

## 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、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿汇总见表 1.1.1，涉及水利工程、交通工程、土木建筑材料、建筑学、市政工程、城乡规划与风景园林、结构工程、工程力学、测绘工程和桥梁工程等学科方向。其中，“跨流域调水的生态环境效应”“交通基础设施韧性提升”“水源地水质污染控制与修复”“面向智慧可持续城市的时空大数据感知方法”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，其他为数据挖掘前沿。各个前沿所涉及的核心论文自 2015 年至 2020 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

##### (1) 跨流域调水的生态环境效应

跨流域调水对于缓解水资源供需矛盾、优化水资源配置具有巨大的潜力与优势，由于改变了相关区域的水资源时空分布和水文情势，跨流域调水将引发复杂且影响持久的生态环境效应。不同于其他

水利工程，跨流域调水通常涉及两个或多个流域，对水量输出区域、输水沿线以及受水区域的生态环境影响各异。水量输出区的相关研究集中在调水引起的流量变化对下游区域河道形貌的改变以及对水生生物生境的影响；输水沿线的相关研究集中在基于模型分析原水水质在调水过程中的演变趋势与特征；受水区的相关研究则偏重水量增长对当地生态系统结构和功能的作用以及对地下水时空分布的影响。目前关于跨流域调水的生态环境效应研究依然局限于“点”和“线”的研究，连点成线、聚线成面，从流域角度综合考虑水资源管理和生态环境保护是该领域未来研究的重点与关键。从 2015 年至 2020 年，核心论文篇数为 26，被引频次为 842，篇均被引频次为 32.38。

##### (2) 交通基础设施韧性提升

交通基础设施的韧性是指交通基础设施适应不断变化的外界环境，不断学习和自我调整，抵御各类灾害并快速恢复到正常服役状态，与外界环境的干扰共同进化。交通基础设施的韧性提升被认为是

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  | 跨流域调水的生态环境效应         | 26    | 842   | 32.38  | 2018.2 |
| 2  | 交通基础设施韧性提升           | 29    | 646   | 22.28  | 2017.8 |
| 3  | 低碳长寿命水泥基材料           | 84    | 8 648 | 102.95 | 2017.4 |
| 4  | 碳中和背景下绿色建筑发展路径       | 135   | 5 496 | 40.71  | 2017.7 |
| 5  | 水源地水质污染控制与修复         | 46    | 1 828 | 39.74  | 2016.5 |
| 6  | 面向智慧可持续城市的时空大数据感知方法  | 22    | 987   | 44.86  | 2018.3 |
| 7  | 可恢复功能防震韧性结构体系        | 24    | 1 437 | 59.88  | 2018.1 |
| 8  | 柔性结构的流致振动及减振         | 22    | 567   | 25.77  | 2019.1 |
| 9  | 地理大数据知识图谱构建          | 15    | 414   | 27.60  | 2018.1 |
| 10 | 桥梁结构动力多荷载耦合灾变监测和机理分析 | 71    | 1 634 | 23.01  | 2018.0 |

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               | 2015年 | 2016年 | 2017年 | 2018年 | 2019年 | 2020年 |
|----|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 跨流域调水的生态环境效应         | 3     | 4     | 1     | 4     | 5     | 9     |
| 2  | 交通基础设施韧性提升           | 3     | 3     | 4     | 7     | 10    | 2     |
| 3  | 低碳长寿命水泥基材料           | 13    | 19    | 11    | 18    | 10    | 13    |
| 4  | 碳中和背景下绿色建筑发展路径       | 20    | 14    | 28    | 21    | 30    | 22    |
| 5  | 水源地水质污染控制与修复         | 16    | 10    | 7     | 7     | 5     | 1     |
| 6  | 面向智慧可持续城市的时空大数据感知方法  | 1     | 2     | 2     | 6     | 8     | 3     |
| 7  | 可恢复功能防震韧性结构体系        | 0     | 5     | 3     | 5     | 7     | 4     |
| 8  | 柔性结构的流致振动及减振         | 1     | 0     | 1     | 3     | 6     | 11    |
| 9  | 地理大数据知识图谱构建          | 1     | 1     | 5     | 1     | 3     | 4     |
| 10 | 桥梁结构动力多荷载耦合灾变监测和机理分析 | 6     | 8     | 12    | 15    | 16    | 14    |

应对气候变化严峻挑战的重要举措之一，提升交通基础设施韧性和降低自然灾害等突发事件对人民交通出行的影响程度已成为交通领域的重大课题。主要研究方向包括：① 极端天气条件下交通基础设施恢复能力提升的理论框架；② 交通基础设施网络弹性评估与关键节点分析理论；③ 新型灾害模式下的韧性交通基础设施应急管理策略研究；④ 韧性交通基础设施的低影响建造与智能维养技术。当前发达国家已将基础设施韧性列为应对气候变化的下一代交通系统的重要组成部分，将智能化、低碳化、网络化、抗冲击和快速恢复等特性作为关键指标开展重点研究。从 2015 年至 2020 年，核心论文篇数为 29，被引频次为 646，篇均被引频次为 22.28。

### （3）低碳长寿命水泥基材料

水泥行业碳排放约占中国碳排放总量的 10%，降低水泥生产与使用过程的碳排放是实现碳达峰、碳中和的重要途径。低碳长寿命水泥基材料是指基于低碳化设计理念、满足长寿命服役需求的水泥基材料。当前的主要研究内容包括：① 基于全寿命周期的碳足迹评测方法，实现水泥基材料生产和应用阶段碳排放的实时监控；② 通过减少水泥熟料用量、大掺量矿物掺合料、高效利用再生骨料

等技术降低水泥基材料的碳排放；③ 新型低碳胶凝材料的开发与应用；④ 基于服役性能提升与防护修复的水泥基材料延寿技术；⑤ 混凝土再碳化等二氧化碳利用技术。未来的发展趋势包括：建立水泥基材料全寿命周期的碳足迹评测方法与系统；形成针对水泥行业的高效碳捕获、利用与储存技术；开发以大宗固废材料、再生材料为主要原料的新型低碳胶凝材料，形成成套应用技术；研发低碳水泥基材料耐久性提升技术，延长水泥基材料的服役寿命。从 2015 年至 2020 年，核心论文篇数为 84，被引频次为 8 648，篇均被引频次为 102.95。

### （4）碳中和背景下绿色建筑发展路径

绿色建筑是在全寿命期内节约资源、保护环境、减少污染，为人们提供健康、适用、高效的使用空间，最大限度地实现人与自然和谐共生的建筑。在碳达峰与碳中和目标的推动下，城乡建设领域正积极进行绿色低碳转型，主要研究方向包括：① 双碳目标导向下的绿色建筑设计原理与方法；② 低碳零碳建筑技术及基础设计参数；③ 低碳城乡规划设计原理与方法；④ 既有建筑绿色改造；⑤ 新型绿色建筑材料与构造体系；⑥ 建筑室内外空气品质与物理环境智能控制；⑦ 绿色建筑脱碳能源系统。绿色建筑的发展趋势是在城乡建设领域全面推行新

建绿色建筑的设计、施工与运行管理,对既有建筑进行包括近零/零能耗的绿色性能改造,大幅提升建筑能效、高比例使用可再生能源,尽早实现建设领域碳达峰和碳中和。从2015年至2020年,核心论文篇数为135,被引频次为5 496,篇均被引频次为40.71。

#### (5) 水源地水质污染控制与修复

水源地水质污染控制与修复主要是指水库、湖泊等饮用水水源的水质污染原位控制与修复。由于全球气候变化、极端天气频现和水动力条件改变,水源地水质呈现出年内季节性、年际周期性与差异性变化特点。有效控制高负荷径流污染、富营养化与藻类污染、内源污染等成为全球水源地水质安全保障面临的难题。主要研究方向包括:①水源地气候变化、温室效应等对污染物在气-土-水复合环境中迁移转化的影响机制,暴雨径流污染负荷削减的水动力学调控技术方法;②混合充氧耦合好氧反硝化菌群脱氮、除磷、削减有机物、抑制藻类繁殖的强化生物技术,无机电子供体弥补有机碳源驱动好氧反硝化脱氮机理与体系构建;③强制混合充氧诱导水体持续自然混合改善水质、修复水体生态净化功能作用机制与条件,放线菌致嗅机理与臭味控制技术;④混合充氧提升底层水温与溶解氧控制内源污染和持续修复污染沉积物的作用机理与技术。未来主要发展趋势是融合气候、水文、流域径流污染、水生物与生态学、沉积与地球化学、环境水力学等多学科知识,系统开展水源地水质污染成因与演变规律研究和物理-生物-生态-水动力等综合性控制关键技术研发。从2015年至2020年,核心论文篇数为46,被引频次为1 828,篇均被引频次为39.74。

