础较好的国家都纷纷加大相关标准、技术、应用的研发投入。推动大数据、物联网、机器人、AI 等深度融合，支持健康医疗行业朝着无线化、智能化、全连接方向发展和演进，提供优质、高效、便捷的健康医疗服务，提高全民健康水平。

（7）基于 AI 的临床诊断决策支持系统

基于 AI 的临床决策支持系统（AI-CDSS），利用 AI 技术来综合临床知识、患者主客观病情信息，辅助临床医护人员进行综合分析判断，增强医疗干预能力，提升医护决策和行动的精准性、个体化和效率，提高医疗质量和服务水平；通过自然语言处理、知识工程、计算机视觉、机器学习，融合生物医学相关技术，挖掘图像、影像、文本等结构多样的医疗大数据中的潜在关联与知识，构建数据与知识融合支撑下的临床诊疗推理逻辑、分类与预测模型，并将形成的系统与模型集成、内嵌到临床信息系统与诊疗流程之中，为医疗人员提供可交互的决策支持能力。AI-CDSS 在诊疗全流程中的应用包括：疾病信息分析处理、疾病风险预测、疾病智能诊断支持、患者用药指导、辅助医师治疗、

患者疾病预后预防干预等；目前应用最为广泛的是面向专科化的智能疾病诊断支持，如类风湿关节炎、癌症、肺病、心脏病、糖尿病视网膜病变、肝炎、阿尔茨海默病、肝病、登革热和帕金森病。据2019年“Clinical Decision Support System Market”报道，2016年全球临床决策支持系统市场价值为7.9亿美元，预计到2023年将增至17.6亿美元。AI-CDSS不仅是临床决策支持系统的核心发展方向，也是AI在健康医疗应用的关键落脚点。在全球老龄化与医疗资源相对不足的背景下，AI-CDSS被视为医疗服务补充、服务质量效率提升的重要手段，成为医疗产业发展的重要内容。系统可持续发展的基础在于解决复杂医学知识规范化表达，多源知识整合，语义标准化；系统应用拓展方向有可解释与可移植性能力提升，面向多模态数据、多学科的临床决策支持；相关产业发展的关键在于人机交互增强临床决策模式，伦理准则、监管机制与执业资格定位。

（8）新型基因编辑技术脱靶效应与对策

新型基因编辑技术脱靶效应指使用成簇规律间隔短回文重复序列（CRISPR）系列的核酸酶进行基因编辑时产生非目的位点编辑的情况，分为向导核糖核酸（sgRNA）依赖性和sgRNA非依赖性的脱靶。此前，已有多种计算程序（如CRISPR Design Tool、E-CRISP、Cas-OFFinder）、高通量全基因组易位测序（HTGTS）、脱氧核糖核酸（DNA）双链断裂原位标记高通量检测（BLESS）、基因组范围内高通量鉴定DNA双链断裂（GUIDE-seq）等脱靶检测技术得到开发和应用，然而这些技术的灵敏性、准确性都不能满足日益发展的基因编辑应用需要。目前，CRISPR系列核酸酶具有DNA双链切割、DNA单链切割、DNA靶向、核糖核酸（RNA）切割以及在此基础上衍生的单碱基编辑和先导编辑等多种功能，不仅在动物模型构建、农业育种方面体现了应用价值，在基因治疗方面也具有广阔前景，但脱靶效应仍是临床化的瓶颈，阻碍了基因编辑产业化。后续应开展现有基因技术的安全评价，发展新型高精度基因编辑技术，使相关技术更好适应多类场景。因基因突变导致的疾病绝大多数无药可医，通过基因编辑纠正或补偿突变基因的生物医药市场前景广阔，一些大型医药公司均在积极开展基因治疗原创新药研发，以基因编辑技术为基础的原创新药研发公司正在迅猛发展，多个CRISPR系列的基因药物已经进入Ⅰ/Ⅱ期临床试验。后续或将有若干个基因药物陆续上市，在治疗效果和安全风险中寻求平衡。在更长远的未来，安全性将是新型基因编辑技术追求的目标，以更好促进基因编辑技术的临床应用。探索和建立基因编辑产业的脱靶效应质量控制标准，在标准严格要求下开发和优化新一代基因编辑技术，推动技术规模化应用。

（9）针对实体瘤的CAR-T治疗技术

CAR-T细胞是一种通过基因修饰手段使T细胞表面表达特异性识别肿瘤抗原的嵌合抗原受体（CAR），在抗肿瘤过程中能够在体内增殖、特异性识别、杀伤肿瘤细胞，具有特异性与持久性抗肿瘤作用。设计和改造CAR分子结构（如特异性靶点的选择、单链抗体可变区片段结合表位与亲和力、铰链区的长度与柔性、胞内区共刺激分子），可直接影响CAR-T细胞在实体肿瘤患者体内的归巢、增殖与杀瘤，使得CAR-T细胞在患者体内长期存活和发挥疗效。CAR-T细胞生产过程中涉及血液采集与运输、病毒载体制备、自体细胞体外培养等具体问题，都会影响肿瘤治疗效果。对CAR-T细胞的药学评价研究，应围绕“识别和控制用药安全性风险，兼顾细胞产品特殊性”的原则展开。以CAR-T细胞为基础的免疫疗法已逐渐开展临床应用，在B细胞淋巴瘤、白血病、其他血液肿瘤患者的治疗方面表现出色，对非小细胞肺癌、胆道系统肿瘤、胰腺癌、肝癌等实体肿瘤的治疗也体现出安

全性与有效性。鉴于肿瘤治疗领域的广阔应用前景，各国高度重视并加大对 CAR-T 细胞治疗肿瘤技术的研究投入。近年来涌现出了一批技术初创公司，陆续实现技术层面突破以改善 CAR-T 细胞在治疗实体肿瘤中的安全性和有效性，已形成一定规模，相应市场持续高速增长。以 CAR-T 细胞为基础的免疫疗法用于实体肿瘤治疗，关键在于选择特异性肿瘤抗原作为治疗实体肿瘤的靶点、选择合适的预处理方案打破肿瘤微环境、提高 CAR-T 细胞归巢能力和抵抗实体肿瘤微环境能力、提高临床治疗的安全性和有效性。CAR-T 细胞在实体肿瘤临床治疗实践中不断改进完善之后，可望成为人类治疗实体肿瘤的有力武器，产生重大的经济和社会效益。

（10）人体微生物组诊断预防及干预技术

人体微生物组诊断预防及干预是一种检测人体第二基因组来反映人体内各生态位健康状况的技术，运用于慢性疾病早期检测、感染性疾病临床辅助诊断、微生物相关的生物干预和治疗，可预防疾病发生、改善人体健康状态；通过扩增子测序、宏基因组或宏转录组深度测序，经核酸提取、文库构建、上机测序、数据分析、功能预测等过程，即可精准解析人体微生物菌群组成谱、功能谱、表达谱，挖掘关键生物标志物和物种，描述“菌群 – 宿主（人）– 环境（生态位）”复杂的相互关系，为个体与人群的健康、疾病状态提供精准的微生物信息。随着测序技术的发展，人体微生物组诊断预防及干预技术已从科研级应用逐步拓展到临床级应用，如微生物组检测用于疾病早期诊断筛查，开发以个体微生物组为靶点的生物治疗用药物和制剂，菌群肠道移植等。此外，宏基因组第二代测序（mNGS）辅助临床感染性疾病精准治疗，在中枢神经系统感染、呼吸道感染、血流感染等疾病等诊疗中得到了广泛应用。人体微生物组的相关科研成果在慢病预防控制、个性化精准诊疗和健康管理、微生物药物和制剂等方向具有广阔前景。近年来出现了一批技术初创公司，业务涵盖第三方医学检测、基因测序、分子诊断、微生物制剂开发等，在生物标志物、基因检测、微生物组学诊断、疾病特异性靶标筛选等方面推出新型产品；基于人体微生物组的诊断预防及干预技术应用产品已形成一定规模，市场规模持续增长。相关技术突破关键在于：测序技术的更新和大规模应用、生物大数据分析能力、个体微生物组普及检测，全微生物组与人类基因组关联分析等。菌群研究成果，如无创非侵入式结肠直肠癌早期筛查、个体化慢病和健康管理、益生菌干预和粪菌移植等，都已转化应用到民生领域。在互联网时代，随着测序技术的进步、用户教育和接受度的提高、从商业到客户业务的转型，人体微生物产业化将在生命和医学领域产生显著效益。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 突发重大传染病疫苗与药物研发

自 1918 年西班牙大流感有记载开始，重症急性呼吸综合征（SARS）、埃博拉出血热、中东呼吸综合征、COVID-19 等疫情相继暴发，人类和传染病的斗争日趋激烈。20 世纪 40 年代，类发现了用于治疗细菌性疾病的抗生素，之后随着抗生素、抗病毒药物、疫苗、新药治疗、新型诊疗技术的发展，越来越多的传染性疾病可以实现预防和治疗，尤其是疫苗的发展加强了对婴幼儿的保护、降低了婴幼儿的死亡率。疫苗对成年人同样具有重要的保护作用，避免了大范围流行病（如霍乱、黄热病）的暴发。快速开发重大传染病疫苗与药物，是人类应对重大传染病的有效手段。1970 年以来，世界上发现了 1500 多种新病原体，其中 70% 被证明是以动物携带的病原体为起源的，包括埃博拉病毒、人类免疫缺陷病毒。随着 COVID-19 疫情的暴发和持续，全球对控制和治疗新型冠状病毒感染的药物与疫苗的需求极为迫切。其中的关键技术问题包括:

快速明确未知病原体的问题，寻找安全有效疫苗类型的问题，克服病原体遗传变异的问题，避免和应对病原体耐药性出现的问题，高效监测可疑传染病以及即时有效应对的问题等。

目前国际上相关研究的热点方向有：完善传染病识别监测系统，涵盖大数据监测、实验室快速筛查、基因测序等；开发疫苗，建立新发突发传染病研发生产技术平台，生产具有确定结构、抗原性、纯度、稳定性、无菌性的医用疫苗，如灭活疫苗、重组蛋白疫苗、病毒载体疫苗、核酸疫苗、减毒活疫苗等，发展下游工艺和生产流程，确定和保存病原体的抗原结构蛋白表征，多种佐剂的确定以及其特定疫苗类型的生产、分离和纯化，建立质量标准和临床研究评价，进行相关临床前试验和临床试验等；开发诊断工具，涉及核酸诊断，如聚合酶链反应（PCR）靶向测序、便携快速诊断测序检测、全基因组测序、RNA/ 互补 DNA 测序、表观遗传学测序、遗传耐药性分析，影像学诊断，病原体直接观察等；开发治疗药物，包括血液制品、免疫疗法、药物疗法等。

截至 2018 年年底，全球共批准针对 41 种疾病的 77 种预防性疫苗，覆盖约 2/3 的重要传染病。然而“疫苗犹豫”现象导致传染病呈现回潮的趋势，仍有约 20 余种疾病，如疟疾、丙型肝炎、人类获得性免疫缺陷综合征、登革热、中东呼吸综合征等缺少有效的疫苗。一般认为，疫苗研发投入 1 美元将节约医疗支出 2~27 美元；预计 2024 年全球疫苗市场规模将达到 448 亿美元，位于所有治疗领域第 4 位。新型冠状病毒感染引起全球大规模传染与暴发，中国面对疫情快速响应，迅速建立新发突发传染病研发生产技术平台，疫情防控成效突出，一定程度上减轻了社会负担，避免了更多的经济损失。中国庞大的人口基数带来了有关疫苗的巨大需求，开发疫苗是减轻公共卫生支出负担的有效途径。随着居民支付能力的提高、防传染病意识的增强，接种疫苗的社会需求持续增加，中国疫苗市场规模由 2013 年约 199 亿元增加到 2019 年 311 亿元。未来中国疫苗市场将继续快速增长。

目前，本方向核心专利产出数量较多的国家是美国、中国、法国、日本、英国（见表 2.2.1）；从核心专利产出的国家之间的合作网络来看，美国和瑞士、中国、加拿大之间合作密切（见图 2.2.1）。核心专利产出数量排名前列的机构是美国卫生与公众服务部、诺华集团、德克萨斯大学（见表 2.2.2）；法国国家科学研究中心和法国国家健康与医学研究院，美国卫生与公众服务部和加利福尼亚大学之间存在合作关系（见图 2.2.2）。

表 2.2.1 “突发重大传染病疫苗与药物研发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	美国	1333	52.54%	20 022	66.42%	15.02
2	中国	392	15.45%	1183	3.92%	3.02
3	法国	106	4.18%	895	2.97%	8.44
4	日本	97	3.82%	877	2.91%	9.04
5	英国	96	3.78%	1351	4.48%	14.07
6	德国	91	3.59%	2953	9.80%	32.45
7	韩国	84	3.31%	98	0.33%	1.17
8	瑞士	83	3.27%	1370	4.54%	16.51
9	加拿大	76	3%	1160	3.85%	15.26
10	荷兰	40	1.58%	658	2.18%	16.45

表 2.2.2 “突发重大传染病疫苗与药物研发”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	美国卫生与公众服务部	67	2.64%	736	2.44%	10.99
2	诺华集团	39	1.54%	1085	3.60%	27.82
3	德克萨斯大学	37	1.46%	426	1.41%	11.51
4	法国国家科学研究中心	36	1.42%	235	0.78%	6.53
5	吉利德科学公司	34	1.34%	976	3.24%	28.71
6	法国国家健康与医学研究院	33	1.30%	157	0.52%	4.76
7	中国人民解放军军事医学科学院	33	1.30%	41	0.14%	1.24
8	加利福尼亚大学	29	1.14%	769	2.55%	26.52
9	哈佛大学	25	0.99%	627	2.08%	25.08
10	北卡罗来纳大学	24	0.95%	148	0.49%	6.17

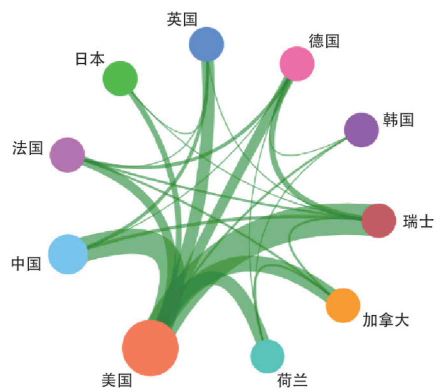

图 2.2.1 “突发重大传染病疫苗与药物研发”工程开发前沿的主要国家间的合作网络

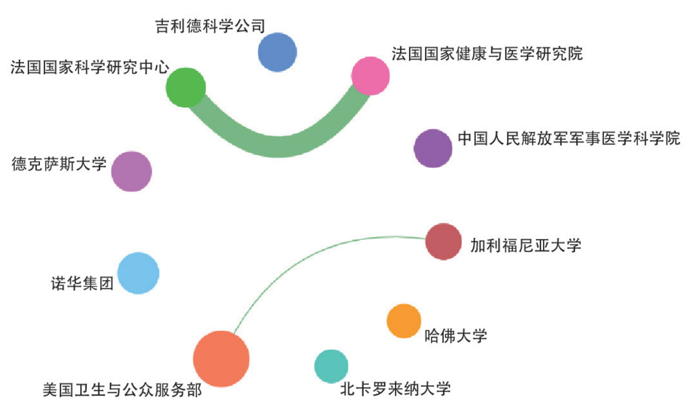

图 2.2.2 “突发重大传染病疫苗与药物研发”工程开发前沿的主要机构间合作网络

2.2.2　突发重大传染病诊断试剂与设备研发

重大新发突发传染病指由新种或新型病原微生物引发的传染病，也可能是重新发生的古老传染病，严重影响社会稳定，对人类健康构成重大威胁。人类对传染病的实验室检测，从最初仅凭临床病症的经验诊断、病原体培养、血清学检测，发展到了当前围绕病原体及宿主应答产物（如病原体核酸、抗原、抗体）的综合检测模式。快速发展的实验室检测技术为疫情监控、感染者早期诊断与疗效评估提供了关键技术手段，意义重大。

