

五、土木、水利与建筑工程

1 工程研究前沿

1.1 Top10 工程研究前沿发展态势

土木、水利和建筑工程领域 Top10 工程研究前沿汇总见表 1.1.1，涉及了结构工程、土木建筑材料、道路与铁路工程、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，“土木工程结构与系统全寿命可靠性”“超高性能与智能水泥基复合材料”“道路铺面再生材料与材料再生”“绿色本土建筑”“基于人工智能的建筑设计方法”“多层次空天地遥感数据的融合处理”“水工程全寿命安全”是传统研究的深入，“建筑环境调控智能系统”“污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理”和“智慧城市地理时空大数据动态融合”是新兴前沿。各个前沿所涉及的

核心论文自 2012 年至 2017 年的逐年发表情况见表 1.1.2，其中，“建筑环境调控智能系统”近年核心论文发表数目增速最显著。

(1) 土木工程结构与系统全寿命可靠性

土木工程结构与系统全寿命可靠性是指考虑荷载的随机分布以及材料、构件乃至结构在服役期间其性能随时间发生演化的时变可靠性。在环境与荷载长期作用下，土木工程结构性能会发生退化，该退化过程兼具随机性和时变性。基于随机过程理论，在荷载效应和结构性能的概率模型都完备的前提下，可定量计算出结构的时变可靠度。土木工程结构与系统全寿命可靠性主要研究方向包括环境作用下结构性能演化、时变可靠度计算、结构体系可靠性等。结构性能演化规律直接影响可靠度分析结果，目前多直接采用确定性分析建立的

表 1.1.1 土木、水利与建筑工程领域 Top10 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	常被引 论文占比	被专利引用的 文献占比
1	土木工程结构与系统全寿命 可靠性	215	4440	20.65	2014.57	—	—
2	超高性能与智能水泥基复合材料	64	2594	40.53	2013.59	—	—
3	道路铺面再生材料与材料再生	27	601	22.26	2013.74	—	—
4	绿色本土建筑	317	9213	29.06	2013.89	—	—
5	基于人工智能的建筑设计方法	107	3704	34.62	2013.92	—	—
6	建筑环境调控智能系统	31	1244	40.13	2015.32	38.70%	0.00
7	污水处理中微塑料等污染物迁移 与转化机理	7	243	34.71	2016.14	28.60%	0.00
8	多层次空天地遥感数据的融合 处理	141	7023	49.81	2014.39	—	—
9	智慧城市地理时空大数据动态 融合	52	1244	23.92	2015.50	—	—
10	水工程全寿命安全	49	913	18.63	2013.78	—	—

表 1.1.2 土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	土木工程结构与系统全寿命可靠性	30	39	31	39	45	31
2	超高性能与智能水泥基复合材料	14	17	17	13	3	0
3	道路铺面再生材料与材料再生	7	3	9	6	2	0
4	绿色本土建筑	56	76	76	70	34	5
5	基于人工智能的建筑设计方法	17	26	27	25	10	2
6	建筑环境调控智能系统	1	0	4	11	13	2
7	污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理	0	0	0	2	2	3
8	多层次空天地遥感数据的融合处理	25	21	21	32	32	10
9	智慧城市地理时空大数据动态融合	1	1	6	18	15	11
10	水工程全寿命安全	10	9	18	6	6	0

抗力退化模型，同时引入相关随机参数。构件层面时变可靠度计算方法主要有早期的穿越法、时不变可靠度串联体系法、蒙特卡罗模拟法以及概率密度演化法等。结构体系的可靠性分析一直是一个难点。从 2012 年至 2017 年，土木工程结构与系统全寿命可靠性的核心论文篇数为 215，被引频次为 4440，篇均被引频次为 20.65。