#### (6) 面向智慧可持续城市的时空大数据感知方法

智慧城市已经超越了技术概念,扩展到以社会和经济可持续增长为目标的智慧可持续城市的概念。面向智慧可持续城市的时空大数据感知方法是

以实现智慧可持续城市为发展目标,通过信息通信技术获取的时空大数据,实现对城市运行综合感知的方法,用于支持城市规划、建设、运维和服务。

主要研究方向包括:①提升智慧可持续城市的减灾、防灾能力,将社交媒体等产生的时空大数据视为实时传感器,用于实时判断洪水、飓风等灾害的影响,进行有效的灾害管理;②提升智慧可持续城市的公共参与,使用时空大数据感知方法实现数字化公众参与,提升社会发展的可持续性;③深度学习等人工智能技术的应用,涉及智慧可持续城市的经济、社会、环境和治理等多个维度,集中关注在城市的能源、环境、健康、土地利用、安全、交通以及城市管理领域。智慧可持续城市目标下的结合人工智能的时空大数据感知方法仍是一个新兴领域,可为智慧可持续城市提升宜居性、生产力、创新力,支持更好的城市规划和城市治理。从2015年至2020年,核心论文篇数为22,被引频次为987,篇均被引频次为44.86。

#### (7) 可恢复功能防震韧性结构体系

传统基于延性设计理念的结构抗震设计方法通常采用主体构件和节点的损伤来达到良好的体系延性,相关设计方法常会导致震后结构损伤和残余变形过大而难以快速恢复正常使用功能。随着防震技术的不断发展,结构抗震设防目标逐渐从防倒塌升级为震后使用功能的快速恢复。可恢复功能防震结构是指应用摇摆、隔震、可更换耗能装置等技术,在遭受地震(设防或罕遇)作用时保持可接受的功能水平、震后不需修复或在部分使用状态下稍加修复即可恢复使用功能的结构,其基本要求是结构体系易于建造和维护,全寿命周期成本效益高。其主要研究方向包括:①摇摆、可更换构件/部件结构等新型结构体系的低损伤设计理论;②新型高性能阻尼器的耗能减震设计;③结构构件、节点及体系的震后韧性评估方法等。未来的主要发展趋势包括:涵盖吊顶、内隔墙、幕墙、设备等非结构体系和结构体系的整个建筑系统的可恢复功能设计

和评估、社区和城市乃至区域的功能可恢复、可恢复功能结构体系与人工智能的交叉融合等。从2015年至2020年，核心论文篇数为24，被引频次为1437，篇均被引频次为59.88。

### （8）柔性结构的流致振动及减振

柔性结构在工程实践中广泛存在，多为圆管形、翼形或钝体截面的细长结构，如海底管道、海洋平台立管、输电线路、高耸结构、大跨径桥梁的主梁及缆索等。柔性结构在风/水流作用下易发生涡振、抖振、颤振和驰振等不同类型的流致振动。由于涉及流体的层/湍流特征、边界层分离、涡脱以及剪切层影响，结构的质量、阻尼、刚度、边界条件，以及二者流固耦合作用，柔性结构的流致振动是高度复杂的非线性问题。此外，上游结构及其振动产生的尾流将影响下游流场，使柔性结构的动力学设计及振动控制更加复杂。相关的主要研究包括：  
① 圆形/非圆形截面的柔性结构的流致振动理论；  
② 基于计算流体力学及结构动力学的流固耦合分析方法；  
③ 柔性结构流致振动的主/被动控制方法。  
未来的发展趋势为：  
① 柔性结构涡振、驰振作用机理及非线性振动能量收集；  
② 多个串联柔性结构的流致振动及减振；  
③ 柔性结构在高雷诺数下的多尺度计算流体力学方法；  
④ 数据驱动的复杂流场特征提取及流固耦合作用分析。从2015年至2020年，核心论文篇数为22，被引频次为567，篇均被引频次为25.77。

### （9）地理大数据知识图谱构建

地理大数据知识图谱是一种利用语义网络对地理概念、实体及其相互关系进行形式化描述的知识系统，能够提供系统的、深层次的结构化地理知识，是地理信息服务向地理知识服务拓展的关键，在地理知识理解、地学问题求解、时空预测决策等方面具有巨大的应用潜力。当前的主要研究内容有：  
① 地理知识表达模型，在一般知识表达的图模式基础上，融合地学知识中复杂的时空特征、计算属性及地学知识关系与规则，构建跨时空维度的

地学知识图谱表达模型；  
② 地学知识图谱构建方法，包括群智协同地学知识图谱构建和基于深度解析的多模态地学数据动态知识图谱构建；  
③ 地理知识推理，从地理知识图谱中的实体概念间关系出发，经过计算机推理，建立地理实体间的新关联，理解地学知识体系演化特征，发现地学新知识。从2015年至2020年，核心论文篇数为15，被引频次为414，篇均被引频次为27.60。

### （10）桥梁结构动力多荷载耦合灾变监测和机理分析

桥梁运营过程中受到包括环境风、地脉动、车流、船撞、河流冲刷、泥石流、温度等多种荷载的作用，这些荷载的联合作用会引发桥梁结构发生丰富的动力灾变现象。观测和认识这些灾变行为不但具有实践指导意义而且具有科学价值。近年来的相关研究从单一荷载向多种荷载组合作用发展，主要研究方向包括：  
① 大跨长桥的风车桥耦合振动响应分析和观测；  
② 考虑桥墩冲刷后拱式桥和梁式桥的抗震和船撞安全性分析；  
③ 考虑突发地震下高速铁路桥梁行车脱轨安全性和驾乘舒适性分析和监测；  
④ 考虑温度荷载的热带亚热带刚构桥抗震风险分析；  
⑤ 洪水泥石流下山桥梁的抗震动力安全性分析。今后的发展趋势是针对在役桥梁监测系统动力灾变涌现现象，认识结构灾变行为的发生机理、相变特征和诱发因素，为桥梁结构的全寿命性能调控和管养维护提供理论指导。从2015年至2020年，核心论文篇数为71，被引频次为1634，篇均被引频次为23.01。

## 1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 跨流域调水的生态环境效应

全球气候变化增加水资源时空分布不确定性，跨流域调水通过在两个或多个流域系统之间调剂水量余缺，有效解决产水和用水需求异地性矛盾，是优化水资源配置的重要工程措施之一，在全球取水



和供水系统中扮演日益重要的角色。但与此同时，此类工程调水距离长、调水规模大，对水量输出流域、输水沿线及受水流域生态环境影响各异，生态环境效应具有复杂性、综合性和滞后性的特点。

当前，该前沿的主要研究方向有：

1) 水源区、输水区和受水区水文情势对水资源重新分配的响应及其影响，包括：① 调水引起的流量变化对河道形貌的改变及对水生生物生境的影响；② 水源区水量减少对下游区域水情的改变及引发的生态环境问题；③ 水资源重新分配对输水沿线和受水区地下水时空分布及化学特征的影响。

2) 跨流域调水对水源区、输水区和受水区水生生态系统生物多样性的影响，包括：① 水量和生境变化对当地生态系统结构和功能的作用效果与机制；② 调水引起的物种跨生物地理屏障迁移与入侵现象。

3) 原水水质在跨流域调水过程中的演变趋势与特征，包括：① 基于水质-水量模型对原水长距离输送过程中水质演变特征的模拟及预测；② 关键污染物在输送过程中的迁移转化规律与机理；③ 引调水对受水区水体营养盐结构的影响及其生态效应。

“跨流域调水的生态环境效应”的核心论文共 26 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引频次为 32.38。核心论文产出排名前五的国家分别为中国、美国、英国、澳大利亚和伊朗（见表 1.2.1），其中中国发表论文占比为 42.31%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前五的国家为老挝、新西兰、新加坡、泰国和美国，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 33.55，略高于平均水平。从排名前十的核心论文产出国家合作网络（见图 1.2.1）来看，论文数量排名前十的国家之间有较为密切的合作关系。

核心论文产出排名前五的机构分别为中国科学院、武汉大学、中国水利水电科学研究院、牛津大学和西安理工大学（见表 1.2.2）。中国科学院的前沿方向是调水过程中污染物的迁移转化规律与特征；武汉大学的前沿方向是调水引起的水质水量变化趋势预测与模拟；中国水利水电科学研究院的前沿方向是水资源供给与河流生态系统保护间的冲突与平衡。从排名前十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五的国家分别为中国、美国、印度、英国和澳大利亚（见表 1.2.3），施引

表 1.2.1 “跨流域调水的生态环境效应”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   | 11    | 42.31% | 369  | 33.55  | 2018.5 |
| 2  | 美国   | 8     | 30.77% | 327  | 40.88  | 2017.9 |
| 3  | 英国   | 4     | 15.38% | 91   | 22.75  | 2018.5 |
| 4  | 澳大利亚 | 3     | 11.54% | 117  | 39.00  | 2017.3 |
| 5  | 伊朗   | 2     | 7.69%  | 63   | 31.50  | 2017.5 |
| 6  | 加拿大  | 2     | 7.69%  | 21   | 10.50  | 2020.0 |
| 7  | 老挝   | 1     | 3.85%  | 95   | 95.00  | 2019.0 |
| 8  | 新西兰  | 1     | 3.85%  | 95   | 95.00  | 2019.0 |
| 9  | 新加坡  | 1     | 3.85%  | 95   | 95.00  | 2019.0 |
| 10 | 泰国   | 1     | 3.85%  | 95   | 95.00  | 2019.0 |