本领域拟解决的关键问题包括：收集全球不同地区的病原体毒株，丰富病原体资源库和基因信息库，为新发突发传染病的病原体快速鉴定及变异监测提供前提基础；研制设备关键技术部件，提高设备检测速度、通量、灵敏度，促进产品实现集成化、小型化、便捷式，以满足不同场景下的集中化检测与个体化检测的应用需求；对诊断试剂的关键材料、方法原理等进行创新研究，提高检测灵敏度和特异度。全球对诊断试剂与设备的需求日益提高，2019 年全球传染病相关体外诊断试剂和设备的市场规模为 163 亿美元，预计 2020—2027 年的复合年增长率约为 7.4%，2027 年将达到 231.7 亿美元。这与政府政策的积极支持以及科研资金投入的增加密不可分。

本领域应用热点主要有：①实时荧光 PCR 作为经典的病原体核酸检测技术，在保证结果准确的前提下，进一步提升检测速度、灵敏度、通量及自动化水平；②等温扩增技术采用新型核酸酶，在恒温下实现目标核酸快速扩增，如环介导等温扩增、重组酶聚合酶扩增、核酸依赖性扩增检测技术、转录介导的扩增技术等；③扩增后杂交及质谱分析，在核酸变性及复性基础上对核酸进行定性、定量分析，将 DNA 片段固定在膜、玻璃、乳胶颗粒或纳米颗粒等反应载体上，通过杂交和荧光标记实现病原体多重检测；④高通量测序，用于疑难复杂感染、急性危重感染的诊断，难培养病原体、新发病原体的鉴定，在传染病溯源、流行规律监测方面具有重要作用；⑤免疫学检测，包括针对病原体的抗原检测、宿主的体液免疫和细胞免疫应答检测，借助抗原，在体外对样品中的特异性抗体进行定性和定量分析，用于病原体实验室诊断、评估传染病暴发过程中病原体感染强度和人群流行情况。

中国是人口大国，受全球经济一体化及生活习惯改变等的影响，自 2003 年 SARS 暴发至今经历了多次新发突发传染病疫情。在应对 COVID-19 疫情过程中，我国政府积极支持并保障科研投入，促进越来越多的体外诊断产品生产企业、科研机构开展诊断试剂和设备研发；相关机构研制了数十种核酸及抗体检测试剂，快速 PCR 扩增仪、微流控芯片、分子移动核酸检测一体机等新设备，在病原体鉴别、实验室诊断、疗效评价、人群筛查、疫情早期预警与监控等方面发挥了重要作用。

目前，本方向核心专利产出数量较多的国家是美国、中国、韩国、日本、德国，中国排名第 2 位（见表 2.2.3）；美国和德国、瑞士、加拿大以及中国合作关系较为密切（见图 2.2.3）。核心专利产出排名前列的机构是美国卫生与公众服务部、中国人民解放军军事医学科学院、德国康瑞提斯有限公司（见表 2.2.4）；德国康瑞提斯有限公司和德国阿瑞斯遗传学有限公司，法国国家科学研究中心和法国巴斯德研究所存在密切的合作关系（见图 2.2.4）。

2.2.3　人体类器官芯片技术

人体类器官芯片具有多器官集成、高仿真人体功能等潜力，作为促进转化医学发展的催化剂，有望取代动物模型进行新药研发测试，体现了未来新药评价体系的重要发展趋势。关键技术问题有：设计和改进类器官芯片循环结构，拓展人体类器官细

表 2.2.3 “突发重传染病诊断试剂与设备研发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	美国	320	38.00%	5706	73.37%	17.83
2	中国	242	28.74%	560	7.20%	2.31
3	韩国	68	8.08%	32	0.41%	0.47
4	日本	41	4.87%	157	2.02%	3.83
5	德国	37	4.39%	525	6.75%	14.19
6	瑞士	20	2.38%	269	3.46%	13.45
7	法国	20	2.38%	153	1.97%	7.65
8	英国	18	2.14%	172	2.21%	9.56
9	加拿大	16	1.90%	256	3.29%	16.00
10	印度	13	1.54%	48	0.62%	3.69

表 2.2.4 “突发重大传染病诊断试剂与设备研发”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	美国卫生与公众服务部	19	2.26%	142	1.83%	7.47
2	中国人民解放军军事医学科学院	14	1.66%	13	0.17%	0.93
3	德国康瑞提斯有限公司	14	1.66%	12	0.15%	0.86
4	德克萨斯大学	12	1.43%	111	1.43%	9.25
5	德国阿瑞斯遗传学有限公司	9	1.07%	12	0.15%	1.33
6	哈佛大学	8	0.95%	504	6.48%	63.00
7	法国巴斯德研究所	8	0.95%	88	1.13%	11.00
8	法国国家科学研究中心	8	0.95%	45	0.58%	5.63
9	卡尤迪生物科技有限公司	8	0.95%	3	0.04%	0.38
10	韩国疾病预防控制中心	8	0.95%	1	0.01%	0.13

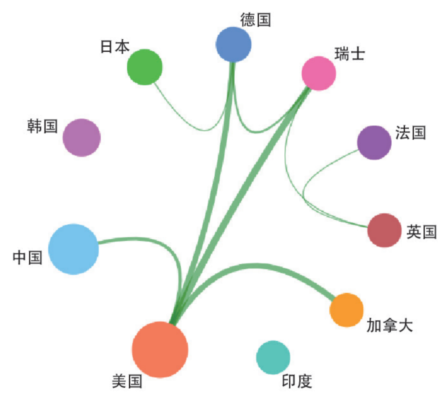

图 2.2.3 “突发重大传染病诊断试剂与设备研发”工程开发前沿的主要国家间合作网络

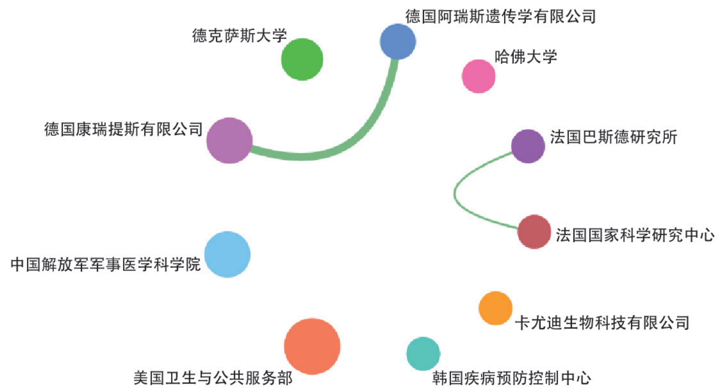

图 2.2.4 “突发重大传染病诊断试剂与设备研发”工程开发前沿的主要机构间合作网络

胞来源，研究细胞外基质代替物和细胞生长基底材料，探索多细胞共培养体系与多器官功能关联协同，监测和调控类器官芯片内环境指标，集成类器官芯片传感检测模块等。目前国际上的研究热点分支领域阐述如下。

在智能生物材料方面，研究面向类器官的可控智能生物材料，包括表面图案化的细胞取向诱导材料、智能通透性膜材料、仿生微血管及三维结构生物支架材料等；优化材料组成、器官生理结构等参数，提升材料结构与性能。

在基底材料–器官细胞相互作用方面，研究材料硬度、黏弹性等物化性质对细胞黏附、迁移、扩散的影响，探究材料微米结构、纳米图案、图案动态变化对细胞生长、迁移、干细胞分化的影响；开发最适合各器官细胞三维生长、行使器官功能的生物材料，构建单种类器官芯片，如心脏芯片、肝脏芯片、肺芯片、肾芯片、膀胱芯片、肠芯片、胰岛芯片、人羊膜腔芯片、皮肤芯片等。

在细胞共培养体系构建方面，设计多种结构的类器官芯片，如多层结构芯片、管道结构芯片、自循环结构芯片、多模块/区域芯片等，为类器官共培养奠定基础；研究各器官、组织间细胞相互作用机制，基于微流控芯片来模拟体内器官和组织结构、流体循环，控制细胞间及细胞与支架间的信息交互，实现体外器官功能的最大化重现；实现心脏、肝脏、肺、肾等类器官中多种细胞的共培养体系，肿瘤细胞、成纤维细胞、血管内皮细胞的共培养体系。

在类器官实时监测方面，研究具有将生物和化学信号向光电信号转换功能的智能生物材料，在类器官芯片上构筑集成式传感和成像元件；根据不同种类的类器官细胞生理特点，设计并集成电学、电化学、光学等传感单元，通过检测电学、光学等信号来实时检测、分析类器官芯片中细胞生理状态；设计具有多层结构的类器官芯片，连接驱动系统和辅助系统，达到类器官芯片内部液体流动循环和三维类器官细胞组织的动态监测。

在芯片内环境调控方面，设计可调节氧气浓度的类器官芯片，模拟体内不同组织器官的氧气浓度，使类器官芯片更具仿生功能；针对不同氧浓度条件，研究胎盘、肺、心脏等类器官的细胞形态及功能差异；设计集成有功能生物材料、传感技术、成像技术的微流控芯片，实现类器官芯片中细胞增殖、分化、凋亡、器官发育过程中的标志物、代谢产物等的实时监测，获得细胞生长微环境中 pH、氧饱和度等的空间分布及变化。

在多个类器官功能关联及协同方面，研究各种类器官细胞对胞外环境的要求，确定不同细胞在统一芯片中共同培养的策略，构建具有多腔结构、多层结构的微流控芯片；开发微通道模拟循环系统，探索不同芯片器官的集成化与整合方式；研究多器官芯片整合、各器官细胞交互，模拟体内器官间信息传导，实现体外类器官间的功能调控。

在药物筛选、毒性分型与模型建立方面，结合信息分析、实时监控技术，实现各种类器官模型特征的提取，研究药物作用下的细胞生物信息、耐药规律，建立系统的基于人体类器官芯片的药物评价体系；利用细胞对化合物毒性的生理反应，针对不同细胞，通过电学、光学、生物信息学等分析技术进行化合物毒性靶点筛查和毒性分型；利用具有分化潜能的细胞，在类器官芯片中模拟器官原位形成、分化和成熟，构建类器官发育模型；通过设计芯片内的管道网络和流体循环，研究纳米颗粒、表面活性剂、药物分子等添加物与类器官细胞的相互作用，构建类器官生理病理模型和药物评估模型。

类器官芯片的研究在国际上尚处于初期阶段，但因其广阔发展前景和市场潜力受到高度重视。发达国家的诸多研究机构、生物技术公司已进行相关技术的研发与推广应用，在技术专利方面具有主导优势。作为未来生物医药领域的发展趋势，类器官芯片对于支撑中国创新药物研发、转化医学发展具有重大意义。近年来，中国的相关研究取得显著进展，国际专利比例逐渐上升，但在建立更符合人体生理的芯片系统、多器官功能关联及协同、芯片标准化和集成传感检测等方面仍面临挑战。

目前，本方向的核心专利产出数量较多的国家是美国、中国、德国、荷兰、日本（见表 2.2.5）；中国、美国、新加坡之间合作较为密切（见图 2.2.5）。核心专利产出数量排名前列的机构是哈佛大学、清华大学深圳研究生院、Emulate Inc.（见表 2.2.6）；哈佛大学和范德堡大学，TissUse GmbH、Tesyus Inc. 和柏林大学存在密切的合作关系（见图 2.2.6）。

表 2.2.5 “人体类器官芯片技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	美国	42	38.89%	343	74.08%	8.17
2	中国	40	37.04%	35	7.56%	0.88
3	德国	6	5.56%	75	16.20%	12.5
4	荷兰	6	5.56%	4	0.86%	0.67
5	日本	5	4.63%	5	1.08%	1.00
6	韩国	4	3.70%	0	0.00%	0.00
7	英国	2	1.85%	0	0.00%	0.00
8	新加坡	2	1.85%	0	0.00%	0.00
9	俄罗斯	1	0.93%	1	0.22%	1.00
10	瑞士	1	0.93%	0	0.00%	0.00

表 2.2.6　“人体类器官芯片技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	哈佛大学	15	13.89%	279	60.26%	18.60
2	清华大学深圳研究生院	5	4.63%	20	4.32%	4.00
3	Emulate Inc.	5	4.63%	17	3.67%	3.40
4	TissUse GmbH	4	3.70%	73	15.77%	18.25
5	麻省理工学院	4	3.70%	0	0.00%	0.00
6	中国科学院大连化学物理研究所	3	2.78%	2	0.43%	0.67
7	深圳华大基因股份有限公司	3	2.78%	0	0.00%	0.00
8	范德堡大学	2	1.85%	110	23.76%	55.00
9	Tesyus Inc.	2	1.85%	58	12.53%	29.00
10	柏林大学	2	1.85%	9	1.94%	4.50

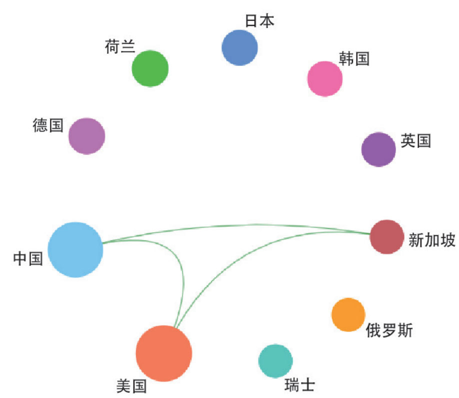

图 2.2.5　“人体类器官芯片技术”工程开发前沿的主要国家间合作网络

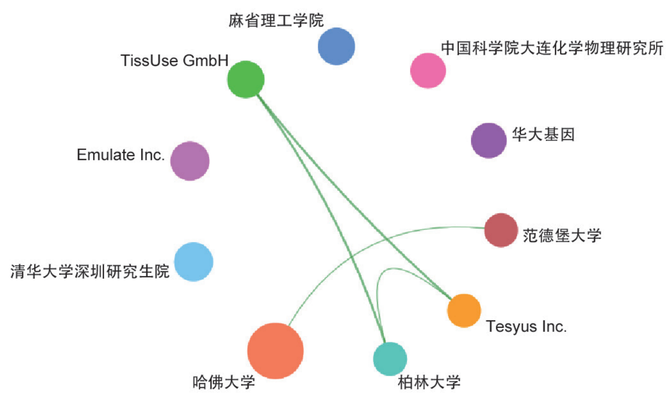

图 2.2.6　“人体类器官芯片技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

领域课题组组长：陈赛娟 张伯礼

院士专家组：

顾晓松 黄璐琦 李兆申 李校堃 沈洪兵
田 伟 张志愿 张 学

其他专家组：

施 健 邹文斌 陶芳标 高 培 吴少伟
周 舟 陈 瑞、屈卫东 阚海东 杨艳杰
贺 佳 缪小平 曹 佳 夏宁邵 席 波
张 本 张永红 汤乃军 邵一鸣 李湉湉
皮静波 鲁向锋 舒跃龙 夏 敏 靳光付
顾爱华 赵丽萍