（2）超高性能与智能水泥基复合材料

超高性能与智能水泥基复合材料是指具有超高力学性能和超高耐久性能的水泥基复合材料以及具有自感知、自保温、自清洁和自阻尼等智能化功能的水泥基复合材料。随着建筑、桥梁等土木结构的发展，结构的复杂化对土木工程材料提出了更高的要求。相较于普通混凝土，超高性能混凝土具有极高的抗压强度，优异的韧性，超高的耐磨性、抗爆性和显著提升的耐久性。超高性能混凝土的研究主要面向两大方向展开：工作性和力学性能。得益于碳材料和相变储能材料的发展，具有自感知、自保温、自清洁等智能化功能的水泥基复合材料成为了可能。碳纳米管、石墨烯、纳米碳纤维等碳材料的掺入，使得水泥基材料的力学性能、电学性能等均有不同程度的提高，在提升混凝土结构安全性和可靠度的同时，赋予了混凝土结构具有智能监测

的功能。从 2012 年至 2017 年，超高性能与智能水泥基复合材料的核心论文篇数为 64，被引频次为 2594，篇均被引频次为 40.53。

（3）道路铺面再生材料与材料再生

近年来，循环经济和可持续发展理念在道路铺面领域引起了极大关注，其中可再生的道路铺面材料成为研究关注的前沿。道路铺面再生材料与材料再生的内涵包括两个方面，再生材料是指借鉴仿生学原理同时又具备感知和激励双重功能的材料，主动感知、自动愈合和自我修复是其基本特征。开发新型再生材料，揭示其再生机理，构建再生复合材料设计体系是实现道路材料可持续发展的有效措施。材料再生是指工业与民用废弃物如钢渣、塑料颗粒、建筑垃圾、道路旧料等材料的再生利用过程。研发新型材料再生技术，探索其物化性能，揭示新旧材料共混机理是实现废弃材料资源化利用的重要手段。从 2012 年至 2017 年，道路铺面再生材料与材料再生的核心论文篇数为 27，被引频次为 601，篇均被引频次为 22.26。

（4）绿色本土建筑

当代绿色本土建筑是基于现代技术和材料，仍具有地域环境适应性和文化延续性的建筑类型。本土建筑在长期的发展中，与地域环境形成了明确的

适应关系，它一方面需要批判性地汲取传统建造体系中的气候适应性特征；另一方面需要回应当代生活要求，并与文脉和社会环境形成可持续的良性发展体系。绿色本土建筑的研究既聚焦于将现代的环境控制技术、结构安全技术、日常厨卫设施与智能通信系统应用于既有的传统建筑遗产中，也致力于发现本土建筑在环境协调、气候适应、文化传承与功能组织中的智慧与经验。这一领域的研究尤其关注本土建筑形式在因地制宜、自我调适、自我完善的过程中对构建整体民族文化形象的贡献。从2012年至2017年，绿色本土建筑的核心论文篇数为317，被引频次为9213，篇均被引频次为29.06。

（5）基于人工智能的建筑设计方法

基于人工智能的建筑设计方法是以建筑设计过程为对象，以人工智能为创新驱动，以各种虚拟技术为界面的，讨论人类设计师如何与具有一定智能的机器系统，通过实时交互来进行设计，以期同时发挥人类的创造与处理非确定问题的能力、机器的精确感知与高速计算能力。首先，传统的建筑设计方法是基于建筑师为唯一主体的一元论体系，而新方法强调人与具有智能的机器互动来完成设计，所以从理论架构上就突破了该一元论体系。其次，最新的人工智能领域，以基于深度神经网络技术的突破为亮点，能够以超出人类感知能力的正确率，完成图像、语音等的识别与解析，并且通过增强学习算法已经实现了在各种博弈问题上对人类的反超。这些都为使机器具有一定程度的智能提供了可能。最后，虚拟技术在硬件上的轻量化、普及化使得其应用场景呈现出爆炸性增长，相比传统屏幕的二维图形用户界面，其带有沉浸感的真三维环境大大提高了信息交互的效率。同时，随着各种实时扫描与投射技术的发展，可触用户界面也逐渐开始普及，彻底摆脱了无论是屏幕还是虚拟环境的这种感知代理模式，直接使得建筑师可以在实物上进行各种带

有可计算信息的操作，从而实现人与机的直接互动。从2012年至2017年，基于人工智能的建筑设计方法的核心论文篇数为107，被引频次为3704，篇均被引频次为34.62。