表 1.2.2 “跨流域调水的生态环境效应”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       | 4     | 15.38% | 94   | 23.50  | 2019.2 |
| 2  | 武汉大学        | 3     | 11.54% | 87   | 29.00  | 2016.3 |
| 3  | 中国水利水电科学研究院 | 3     | 11.54% | 65   | 21.67  | 2019.3 |
| 4  | 牛津大学        | 2     | 7.69%  | 55   | 27.50  | 2018.0 |
| 5  | 西安理工大学      | 2     | 7.69%  | 46   | 23.00  | 2019.5 |
| 6  | 长安大学        | 1     | 3.85%  | 111  | 111.00 | 2019.0 |
| 7  | 国际水资源管理研究所  | 1     | 3.85%  | 95   | 95.00  | 2019.0 |
| 8  | 新加坡科技设计大学   | 1     | 3.85%  | 95   | 95.00  | 2019.0 |
| 9  | 斯德哥尔摩环境研究所  | 1     | 3.85%  | 95   | 95.00  | 2019.0 |
| 10 | 越南水利大学      | 1     | 3.85%  | 95   | 95.00  | 2019.0 |

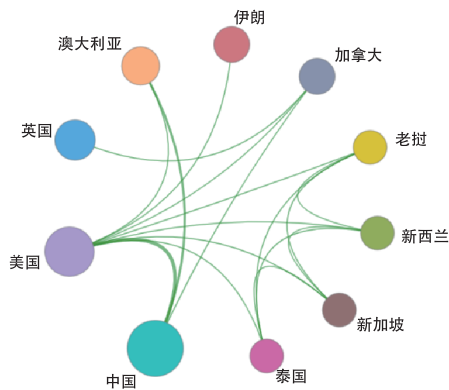


图 1.2.1 “跨流域调水的生态环境效应”工程研究前沿主要国家的合作网络

核心论文产出前五的机构分别为中国科学院、长安大学、河海大学、武汉大学和中国水利水电科学研究院（见表 1.2.4）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出排名前五的国家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一，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“跨流域调水的生态环境效应”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。

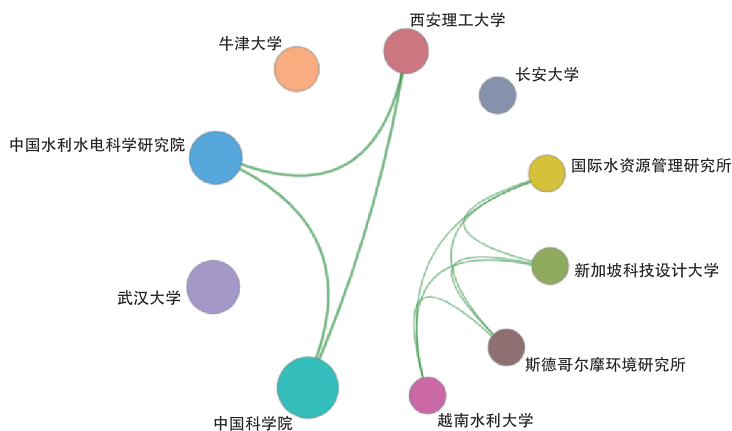


图 1.2.2 “跨流域调水的生态环境效应”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “跨流域调水的生态环境效应”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   | 377     | 38.59%   | 2019.6 |
| 2  | 美国   | 174     | 17.81%   | 2019.4 |
| 3  | 印度   | 84      | 8.60%    | 2019.8 |
| 4  | 英国   | 75      | 7.68%    | 2019.8 |
| 5  | 澳大利亚 | 65      | 6.65%    | 2019.1 |
| 6  | 伊朗   | 48      | 4.91%    | 2019.6 |
| 7  | 德国   | 35      | 3.58%    | 2019.2 |
| 8  | 巴西   | 33      | 3.38%    | 2019.6 |
| 9  | 荷兰   | 31      | 3.17%    | 2020.0 |
| 10 | 西班牙  | 29      | 2.97%    | 2019.6 |

表 1.2.4 “跨流域调水的生态环境效应”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       | 85      | 23.48%   | 2019.6 |
| 2  | 长安大学        | 54      | 14.92%   | 2019.7 |
| 3  | 河海大学        | 32      | 8.84%    | 2019.7 |
| 4  | 武汉大学        | 28      | 7.73%    | 2019.3 |
| 5  | 中国水利水电科学研究院 | 28      | 7.73%    | 2019.5 |
| 6  | 西安理工大学      | 25      | 6.91%    | 2019.8 |
| 7  | 密歇根州立大学     | 25      | 6.91%    | 2018.8 |
| 8  | 牛津大学        | 25      | 6.91%    | 2019.4 |
| 9  | 北京师范大学      | 23      | 6.35%    | 2018.9 |
| 10 | 墨尔本大学       | 21      | 5.80%    | 2018.7 |

### 1.2.2 交通基础设施韧性提升

交通基础设施是城市运行的骨架和基础。提升交通基础设施韧性能够避免昂贵的维修费用，也可以显著降低自然灾害对人民生活 and 福祉的影响程度。当前国内外的研究者已将交通韧性作为城市韧性的重要组成部分，提出韧性交通基础设施的四个主要特性，即抵抗力、可靠性、冗余性和恢复力。研究从单一交通设施的韧性设计逐步拓展到交通设施的网络韧性评估和系统性分析。

主要研究方向包括：

1) 极端气候条件下交通基础设施韧性提升的

理论框架。量化评估气候变化和自然灾害对不同区域交通基础设施的影响，开发交通基础设施灾害预警系统，建立突发自然灾害下的疏散模型以及经济损失预估模型。

2) 交通基础设施网络韧性评估与关键节点分析理论。交通基础设施网络互联，单个交通资产无法对所有风险保持韧性。研究构建交通基础设施网络关键性和复杂性的评估模型，优化应急条件下的网络恢复策略，提出多目标下的网络决策支持系统。

3) 新型灾害模式下的交通基础设施韧性。自动驾驶、无人机、车路协同等智能交通系统的广泛

应用和城市网络化连接日益紧密，网络攻击、恐怖袭击、传染病蔓延等新型灾害模式不可忽略。基于多源信息融合技术，开展交通基础设施信息层的多层次韧性分析，研究智能交通系统在灾前预测、灾害响应和灾后救援中的应用方法。

4) 交通基础设施的用户韧性。从政策层面，搭建基础设施灾前和灾后风险管理决策支持框架，建立交通基础设施灾前投资决策模型。从使用者层面，开发低影响智能建造技术和智能维养技术，构建自适应和自修复交通基础设施。

“交通基础设施韧性提升”的核心论文共 29 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引频次为 22.28。核心论文产出排名前五的国家分别为美国、中国、英国、哥伦比亚和希腊（见表 1.2.5），其中中国发表论文占比为 20.69%，是该前沿的最主要研究国家之一。篇均被引频次排名前五的国家分别为沙特阿拉伯、美国、英国、马来西亚和中国，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 16.00，说明中国学者在该前沿的研究工作也逐步受到了关注。从排名前十的核心论文产出国家合作网络（见图 1.2.3）来看，中国和美国的合作相对频繁。

核心论文产出排名前五的机构分别为伊利诺伊大学、上海交通大学、俄克拉荷马大学、马里兰大

学和香港理工大学（见表 1.2.6）。近年来，伊利诺伊大学和上海交通大学的前沿科学领域主要是交通基础设施的脆弱性和恢复能力评价。从排名前十的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.4）来看，机构之间的合作较为稀疏。

施引核心论文产出前五的国家分别为美国、中国、英国、伊朗和加拿大（见表 1.2.7），施引核心论文产出前五的机构分别为代尔夫特理工大学、香港理工大学、伊利诺伊大学、清华大学和德黑兰大学（见表 1.2.8）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出排名前五的国家的施引核心论文数也比较多。

综合以上统计数据，在“交通基础设施韧性提升”研究前沿，中国学者发表论文数和施引论文数均排名第二，说明中国学者对该领域前沿动态保持比较密切的跟踪，但国际合作较少。

### 1.2.3 低碳长寿命水泥基材料

水泥混凝土是世界上用量最大的人工材料，中国水泥用量占全球产量的近 60%，其 CO<sub>2</sub> 排放量约占中国排放总量的 10%，因此降低水泥生产与应用过程的碳排放是实现碳达峰和碳中和的重要途径。水泥生产的过程碳排放主要来自生产过程中

表 1.2.5 “交通基础设施韧性提升”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    | 16    | 55.17% | 489  | 30.56  | 2017.5 |
| 2  | 中国    | 6     | 20.69% | 96   | 16.00  | 2017.2 |
| 3  | 英国    | 2     | 6.90%  | 37   | 18.50  | 2017.0 |
| 4  | 哥伦比亚  | 2     | 6.90%  | 24   | 12.00  | 2019.0 |
| 5  | 希腊    | 2     | 6.90%  | 17   | 8.50   | 2017.0 |
| 6  | 沙特阿拉伯 | 1     | 3.45%  | 32   | 32.00  | 2015.0 |
| 7  | 马来西亚  | 1     | 3.45%  | 18   | 18.00  | 2019.0 |
| 8  | 法国    | 1     | 3.45%  | 11   | 11.00  | 2019.0 |
| 9  | 荷兰    | 1     | 3.45%  | 11   | 11.00  | 2019.0 |
| 10 | 挪威    | 1     | 3.45%  | 11   | 11.00  | 2019.0 |