工作组：

张文韬 赵西路 奚晓东 严晓昱 陈银银
代雨婷 乔 妞

文献情报组：

仇晓春 邓珮雯 吴 慧 樊 嵘 寇建德
刘 洁 陶 磊 江洪波 陈大明 陆 娇
毛开云 范月蕾 袁银池 张 洋

领域前沿报告执笔专家

研究前沿：

沈洪兵 舒跃龙 施小明 杨维中 冯录召
张 婷 秦成峰 李兰娟 吕龙贤 韩忠朝
付小兵 田 伟 韩晓光 冯建峰 谢小华
陈厚早 徐希平 黄璐琦 张 学 郑桐森

开发前沿：

张云涛 王雪薇 尚 红 钟 平 韩晓旭
陈 瑜 李金明 夏宁邵 邓中平 王佑春
潘柏申 陈文祥 赵远锦 杨财广 徐瑞华
赵洪云 黎成权 李兰娟 何前锋 朱烨琳
李莹莹 杨 辉 张海南 霍小娜 左二伟
韩为东 徐建国 杨 晶 濮 吉

九、工程管理

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

在工程管理领域，2020 年度 10 个全球工程研究前沿分别是：重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应与配置研究、供应链韧性、重大工程社会责任研究、未来极端降雨条件下城市洪涝风险管理研究、协同驾驶控制与管理问题研究、基于区块链的工程管理研究、基于大数据的工业智能化研究、城市生命线系统级联失效模拟仿真与韧性耦联分析技术研究、电动汽车充电基础设施布局与优化研究、人工智能背景下的仿真优化研究，其核心论文发表情况如表 1.1.1 和表 1.1.2 所示。其中重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应与配置研究、供应链韧性、重大工程社会责任研究为重点解读的前沿，后文会详细对其目前发展态势以及未来趋势进行解读。

（1）重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应与配置研究

医疗物资是指在一定社会经济条件下，为提供医疗服务，社会对卫生部门与公众提供的物资的总称。重大突发公共卫生事件应对中的关键医疗物资包括：①医疗防护物资，如口罩、防护服等；②医疗药品；③医疗救治器械，如呼吸机等。医疗物资的供应与配置是指基于科学的医疗物资需求预测，有计划地储备、采购、捐赠与转扩产医疗物资，精准供需匹配，并公平、高效地对医疗物资进行分配的活动的总称。在严重急性呼吸综合征（SARS）、埃博拉病毒（Ebola virus）与新型冠状病毒肺炎（COVID-19）疫情等重大突发公共卫生事件应对中，医疗物资需求激增，且具有时效性与不可替代性，给医疗物资的供应与配置带来巨大的挑战。在 COVID-19 疫情应对中，许多国家出现了“医疗物资荒”。为此，联合国发起了保障医疗物资供应的倡议，欧盟委员会决定建设医疗设备共用战略储备库，美国启动了《国防生产法案》（DPA）。医疗物资保障工作直接影响重大突发公共卫生事件应对的大局。医疗物资需求精准预测、因地制宜的供给模式、供需匹配，以及公平高效的分配机制等关键

表 1.1.1 工程管理领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应与配置研究	10	133	13.30	2016.6
2	供应链韧性	33	963	29.18	2017.6
3	重大工程社会责任研究	34	643	18.91	2017.4
4	未来极端降雨条件下城市洪涝风险管理研究	10	1146	114.60	2016.7
5	协同驾驶控制与管理问题研究	44	1265	28.75	2016.9
6	基于区块链的工程管理研究	27	2835	105.00	2018.1
7	基于大数据的工业智能化研究	52	5322	102.34	2017.6
8	城市生命线系统级联失效模拟仿真与韧性耦联分析技术研究	17	120	7.06	2016.6
9	电动汽车充电基础设施布局与优化研究	51	3089	60.56	2017.1
10	人工智能背景下的仿真优化研究	17	195	11.47	2017.5

表 1.1.2　工程管理领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应与配置研究	1	0	5	2	0	2
2	供应链韧性	2	0	4	6	11	10
3	重大工程社会责任研究	0	3	4	11	9	7
4	未来极端降雨条件下城市洪涝风险管理研究	1	0	2	5	2	0
5	协同驾驶控制与管理问题研究	4	2	9	13	10	6
6	基于区块链的工程管理研究	0	0	3	3	9	12
7	基于大数据的工业智能化研究	0	0	7	16	21	8
8	城市生命线系统级联失效模拟仿真与韧性耦联分析技术研究	3	1	6	0	4	3
9	电动汽车充电基础设施布局与优化研究	5	4	9	6	15	12
10	人工智能背景下的仿真优化研究	1	1	1	3	7	4

科学问题，是目前应急管理、心理学、工业工程等多学科交叉的国际前沿研究热点。

（2）供应链韧性

在当前政治、经济和自然环境下，供应链面临越来越多的突发性风险，如恐怖主义、经济封锁以及地震、飓风等，这些风险很容易导致供应链的中断，影响工程或企业的持续运营。不同于传统的供应链风险，我们很难通过统计数据对突发风险的发生概率及影响进行事先预测，很多突发风险甚至是“未知的未知”，因此“风险识别－风险评价－风险应对－风险监控”这一传统的风险管理框架难以适用于突发性风险的应对。在这种背景下，建立有韧性的供应链成为应对突发性风险的一种重要工具，这使得针对供应链韧性的研究越来越凸显其重要性。供应链韧性强调突发风险导致供应链中断后能够恢复到原状态或更加理想状态的能力。在现有的关于供应链韧性的研究中，如何有效测度、评价供应链韧性，以及如何提升供应链韧性等关键科学问题是目前土木工程、工业工程等多学科交叉的研究热点。同时，供应链韧性的内生性决策问题、供应链韧性提升策略的选择问题，以及特定情境下（如基础设施运营或航空航天等特定的工程情境）的供应链韧性研究是未来可能的研究方向。

（3）重大工程社会责任研究

重大基础设施工程（简称重大工程）是对国家政治、经济、社会、科技发展、环境保护、公众健康与国家安全等具有重要影响的大型公共工程，其投资规模巨大、实施周期长、不确定因素复杂、利益相关者众多、对生态环境影响深远。随着重大工程建设的开放性、主体多元化以及新技术运用所造成的工程复杂性日益凸现，重大工程的社会责任治理面临着前所未有的挑战，主要表现包括参建主体社会责任缺失、工程建设生态环保意识羸弱、建筑职工健康安全体系不健全等。重大工程社会责任是指工程在规划、设计、建造和运营等全生命周期的不同阶段，各利益相关者为其决策和活动对社会和环境产生的影响而承担的社会责任。目前，学术界对此已进行了卓有成效的探索，但尚缺乏系统性研究，以重大工程可持续性为目标、社会责任为重要支撑的战略管理体系尚未建立，难以为重大工程的管理实践提供理论支撑及实践指引。尤其是面向重大工程国际化的新态势，政治、经济、规制和文化差异背景下，不同利益相关者的诉求冲突，也为重大工程社会责任管理理论和治理体系的研究带来一

系列全新的主题，由此可见，重大工程社会责任的理论、方法及其治理体系与治理能力现代化等关键科学问题将成为本领域的研究热点。

（4）未来极端降雨条件下城市洪涝风险管理研究

城市洪涝是指因大雨、暴雨或持续性降雨使城市地区淹没、渍水的现象，其风险一般通过城市洪涝事件发生的概率及其造成的后果如人员伤亡、基础设施损坏、环境破坏等来度量。气候变化导致全球气温升高、极端降水增多，城市扩张使区域不透水面积增大，显著改变了城市水循环过程，导致地表径流系数增大，城市洪涝频发；同时，城市是人口高度密集且生产力、财富集中的地区，极易造成重大的人员伤亡和财产损失。另外，由于城市是一个复杂的开放系统，洪涝灾害会在系统内部和系统之间产生连锁反应，更易诱发次生、衍生灾害，形成灾害链，使得城市洪涝灾害潜在风险进一步扩大。面对未来极端降雨趋势，许多国家或地区提出了因地制宜的城市洪涝防控系统与风险管理体系，以减缓城市洪涝对人们的生命安全、财产、社会秩序和经济的负面影响。如何评估未来极端降雨条件下城市洪涝风险，提升城市洪涝防控能力已成为国内外亟待解决的关键科学问题。随着大数据和人工智能技术的发展，“数据驱动”与“模型驱动”的融合范式，为揭示城市洪涝致灾机理、开发多源数据融合的城市洪涝实时监测与预警预报技术、研发城市洪涝风险全场景模拟平台、构建防洪工程调度与社会减灾协同综合防控体系提供了新思路与技术基础。

（5）协同驾驶控制与管理问题研究

协同驾驶是指在车联网和自动驾驶技术的支持下，协调多个车辆的轨迹与运动控制，使车辆运行的更加顺畅、快捷，提高交通安全和效率，减少旅行时间、能耗和污染。相对于交通拥堵车辆诱导、交通拥堵收费以及交通信号灯控制等传统交通管控策略而言，协同驾驶将整体交通管理和局部车辆控制两个层面的问题联系起来处理，因此被认为是解决地面交通问题的根本所在。近年来，人工智能、大数据和智能网联等的新进展为深入研究协同驾驶提供了可行的技术支撑及研究手段。这些技术使交通参与者、运载工具和道路基础设施的信息获取与交互手段、内容和范围产生了重大变化，将促进交通的全程协同规划和全面协同控制，进而引发交通安全保障、道路智能管理和高效出行服务的深层次变革，使交通更安全，出行更畅通。当前，协同驾驶研究的关键问题为：全时空动态交通信息采集与融合、车辆协同安全和主动控制、人车混驾下的协同驾驶、全景交通信息环境下的智能交通管理和服务的集成与协同等。研究协同驾驶，可大大提高无人驾驶车辆的感知和决策能力，同时也将为第五代移动通信技术（5G），云计算等高新技术提供落地应用场景，并为交通系统的进一步升级和发展提供理论依据和决策支持。

（6）基于区块链的工程管理研究

基础设施建设、航空航天、水利水运和能源开发等在内的各类工程共同推动了中国经济社会的发展，对于提升中国综合实力、改善民生具有重要作用。工程项目通常具有投资数额大、项目周期长、参与主体众多等特点。项目内合作关系复杂、互信程度低，易导致参与主体间目标的不一致，削弱生产力，甚至滋生违法犯罪，阻碍工程管理目标的实现。构建信任关系已成为提升工程绩效、实现管理目标的关键。区块链技术具有信息防篡改、可追溯、公开透明、自动执行等特性，有改变工程项目组织互动方式的潜力，为营造互信的合作环境提供可能，已成为多个国家战略信息基础设施的重要内容。

区块链技术有助于明确工程项目各参与方的责任权力和利益，减少侥幸心理与投机主义行为，推动深层次合作。智能合约的集成能够实现包括工程供应链协作、工程数据保护、工程数字资产转移、工程保险、工程支付、工程人力资源与绩效考核等各类业务的自动化，从而简化管理逻辑、降低管理

成本。目前，工程管理领域的区块链研究蓬勃发展，但整体仍处于起步阶段，缺乏实证探索，在工程招投标、工程设计、工程实施、工程运维、工程供应链等各方面的潜力值得研究。此外，对区块链技术与5G、物联网、工业互联网等通信网络基础设施，与人工智能、云计算等新技术基础设施，以及与数据中心、智能计算中心等算力基础设施相集成的探索与验证将有助于工程管理向高标准、高效益、高质量的范式转移。

（7）基于大数据的工业智能化研究

工业智能化是通过汇集行业技术、控制技术、信息技术，使得生产动态运行、管理、服务等过程具备类似于人类的感知、记忆、学习、自适应和自决策的智慧能力。数据是工业过程中信息的存储形式，也是决策和控制命令下达的载体。近年来，随着信息技术的完善，数据收集、数据存储、数据分析、数据可视化等大数据处理技术不断提升；因此，工业大数据得以更好地被收集、整理、分析，并能够更好地服务于工业的管理决策、操作优化、过程控制。基于大数据的工业智能化即以数据解析、区块链、云平台等基于工业过程数据的大数据处理手段实现工业过程的自感知、自学习、自适应和自决策的智慧能力；其主要内容涵盖了物联网环境下的工业过程智能感知、基于云平台的工业大数据存储与管理、工业大数据统计与分析、全流程协同优化与控制等。近十年来，包括德国“工业4.0”在内的工业智能化发展蓝图获得了各国政府和工业界的广泛重视；随着大数据技术的不断完善，结合不同工业的生产环境，工艺过程的定制化需求和稳定高效的大数据存储、分析等手段实现工业智能化水平的不断提升将成为学术界和工业界广泛关注的前沿研究热点。

（8）城市生命线系统级联失效模拟仿真与韧性耦联分析技术研究

生命线工程系统是指维系现代城市功能与区域经济的基础性工程系统，包括交通、供水、供电、供气、通信等系统。相比单体的建筑或桥梁结构，系统的生命线工程具有空间分布的广泛性、结构组成的复杂性以及系统之间的复杂耦合性等特征。近十年来，全球城市化进程导致城市规模迅速扩大、城市生命线系统的复杂性和耦合关系显著增强，使得生命线系统的韧性量化模型，尤其是在不同灾场条件下的生命线系统之间级联失效与耦联恢复的仿真模型及其高效算法，成为当前研究的热点问题，并且在此基础上衍生出了包括生命线系统在内的城市建成环境韧性量化模型，及其在城市设计、规划、改造以及灾害治理等不同领域应用的实践探索。该领域未来可见的研究前沿之一是智能化指向，即借助人工智能、大数据、5G网络等计算机通信领域的先进技术，研发高效准确的城市生命线系统韧性分析方法和智能化管理模式。此外，由于城市自身是具有高度复杂特征的生态系统，生命线韧性研究与城市社会、经济和环境等学科的交叉融合是必然趋势，并有望进一步推进城市多维度（物理、环境、社会、经济、组织等）、多尺度（街道、辖区、城市、城市群等）、多阶段（灾前、灾中、灾后）的综合韧性仿真技术发展，全面地量化、分析并治理灾害对城市建成环境、人居环境、社会功能、区域经济甚至全球化影响成为可能。

（9）电动汽车充电基础设施布局与优化研究

充电基础设施是指为电动汽车提供电能补给的各类充换电设施，包括电力基础设施、控制和通信基础设施等。根据服务对象特点分为：公共服务领域充电基础设施、用户居住地与单位充电基础设施、城市公共充电网络和城际快充网络等。随着电动汽车产业的快速发展，充电设施规划与建设步入规模化、网络化时代，如何科学系统地开展充电基础设施布局优化显得尤为重要。完善的充电基础设施体系是电动汽车普及、合理配置电力资源和减少温室气体排放的重要保障。电动汽车的技术特点，服务对象的使用行为特征，不同商业模式以及电网电价和负荷等因素会直接影响充电基础设施布局与优化