（6）建筑环境调控智能系统

建筑环境调控智能系统是指以建筑室内的热、声、光、空气品质等环境参数为控制目标，以建筑空调供暖系统、照明系统、围护结构等机电系统进行自动监测、自动控制、自动调节和自动管理的系统。主要研究方向包括：建筑环境参数的监测和传输，调控系统的智能化分析、识别和诊断，建筑机电系统的智能化自动控制和设备运行优化等。该系统由建筑自动化系统功能细分和发展而来，最初的建筑自动化系统通过计算机对空调供暖、电梯、供水、安保、消防和供配电系统进行监测和控制，为物业管理人员提供建筑运行状态的参考和预警，起到辅助建筑管理的作用，随着近年来计算机、电子技术的发展，以及手机、智能穿戴设备、显示屏等智能终端的普及，使得建筑环境调控向智能化方向发展，如使用智能终端对建筑环境参数和室内人员主观感受进行采集，结合人员的主观感受进行环境参数的智能化控制，以及更为个性化的室内环境参数调控终端等。从2012年至2017年，建筑环境调控智能系统的核心论文篇数为31，被引频次为1244，篇均被引频次为40.13。

（7）污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理

微塑料是指粒径很小的塑料颗粒以及纺织纤维，通常认为粒径小于5 mm的塑料颗粒。其主要来源是生活中广泛存在的塑料暴露在自然环境中被风吹日晒逐渐变小而成的微塑料。另外，人们使用的化妆品或者清洁用品中有大量的磨砂颗粒，或者家用洗衣机排出的废水中含有的大量纤维。这些微塑料体积小、比表面积大、吸附污染物的能力强，更容易与污水中普遍存在的疏水性多氯联苯、双酚

A 等持久性有机污染物形成有机污染球体,且在污水处理中漂浮在水面上,传统城市污水处理厂无法将其有效处理。游荡的微塑料很容易被贻贝、浮游动物等低端食物链生物吃掉且不能被消化,导致动物生病甚至死亡;如果带着有机污染物的微塑料被吃掉,污染物在生物体内酶的作用下释放出来加剧其病情。微塑料、带有有机污染物的微塑料进入上层动物体内,食物链“富集”效应会使大量的食用微塑料的生物生病或者死亡。污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理研究是通过多种观察、实验、理论推导和模拟手段,研究污水中微塑料等污染物的组成,采用多种技术手段研究这些微塑料等污染物在污水处理系统中的迁移途径、转化产物、转化和分布规律。重点研究微塑料、持久性有机污染物、重金属、内分泌干扰物和新兴污染物等。从 2012 年至 2017 年,污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理的核心论文篇数为 7,被引频次为 243,篇均被引频次为 34.71。

(8) 多层次空天地遥感数据的融合处理

通过获取多源、多层次航空、航天和地面遥感数据,对遥感大数据的信息深度融合,以地物目标的物理特性为基础,分析影像特征、发现多源数据之间的内在规律性。以混合多层次融合技术为主,将像素层、特征层和决策层融合,结合行业特有模型提取有价值信息。主要的研究方向包括:①多源遥感数据高精度预处理,如遥感影像的辐射定标、几何校正、大气校正等常规处理和多源异构数据的协同精确校正等。②多源遥感数据空间融合,主要有基于联合区域网平差的方法和基于图像配准的方法。前者是从摄影测量的角度出发,将空间融合问题转换为多源遥感数据的联合区域网平差问题;后者是从图像处理和计算机视觉的角度出发,将空间融合问题转换为图像配准问题。③多源遥感数据信息融合,在实现多源遥感数据

的空间融合后,需要对这些具有统一地理坐标信息的多源数据进行信息融合,从而发掘出全新、有意义的信息。多源遥感数据信息融合一般可分为三个层次:像素级、特征级和决策级。主要的发展趋势包括:①支持多源数据联合区域网平差,实现异源、异时相、异分辨率间图像的同名点自动搜寻和联合平差;②基于多层次混合的深度信息融合技术;③基于深度神经网络和学习的信息提取技术。从 2012 年至 2017 年,多层次空天地遥感数据的融合处理的核心论文篇数为 141,被引频次为 7023,篇均被引频次为 49.81。