表 1.2.6 “交通基础设施韧性提升”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  | 伊利诺伊大学  | 2     | 6.90% | 101  | 50.50  | 2017.5 |
| 2  | 上海交通大学  | 2     | 6.90% | 34   | 17.00  | 2017.0 |
| 3  | 俄克拉荷马大学 | 1     | 3.45% | 123  | 123.00 | 2016.0 |
| 4  | 马里兰大学   | 1     | 3.45% | 117  | 117.00 | 2015.0 |
| 5  | 香港理工大学  | 1     | 3.45% | 32   | 32.00  | 2015.0 |
| 6  | 沙特国王大学  | 1     | 3.45% | 32   | 32.00  | 2015.0 |
| 7  | 密苏里科技大学 | 1     | 3.45% | 32   | 32.00  | 2015.0 |
| 8  | 堪萨斯大学   | 1     | 3.45% | 32   | 32.00  | 2015.0 |
| 9  | 兰卡斯特大学  | 1     | 3.45% | 32   | 32.00  | 2015.0 |
| 10 | 华盛顿大学   | 1     | 3.45% | 24   | 24.00  | 2015.0 |

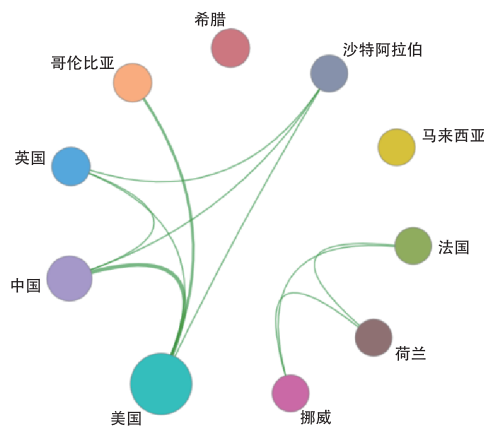


图 1.2.3 “交通基础设施韧性提升”工程研究前沿主要国家间的合作网络

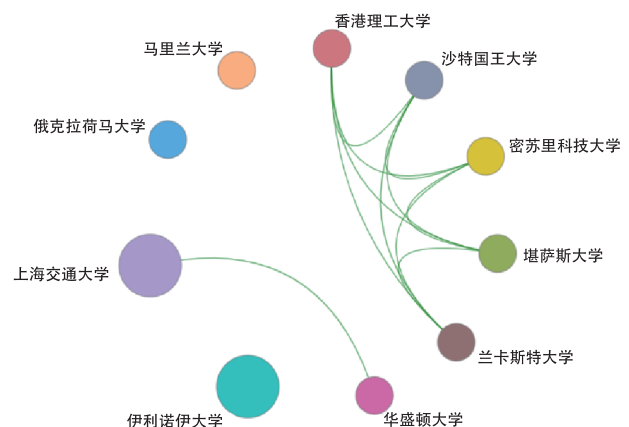


图 1.2.4 “交通基础设施韧性提升”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “交通基础设施韧性提升”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   | 210     | 32.71%   | 2019.3 |
| 2  | 中国   | 187     | 29.13%   | 2019.5 |
| 3  | 英国   | 51      | 7.94%    | 2019.3 |
| 4  | 伊朗   | 31      | 4.83%    | 2019.0 |
| 5  | 加拿大  | 30      | 4.67%    | 2019.7 |
| 6  | 澳大利亚 | 24      | 3.74%    | 2019.4 |
| 7  | 法国   | 23      | 3.58%    | 2019.2 |
| 8  | 意大利  | 23      | 3.58%    | 2019.2 |
| 9  | 印度   | 22      | 3.43%    | 2019.3 |
| 10 | 韩国   | 22      | 3.43%    | 2019.7 |

表 1.2.8 “交通基础设施韧性提升”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  | 代尔夫特理工大学 | 14      | 12.50%   | 2019.7 |
| 2  | 香港理工大学   | 14      | 12.50%   | 2019.6 |
| 3  | 伊利诺伊大学   | 11      | 9.82%    | 2019.6 |
| 4  | 清华大学     | 10      | 8.93%    | 2020.1 |
| 5  | 德黑兰大学    | 10      | 8.93%    | 2019.4 |
| 6  | 同济大学     | 10      | 8.93%    | 2020.3 |
| 7  | 大连海事大学   | 9       | 8.04%    | 2020.8 |
| 8  | 华中科技大学   | 9       | 8.04%    | 2019.4 |
| 9  | 北京交通大学   | 9       | 8.04%    | 2020.7 |
| 10 | 浙江大学     | 8       | 7.14%    | 2020.0 |

的燃煤消耗产生 CO<sub>2</sub> 以及石灰石原料分解产生的 CO<sub>2</sub>。目前，窑炉筒体保温、余热回收利用、协同资源处置等系列节能减排技术已经在水泥行业得到了大规模普及利用，单纯依靠工艺技术及装备水平改造实现进一步节能减排的空间有限。因此需基于低碳化设计理念，突破传统水泥的制备与使用理念，研发原料来源广泛、绿色环保且能满足长寿命服役的新型低碳长寿命水泥基材料。

低碳长寿命水泥基材料的主要研究方向包括：

1) 水泥混凝土全寿命服役周期的碳足迹评测方法，全面分析水泥基材料生产和应用阶段的碳排放情况，形成环保、节能、减碳和成本等多维分析模型。

2) 水泥基材料低碳化利用技术，通过使用大掺量矿物掺合料来减少水泥中熟料用量，利用废弃混凝土制备再生骨料，提高混凝土的力学性能减少构件尺寸与混凝土用量等手段来降低现有水泥混凝土的碳排放。

3) 新型低碳胶凝材料的开发与应用，充分利用尾矿、冶金矿渣、建筑垃圾等大宗固废材料，通过多元活化技术，开发包括煅烧高岭土尾矿-石灰石复合胶凝体系、碱激发胶凝材料等在内的新型低碳胶凝材料体系。

4) 基于服役性能提升与防护修复的水泥基材料延寿技术，通过提升水泥基材料的耐久性能，并采用系统防护修复技术，延长混凝土构筑物的服役寿命，减少全寿命周期内水泥的消耗量。

5) 混凝土再碳化技术与碳捕获、利用与储存技术，包括通过既有建筑结构中混凝土的再碳化行为来吸收空气中二氧化碳，以及通过化学吸收、吸附、富氧燃烧等方式捕获水泥生产过程中产生的二氧化碳，通过地质封存、海洋封存等形式进行长期存储或直接用于含碳化硬化胶凝材料混凝土制品的制备与养护中。

“低碳长寿命水泥基材料”的核心论文 84 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引频次为 102.95。核心论文产出排名前五的国家分别为中国、英国、澳大利亚、印度和美国（见表 1.2.9），其中中国发表论文占比为 35.71%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前五的国家分别为英国、印度、美国、巴西和中国，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 99.10，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。从排名前十的核心论文产出国家合作网络（见图 1.2.5）来看，国际有较为密切的合作关系，中国和澳大利亚之间的合作相对频繁。

核心论文产出排名前五的机构分别为湖南大学、香港理工大学、同济大学、马来西亚理工大学和谢菲尔德大学（见表 1.2.10）。湖南大学前沿领域集中在新型低碳胶凝材料的开发与利用，尤其是在地聚合物方向成果显著；香港理工大学和同济大学的前沿领域主要集中在再生骨料的处理与利用，以及水泥混凝土全生命服役周期的碳足迹评测方法。从排名前十的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.6）来看，除马来西亚理工大学、西悉尼大学和里斯本大学外，其他机构之间合作相对频繁。

施引核心论文产出前五的国家分别为中国、美

国、澳大利亚、印度和英国（见表 1.2.11），施引核心论文产出前五的机构分别为同济大学、武汉理工大学、香港理工大学、湖南大学和深圳大学（见表 1.2.12）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出排名前五的国家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一，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“低碳长寿命水泥基材料”研究前沿，与国外同行相比，中国学者逐步发展到领先地位。

表 1.2.9 “低碳长寿命水泥基材料”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  | 中国   | 30    | 35.71% | 2 973 | 99.10  | 2017.5 |
| 2  | 英国   | 12    | 14.29% | 2 130 | 177.50 | 2017.2 |
| 3  | 澳大利亚 | 11    | 13.10% | 1 073 | 97.55  | 2016.5 |
| 4  | 印度   | 7     | 8.33%  | 1 159 | 165.57 | 2017.3 |
| 5  | 美国   | 7     | 8.33%  | 1 120 | 160.00 | 2016.7 |
| 6  | 加拿大  | 6     | 7.14%  | 425   | 70.83  | 2017.5 |
| 7  | 马来西亚 | 6     | 7.14%  | 291   | 48.50  | 2018.5 |
| 8  | 巴西   | 5     | 5.95%  | 749   | 149.80 | 2017.4 |
| 9  | 韩国   | 4     | 4.76%  | 383   | 95.75  | 2016.5 |
| 10 | 葡萄牙  | 4     | 4.76%  | 382   | 95.50  | 2016.8 |

表 1.2.10 “低碳长寿命水泥基材料”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  | 湖南大学            | 9     | 10.71% | 1 339 | 148.78 | 2016.8 |
| 2  | 香港理工大学          | 6     | 7.14%  | 573   | 95.50  | 2015.8 |
| 3  | 同济大学            | 5     | 5.95%  | 269   | 53.80  | 2018.2 |
| 4  | 马来西亚理工大学        | 5     | 5.95%  | 259   | 51.80  | 2018.4 |
| 5  | 谢菲尔德大学          | 4     | 4.76%  | 941   | 235.25 | 2017.2 |
| 6  | 里斯本大学           | 4     | 4.76%  | 382   | 95.50  | 2016.8 |
| 7  | 中南林业科技大学        | 3     | 3.57%  | 473   | 157.67 | 2015.3 |
| 8  | 深圳和华国际工程与设计有限公司 | 3     | 3.57%  | 473   | 157.67 | 2015.3 |
| 9  | 西悉尼大学           | 3     | 3.57%  | 285   | 95.00  | 2017.7 |
| 10 | 香港科技大学          | 3     | 3.57%  | 259   | 86.33  | 2017.0 |