决策。此外，新兴的技术包括动态无线传输（WPT）、互联移动（CM）、自动驾驶、共享模式和能源互联网等，这些新兴技术将为未来的电动汽车应用带来技术性变革。电动汽车不仅作为运输工具，还可以作为电力负载（G2V），电网的分布式能量存储（V2G），建筑的能量存储（V2B）和网络通信节点。充电基础设施选址与规模布局、投资与建设时序等优化问题、电动汽车充放电调度问题以及充电设施与智能电网融合，充电智能服务平台构建等科学问题是城市规划、交通工程、管理科学和电气工程等多学科交叉的国际前沿研究热点。

（10）人工智能背景下的仿真优化研究

人工智能是研究如何通过计算机来模拟并延伸人类智能的一门技术科学，包括机器学习、系统仿真等关键技术。近年来，机器学习技术已经在社会上得到了广泛的应用，例如，无人驾驶汽车、购物软件的商品推荐等。系统仿真通过仿真模型来描述系统的运行、演变及其发展过程，是人工智能的关键技术之一。在“工业 4.0”的背景下，越来越多的智能系统应用了机器学习技术，这对系统仿真提出了更高的要求。在开发相应的仿真模型时，不仅需要融入机器学习模块，还需要耗费更大的精力对复杂的仿真模型进行校准与优化。一方面，研究者既能将仿真数据用于神经网络的训练，也能直接将仿真模型应用于深度强化学习，从而提升机器学习技术的准确性；另一方面，机器学习和智能采样方法又可以加快对仿真模型的校准与优化速度。在数字孪生兴起的背景下，通过运用机器学习的方法提高高保真度仿真模型的仿真效率，已经成为国际前沿的研究热点。主要研究方向包括：研究以提高机器学习算法质量为目标的仿真优化理论与方法；探索如何通过机器学习的方法来提高仿真模型的精准度和运算效率；综合运用线下仿真、实时仿真和机器学习方法，实现数字孪生模型的实时优化决策。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应与配置研究

“供应”在经济学上是指在特定的时间内，以给定的价格，生产者意愿且能够供给的产品及数量。“配置”是根据需求信息，将适当数量的物资分配给合适的需求者。土耳其 Ilhan 教授和 Pierskalla 教授于 1979 年首次研究了各大医院之间血液的供应与配置问题。随后，医疗物资供应与配置应用于不同灾害类型，包括地震、飓风与 SARS 等，旨在满足对医疗物资的需求。医疗物资供应与配置是提高应对重大突发公共卫生事件水平与能力的核心与关键，是进一步健全国家应急管理体系，实现国家治理体系与治理能力现代化的前提。

下面对医疗物资供应的需求预测、供给模式、供需匹配与配置模式进行更加深度的分析，并对医疗物资供应与配置研究的未来发展趋势进行展望。

（1）医疗物资需求预测

医疗物资需求预测是指为了识别医疗机构和公众在提供或接受医疗卫生服务时所需物资的数量，通过收集、分析相关资料，选用合适的预测方法，对具体某类医疗物资的需求量做出预见性的估计。精准的医疗物资需求预测是做好医疗物资供应与配置的基础。一般医疗物资需求预测以识别住院或门诊需求为目标，通常采用移动平均、线性回归等方法预测医疗机构日常的床位、医护人员、血液等医疗资源的需求，需求波动往往较小。但对于重大传染病疫情，其防护用品、急救设备等医疗物资的需求由疫情的严重程度决定，需求会伴随疫情的发展动态波动。在 COVID-19 疫情背景下，考虑疫情演变的医疗物资需求预测是研究的主流。学者们提出了各种预测指标以及相应的预测方法。医疗物资需求预测的研究热点主要包括：考虑医疗物资供应与疫情演化耦合关系的医疗物资需求预测，基于地区间疫情传播关联性的医疗物资需求预测。

（2）医疗物资供给模式

政府主导下的多元化医疗物资供给模式在中国 COVID-19 疫情防控中取得了明显的成效，具体包含储备、社会捐赠、市场采购以及转扩产四大类供给方式。医疗物资转扩产是指政府通过动员机制，鼓励、引导社会企业转产、扩产医疗物资，并统一调配，以满足医疗机构与公众对医疗物资的需求。转扩产是我国 COVID-19 疫情防控中医疗物资供应的保障。美国、加拿大等国家也采取了医疗物资转扩产的供给方式，如美国福特汽车公司、通用汽车公司和电动车及能源公司等转产呼吸机；加拿大啤酒巨头 Labatt 转产消毒液，加拿大鹅（Canada Goose）改产医护一线人员急需的防护服等。为了支持医疗物资转扩产，相应的国家都出台了一系列政策，比如提供场地与资金支持，减少税收或者提供补贴等。在 COVID-19 疫情动态演变的情况下，医疗物资转扩产产能设计是一个多阶段动态优化的问题。在医疗物资供给模式中，转扩产产能设计的研究热点主要包括：医疗物资转扩产动员机制，医疗机构与公众、转扩产企业及政府三者之间的演化博弈模型，疫情演变下动态的医疗物资价格管控、税收优惠与财政补贴优化机制。

（3）医疗物资供需匹配

对于社会捐赠的医疗物资供应，关键是实现医疗物资供需信息的有效匹配，解决供需双方的信息不对称问题。社会捐赠是社会民众或单位为了救助灾害、救济贫困、扶助残疾人等困难社会群体和个人、资助科教文卫事业与环境保护，以及社会公共设施建设等慈善事业而进行的自觉、自愿的无偿捐赠。互联网平台已成为社会捐赠医疗物资供需匹配的主要载体。在互联网平台下，社会捐赠医疗物资供需匹配的核心是利用信息处理技术实现供需信息的识别与自动匹配，而社交媒体作为灾后供需信息发布的媒介，是灾后供需信息数据的来源。许多学者考虑物资种类和地理因素，运用相关的信息处理手段，研究社交媒体上社会捐赠物资信息和需求信息的有效匹配。医疗物资供需匹配的研究热点主要包括：互联网平台下医疗物资供需匹配指标的设计，不确定性条件下医疗物资供需匹配动态交互模型的建立，医疗物资供需信息获取与匹配的数据处理技术的开发。

（4）医疗物资配置模式

医疗物资配置模式是指医疗物资的分配策略与方案。在重大突发公共卫生事件应对中，医疗资源的分配往往与医疗处置能力和事件演化过程相互耦合，一方面医疗物资的分配会影响收治能力和处置效率，进而影响整个疫情演化的态势；另一方面，疫情的演化态势又会反过来影响稀缺物资分配的策略和方案。当前研究从不同角度探讨了医疗物资与传染病的传播和演化存在的耦合关系。在大规模传染病的应对过程中，分级收治是避免疾病扩散、且有利于稀缺物资合理配置的关键措施。当前研究主要探讨了针对个体病患的分级准则，以及为其提供稀缺医疗资源的原则，主要考虑的是公平性原则以及最小化伤亡率的目标。从科学研究和医学实践的层面，医学界较为细致地探索了针对某些具体关键医疗设备的使用对患者进行分级的指导原则，从而提高大规模疫情发生时的存活率。医疗物资配置模式的研究热点主要包括医疗物资配置与疫情演化的相互影响规律，分级收治模式下的医疗物资动态配置机制。

（5）发展现状与未来发展趋势

美国海军医学研究中心研究了有效预计医疗物资类别、数量以及配置情况的算法，并开发了医疗物资供应预估程序（ESP），提升医疗物资供应与管理水平。在应对 COVID-19 疫情中，世界卫生组织成立了工作组落实联合国保障医疗物资供应的倡议，并计划建立全球物资供应平台，接受有需要国家的物资供应申请，集中采购物资，按照需求迫切程度分配物资。中国国家自然科学基金委员会于

2020 年启动了“新冠肺炎疫情等公共卫生事件的应对、治理及影响”专项，其中重大突发公共卫生事件下的医疗资源供给与配置模式是重点资助方向。综合当前研究现状，未来的发展趋势主要包括：医疗物资供应、配置与疫情演变之间的耦合规律建模与验证，疫情动态演变下不同医疗物资供给方式之间的组合优化、互联网环境下医疗物资配置优化等。

“重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应与配置研究”工程研究前沿中的核心论文数量与被引频次排名前两位的国家分别为中国与美国（见表 1.2.1）。中国主要研究公共卫生事件的影响评估，以及应急物资配置的风险管理；美国重在研究应急物资的最后一千米配送问题。德国、巴西、印度与英国文献数量相当，分别研究了紧急与非紧急医疗服务资源的配置、医护人员的紧急供应、基于多媒体信息挖掘的医疗资源供需匹配，与医疗资源的需求预测分析。从目前数据看，这些国家之间还没有形成合作关系。

“重大突发公共卫生事件下医疗物资供应与配置研究”工程研究前沿中核心论文数量排名第 1 的机构为北京师范大学，主要研究了物资运输中的污损风险预测，其他机构核心论文数量相同（见表 1.2.2）。从核心论文产出机构合作网络图（见图 1.2.1）来看，在核心论文发表数量排名前 10 的机构中，圣保罗大学、弗鲁米嫩塞联邦大学、巴西卫生部和巴西社会经济统计数据研究所之间的合作较多。

根据表 1.2.3 可以看出，中国的施引核心论文

表 1.2.1 “重大突发公共卫生事件下医疗物资供应与配置研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	3	30.00%	56	18.67	2016.0
2	美国	3	30.00%	37	12.33	2015.7
3	德国	1	10.00%	20	20.00	2017.0
4	巴西	1	10.00%	14	14.00	2016.0
5	印度	1	10.00%	4	4.00	2019.0
6	英国	1	10.00%	2	2.00	2019.0

表 1.2.2 “重大突发公共卫生事件下医疗物资供应与配置研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	北京师范大学	2	20.00%	50	25.00	2016.0
2	莱特州立大学	1	10.00%	29	29.00	2014.0
3	夏里特医院	1	10.00%	20	20.00	2017.0
4	奥斯瓦尔多·克鲁兹基金会	1	10.00%	14	14.00	2016.0
5	巴西卫生部	1	10.00%	14	14.00	2016.0
6	弗鲁米嫩塞联邦大学	1	10.00%	14	14.00	2016.0
7	圣保罗大学	1	10.00%	14	14.00	2016.0
8	西安交通大学	1	10.00%	6	6.00	2016.0
9	美国卫生部	1	10.00%	4	4.00	2016.0
10	埃默里大学医院	1	10.00%	4	4.00	2016.0

数排名第 1。同时根据表 1.2.4 可以看出，排名靠前的机构是华北电力大学和中国科学院。

1.2.2 供应链韧性

“供应链韧性”（Supply Chain Resilience）的概念最早是在 2003 年由 Rice 教授和 Caniato 教授提出，但其定义是由 Christopher 教授和 Peck 教授在 2004 年首次提出，将供应链韧性定义为“供应链受到干扰后能够恢复到原状态或者更加理想状态的能力”。随着学者们意识到韧性的供应链是应对突发性风险的一种重要工具，供应链韧性的研究也逐渐增加。下面主要对供应链韧性的理论研究视角、研究方法、热点研究问题、测度与评价研究以及提升研究进行分析。

（1）供应链韧性的理论研究视角

在供应链韧性的研究中，学者们所采用的理论，包括宏观理论、中观理论和微观理论，初步统计有二十余种。在这些理论中，最常用的理论是资源基础观、动态能力理论、关系理论和系统理论 / 复杂自适应系统理论等，其中资源基础观是最基础和核心的理论。企业资源基础观将企业视为一系列资源的集合。企业的能力与竞争优势源自于企业所拥有的有价值、稀缺、不可模仿和不可替代的资源。在复杂多变的环境扰动下，企业需要不断整合、构建

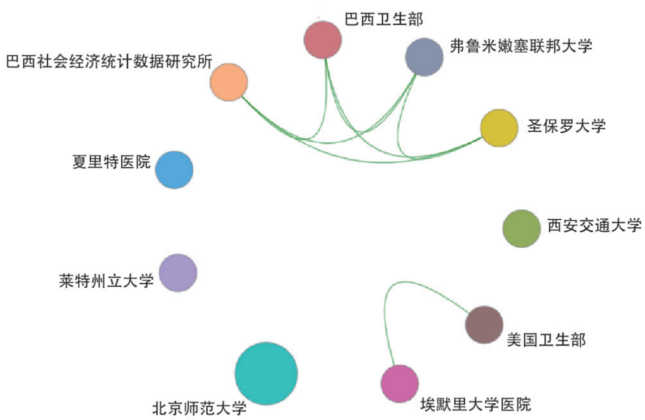

图 1.2.1 “重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应与配置研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应与配置研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	39	27.27%	2018.3
2	美国	32	22.38%	2018.3
3	德国	23	16.08%	2017.9
4	巴西	16	11.19%	2018.4
5	澳大利亚	9	6.29%	2018.7
6	加拿大	6	4.20%	2019.0
7	英国	5	3.50%	2018.8
8	伊朗	4	2.80%	2018.5
9	比利时	3	2.10%	2017.0
10	印度	3	2.10%	2018.7

表 1.2.4 “重大突发公共卫生事件下的医疗物资供应与配置研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	华北电力大学	7	14.58%	2018.3
2	中国科学院	6	12.50%	2017.8
3	莱特州立大学	5	10.42%	2016.8
4	北京师范大学	5	10.42%	2017.8
5	天津大学	4	8.33%	2017.8
6	德黑兰大学	4	8.33%	2018.5
7	武汉大学	4	8.33%	2019.5
8	柏林医科大学	4	8.33%	2018.5
9	中国水利水电科学研究院	3	6.25%	2019.0
10	泛美卫生组织	3	6.25%	2018.7

和重新配置内外部资源，以此增强供应链韧性。然而，由于资源基础观本质上是静态的，忽视了市场动态性的影响，因此学者们又采取了动态能力理论、关系理论来对资源基础观在动态环境条件下进行拓展。此外，一些学者们认为供应链是一个复杂的系统，认为韧性是系统的固有特征，利用系统理论/复杂自适应系统理论来对供应链韧性进行研究。

（2）供应链韧性的研究方法

关于供应链韧性的研究，其研究方法可分为定性的研究方法和定量的研究方法。其中，定性的研究方法主要是以案例研究为主，定量的研究方法主要包括优化、决策分析、网络建模和模拟四大类。优化是采用最多的定量研究方法，其包括多目标线性规划、随机规划、目标规划等。决策分析主要采用的方法为多目标决策分析、层次分析法、网络分析法等。网络建模的方法包括贝叶斯网络、图形建模、聚类供应链网络模型等。模拟所采用的方法包括基于主体的仿真模拟和离散事件模拟等。