(9) 智慧城市地理时空大数据动态融合

随着智慧地球和智慧城市的建设和应用,无所不在的亿万个各类传感器将产生 PB/EB 甚至 ZB 数据量级的城市地理时空大数据。智慧城市地理时空大数据动态融合从实时获取的多平台、多时相、多传感器、多类型、高分辨率、高光谱的海量多源地理时空大数据中自动发现和提取隐含的和非显见的模式、规则及知识,通过高效智能动态融合处理快速地将之转化成有价值的信息,极大地提高了智慧城市的空间认知能力,是测绘工程领域的研究前沿之一。其主要研究方向是智慧城市地理时空大数据表示、度量和理解的基本理论和方法,揭示时空大数据与现实世界对象、行为、事件间的对应规律。其未来发展趋势是用各种手段和集成各种方法对智慧城市及其中的实体目标和人类活动进行地理时空数据采集、信息提取、网络管理、知识发现、空间感知认知和智能位置服务,形成一门多学科交叉的科学技术。从 2012 年至 2017 年,智慧城市地理时空大数据动态融合的核心论文篇数为 52,被引频次为 1244,篇均被引频次为 23.92。

(10) 水工程全寿命安全

水工程是国家基础设施体系的关键组成部分,对保障水安全和促进社会经济发展具有不可替代的

重要作用。近年来，在“一带一路”倡议背景下，水工程建设从国内走向国外，从内陆走向深海，面临的环境更加复杂多变，对施工安全和服役期内的运行安全也提出了更高的要求。水工程全寿命安全是针对结构物全寿命各阶段的安全隐患及周围环境变化提出的概念，主要研究水利工程结构的抗振、抗腐、抗震技术以及水下结构物无损检测、损伤识别、快速修复技术等，从而构建涉水工程结构安全诊断评价体系，优化水工程全寿命安全设计。相比于水工、港工及近海工程，深海工程的环境更为复杂，包括风、浪、流、盐等常态环境因素和台风、地震等极端环境因素。为了确保深海工程的安全，必须要综合考虑各种环境因素的联合作用，通过实验或模拟技术分析深海工程结构在复杂环境下的响应特征及破坏机理，并在此基础上建立深海工程结构的全寿命性能监测系统和损伤修复系统，从而构建深海环境水工程全寿命安全的评价体系和设计准则。因此，复杂条件下的水工程灾变机理研究、智能监控和自动修复技术以及结构系统全寿命安全分析与优化设计将成为今后水工程全寿命安全的重要发展方向。从2012年至2017年，水工程全寿命安全的核心论文篇数为49，被引频次为913，篇均被引频次为18.63。

1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 土木工程结构与系统全寿命可靠性

在20世纪中期，由于工业化迅猛发展，各国进行了大规模的基础设施建设，与此同时，土木工程结构的耐久性和使用寿命问题日益突出。由于对结构性能演化的认识不足，使得部分结构性能过早退化，威胁结构安全并浪费社会资源。国内外结构工程师们深知结构使用寿命的重要性，提出了一套与结构目标使用年限有关的设计方法：容许应力设计法、破坏强度设计法和极限状态设计法。目前基于概率理论的极限状态设计法经实践检验后为大多

数国家所采用。但该方法仅满足结构在施工完成后的状态，引入了目标使用年限对荷载的影响，但未考虑结构性能退化问题。

为此，有关研究人员提出采用基于随机过程的可靠性分析方法。基于随机过程意味着在考虑时变性的影响下，引入结构抗力退化的时变概率模型。然而到目前为止，对环境与荷载作用下各类结构的性能演化机理尚缺乏深入的认识。因此基于已有构件抗力预测模型的可靠性分析结果与真实情况有所偏差。此外，不同学者针对各自的抗力退化模型提出了不同的时变可靠性分析计算方法，如穿越法、时不变可靠度串联体系法、以及蒙特卡罗模拟法等。其中，穿越法和时不变可靠度串联体系法或是不适用时变可靠度计算，或是受限于特定的极限状态方程的表达形式。尽管蒙特卡罗模拟法不受限于随机物理系统以及极限状态方程，且应用最为广泛，精度较高，但是计算相对耗时。