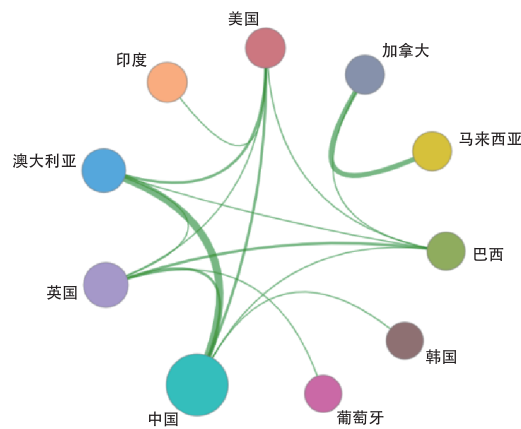


图 1.2.5 “低碳长寿命水泥基材料”工程研究前沿主要国家间的合作网络

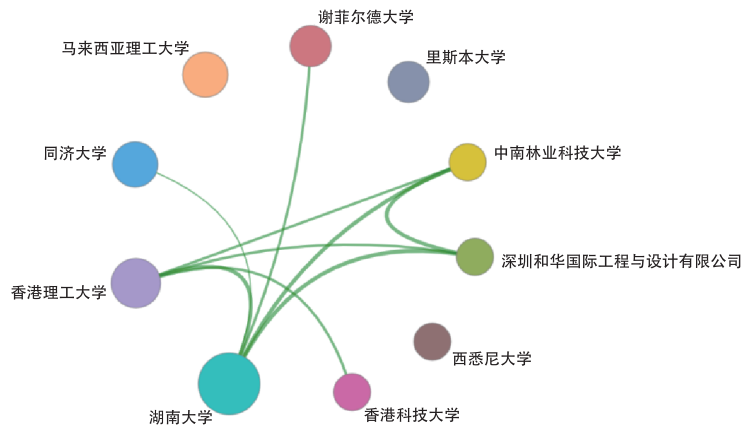


图 1.2.6 “低碳长寿命水泥基材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “低碳长寿命水泥基材料”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   | 1 896   | 37.23%   | 2019.5 |
| 2  | 美国   | 564     | 11.08%   | 2019.4 |
| 3  | 澳大利亚 | 468     | 9.19%    | 2019.3 |
| 4  | 印度   | 431     | 8.46%    | 2019.5 |
| 5  | 英国   | 327     | 6.42%    | 2019.2 |
| 6  | 西班牙  | 284     | 5.58%    | 2019.3 |
| 7  | 马来西亚 | 252     | 4.95%    | 2019.2 |
| 8  | 巴西   | 250     | 4.91%    | 2019.4 |
| 9  | 韩国   | 209     | 4.10%    | 2019.2 |
| 10 | 意大利  | 206     | 4.05%    | 2019.2 |



表 1.2.12 “低碳长寿命水泥基材料”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  | 同济大学     | 141     | 13.61%   | 2019.7 |
| 2  | 武汉理工大学   | 120     | 11.58%   | 2019.3 |
| 3  | 香港理工大学   | 114     | 11.00%   | 2019.3 |
| 4  | 湖南大学     | 106     | 10.23%   | 2019.1 |
| 5  | 深圳大学     | 103     | 9.94%    | 2019.8 |
| 6  | 东南大学     | 96      | 9.27%    | 2019.1 |
| 7  | 里斯本大学    | 91      | 8.78%    | 2019.2 |
| 8  | 哈尔滨工业大学  | 77      | 7.43%    | 2019.6 |
| 9  | 马来西亚理工大学 | 65      | 6.27%    | 2019.2 |
| 10 | 西安建筑科技大学 | 62      | 5.98%    | 2019.6 |

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

土木、水利与建筑工程领域的 Top 10 工程开发前沿及统计数据见表 2.1.1，涉及结构工程、市政工程、测绘工程、交通工程、土木建筑材料、岩土及地下工程、城乡规划与风景园林、水利工程等学科方向。其中，“村镇智能化一体式污水处理装置”“时速 600 km/h 以上高速磁浮基础设施建造技术”“多重灾害下水工结构安全保障技术”“复杂交通网络韧性监测、评估与优化技术”是专家提名前沿或者基于数据挖掘前沿凝练而成的前沿，其他是数据挖掘前沿。各个前沿所涉及的专利自 2015 年至 2020 年的逐年公开量见表 2.1.2。

#### (1) 建筑结构智能建造技术

建筑工程智能建造技术是指新一代信息技术与建筑工程建造相融合而形成的建造创新技术，即利用以“三化”（数字化、网络化和智能化）和“三算”（算据、算法和算力）为特征的信息技术，在实现工程建造要素资源数字化的基础上，通过规范化建模、网络化交互、可视化认知、高性能计算以及智能化决策支持等技术，实现数字链驱动下的建筑工程立项策划、规划设计、施工生产、运维服务、循

环消纳的一体化集成与高效率协同，不断拓展建筑工程建造价值链、改造产业结构生态链，向用户交付以人为本和绿色可持续的智能化建筑工程产品与服务。其主要技术方向包括：① 建筑工程数字建模和仿真交互技术；② 建筑工程泛在感知与宽带物联技术；③ 建筑工程工厂制造和机器施工技术；④ 建筑工程人工智能与辅助决策技术；⑤ 建筑工程绿色低碳和生态环保关键技术。目前智能建造技术已成为建筑工程技术发展的大势所趋，发展重点是充分挖掘和广泛利用以大数据智能、人机混合增强智能、类脑智能等为代表的人工智能技术在主动感知、自主学习、分析推理和知识应用方面的独特优势，推动建筑工程的传统建造向智能建造加速转变。从 2015 年至 2020 年，专利公开量为 107，引用量为 625，平均被引数为 5.84。

#### (2) 村镇智能化一体式污水处理装置

村镇智能化一体式污水处理装置是指适用于小规模分散式生活污水处理且可对工艺智能监控的一体式装置，是实现广大农村地区生活污水的广泛收集、分散高效处理和集中集约管理的有效途径。主要技术方向包括：① 重力势能、风能、太阳能驱动的村镇一体化污水处理装置，生物生态耦合的污水净化及回用技术和组合工艺；② 基

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 | 引用量   | 平均被引数 | 平均公开年  |
|----|----------------------------|-----|-------|-------|--------|
| 1  | 建筑结构智能建造技术                 | 107 | 625   | 5.84  | 2018.3 |
| 2  | 村镇智能化一体式污水处理装置             | 82  | 106   | 1.29  | 2017.7 |
| 3  | 室内外一体化高精度定位导航系统            | 85  | 425   | 5.00  | 2017.8 |
| 4  | 时速 600 km/h 以上高速磁浮基础设施建造技术 | 54  | 17    | 0.31  | 2019.4 |
| 5  | 固体废物在土木工程中高效资源化应用技术        | 339 | 598   | 1.76  | 2018.2 |
| 6  | 地下空间工程工业化建造技术              | 132 | 234   | 1.77  | 2017.4 |
| 7  | 全域全要素的数字孪生城市感知和仿真技术        | 137 | 371   | 2.71  | 2018.8 |
| 8  | 多重灾害下水工结构安全保障技术            | 24  | 75    | 3.13  | 2017.3 |
| 9  | 复杂交通网络韧性监测、评估与优化技术         | 274 | 1 599 | 5.84  | 2017.3 |
| 10 | 混凝土裂缝智能感知与生物修复技术           | 88  | 1 419 | 16.13 | 2016.6 |

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

| 序号 | 前沿名称                       | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 | 2019 年 | 2020 年 |
|----|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 建筑结构智能建造技术                 | 12     | 7      | 15     | 23     | 32     | 18     |
| 2  | 村镇智能化一体式污水处理装置             | 3      | 7      | 21     | 28     | 14     | 8      |
| 3  | 室内外一体化高精度定位导航系统            | 11     | 8      | 15     | 14     | 15     | 20     |
| 4  | 时速 600 km/h 以上高速磁浮基础设施建造技术 | 0      | 0      | 3      | 3      | 17     | 31     |
| 5  | 固体废物在土木工程中高效资源化应用技术        | 20     | 34     | 34     | 54     | 79     | 107    |
| 6  | 地下空间工程工业化建造技术              | 9      | 23     | 35     | 28     | 14     | 17     |
| 7  | 全域全要素的数字孪生城市感知和仿真技术        | 3      | 5      | 8      | 24     | 44     | 52     |
| 8  | 多重灾害下水工结构安全保障技术            | 7      | 0      | 0      | 5      | 8      | 2      |
| 9  | 复杂交通网络韧性监测、评估与优化技术         | 25     | 32     | 35     | 35     | 58     | 53     |
| 10 | 混凝土裂缝智能感知与生物修复技术           | 24     | 23     | 14     | 19     | 8      | 0      |