（3）供应链韧性的热点研究问题

供应链韧性早期被提出时，学者们更多关注的是供应链韧性的定义和内涵。随着研究的不断深入，学者们将研究重点聚焦于供应链韧性的测度与评价以及供应链韧性提升研究等方面。

（4）供应链韧性测度与评价研究

尽管学者们对供应链韧性的定义各不相同，但对供应链韧性的内涵和本质有较强的共识，即认为供应链韧性是指从干扰中恢复到原状态或新的更加理想状态的能力，但学者们在对供应链韧性进行测度和评价时，所用的方法却不尽相同。目前已有的供应链韧性测度与评价的方法主要可分为四类：①用核心要素测度韧性。将供应链韧性分解成几个核心要素，并用调查表的方式对这些核心要素进行打分。最常见的核心要素包括灵活性、冗余性、敏捷性等。②用直接的定量指标测度韧性。这类方法所用的定量指标包括供应链受到扰动后恢复到原有状态或更加理想状态所需要的时间、恢复的程度、以及恢复期内供应链绩效的损失程度等。③用具体的供应链绩效评价的定量指标测度韧性。学者们用一个或者多个供应链绩效评价指标，如客户服务水平、订单满足率等，并通过模拟等方法对韧性进行评价。④用拓扑指标测度韧性。这类指标主要是从复杂网络的视角来对韧性进行测度，常用的指标包括密度、复杂度、节点关键性、平均路径长度等。

（5）供应链韧性提升研究

研究供应链韧性最主要的目的就是为了提升供应链的韧性，建立有韧性的供应链。为此，学者们

对如何提升供应链的韧性给出了一系列的策略，这些策略可以划分为两大类：一类是中断发生前的主动策略，另一类是中断发生后的被动策略。中断发生前的主动策略是指能够抵抗中断的措施，如通过提高产品灵活性，合同灵活性，采购灵活性等提高中断发生前供应链韧性；通过供应链整合，促进供应链各参与方的信息共享与合作，从而抵御中断发生的可能性；在资金实力较强的情况下，通过业务多元化，以及保险等金融服务增强供应链韧性。中断发生后的被动策略是指中断发生后仍能维持一定的基本功能且能迅速恢复正常功能的措施，主要的提升策略是回应策略，如组建应急响应团队、市场需求的快速响应等，以及恢复策略，如制定中断发生后的应急计划、构建吸收损失能力、考虑优化恢复成本的供应链韧性提升等。

作为供应链风险管理的一个重要工具，供应链韧性已经被学者们进行了比较广泛的研究，但仍然存在一些亟待解决的问题。

第一，供应链韧性的内生性决策研究。增强供应链韧性对于供应链突发风险的应对具有重要作用，但供应链韧性的增强通常是以牺牲供应链的整体效率为代价，即较强韧性的供应链通常意味着较低的供应链效率。尽管学者们对供应链韧性已经进行了大量的研究，但是这些研究基本都隐含假设供应链韧性具有外生性，因此如何对供应链韧性的强度进行决策是未来研究首先需要解决的问题。第二，供应链韧性提升策略的选择研究。学者们对如何提升供应链韧性已经提出了很多策略，如通过增加供应链冗余以及增强供应链成员间的信息分享等，不同的策略或策略组合对于增强供应链韧性具有不同的作用强度，如何对供应链韧性提升策略进行选择也是未来研究需要解决的问题。第三，特定情境下的供应链韧性研究。当前关于供应链韧性的研究通常针对的是一般供应链，所得到的结论很难直接应用于特定情境中，如何通过考虑某一特定情境的独特性特征进行供应链韧性的研究也是未来的研究方向之一，如海外基础设施建设及运营供应链的韧性管理研究等。

从发表的核心论文上看，排名前 3 位的国家分别为德国、法国和美国（见表 1.2.5），三个国家的研究重点有所不同。德国和法国更倾向于供应链韧性的定量研究方法的拓展与开发，而美国更关注供应链韧性的提升策略研究，尤其是关注中断发生前的主动策略。篇均被引频次前 3 位的国家分别为俄罗斯、德国和法国（见表 1.2.5），从核心论文产出国家和地区合作网络图（见图 1.2.2）来看，俄罗斯、法国和德国之间的合作较多。

从机构合作网络图中，柏林经济与法律学院和俄罗斯科学院合作较多（见图 1.2.3），核心论文数靠前的机构为柏林经济与法律学院和俄罗斯科学院（见表 1.2.6）。

根据表 1.2.7 可以看出，施引核心论文数排名前 3 位分别为美国、德国和中国。同时根据表 1.2.8 可以看出，排名靠前的机构是柏林经济与法律学院、圣彼得堡国立科技大学和皇家墨尔本理工大学。

1.2.3 重大工程社会责任研究

重大工程已经成为国民经济和社会发展的生命线，社会责任已经成为重大工程建设管理的重要支撑。重大工程社会责任涉及直接参与者（政府、工程承包商、供应商、设计方、员工等）以及其他利益相关者（公众、社区、非政府组织等），其相关活动的实施需要贯穿重大工程全生命周期。重大工程社会责任可以被概述为：重大工程各利益相关者在项目全生命周期内，以可持续发展为目标，通过透明和合乎道德的行为，为其决策和活动对社会和环境带来的影响而承担的责任。

（1）重大工程社会责任与国际化战略

重大工程国际化已经突破传统意义上的建造业范畴，需要工程建造业、装备制造业、金融服务业、咨询服务业等有机整合，其价值链的提升也需要从建造向建造服务一体化转型。基于此，面向国际化

表 1.2.5　“供应链韧性”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	德国	16	48.48%	597	37.31	2017.6
2	法国	13	39.39%	477	36.69	2017.7
3	美国	12	36.36%	287	23.92	2017.8
4	俄罗斯	9	27.27%	397	44.11	2017.2
5	英国	5	15.15%	97	19.40	2018.2
6	荷兰	3	9.09%	54	18.00	2018.0
7	印度	2	6.06%	39	19.50	2017.5
8	澳大利亚	2	6.06%	35	17.50	2018.5
9	波兰	2	6.06%	33	16.50	2018.0
10	韩国	1	3.03%	27	27.00	2016.0

表 1.2.6　“供应链韧性”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	柏林经济与法律学院	15	45.45%	563	37.53	2017.6
2	俄罗斯科学院	6	18.18%	293	48.83	2016.8
3	法国大西洋高等矿业电信学校	4	12.12%	164	41.00	2018.0
4	法国国家科学研究中心	4	12.12%	127	31.75	2018.2
5	圣彼得堡国立科技大学	3	9.09%	111	37.00	2017.3
6	俄克拉荷马大学	2	6.06%	48	24.00	2018.0
7	伊拉斯姆大学	2	6.06%	45	22.50	2018.0
8	密歇根州大学	2	6.06%	39	19.50	2018.0
9	普利茅斯大学	2	6.06%	35	17.50	2018.5
10	南密西西比大学	2	6.06%	34	17.00	2019.0

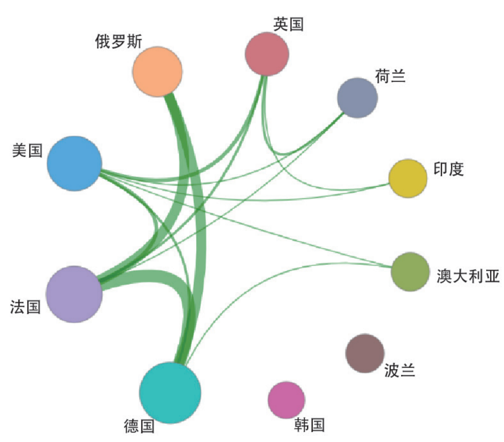

图 1.2.2　“供应链韧性”工程研究前沿主要国家间的合作网络

的重大工程社会责任承担需要各参与方考虑更多维度的目标，包括更加环保的施工方案、更加包容的组织方式和更符合所在国文化规制的设计方案。同时，需要相关主体从全过程、全方位加以推进，例如通过技术创新实现环境可持续性，通过组织创新满足当地劳动力就业需求，通过机制创新促进当地经济发展等。推进重大工程社会责任，坚持以人为本，尊重当地文化和传统，保证工程安全质量和业主权益，从供应链管理和公平竞争等多维度实施，从而积极有效布局重大工程国际化战略。研究问题包括：面向国际化的重大工程社会责任多维异质性

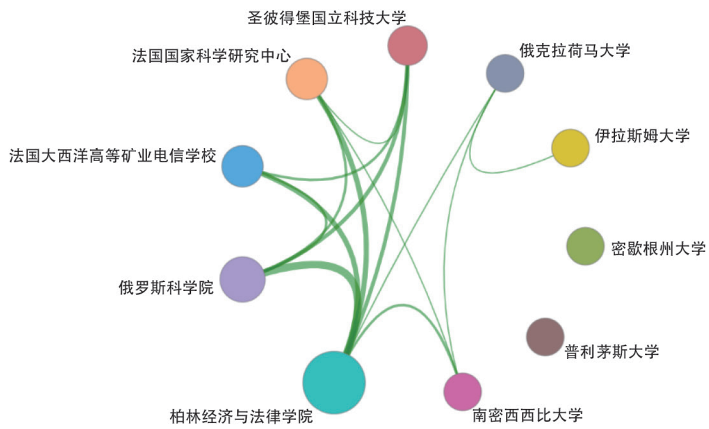

图 1.2.3 “供应链韧性”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “供应链韧性”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	77	18.03%	2018.2
2	德国	59	13.82%	2018.1
3	中国	57	13.35%	2018.2
4	法国	47	11.01%	2017.9
5	俄罗斯	35	8.20%	2017.6
6	英国	35	8.20%	2018.4
7	澳大利亚	32	7.49%	2018.2
8	印度	30	7.03%	2018.5
9	伊朗	28	6.56%	2018.1
10	加拿大	15	3.51%	2018.4

表 1.2.8 “供应链韧性”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	柏林经济与法律学院	41	31.78%	2017.9
2	圣彼得堡国立科技大学	16	12.41%	2016.5
3	皇家墨尔本大学	13	10.08%	2017.8
4	法国国家科学研究中心	11	8.53%	2018.4
5	法国大西洋高等矿业电信学校	9	6.98%	2018.3
6	波兰克拉科夫科技大学	9	6.98%	2017.3
7	德黑兰大学	9	6.98%	2018.0
8	肯特大学	7	5.43%	2018.3
9	俄罗斯科学院	7	5.43%	2017.1

对参与方动态能力的作用路径；重大工程建造服务一体化模式创新对社会责任的影响效应；重大工程社会责任与国际化战略选择的适应性等。

（2）重大工程社会责任治理体系

全球格局中的重大工程国际化不能再以低廉成本为竞争优势，而是需要通过政策引导、行业推动、企业实施和社会参与等全方位集成加以推动。重大工程社会责任已经成为重大工程品牌的重要表征，重大工程社会责任治理需要全员参与，不仅需要行业指引的构建，也需要企业积极参与及信息披露。重大工程社会责任治理体系需要从全主体、全方位、全过程三个维度加以推动，涵盖治理原则、治理逻辑、治理范式等。相关研究问题包括：重大工程社会责任的治理主体及其相互关系，重大工程社会责任治理原则及治理能力构成要素，重大工程社会责任治理能力评价指标体系和测度方法，重大工程社会责任治理能力对国际化竞争力提升的作用路径等。

在新的时代背景下，重大工程已经成为国家综合竞争力的重要标杆，重大工程社会责任治理的紧迫性和重要性日益凸现。综合当前研究现状及重大工程管理实践需求，可以看出未来的发展趋势主要包括：面向复杂环境的重大工程社会责任理论与方法，国际化情境下的重大工程社会责任治理体系等。

从已有研究成果看，“重大工程社会责任研究”研究前沿中的核心论文数量排名前 3 位的国家分别为中国、澳大利亚、英国（见表 1.2.9），篇均被引频次排名前 3 位的国家分别为澳大利亚、美国和中国（见表 1.2.9）。从核心论文产出国家合作网络图（见图 1.2.4）来看，在排名前 5 位的国家中，中国学者和澳大利亚学者之间的合作较多。其中，中国学者率先提出了重大工程社会责任的论题，搭建了重大工程社会责任研究的理论框架，并建立“全生命期 – 利益相关者 – 社会责任”三维动态模型。依托港珠澳大桥、广西南宁东站和上海磁悬浮等重大工程，提出了针对公众参与和政府参与的重大工程治理框架，揭示了重大工程在经济、环境、社会等不同维度的可持续效应。澳大利亚学者针对重大工程社会责任中的资源节约和环境保护等方面进行了深入研究。通过提升技术和管理水平，提高建筑工地的用水效率，消除或减少废料的产生；利用环境补偿来减轻重大项目对环境的影响，提出改善环境补偿政策的设计制定、批准、评估和监管流程，

表 1.2.9 “重大工程社会责任研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	21	61.76%	489	23.29	2017.5
2	澳大利亚	13	38.24%	430	33.08	2016.9
3	英国	7	20.59%	92	13.14	2017.3
4	美国	6	17.65%	173	28.83	2016.7
5	荷兰	2	5.88%	25	12.50	2017.5
6	波兰	1	2.94%	14	14.00	2018.0
7	韩国	1	2.94%	12	12.00	2017.0
8	马来西亚	1	2.94%	2	2.00	2018.0
9	伊朗	1	2.94%	0	0.00	2019.0

提高环境补偿政策的有效性。

“重大工程社会责任研究”工程研究前沿中核心论文数量排名前 3 位的机构分别为香港理工大学、华南理工大学、同济大学（见表 1.2.10），从核心论文产出机构合作网络图（图 1.2.5）来看，在核心论文发表数量排名前 10 的机构中，香港大学、华南理工大学和昆士兰科技大学之间的合作较多。来自香港理工大学的研究团队主要从利益相关者视角来研究重大工程社会责任议题。主要分析了重大工程项目利益相关者的复杂性，提出通过构建利益相关者协作框架来解决重大工程项目中的责任不清晰等问题，平衡项目中利益相关者的权力和相应社会责任；提出对利益相关方追求符合社会、环境和经济可持续性目标的期望管理策略，为重大工程实践提供了支撑。来自于华南理工大学和同济大学的研究团队则从利益相关者视角分析重大工程社会责任的具体行为特点。研究了特定的社会责任行为，以及影响利益相关者选择社会责任行为的动机和影响因素；提出在公众参与主要基础设施工程期间多利益相关者的多目标决策方法。来自上海交通大学的研究团队聚焦于重大工程社会责任的内涵与关键要素，提出了重大工程社会责任的三维模型，构建了评价重大工程社会责任指标体系，提出了重大工程社会责任的社会治理模型，分析了重大工程

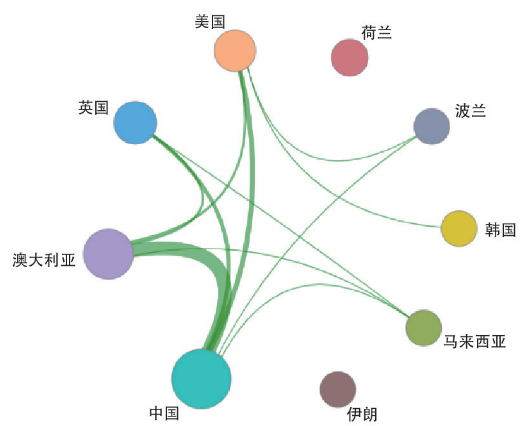

图 1.2.4 “重大工程社会责任研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.10 “重大工程社会责任研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	香港理工大学	6	17.65%	207	34.50	2017.5
2	华南理工大学	5	14.71%	75	15.00	2017.8
3	同济大学	5	14.71%	21	4.20	2018.4
4	上海交通大学	4	11.76%	150	37.50	2016.8
5	香港大学	4	11.76%	74	18.50	2017.5
6	昆士兰科技大学	4	11.76%	44	11.00	2017.8
7	皇家墨尔本理工大学	3	8.82%	194	64.67	2016.3
8	南京审计大学	3	8.82%	72	24.00	2017.3
9	佛罗里达大学	2	5.88%	104	52.00	2016.0
10	南澳大学	2	5.88%	54	27.00	2015.5