于光学和电学的廉价可靠的水质在线智能传感器和远程数据传输及控制系统；③ 基于活性污泥数学模型耦合人工智能深度学习算法的污水工艺运行状态诊断和预测预警模型；④ “无人值守—云诊断—云预警—机动维护”的污水处理装置智能维护模式。未来的发展趋势是融合水污染控制工程、微生物学、仪器科学、人工智能、物联网等多学科知识，研发低耗高效易维护云管理的村镇智能化一体式污水处理装置及运行和管理模式。从 2015 年至 2020 年，专利公开量为 82，引用量为 106，平均被引数为 1.29。

### （3）室内外一体化高精度定位导航系统

室内外一体化高精度定位导航系统将支持室外场景的技术手段和支持室内场景的技术手段集成于同一个终端，为用户提供室内外位置信息服务。它是测绘工程领域的开发前沿之一，在仓储物流、智慧养老、特种医院、智慧工厂、社区矫正、商场管理等场景中有广泛的应用需求。当前的主要技术方向包括：① 室内外组合定位技术，实现不同空间场景下的一体化无缝高精度定位；② 多传感器信息融合技术，通过融合惯性测量设备、卫星导航设备、磁传感器、视觉设备等多传感器定位信息，提

高室内外定位精度；③ 低功耗定位信号发送与接收装置，通过低功率广域网络（LPWAN）技术实现定位和通信信号的低功耗传输，提高定位导航系统的续航及待机时间。从 2015 年至 2020 年，专利公开量为 85，引用量为 425，平均被引数为 5.00。

#### （4）时速 600 km/h 以上高速磁浮基础设施建造技术

高速磁浮基础设施建造技术用于确保时速 600 km/h 以上高速磁浮交通系统安全稳定运行，涉及基础设施设计、施工和养护维修等多个方面。目前，时速 600 km/h 以上的高速磁浮列车已经下线，但满足工程化要求的中长距离线路基础设施建造技术尚不成熟，直接制约着高速磁浮交通技术的发展，需从基础理论和试验验证两方面开展系统研究。高速磁浮列车与基础设施耦合作用机制是基础设施建造技术的基础理论支撑，涉及结构动力学、电磁控制理论、超导电动磁力作用等多个学科领域。此外，高速磁浮基础设施还面临环境复杂、安全风险大等严峻挑战，而传统轮轨交通基础设施相应的配套技术很难满足要求。主要技术方向包括：① 高速磁浮列车—基础设施耦合动力学理论；② 高速磁浮列车基础设施综合试验平台；③ 复杂服役环境下高速磁浮基础设施结构及材料服役性能演化机理及应对措施；④ 高速磁浮基础设施智能动态检测方法及其养护维修技术。未来主要发展趋势为基础设施建造关键技术中长线工程化验证、高速磁浮列车基础设施长期服役性能及演化规律、基础设施性能智能化检测及监测技术等。从 2015 年到 2020 年，专利公开量为 54，引用量为 17，平均被引数为 0.31。

#### （5）固体废物在土木工程中高效资源化应用技术

固体废物（简称固废）指各类生产活动中丧失原有利用价值的固态废物。钢铁、煤炭、有色、化工、建筑、采矿、农业、垃圾处置等行业产生的各类废弃物都可以用于制备建材产品，实现高效资源化利用。这类技术既有助于固体废弃物的无害化处置，也能够减少土木工程领域对于各类资源的消

耗，是实现循环经济与可持续发展的重要途径。根据固体废弃物的理化性质，其在土木工程中的资源化利用途径大致可分为：① 硅铝质固体废物，可作为混凝土掺和料、水泥混合材、水泥烧成替代原料（生料），也可用于制备碱激发材料等新型胶凝材料；② 硫酸钙质固体废物，可用于配制水泥，或制备建筑板材、砂浆；③ 淤泥、渣土、尾矿等低钙、惰性固体废物，可用于路基回填或制备砌体材料；④ 混凝土废弃物或其他块状固体废物，可作为混凝土骨料；⑤ 植物纤维质固体废物，可用于制造建筑板材。从固废处置的角度，这类技术的发展方向主要在于提高固废的处置效率与产品的环境安全性，其中的热点问题有：提高低活性固废的化学活性、开发新的资源化利用方法、在资源化利用过程中实现固废中有害成分的无害化等。而从水泥、混凝土及建筑行业的角度，这类技术中的关键问题包括：建立有效的理论实现材料的高性能化、在行业内部实现高品质资源的优化配置等。从 2015 年至 2020 年，专利公开量为 339，引用量为 598，平均被引数为 1.76。

#### （6）地下空间工程工业化建造技术

建筑工业化是以构件预制化生产、装配式施工为生产方式，以设计标准化、构件部品化、施工机械化、管理信息化为特征，实现建筑产品节能、环保、全生命周期价值最大化的可持续发展的新型建筑生产方式。随着地下空间开发需求日增和装配式建筑技术发展，地下空间工程工业化成为建筑工业化的重要组成部分，从传统盾构区间隧道推广到整体装配式地铁车站、装配式综合管廊、装配式竖井停车库等更加复杂的多功能地下结构体系。主要技术方向包括：① 复杂地下结构体系构件的标准化和系列化；② 适应复杂地下建造条件的预制地下结构体系施工技术和智能装备；③ 抵御极端灾害的预制地下结构体系韧性提升；④ 适应预制装配式地下结构防水、抗震新材料研发；⑤ 支撑地下空间工程产业化的信息技术；⑥ 地下建造环境的

透明化技术和地下工程精细分析方法。该技术将走向更为复杂的大空间地下工程应用。从2015年至2020年，专利公开量为132，引用量为234，平均被引数为1.77。

### (7) 全域全要素的数字孪生城市感知和仿真技术

基于复杂综合技术体系构建的城市数字孪生体是信息维度上的虚拟城市，是与实体城市共同生存、虚实交融的城市未来发展形态，是以数据驱动治理的线上、线下互促的城市智能化运行模式。其主要特征是城市全要素数字化与虚拟化、全状态实时化与可视化、城市运行管理协同化与智能化，覆盖全域、全要素的感知、检测、预警、仿真、计算与决策体系。空间上，数字孪生城市技术的发展方向是国家-区域-城市-社区-建筑全域覆盖，要素上，从物理建筑要素感知与仿真扩展至自然气象、经济社会、农业生态等全要素。以智慧城市建设和城市信息模型(CIM)、城市与社区中枢大脑等应用，配合物联网、边缘计算、深度学习、主动感知分析技术等是目前全域全要素数字孪生的关键技术。主要技术方向包括：①以人为本理念价值导向下，利用多源大数据精准预测人口与活动特征，打造智能便捷的数字化公共服务体系，构建充满活力的数字生活服务生态；②服务现代治理，通过数据赋能，推动城市管理精细化、智能化和高质量发展；③维护城市韧性安全，通过多源一体化智能感知技术，实现各元系统三维拓扑和物理信息的全域感知和全域透明，通过分布式、多层级的城市数字孪生模型，开展全生命周期数字化，提升城市防灾减灾安全管理水平。从2015年至2020年，专利公开量为137，引用量为371，平均被引数为2.71。

### (8) 多重灾害下水工结构安全保障技术

水工结构运全生命周期过程中可能遭遇极端降雨、强震等多种重大自然灾害，进而引发河道巨型滑坡、泥石流等次生地质灾害，导致库区涌浪、

堰塞坝溃决洪水等，造成多种致灾因子叠加，严重影响工程安全，可能诱发流域尺度的系统性风险，危及梯级水库群。多重灾害下水工结构安全保障技术旨在针对地震活跃、地质灾害和气象灾害高发地区，提升水工结构应对多重灾害的能力，降低系统风险。主要技术方向包括：①地震-地质-洪水灾害连锁效应的时空特点和评价方法；②巨灾风险评估与防控技术及方法；③考虑超标准洪水、强震、特大地质灾害叠加效应的场景数值模拟技术和风险推演方法；④流域水工程群多维安全调控和风险调度平台。从2015年至2020年，专利公开量为24，引用量为75，平均被引数为3.13。

### (9) 复杂交通网络韧性监测、评估与优化技术

韧性表征系统对内外部风险的抵御、吸收、自适应和恢复等全周期的应对能力。交通系统是城市运行系统的重要组成部分，交通网络是承载出行需求的载体，也是重要的生命线系统。《交通强国建设纲要》要求“完善多层次网络布局，优化存量资源配置，增强系统弹性”。城市出行需求强度高，多方式网络耦合强。交通系统内外的扰动和冲击事件频发，经大规模、强关联、多方式网络的传播效应，极易产生区域性、网络化的瘫痪和失效。扰动和冲击事件对网络的影响具有全局性，而现有应对措施具有事后性、局部性。因此，考虑事件对网络全周期的影响，构建韧性交通网络已成为交通工程、城市科学等领域的前沿热点，其核心是实现对网络的全局监测、精准评估、协同优化，主要技术方向包括：①海量要素级观测数据的监测部署策略和监测方法，准确及时辨识网络异常状态、触发动态调控机制；②网络韧性精准评估及自恢复力推演技术，提高对异常状态的敏感性、指向性、预判性；③全周期协同优化多方式网络韧性，在事前，设计具有合理冗余、稳健鲁棒的交通网络，在事后，优化多主体恢复资源的时空配置，提升网络恢复能力。针对失效事件难预防、系统演化难预测、事后