社会责任的行业溢出效应等。根据表 1.2.11 可以看出，中国的施引核心论文数量排名第 1 位。同时根据表 1.2.12 可以看出，排名靠前的机构是香港理工大学和同济大学。

2　工程开发前沿

2.1　Top 10 工程开发前沿及发展态势

在工程管理领域中，本年度的 10 个全球工程开发前沿，分别是基于区块链技术的供应链管理系统与方法、基于高速率移动网络的远程诊疗系统与方法、面向城市安全的综合应急技术、基于大数据的流行病调查技术与方法、基于数字孪生的仿真系统及方法研究、基于物联网的农业跟踪监控系统、智慧城市数字孪生技术与方法、微电网优化智能调度系统、基于大数据的基础设施健康状态监测系统与方法、智能配送服务管理系统和方法。其核心专利情况如表 2.1.1 和表 2.1.2 所示。这 10 个工程开发前沿集中包含了农业、运输、医学、建筑、电子等众多学科。其中基于区块链技术的供应链管理系统与方法、基于高速率移动网络的远程诊疗系统与方法、面向城市安全的综合应急技术为重点解读的前沿，后文会详细对其目前发展态势以及未来趋势进行解读。

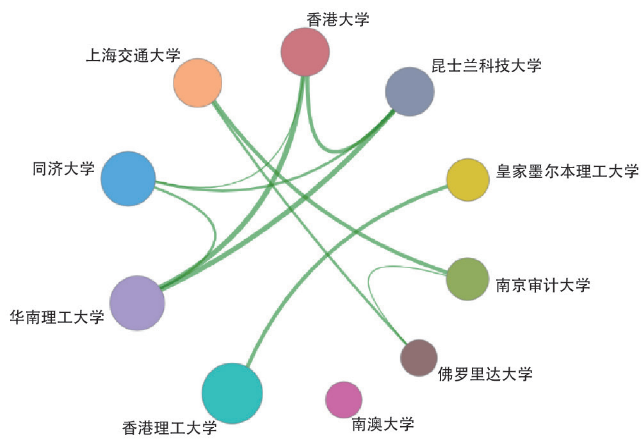

图 1.2.5　“重大工程社会责任研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“重大工程社会责任研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	210	40.08%	2018.4
2	澳大利亚	93	17.75%	2018.4
3	英国	66	12.60%	2018.5
4	美国	49	9.35%	2018.6
5	荷兰	30	5.73%	2018.3
6	伊朗	18	3.44%	2018.3
7	马来西亚	15	2.86%	2017.7
8	西班牙	14	2.67%	2018.2
9	南非	10	1.91%	2018.8
10	巴西	10	1.91%	2018.3

表 1.2.12 “重大工程社会责任研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	香港理工大学	44	21.36%	2018.1
2	同济大学	30	14.56%	2018.2
3	深圳大学	18	8.74%	2018.7
4	哈尔滨工业大学	16	7.77%	2018.6
5	格罗宁根大学	16	7.77%	2018.6
6	阿德莱德大学	15	7.28%	2018.3
7	上海交通大学	15	7.28%	2018.4
8	天津大学	14	6.80%	2017.9
9	昆士兰科技大学	13	6.31%	2018.5
10	香港大学	13	6.31%	2018.5

表 2.1.1 工程管理领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引数	平均被引数	平均公开年
1	基于区块链技术的供应链管理系统与方法	15	43	2.87	2018.7
2	基于高速率移动网络的远程诊疗系统与方法	43	1865	43.37	2016.8
3	面向城市安全的综合应急技术	57	263	4.61	2018.4
4	基于大数据的流行病调查技术与方法	31	892	28.77	2017.0
5	基于数字孪生的仿真系统及方法研究	13	2	0.15	2018.9
6	基于物联网的农业跟踪监控系统	25	132	5.28	2016.7
7	智慧城市数字孪生技术与方法	28	7	0.25	2018.6
8	微电网优化智能调度系统	21	46	2.19	2018.1
9	基于大数据的基础设施健康状态监测系统与方法	14	33	2.36	2017.5
10	智能配送服务管理系统和方法	15	81	5.40	2016.0

表 2.1.2 工程管理领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	基于区块链技术的供应链管理系统与方法	0	0	0	0	4	11
2	基于高速率移动网络的远程诊疗系统与方法	3	9	7	10	4	10
3	面向城市安全的综合应急技术	0	2	5	4	17	29
4	基于大数据的流行病调查技术与方法	3	3	5	6	9	5
5	基于数字孪生的仿真系统及方法研究	0	0	0	0	2	11
6	基于物联网的农业跟踪监控系统	2	5	6	3	4	5
7	智慧城市数字孪生技术与方法	0	0	0	3	6	19
8	微电网优化智能调度系统	0	0	1	3	10	7
9	基于大数据的基础设施健康状态监测系统与方法	1	1	1	1	7	3
10	智能配送服务管理系统和方法	4	3	1	3	4	0

（1）基于区块链技术的供应链管理系统与方法

区块链技术本质上是一个去中心化的数据库，是分布式存储、点对点传输、共识机制、密码学等多种技术结合的新型应用模式，可以分为公有链、联盟链和私有链。自从2008年诞生以来，以数字货币为开端，区块链的应用已经延伸到经济社会的各个领域，如电子政务、金融服务、文化娱乐、智能制造、社会公益、教育事业及供应链管理等。供应链是一个由物流、信息流、资金流共同组成的，由供应商、制造商、运输企业、分销商和零售商等将原材料转化为最终产品并将产品供应给消费者的系统。供应链管理就是设计和管理不同组织之间无缝增值的流程以满足最终顾客的真实需求。区块链，特别是其中的联盟链，天然地适合运用于供应链管理，能够实现不同组织间大规模的协作。但是在实际应用过程中，供应链通常是动态变化的，不同供应链之间也会有交互行为，而联盟链相对稳定，如何使其具有动态适应性，如何实现不同链之间的交互，是需要解决的重要问题，需要深入研究跨链技术。另外，区块链本身只能保证数据上链后不被篡改，并不能保证上链数据的真实性，与物联网、大数据和人工智能技术结合有望解决这一问题。此外，制约其在供应链管理中应用的还有区块链的一个共性问题：去中心化、安全性、可扩展性的“不可能三角”，这需要根据不同场景进行权衡。因此，进一步发展跨链技术、结合物联网、大数据以及人工智能等新兴技术，进行隐私保护、安全性、高效验证、跨链、可扩展性等领域的优化，是未来的重要研究方向。

（2）基于高速率移动网络的远程诊疗系统与方法

基于高速率移动网络的远程诊疗系统是指以高速率移动网络通信技术为基础，通过智能化的终端医疗设备和集成化的信息采集终端，辅助跨地域的医护等完成低时延、高可靠的远程诊疗服务活动。目前，随着高速率移动网络的远程通信技术的成熟，为医护人员实施较为复杂的诊疗行为提供了新的解决方案，远程诊疗技术也进一步在航海航空保障、灾害应急救援以及公共卫生安全等领域展现出了广阔的应用前景。此外随着物联网技术和深度学习等人工智能技术在相关领域的应用，远程诊疗系统获取和处理信息的能力得到进一步提高，围绕远程诊疗的交互服务系统与方法成为了学界的研究热点。但是，在工程化应用管理中，诊疗设备终端的差异带来的数据规格不一致和非固定的远程交互环境制约了基于高速率移动网络的远程诊疗服务系统的应用。边缘计算和云边融合的人工智能技术为终端信息高速处理和标准化提供了支持。因此，未来研制整合拓展多源信息流的诊疗服务终端服务系统，使得交互信息得以高效准确地传达。基于边缘计算技术等与人机交互技术相结合，提升远程诊疗服务质量是现代远程诊疗系统的主要发展趋势。

（3）面向城市安全的综合应急技术

面向城市安全的综合应急技术是指以信息技术为基础，通过建立城市安全应急管理系统平台实现信息融合、数据采集、预测预警、态势评估、应急决策等功能，辅助城市运行与应急管理工作。从城市安全的业务角度上，综合应急的环节包含了预防与应急准备、监测与预警、应急处置与救援、事后恢复与重建四个方面。目前，物联网、大数据、云计算及空间地理信息技术等新兴信息技术的快速发展为应急管理系统提供了新的技术支撑手段，使得综合应急技术展示出了更为广阔的应用前景。将新兴信息技术与综合应急、城市安全运行等业务进行深度融合与应用，成为新的学术研究热点。在实际工程管理应用中，城市安全涉及水、电、气、热、交通、环境、气象等多源异构跨层级的数据信息，过剩信息的表象背后隐藏的是理论模型的不足和有效信息的匮乏，尤其是应急情况下针对跨领域不完整信息的研判难题制约了综合应急技术的发展。知识图谱、深度学习、智能仿真等人工智能技术能够更准确、更高效地感知数据，更加智能的进行决策。

因此，未来如何结合安全工程领域知识与人工智能技术，挖掘多源异构大数据进行城市安全风险的精准识别与评估，针对不同灾害场景 / 决策阶段进行科学预测和综合研判、智能生成决策建议，将是未来研究的两大发展趋势。

（4）基于大数据的流行病调查技术与方法

大数据是指超过传统数据系统处理能力、超越经典统计分析范围、难以用主流软件工具及技术进行单机分析的复杂数据的集合，通过现代计算机技术和创新统计方法，有目的地获取、管理、分析数据，揭示隐藏在其中的有价值的模式和知识。健康医疗大数据是医学与大数据发展过程中相互融合的产物，其主要来源有：卫生行政管理数据、人口统计和疾病监测数据、真实世界的健康相关记录（电子病历、医学影像、体检数据等）、科研数据（生物标志物、临床试验或队列研究多组学数据）、登记数据（如设备登记、过程登记、疾病登记数据）、来自移动医疗设备的数据、患者报告的数据等。大数据采集与预处理、存储与管理、计算模式与系统、分析与挖掘、可视化分析等方法的建立和发展，使得健康医疗大数据在疾病诊疗、居民健康管理、病因探索、疾病预测预警模型构建、疾病防控决策等公共卫生方面应用广泛。健康医疗大数据的发展将为传染病流行病学研究、慢性病病因研究、老年共病研究、实施性研究等科学研究提供丰富的资源与广阔的平台：为流行病学在更加丰富和复杂的数据中提炼研究问题，开辟新的研究方向提供契机。同时为了更好地将大数据中丰富的信息及时转化为知识与工具，需要构建新的流行病学研究方法，开发大数据分析技术、大数据挖掘和分析的统计软件等。基于大数据的流行病学调查技术与方法的发展，将助力“数字公共卫生”建设。

（5）基于数字孪生的仿真系统及方法研究

数字孪生是以数字化的方式建立与物理实体完全映射的虚拟模型，将物理实体的属性、结构、状态、性能、功能和行为映射到虚拟世界，并借助数据模拟物理实体在现实环境中的行为，从而观察、认识、理解、控制和改造物理世界。仿真是利用模型模拟和复现现实的动态系统，并通过在仿真模型上执行各种实验来评估和改善系统性能。仿真作为产品研发制造中必不可少的技术，已经被广泛应用到工业各个领域中。随着数字孪生的快速发展及其理论和技术的研究越来越丰富，以数据和模型为驱动，基于数字孪生进行仿真研究与应用成为新兴的热点研究方向，包括基于数字孪生的设计仿真、基于数字孪生的生产系统仿真、基于数字孪生的运维仿真等。但是，数字孪生中海量多源异构数据处理和复杂模型的精准建模与解算，以及数字孪生实时虚实交互和闭环控制的特性，为基于数字孪生的仿真带来了新的挑战。因此，实现多维、多时空尺度动态模型的构建、组装、重构与一致性验证，对多源异构孪生数据实时高效分析与融合，对仿真模型进行降阶和统一求解，揭示孪生数据与模型之间的耦合机理，实现模型和数据融合双驱动的实时仿真，是实现基于数字孪生仿真的主要技术方向。未来，通过打造数字孪生，将日益丰富的数据和功能强大的模型仿真双剑合璧，帮助企业在产品设计、生产制造、健康管理、远程诊断、智能维护、共享服务等方面提高质量、增加效率、节约成本，将是未来研究的主要发展趋势。

（6）基于物联网的农业跟踪监控系统

基于物联网的农业跟踪监控系统是以物联网为技术支撑，实时跟踪监控农产品供应链上的各个环节，如农作物的种植、采摘、加工、物流等，实现对各个环节数据的实时采集、传输、存储与处理，便于自动、科学、高效地控制各个环节，最终实现农业的精细化、智能化管理及对农产品的品质管控，从而推动智慧农业的发展。目前，基于物联网的农业跟踪监控系统展示出了广阔的应用前景，可应用于农作物病虫害识别预警、农作物生长环境监测、农产品溯源等方面。随着云计算、深度学习、区块链等前沿技术在农业领域的应用，精准农业、农业

4.0 的不断推进，基于物联网的农业跟踪监控系统的研究将迎来快速发展阶段。但是，农业跟踪监控系统面临着农作物种类繁多，温度、光照、土壤养分、空气湿度等多个环境因素综合影响作物的成长，作物病害频发且症状多变等诸多复杂的问题，这使得系统采集的数据具有多源异构性、高不确定性、动态性、高矩阵稀疏性等特征。因此，有效地处理、分析这些数据并用于智慧农业管理，是当前亟须攻克的难点。深度学习等人工智能技术、云计算技术、区块链、5G、智能无人机等前沿技术与物联网技术的结合，能够完成海量数据的安全存储、分析和计算，以更准确、更高效、更智能地监控农产品供应链中各个环节的运行情况，从而创建可追溯、安全可信的农产品供应链。因此，未来结合人工智能、云计算、区块链与物联网等技术，提出具有农业特色的数据分析处理方法，提高基于物联网的农业跟踪监控系统的智能化、自动化和科学化水平；以及根据农业实践水平的不断提高，提供专家级别的农事管理建议，并在实践中提高前沿技术的持续渗透应用，将是未来研究的两大发展趋势。

（7）智慧城市数字孪生技术与方法

随着城市治理和运营在数字时代下变得更为精细化和精准化，以及城市数据资源在内涵式城镇化时代下亟须转化为城市数字资产，工业领域的数字孪生概念被运用到了智慧城市领域。数字孪生是物质产品或资产的虚拟复制品，且以实时更新或周期性更新方式，使其与真实世界的对应物尽可能的一致。数字孪生城市则意味着城市的所有部件、要素、活动等都被复制成为虚拟城市，且虚拟城市与现实城市之间实时或高频交流互动，未来城市本身逐步变成不同尺度的实体与虚拟空间叠合以及不同群体实时动态交流的产物。这不仅仅是地理信息系统（GIS）、建筑信息模型（BIM）以及物联网（IoT）等技术的融合，而且涉及到低轨卫星网、5G、云计算、边缘计算、多源异构数据实时融合与调用等新兴技术的创新性整合。根据国内外专利和文章来看，数字孪生城市技术在城市应急安全、社区治理、智慧教育医疗、智慧旅游、智慧交通等领域都有初步的探索性应用。不过，数字孪生城市改变了传统智慧城市的发展路径，更为聚焦于城市规划、建设、运营等新的数字空间及其交流模式，以数字空间为驱动，推动土地、资本、人才等在实体空间中的重新配置，反过来又建构更为丰富的数字空间，形成数字孪生的新型城镇化。其研究难点在于数字孪生城市如何提供更为人机互动的交互模式，如何提供更为实时的超大规模计算，以及如何提供更为自我学习迭代的城市机制。

（8）微电网优化智能调度系统

微电网是指将分布式电源、负荷、储能装置以及监控保护装置有机整合在一起的小型发、用电自治系统。微电网通过优化调度，充分协调分布式电源、储能装置以及柔性负荷等可控单元，实现微电网功率平衡，满足负荷需求并保障微电网安全稳定经济运行。随着微电网技术的发展，其结构和功能也不断发生新的变革，逐渐从单一电能结构扩展为包含气、热、电在内的多能源形式，并与交通系统如电动汽车和充电桩、信息通信系统如 5G 基站等不断融合，向综合能源系统演变。同时，同一区域内将存在由多个微电网构成的微电网群，微电网间以及微电网群与电力系统间的动态交互过程更加复杂，微电网优化调度面临严峻挑战。近年来兴起的人工智能技术、5G 技术等使得新能源发电与负荷预测、系统状态感知和优化调度决策等环节变得更加精准与高效。同时，优化调度系统所依赖的集中采集调度机制也逐渐向分布式点对点交互协商机制转变，大大增强了调度系统的灵活性与可拓展性。因此，充分考虑微电网（群）内多能源耦合互补特性，以及与大电网的动态交互和兼容运行，结合先进人工智能技术、5G 技术以及分布式调度架构体系共同构建优化智能调度系统，将是未来研究开发的重要发展趋势。

（9）基于大数据的基础设施健康状态监测系统与方法

基础设施健康监测系统安装大量传感设备以实时获取环境荷载和结构响应信息，通过分析海量监测数据以识别可能的结构损伤并认知结构安全状态。先进智能传感技术的发展促使形成基础设施健康监测大数据，也使得基于大数据的基础设施健康状态监测系统与方法逐渐成为研究热点，并将为传统健康监测技术带来革命性变革。大数据方法在基础设施健康状态监测领域尚处于探索阶段，主要技术方向包括智能化监测装备的研发、多源异构海量数据分析方法和高效的分析计算手段。智能化监测装备、智能手机等工具在基础设施健康监测中具有广阔的应用前景，将为基础设施健康状态监测提供更多有价值的信息；自动化、智能化的监测手段产生大量非结构化数据，需要深入研究有效的数据融合方法，将非结构化数据与结构化数据综合利用，最大程度地发挥多源异构海量数据的价值；健康监测数据中包含大量噪声及错误信息，自动化的数据预处理是进行健康监测大数据分析预先要解决的问题；作为基础设施健康状态监测的重要任务，基于大数据的损伤识别的关键问题是提取对结构损伤敏感而对环境与运营荷载变化不敏感的特征指标，有效判断基础设施裂化和极端荷载作用后结构的损伤状态；未来的基础设施健康状态监测将以群体为对象，将面临分析算力不足或计算效率低下的问题，发展高效的云计算平台也将成为必然的趋势。因此，大数据分析方法与人工智能、物联网、超级计算机技术结合，是未来基础设施健康状态监测发展的趋势，将为基础设施安全运营提供更可靠、更有效的保障。

（10）智能配送服务管理系统和方法

配送服务管理系统通常包括运输管理系统和仓储管理系统，主要是将传统手工、文件形式的操作流程系统化和信息化，以计算机软件系统的形式呈现。目前，市场上有多家配送服务管理系统软件供应商，并且该类系统已经被多个领域的企业应用，例如，汽车制造业、食品医药、零售快消、电商业等。本质上，配送服务管理系统仅仅是使得企业的操作流程可以得到高效的管理，数据可以准确无误的共享，但是它并不能为企业在运营中提供优秀的决策方案，企业中的决策目前大多数还是依靠人脑。智能配送服务管理系统指的是嵌入了智能决策算法引擎的配送服务管理系统，它可以基于企业的业务流程、输入数据以及所拥有的资源等现状，运用运筹优化算法，通过复杂的计算来生成最优的决策方案供企业直接使用或作为决策支持。运筹优化算法主要包括分支定价算法，动态规划算法，基于列生成的启发算法，禁忌搜索算法，变邻域搜索算法，大邻域搜索算法等，这些算法是目前解决企业实际问题的主流方法，非常高效，并且得到了广泛的应用。近年来，很多学者都在尝试应用强化学习、深度学习等基于神经网络的人工智能算法来解决配送服务领域的优化问题，该方向已经成为当前学术研究的热点。但是，相关的方法和理论成果仍然不丰富，相关算法的效果仍然不如传统的运筹优化算法。将基于神经网络的人工智能算法和传统的运筹优化算法相结合，利用他们各自的优势来解决配送服务领域的优化问题是未来研究的趋势。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 基于区块链技术的供应链管理系统与方法

供应链由众多参与主体构成，存在大量交互协作，信息被离散地存储在各自环节各自系统中，缺乏透明度。信息传递的不流畅导致各参与主体难以准确了解相关事项的实时状况及存在的问题，影响供应链协同效率。当各主体间出现纠纷时，举证和追责耗时费力。未来企业市场范围越来越大，物流环节表现出多区域、长时间跨度的特征，需要智能高效的防伪追溯能力。另外，供应链中的很多中小企业融资难、融资贵，往往影响其有效运作，进而

会影响整个供应链的绩效。供应链金融是解决这一问题的方法之一，被提出时受到行业内的一致追捧，但长时间以来受限于风险控制成本的问题，无法发挥其理想作用。

区块链具有数据不可篡改、可溯源、降低成本、建立信任等优势，能够很大程度解决传统供应链管理中存在的上述痛点问题。数据不可篡改：区块链使用非对称加密和哈希算法，保障数据的记录与传递真实、不可篡改且不可抵赖。可溯源：通过植入识别技术和普适算法等实现供应链信息的主体交互，按照时间序列在公共“区块”中构建形成一个唯一且不断延续的“链”，保证了供应链交易信息的唯一性与可溯源性。降低成本：以时间戳、密码保护、节点保护等技术为支撑的区块链技术，可确保供应链数据的安全性与可获取性，这使得区块链天然地匹配了供应链的成本控制需求。建立信任：区块链被誉为“信任机器”。在区块链系统中，共识机制解决并保证了每一条上传的信息数据在所有链条节点上的一致性和正确性，保证了在不依靠中心化组织认可的前提下，可直接写入数据区块并记录到区块链，进入整个追溯体系中，完成运转。

同时需要指出的是，区块链在供应链中的应用也存在不足。例如，针对交易行为的隐藏和智能合约的隐私保护技术体系还不完备；智能合约代码实现中可能存在安全漏洞和后门，可能导致业务欺诈等风险；不同区块链之间的信息交互与价值转移问题亟待解决；随着节点数的增多，通信成本会急剧增加，影响其在用户和交易数量方面的可扩展性和系统可用性。

从专利分析来看，基于区块链的供应链管理系统与方法主要包括两大类：基于区块链的供应链溯源方法及系统和基于区块链的供应链金融管理方法及系统。

（1）基于区块链的供应链溯源方法及系统

基于区块链的供应链溯源方法及系统包括将预定数量的单体产品组成产品物流单元并且为产品物流单元装备卫星定位芯片，获取位置信息，生成当前哈希值。可将批处理产品的私钥存储在区块链中，并将区块链与当前产品批次关联。通过对物流溯源信息进行记录，确保物流信息记录的完整性，防止物流溯源信息的丢失，同时便于对物流溯源信息进行查询。

（2）基于区块链的供应链金融管理方法及系统

基于区块链的供应链金融管理方法及系统主要包括供应链金融平台和风险评估平台。供应链金融平台包括上游原材料供应服务平台、品牌商服务平台、加工商服务平台、下游门店服务平台；风险评估服务平台包括行业大数据评估模块和金融交易服务平台，其中，行业大数据评估平台连接有风险预警模块，金融交易服务平台连接有交易资产服务模块。基于区块链的供应链金融服务平台有助于对金融服务进行详细了解，从而进行金融投资，降低投资风险。

由此可见，区块链主要解决的是交易的信任和安全问题，基于这个问题，提出了分布式账本、非对称加密和授权技术、共识机制、智能合约等创新点。区块链的去中心化、开放性、自治性、信息不可篡改、匿名性等特征为供应链管理提供了很好的支持。

从发表专利的数量来看，专利数量排名前两位的国家分别为：中国和美国（见表 2.2.1）。专利平均被引数分别是 14.27 和 22.00（见表 2.2.1）。目前，中国主要研究了基于区块链的供应链跟踪溯源方法以及基于区块链的供应链财务防伪追踪方法。其中，基于区块链的供应链跟踪溯源方法主要采用射频识别（RFID）、近场通信（NFC）和二维码等方法生成产品标签并完成交易过程；基于区块链的供应链财务防伪追踪方法通过智能合约实现买卖双方的合同协议，进行物流监督和财务评估，以减少繁琐的程序，提高处理速度。美国主要研究了基于区块链的供应链跟踪溯源方法，用于管理商品从始发地到目的地的运输，并采用智能合约加快

交易速度，保证操作流程的规范性。

专利数量排名第 1 的机构是电子科技大学（见表 2.2.2），其主要研究了基于主权区块链技术的供应链金融管理方法以及基于区块链的货运物流管理方法。其中，基于主权区块链技术的供应链金融管理方法主要利用主权区块链技术搭建适用于中国供应链金融的区块链应用平台，从而提升供应链金融应用的安全性、可追溯性，降低交易成本，并实现对供应链金融全流程环节的监督；基于区块链的货运物流管理方法通过将分区块链结合建立区块链平台，实现整个货运物流过程的可信任数据共享，解决了后期货运物流环节中数据取证难度大的问题。

2.2.2 基于高速率移动网络的远程诊疗系统与方法

远程诊疗系统由英文“Telemedicine”引申而来，是 20 世纪电信技术快速发展的产物。早期的远程诊疗由电话和短距无线电完成，主要服务于医疗信息的交换，辅助医疗资源不对称的区域完成诊疗活动。随着现代通信技术的革新，其内涵也不断丰富，现代远程医疗服务系统包括资源提供者、服务需求方和交互通信装置，从早期的单一信息交换服务逐渐演变为面向应急救援、健康监护和突发事件处理等复杂场景下多方实时交互的信息系统技术。现代远程诊疗系统的构建是多学科领域融合发展的成果，包括现代通信、物联网、医疗装备智能化、边缘计算和分布式人工智能等技术，使得远程诊疗系统不再局限于信息的交换，而是更能深度挖掘信息本身和交互过程的价值。在保证数据传输时效性的同时，进一步提高交互过程中有效信息的展现，并依据交互信息辅助医护人员提高远程诊疗的服务水平。

在工程化应用管理中，诊疗设备终端的差异带来的数据规格不一致和非固定的远程交互环境制约了基于高速率移动网络的远程诊疗服务系统的应用。因此，研制整合具有拓展性的诊疗服务终端装备，以及基于边缘计算技术与人机交互技术相结合的远程诊疗服务，是未来提升远程诊疗服务效率的主要趋势。从专利分析来看，基于高速率移动网络的远程诊疗系统与方法主要包括：医疗物联网、计算机辅助诊断（CAD）、医疗机器人、诊疗信息检

表 2.2.1 “基于区块链的供应链管理系统与方法”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	11	84.62%	157	78.11%	14.27
2	美国	2	15.38%	44	21.89%	22.00

表 2.2.2 “基于区块链的供应链管理系统与方法”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	电子科技大学	3	23.08%	35	17.41%	11.67
2	无锡井通网络科技有限公司	2	15.38%	21	10.45%	10.50
3	深圳前海联动云软件科技有限公司	2	15.38%	15	7.46%	7.50
4	杭州云象网络技术有限公司	2	15.38%	60	29.85%	30.00
5	深圳中联高科安全技术有限公司	1	7.69%	8	3.98%	8.00
6	广东工业大学	1	7.69%	18	8.96%	18.00
7	Skuchain 公司	1	7.69%	37	18.41%	37.00

索、远程医疗边缘计算技术。

（1）医疗物联网

医疗物联网是现代智能物联网和高速通信技术融合发展的产物，是一个连接医护病患及药品设备等终端设施，支持诊疗信息的实时交互的信息管理系统。在工程管理领域，医疗物联网可以完成医疗互联环境下的信息自动识别、关键信息定位、自动数据采集、溯源跟踪、综合信息管理、区域信息共享等功能。但目前由于物联网设备的采集信息标准不一致，导致人机互联程度不高。而基于人工智能的医疗物联网技术可以有效地在终端设备中标准化数据信息，使得医疗物联网技术可以有效地服务于现代医疗管理。

（2）计算机辅助诊断

CAD 是帮助医生解释诊疗数据的系统。CAD 早期主要处理 X 射线，磁共振成像（MRI）和超声波诊断中的成像技术产生的大量信息，从而降低影像科室医护的读片阅片时间。目前，在工程实践领域，计算机辅助诊断已经广泛应用于专科科室，虽然已经可以在某些环节辅助医护完成诊疗工作，但是受限于诊疗数据种类的多源多模态，计算机辅助诊断技术还需人工介入完成诊疗。随着人机协同的人工智能技术的发展，在未来有望实现基于人机耦合的智能辅助诊疗系统。

（3）医疗机器人

医疗机器人是通过构造精密的电气装置，辅助或代替医护人员完成诊疗服务工作的一类机器人。包含多个种类，如远洋航行或偏远地区的外科手术中用的手术机械臂可以完成更精准、侵入性更小的手术；COVID-19 疫情中的监护机器人可以在避免交叉感染的情况下完成个人体征信息的采集；远程手术中使用的远程操控机器人可以跨地域辅助医生完成复杂的手术操作。目前在工程实践领域，医疗机器人与使用场景结合紧密，但环境适应性较弱，开发适用于人机耦合环境下的医疗机器人是未来主流的发展方向。

（4）诊疗信息检索

诊疗信息检索是指从诊疗系统进行信息查询和信息展示的过程。传统诊疗信息检索由医疗机构内部构建的信息系统完成，对数据检索效率要求较低。而在远程诊疗过程中，为了完成高质量的远程诊疗活动，需要利用诊疗信息检索技术快速定位到包括电子病历、病理图像和诊疗视频等数据在内的多模态关联信息。在工程管理中，经典的信息检索技术包括基于结构化数据的向量空间模型和概率模型。但由于远程诊疗系统数据的模态多样性，现有检索方法普遍效率较低。随着基于深度学习的语义理解技术的发展，实现对多模态医疗数据的高层语义理解和关联检索是未来诊疗信息检索的一个主要方向。