恢复效率低的难题，需要充分利用大数据、人工智能、物联网等技术，研发大数据和知识融合驱动的复杂交通网络韧性分析与优化技术体系，形成韧性仿真推演与决策评估平台。从 2015 年至 2020 年，专利公开量为 274，引用量为 1 599，平均被引数为 5.84。

#### (10) 混凝土裂缝智能感知与生物修复技术

混凝土裂缝智能感知与生物修复技术是指利用基体内预埋的自修复功能单元，对裂缝开展的尖端应力或变形，以及水、有害离子、空气等通过裂缝快速传播引起的环境变化主动响应，并仿照生物体释放或制造功能物质对裂缝或环境进行修复的技术。通过自修复功能单元响应、修复与评价等关键核心技术的研发，实现混凝土抗渗性能、力学性能等的自主修复，保障工程的耐久与安全。主要技术方向包括：① 裂缝及微环境变化响应机制；② 裂缝自修复功能单元设计及与混凝土基体高效融合技术；③ 响应与修复过程的模拟与监测技术；④ 自修复效果评估方法；⑤ 实际服役条件下混凝土裂缝响应与修复技术开发。目前发展重点是优化自修复单元与混凝土的亲水性，提升自修复功能单元在混凝土中的稳定性和长效性，探索高效修复的自修复单元的结构形式及响应机制，开展混凝土生物自修复技术的实际应用。从 2015 年至 2020 年，专利公开量为 88，引用量为 1 419，平均被引数为 16.13。

## 2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 建筑结构智能建造技术

传统的建筑工程建造具有生产方式粗放、劳动效率低下、资源消耗庞大等突出问题，开展内涵集约式发展已成为当务之急。当前，以物联网、大数据、云计算、人工智能和区块链等为代表的新一代信息技术加速向各行业全面渗透，正在深刻变革着建筑工程科学与技术的发展，以“智能建造”为代表的未来建筑工程时代业已临近。

建筑工程智能建造技术的核心是建筑工程全产业链的信息互联互通技术，即通过建筑信息模型（BIM）技术提供基础信息的创造、集成、管理、展示与服务，通过物联网技术提供生产、物流、施工和服役过程中的信息感知、采集、传输和反馈，通过人工智能技术提供全生命周期各个环节的信息处理、决策和操作，最终实现建筑工程的标准化设计、工业化生产、机械化施工、一体化装修、信息化管理、智能化应用和绿色化消纳。目前建筑工程智能建造技术的研发方向有：

1) 建筑工程智能设计，包括智能设计理论方法、智能设计关键技术、基于数字孪生的智能设计模式。

2) 建筑工程智能施工，包括可持续与绿色施工技术、模块化和精细施工技术、人工智能与决策技术、机器人系统与自动化技术、技术集成与信息建模。

3) 建筑工程智能运维，包括智能感知和数采技术、环境友好型结构养护技术、结构的精准加固维修技术、大型工程改造与协同技术。

4) 建筑工程智能消纳，包括智能分类回收技术，清洁增值利用、高效安全转化和精深加工技术，精准管控决策技术。

“建筑结构智能建造技术”工程开发前沿的核心专利共 107 篇，平均被引数为 5.84（见表 2.1.1）。核心专利产出排名前三的国家分别为中国、日本和美国（见表 2.2.1）。中国为申请专利量最多的国家，占比达到了 75.70%，平均被引数为 5.17，是该工程开发前沿的重点研究国家之一。

核心专利产出排名前五的机构分别为中国建筑集团有限公司、中国中冶集团、厦门华蔚物联网科技有限公司、澳大利亚 Fastbrick Ip 有限公司和中国交通建设股份有限公司（见表 2.2.2）。

### 2.2.2 村镇智能化一体式污水处理装置

村镇智能化一体式污水处理装置主要是指适用

表 2.2.1 “建筑结构智能建造技术”工程开发前沿中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   | 81  | 75.70% | 419 | 67.04% | 5.17  |
| 2  | 日本   | 8   | 7.48%  | 26  | 4.16%  | 3.25  |
| 3  | 美国   | 6   | 5.61%  | 102 | 16.32% | 17.00 |
| 4  | 德国   | 3   | 2.80%  | 38  | 6.08%  | 12.67 |
| 5  | 澳大利亚 | 3   | 2.80%  | 25  | 4.00%  | 8.33  |
| 6  | 韩国   | 2   | 1.87%  | 0   | 0.00%  | 0.00  |
| 7  | 加拿大  | 1   | 0.93%  | 15  | 2.40%  | 15.00 |
| 8  | 俄罗斯  | 1   | 0.93%  | 0   | 0.00%  | 0.00  |

表 2.2.2 “建筑结构智能建造技术”工程开发前沿中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  | 中国建筑集团有限公司             | 中国   | 8   | 7.48% | 67  | 10.72% | 8.38  |
| 2  | 中国中冶集团                 | 中国   | 3   | 2.80% | 33  | 5.28%  | 11.00 |
| 3  | 厦门华蔚物联网科技有限公司          | 中国   | 3   | 2.80% | 33  | 5.28%  | 11.00 |
| 4  | 澳大利亚 Fastbrick IP 有限公司 | 澳大利亚 | 3   | 2.80% | 25  | 4.00%  | 8.33  |
| 5  | 中国交通建设股份有限公司           | 中国   | 3   | 2.80% | 14  | 2.24%  | 4.67  |
| 6  | 德国斯棱曼公司                | 德国   | 2   | 1.87% | 18  | 2.88%  | 9.00  |
| 7  | 中国电力建设集团有限公司           | 中国   | 2   | 1.87% | 12  | 1.92%  | 6.00  |
| 8  | 常州伟泰科技股份有限公司           | 中国   | 2   | 1.87% | 8   | 1.28%  | 4.00  |
| 9  | 中国中铁股份有限公司             | 中国   | 2   | 1.87% | 4   | 0.64%  | 2.00  |
| 10 | 美国 Armatron Systems 公司 | 美国   | 1   | 0.93% | 36  | 5.76%  | 36.00 |

于镇乡村等小规模分散式生活污水处理且可对工艺智能监控调的一体式装置，处理规模 5 ~ 500 m<sup>3</sup>/d。受散居模式和条件限制，广大农村地区仍普遍存在污水散乱排放、管网铺设率低、集中处理率低的问题，现有污水处理设施运行率低、运行成本高、故障率高、维护难。如何实现广大农村生活污水的广泛收集、分散高效处理、集中集约管理是当前亟待解决的棘手问题，把污水处理装置作为一个智能终端将是一种可能的出路。

村镇智能化一体式污水处理装置的主要技术方向包括：

1) 因地制宜地研发重力势能、风能、太阳能驱动的村镇一体化污水处理装置（维护方便、稳定性高、故障率低），生物生态耦合的污水净化及回

用技术和组合工艺。

2) 研发基于光学和电学的廉价可靠水质在线智能传感器，构建远程数据传输及控制系统。

3) 构建基于活性污泥数学模型耦合人工智能深度学习算法的污水工艺运行状态预测预警模型，构建污水处理装置故障智能诊断模型。

4) 构建分散式污水处理装置云管理平台及区域中心，建立“无人值守—云诊断—云预警—机动维护”的污水处理装置智能维护新模式。

未来的发展趋势是融合水污染控制工程、微生物学、仪器科学、人工智能、物联网等多学科知识，研发低耗高效易维护云管理的村镇智能化一体式污水处理装置及运行和管理模式。

“村镇智能化一体式污水处理装置”工程开发

前沿的核心专利共 82 篇，平均被引数为 1.29（见表 2.1.1）。核心专利产出排名前三的国家分别为中国、韩国和俄罗斯（见表 2.2.3）。中国机构或个人所申请的专利占比达到了 92.68%，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引数为 1.12。

核心专利产出排名前五的机构分别为湖南子宏生态科技股份有限公司、滁州友林科技发展有限公司、福建省致青生态环保有限公司、韩国斗山工程机械有限公司和武汉益锦祥生物环保科技有限公司（表 2.2.4）。湖南子宏生态科技股份有限公司专利将活性污泥工艺与过滤工艺集成，其特色和先进性在于利用发明的三相分离区既实现泥水的稳定高效分离，又实现污泥无能耗的自动回流；滁州友林科技发展有限公司专利集成了活性污泥和生物膜及氧化和絮凝工艺，发明的多孔珍珠岩微粉与粉煤灰微粉和膨润土粉组合的絮凝剂活化组分，实现了污水高效除磷和脱色的深度处理；福建省致青生态环保

有限公司专利是针对高浓度废水的一体化装置，将上流式厌氧污泥床(UASB)和膜生物反应器(MBR)整合形成 A/O 并集成了光催化氧化提高出水质量，污泥均自动进入厌氧产沼气，通过沼气的产电实现装置的自给能。从专利公开趋势看，该领域研究最早在 1989 年，于 2015 年专利数量逐年增长，到 2018 年达到顶峰，然后开始呈现下降趋势，说明从 2018 年开始该技术领域有待新的重大突破。

### 2.2.3 室内外一体化高精度定位导航系统

室内外一体化高精度定位导航系统支持室外场景的技术手段和支持室内场景的技术手段集成于同一个终端，为用户提供室内外位置信息服务，在仓储物流、智慧养老、特种医院、智慧工厂、社区矫正、商场管理等场景中有广泛的应用需求。

当前发展的主要技术方向包括：

- 1) 室内外组合定位技术，包括室外全球导航

表 2.2.3 “村镇智能化一体式污水处理装置”工程开发前沿中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  | 76  | 92.68% | 85  | 80.19% | 1.12  |
| 2  | 韩国  | 4   | 4.88%  | 10  | 9.43%  | 2.50  |
| 3  | 俄罗斯 | 1   | 1.22%  | 7   | 6.60%  | 7.00  |
| 4  | 美国  | 1   | 1.22%  | 4   | 3.77%  | 4.00  |

表 2.2.4 “村镇智能化一体式污水处理装置”工程开发前沿中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  | 湖南子宏生态科技股份有限公司  | 中国 | 2   | 2.44% | 1   | 0.94%  | 0.50  |
| 2  | 滁州友林科技发展有限公司    | 中国 | 1   | 1.22% | 15  | 14.15% | 15.00 |
| 3  | 福建省致青生态环保有限公司   | 中国 | 1   | 1.22% | 8   | 7.55%  | 8.00  |
| 4  | 韩国斗山工程机械有限公司    | 韩国 | 1   | 1.22% | 7   | 6.60%  | 7.00  |
| 5  | 武汉益锦祥生物环保科技有限公司 | 中国 | 1   | 1.22% | 5   | 4.72%  | 5.00  |
| 6  | 中国航天系统科学与工程研究院  | 中国 | 1   | 1.22% | 4   | 3.77%  | 4.00  |
| 7  | 美国普雷斯比专利信托      | 美国 | 1   | 1.22% | 4   | 3.77%  | 4.00  |
| 8  | 瑞盛环境股份有限公司      | 中国 | 1   | 1.22% | 4   | 3.77%  | 4.00  |
| 9  | 深圳市碧园环保技术有限公司   | 中国 | 1   | 1.22% | 4   | 3.77%  | 4.00  |
| 10 | 北京华清博雅环保工程有限公司  | 中国 | 1   | 1.22% | 3   | 2.83%  | 3.00  |

卫星系统（GNSS）与室内超宽带（UWB）组合的一体化定位系统，室外 GNSS 和室内地磁组合的一体化定位系统，室外 GNSS 和室内惯导组合的一体化定位系统，室外 GNSS 和室内移动网络基站定位组合的一体化定位系统等多种不同的组合方式。通过组合使用室内精准定位技术与室外精准定位技术实现不同空间场景下的一体化无缝高精度定位。

2) 多传感器信息融合技术，通过融合 GNSS、惯性测量设备、磁传感器和视觉设备等多传感器信息和伪卫星信号、地图约束等多源定位信息，提高室内外定位精度。

3) 低功耗定位信号发送与接收装置，通过 LPWAN 技术实现定位和通信信号的低功耗传输，提高定位导航系统的续航及待机时间。

“室内外一体化高精度定位导航系统”工程

开发前沿的核心专利共 85 篇，平均被引数为 5.00（见表 2.1.1）。核心专利产出排名前三的国家分别为中国、英国和韩国（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 91.76%，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，平均被引数为 5.12，略高于平均水平。

核心专利产出排名前五的机构分别为中国电子科技集团公司、中国航天系统科学与工程研究院、阿里巴巴集团控股有限公司、桂林电子科技大学和深圳市中舟智能科技有限公司（见表 2.2.6）。中国电子科技集团公司着重于研究室内外组合定位技术和多源融合定位技术；中国航天系统科学与工程研究院偏重研发卫星定位信号转发接收装置，为全飞行器系统室内测试任务提供转发的卫星定位信

表 2.2.5 “室内外一体化高精度定位导航系统”工程开发前沿中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   | 78  | 91.76% | 399 | 93.88% | 5.12  |
| 2  | 英国   | 2   | 2.35%  | 10  | 2.35%  | 5.00  |
| 3  | 韩国   | 2   | 2.35%  | 0   | 0.00%  | 0.00  |
| 4  | 开曼群岛 | 1   | 1.18%  | 12  | 2.82%  | 12.00 |
| 5  | 美国   | 1   | 1.18%  | 4   | 0.94%  | 4.00  |
| 6  | 奥地利  | 1   | 1.18%  | 0   | 0.00%  | 0.00  |

表 2.2.6 “室内外一体化高精度定位导航系统”工程开发前沿中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  | 中国电子科技集团公司          | 中国 | 3   | 3.53% | 12  | 2.82% | 4.00  |
| 2  | 中国航天系统科学与工程研究院      | 中国 | 3   | 3.53% | 1   | 0.24% | 0.33  |
| 3  | 阿里巴巴集团控股有限公司        | 中国 | 2   | 2.35% | 27  | 6.35% | 13.50 |
| 4  | 桂林电子科技大学            | 中国 | 2   | 2.35% | 15  | 3.53% | 7.50  |
| 5  | 深圳市中舟智能科技有限公司       | 中国 | 2   | 2.35% | 13  | 3.06% | 6.50  |
| 6  | 广东工业大学              | 中国 | 2   | 2.35% | 13  | 3.06% | 6.50  |
| 7  | 杭州电子科技大学            | 中国 | 2   | 2.35% | 7   | 1.65% | 3.50  |
| 8  | 长沙海格北斗信息技术有限公司      | 中国 | 2   | 2.35% | 6   | 1.41% | 3.00  |
| 9  | 深圳市城市交通规划设计研究中心有限公司 | 中国 | 2   | 2.35% | 4   | 0.94% | 2.00  |
| 10 | 北京航天长征飞行器研究所        | 中国 | 2   | 2.35% | 1   | 0.24% | 0.50  |



号；阿里巴巴集团控股有限公司则着重于车载室内外一体化高精度定位导航系统的研发。从排名前十

的核心专利产出机构合作网络（见图 2.2.1）来看，机构之间的合作较为稀疏。

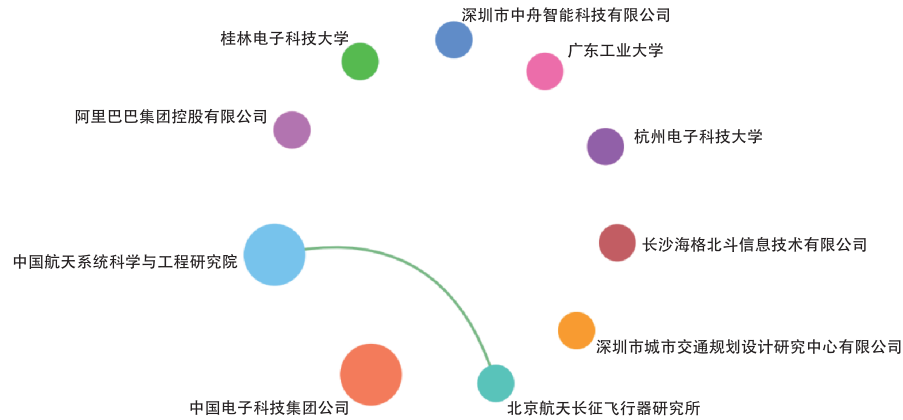


图 2.2.1 “室内外一体化高精度定位导航系统”工程开发前沿的主要机构间合作网络

## 领域课题组人员

课题组组长：崔俊芝 张建云 顾祥林

专家组：

院士：

江 亿 欧进萍 杨永斌 张建云 刘加平<sup>①</sup>  
 缪昌文 杜彦良 钮新强 彭永臻 郑健龙  
 王复明 张建民 吴志强 岳清瑞 吕西林  
 马 军 冯夏庭 朱合华 胡亚安 唐洪武  
 刘加平<sup>②</sup>

专家：

艾剑良 蔡春声 蔡 奕 陈 鹏 陈 庆  
 陈求稳 陈先华 陈 欣 陈以一 陈志光  
 达良俊 戴晓虎 董必钦 樊健生 高 军  
 高 亮 葛耀君 顾冲时 郭劲松 韩 杰  
 黄廷林 黄子硕 贾良玖 蒋金洋 姜 屏  
 蒋正武 焦文玲 金君良 李安桂 李 晨  
 李建斌 李益农 李峥嵘 林波荣 凌建明

刘 超 刘 芳 刘 京 刘曙光 刘彦伶  
 马 腾 钮心毅 潘海啸 任伟新 邵益生  
 沈 迪 沈 尧 史才军 史良胜 舒章康  
 孙 剑 孙 智 谈广鸣 谭忆秋 谭 峥  
 童小华 汪洁琼 汪双杰 王本劲 王国庆  
 王建华 王 伟 王亚宜 王元战 夏圣骥  
 肖飞鹏 肖 洋 肖 忠 徐俊增 严金秀  
 杨 敏 杨庆山 杨仲轩 姚俊兰 叶 蔚  
 余钟波 袁 烽 张 辰 张 锋 张 松  
 张 旭 张云升 郑百林 郑 刚 仲 政  
 周伟国 周 翔 朱 能 朱兴一 庄晓莹

执笔组：

刘加平<sup>②</sup> 陈 鹏 陈求稳 董必钦 高 亮  
 郭劲松 黄廷林 贾良玖 蒋正武 刘 超  
 刘 芳 钮心毅 沈 尧 孙 剑 孙 智  
 王本劲 王 伟 向 衍 肖飞鹏 杨 柳  
 姚俊兰 周新刚

① 西安建筑科技大学。

② 东南大学。