（5）远程医疗边缘计算

远程医疗边缘计算是指在完成远程诊疗智能化服务的过程中，在资源请求或数据源头的一侧，通过整合存储、传输、管理的计算资源，就近提供最近端智能化诊疗服务。例如，在移动医疗中的移动阅片终端可以辅助医生自动分析和展示诊疗信息；在远程会诊过程中使用的分布式共享存储可以支持远程诊疗的多方数据实时访存等。随着 5G 等高速率通信技术的应用，现代的边缘计算已经可以完成更为复杂的多模态诊疗数据分析和医疗资源请求分配等工作，可实现将原有部署于云端的计算资源部分下放至边缘医疗终端，从而在边缘终端完成数据分析与预处理，降低远程诊疗时的通信负载压力，减少诊疗信息泄露风险。同时随着分布式人工智能技术的发展，在未来的远程诊断系统中，边缘计算将继续扮演重要的角色。

从发表专利的数量来看，专利数量排名前两位的国家分别为：美国和韩国（见表 2.2.3），其专利主要包括具有交互能力的远程会诊系统和具有主动预警能力的长期实时护理监护系统，传感信息较为丰富，部分使用了基于边缘计算的计算机

辅助诊断技术，中国在这方面还处于追赶阶段。平均被引数排名前3位的国家分别是：英国、美国和荷兰（见表2.2.3），其核心内容涉及糖尿病等慢性病患的异常信息预警，以及远洋航行等特殊环境下的远程健康监护。从专利产出合作网络图（见图2.2.1）来看，美国和荷兰之间已经在移动网络中远程视像传输关键技术领域形成了合作关系。专利数量排名前两位的机构分别为：MI Express护理许可公司和荷兰皇家飞利浦电子公司（见表2.2.4），但局限在长期健康监护领域，主要基于多种类传感器来实现。从专利产出结构的合作网络图（见图2.2.2）来看，区域性合作的规模已经初步形成，但是并未出现跨区域的合作网络，其中荷兰的荷兰皇家飞利浦电子公司与Ishihara公司，英国的云南欧铂斯医疗科技有限公司与E-San有限公司均在慢性病病症监护领域有合作，核心技术涉及初级语义诊疗信息检索等。中国的企业单位在慢性疾病监护和远程诊疗领域处于同步赶超阶段，但得益于中国高速率移动通信网络的发展，中国的远程手术会诊和远程医疗

表2.2.3 “基于移动高速率网络的远程诊疗系统与方法”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	美国	31	51.67%	1581	75.14%	51.00
2	韩国	10	16.67%	34	1.62%	3.40
3	中国	8	13.33%	26	1.24%	3.25
4	德国	2	3.33%	26	1.24%	13.00
5	日本	2	3.33%	3	0.14%	1.50
6	英国	1	1.67%	364	17.30%	364.00
7	荷兰	1	1.67%	34	1.62%	34.00
8	加拿大	1	1.67%	28	1.33%	28.00
9	芬兰	1	1.67%	25	1.19%	25.00
10	丹麦	1	1.67%	17	0.81%	17.00

表2.2.4 “基于移动高速率网络的远程诊疗系统与方法”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	MI Express护理许可公司	7	11.67%	26	1.24%	3.71
2	荷兰皇家飞利浦电子公司	2	3.33%	1385	65.83%	692.50
3	Ishihara公司（美国）	1	1.67%	1351	64.21%	1351.00
4	E-SAN有限公司	1	1.67%	364	17.30%	364.00
5	云南欧铂斯医疗科技有限公司	1	1.67%	364	17.30%	364.00
6	雅培糖尿病护理公司	1	1.67%	52	2.47%	52.00
7	韩国KT Freetel公司	1	1.67%	30	1.43%	30.00
8	美国Telehealth Broadband公司	1	1.67%	28	1.33%	28.00
9	美国Verathon公司	1	1.67%	28	1.33%	28.00
10	芬兰Increa公司	1	1.67%	25	1.19%	25.00

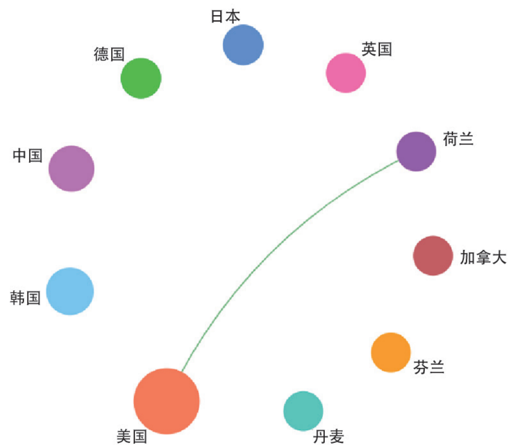

图 2.2.1　“基于移动高速率网络的远程诊疗系统与方法”工程开发前沿主要国家间的合作网络

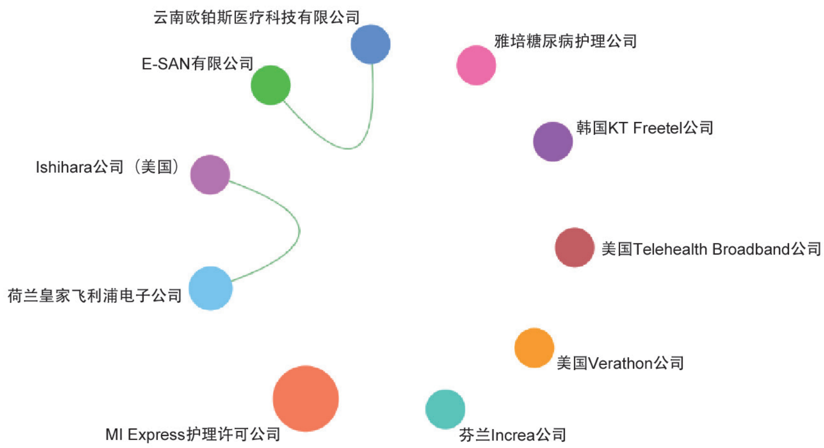

图 2.2.2　“基于移动高速率网络的远程诊疗系统与方法”工程开发前沿的主要机构间合作网络

机器人等特殊领域的远程诊疗技术具有一定的先发优势。

2.2.3　面向城市安全的综合应急技术

城市建筑密度大、基础设施网络复杂、各子系统在结构和功能上耦合密切，在突发事件的危害下会表现出较高脆弱性。1989 年，第一届“防止事故和损失”学术会议正式提出“安全城市”的概念，2001 年美国“9·11”事件后，应急管理（Emergency Management）的概念被提出。近年来，城镇化进程的快速发展使得城市安全风险因素急剧增加，面向城市安全的综合应急技术开始受到越来越多的关注。城市安全综合应急技术是一门交叉学科，其涵盖了众多研究领域，如信息系统、安全工程、系统工程、决策管理等技术。物联网、大数据、云计算等新兴信息技术的快速发展为综合应急技术提供了新的推动力，应急大数据建模、信息共享与全流程应用，及新兴信息技术支撑下的应急决策理论与方法等科学问题成为新兴的学术研究热点，并被认为是应急管理未来发展的重要方向之一。

在实际工程管理应用中，城市安全数据类型跨领域、跨层级、跨模态，且在应急情况下数据信息往往不完整，如何融合领域知识与模型、多源异构

且不完整的数据、以及应急管理业务需求，是城市安全综合应急技术亟待解决的难题。从专利分析来看，面向城市安全的综合应急技术主要包括：大数据融合、城市风险监测预警、城市风险评估、应急智能决策支持、应急一张图可视化。

（1）大数据融合

大数据融合是通过模型、实体链接、关系推演等手段建立数据间、信息间、知识片段间多维度和多粒度的关联关系，实现更多层面的知识交互。城市安全相关数据信息多种多样，从应急技术应用角度来看，大数据融合能够部分解决信息割裂导致认识片面和决策错误的问题，但仍需要针对应急大数据进行更高效、更准确的融合治理，支撑城市安全综合应急决策。

（2）城市风险监测预警

风险监测预警利用物联网技术，通过射频识别、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备，按约定的协议，把任何物品与互联网相连接，进行信息交换和通信，以实现对物品的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理。物联网为城市风险监测预警提供了大量不同于传统技术带来的数据信息。城市应急如何应用物联网技术改进监测能力，研究基于新数据的分析模型提升预警准确性是未来需要重点关注和解决的问题。

（3）城市风险评估

风险评估需要用到各类灾害分析模型来对城市运行的各个要素进行预测模拟，灾害分析模型逐渐向精细化发展，大规模输入数据量，大规模计算量保证了计算准确性，但同时也增加了计算时间，基于云计算的高精度灾害模拟仿真可为实用化的风险评估提供能力支撑。

（4）应急智能决策支持

随着科技发展，人工智能技术逐渐应用于应急智能决策。机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等理论和技术日益成熟。但是，实际应急场景复杂多变，而且往往要求基于已知海量信息，快速做出决策，人工智能针对应急决策场景的综合应用还需进一步探索。

（5）应急一张图可视化

一张图是应用地理信息系统对空间中地理分布相关数据进行采集、管理、分析、展示。结合地理学与地图学以及遥感和计算机科学，已经广泛地应用在城市安全与应急领域。多源数据基于同一张底图进行展示，为应急决策带来很多便利，但在城市复杂情况下如何实现海量数据的高效整合与快速有效可视化展示，为基于一张图的城市安全应急决策带来新的挑战。

从发表专利的数量来看，专利数量排名前两位的国家分别为：中国和美国（见表 2.2.5）。平均被引数排名前两位的国家分别是：中国和美国（见表 2.2.5）。不同机构的专利数量相当（见表 2.2.6）。

不同国家在城市安全综合应急技术领域的核心专利具有不同的研究特点。中国注重物联网技术的应用，提出了涉及城市多维度安全的综合评估系统，如基于物联网的道路交通信息云计算与云服务实现系统、城市天然气智能泄漏报警系统、基于物联网的城市地下综合管廊动态监测预警系统等，这些系统将物联网、大数据等先进技术巧妙地应用到城市综合评估与监测预警中；美国比较关注反恐安全问题，如非军用无人机信号的检测与视频反馈、建筑人员精准定位与应急响应研究等；日本则关注地震、海啸等自然灾害问题，其研究内容基本与逃生引导、灾害监测等相关，如用于地震、火灾或海啸等灾害中的逃生引导系统、城市地震智能监测预警系统等。不同机构的研究重点也有所差异。例如，浙江工业大学关注城市车辆精准定位的研究，提出了一种配有移动车辆全球定位系统（GPS）的数据接收和存储服务器的信息中心系统，可以大规模的实时监测道路交通信息；

表 2.2.5 “面向城市安全的综合应急技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	28	57.14%	175	66.29%	6.25
2	美国	12	24.49%	63	23.86%	5.25
3	韩国	6	12.24%	17	6.44%	2.83
4	日本	3	6.12%	9	3.41%	3.00

表 2.2.6 “面向城市安全的综合应急技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	江苏省邮电规划设计院有限责任公司	1	2.04%	50	18.94%	50
2	Redsky 技术公司	1	2.04%	34	12.88%	34
3	浙江工业大学	1	2.04%	25	9.47%	25
4	广州翰润信息科技股份有限公司	1	2.04%	25	9.47%	25
5	杭州辰清和业科技有限公司	1	2.04%	12	4.55%	12
6	韩国气体安全公司	1	2.04%	8	3.03%	8
7	深圳市易创科技有限公司	1	2.04%	8	3.03%	8
8	韩国 GSM 解决方案公司	1	2.04%	6	2.27%	6
9	日本 READ ENG 株式会社	1	2.04%	6	2.27%	6
10	北京北排水务设计研究院有限公司	1	2.04%	5	1.89%	5

韩国 GSM 解决方案公司重视图像的加工与处理，提出了一种基于地理信息系统和互联网络子系统对景观图像、GIS 数据和测量信息进行实时重叠处理并确定目标位置的系统；日本 READ ENG 株式会社比较关注灾害事件中引导人员正确逃生的研究，提出了一种根据灾害发生地点信息和当前位置信息确定最佳疏散区域，帮助人员在地震等灾害中高效逃生的指示系统。

领域课题组人员

专家组成员：

丁烈云 何继善 胡文瑞 向 巧 陈晓红
曹耀峰 柴洪峰 陈清泉 傅志寰 刘人怀
陆佑楣 栾恩杰 凌 文 孙永福 邵安林
王 安 王基铭 王礼恒 王陇德 汪应洛
王玉普 王众托 薛 澜 许庆瑞 徐寿波
杨善林 殷瑞钰 袁晴棠 朱高峰 郑静晨
赵晓哲 Mirosław Skibniewski
Peter E. D. Love 毕 军 蔡 莉 陈 劲
丁进良 杜文莉 方东平 高自友 胡祥培

华中生　黄季焜　黄　伟　江志斌　康　健
李　恒　李永奎　李　政　刘晓君　骆汉宾
任　宏　唐加福　唐立新　唐平波　王红卫
王慧敏　王孟钧　王先甲　王要武　魏一鸣
吴德胜　吴建军　吴启迪　许立达　杨　海
杨剑波　叶　强　曾赛星　周建平　程　哲
冯　博　李　果　李晓冬　李玉龙　林　翰
刘炳胜　刘德海　罗小春　吕　欣　马　灵
欧阳敏　裴　军　司书宾　王宗润　吴　杰
肖　辉　杨洪明　杨　阳　於世为　袁竞峰
张跃军　镇　璐　周　鹏　朱文斌

工作组成员：

王红卫　骆汉宾　钟波涛　李　勇　董惠文
向　然　邢雪娇　潘　杏

办公组成员：

聂淑琴　常军乾　郑文江　穆智蕊　张丽南

前沿报告执笔组成员：

研究前沿：

曾赛星　陈宏权　伊雅丽　樊　博　高　颖
冯　卓　张水波　杜丽敬　王慧敏　李　力
钟波涛　盛　达　吴海涛　潘　杏　向　然
邢雪娇　杨　阳　王乃玉　杨　珺　肖　辉

开发前沿：

王　艳　李　健　朱士超　黄鲁成　丁　帅
袁宏永　王　齐　戚庆林　孙丽君　杨　滔
陈　霞　朱宏平　翁　顺　秦　虎

总体组成员

项目组长：杨宝峰

项目组成员：

段正澄　郭东明　卢锡城　潘云鹤　王静康　刘炯天　翁史烈　倪维斗
彭苏萍　顾大钊　崔俊芝　张建云　陈以一　郝吉明　曲久辉　张福锁
康绍忠　陈赛娟　张伯礼　丁烈云　何继善　胡文瑞　向　巧　吴　向
延建林　周炜星　张　勇　吉久明　蔡　方　蒋志强　高彦静　郑文江
穆智蕊

综合组执笔：

穆智蕊　郑文江　延建林　周炜星　吉久明　蔡　方　蒋志强

数据支持：

科睿唯安

工作组：

组　长：安耀辉　焦　栋　韩　筠
副组长：吴　向　延建林　丁　宁　张　勇　周炜星　周　源　郑文江
成　员：姬　学　黄海涛　王爱红　宗玉生　张　松　王小文　张秉瑜
张文韬　聂淑琴　陈冰玉　闻丹岩　穆智蕊　李佳敏　潘腾飞

致谢：

感谢高等教育出版社有限公司、科睿唯安公司、中国工程院院刊（系列）编辑部、中国工程院战略咨询中心、中国工程科技知识中心、中国工程院各学部和学部办公室、哈尔滨医科大学、华东理工大学、华中科技大学、浙江大学、天津大学、上海交通大学、同济大学、清华大学、中国农业大学、上海交通大学医学院附属瑞金医院、《中国工程科学》杂志社的大力支持！