目前，土木工程结构与系统全寿命可靠性的研究方向有：

(1) 时变可靠性分析方法改进，主要有基于泊松计数过程等随机过程模型的时变可靠度计算的解析法，以及基于蒙特卡罗模拟的随机模拟法，以克服直接模拟法带来的高昂计算成本，以及小概率事件抽样面临的困难。此外还有基于概率守恒原理的概率密度演化方法的时变可靠度计算方法等。

(2) 结构、系统时变状态函数的改进，如考虑钢筋锈蚀速率的时变性、钢筋腐蚀电流密度分布及钢筋锈蚀形态的不均匀性的锈蚀钢筋混凝土结构的时变可靠度计算，考虑复杂结构失效模式转换的等效极值事件建立及可靠度计算等。

(3) 基于时变可靠性的结构与系统全寿命设计理论与维护技术。

土木工程结构与系统全寿命可靠性的核心论文数为215篇（见表1.1.1），核心论文的篇均被引频次为20.65。核心论文产出排名前三的国家/地

表 1.2.1 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	72	33.49%	1523	34.30%	21.15
2	USA	40	18.60%	911	20.52%	22.78
3	Italy	24	11.16%	528	11.89%	22.00
4	Australia	19	8.84%	396	8.92%	20.84
5	UK	18	8.37%	421	9.48%	23.39
6	Iran	18	8.37%	303	6.82%	16.83
7	Czech Republic	12	5.58%	124	2.79%	10.33
8	Singapore	11	5.12%	254	5.72%	23.09
9	France	9	4.19%	279	6.28%	31.00
10	Germany	9	4.19%	151	3.40%	16.78

表 1.2.2 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”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	被引频次比例	篇均被引频次
1	Hunan Univ	13	6.05%	342	7.70%	26.31
2	Dalian Univ Technol	12	5.58%	207	4.66%	17.25
3	Tongji Univ	10	4.65%	240	5.41%	24.00
4	Lehigh Univ	9	4.19%	256	5.77%	28.44
5	Univ Sydney	8	3.72%	199	4.48%	24.88
6	Univ Zabol	8	3.72%	118	2.66%	14.75
7	Natl Univ Singapore	6	2.79%	183	4.12%	30.50
8	Tech Univ Munich	6	2.79%	103	2.32%	17.17
9	VSB Tech Univ Ostrava	6	2.79%	48	1.08%	8.00
10	Politecn Milan	5	2.33%	149	3.36%	29.80

区为中国、美国和意大利（见表 1.2.1），其中中国发表论文占比为 33.49%（其中港澳占 9.7%），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 / 地区为法国、英国、新加坡、美国和意大利，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 21.15，略高于平均水平，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 / 地区合作网络（见图 1.2.1）来看，除捷克之外，论文数量排名前十的国家 / 地区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），

该前沿排名前三的产出机构为中国的湖南大学、大连理工大学和同济大学。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，机构间合作不甚紧密。

施引核心论文产出前五的国家 / 地区为中国、美国、意大利、英国和澳大利亚（见表 1.2.3），施引核心论文产出前三的机构为中国湖南大学、同济大学和美国理海大学（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五的国家 / 地区施引核心论文数也比较多，其中中国施引论文数排名第一，说明中国学者对该前



图 1.2.1 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

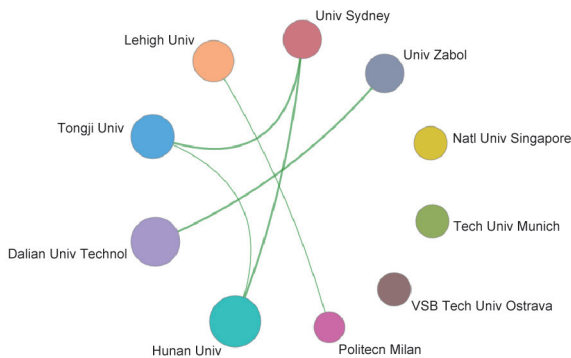


图 1.2.2 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	1191	38.72%	2016.5
2	USA	645	20.97%	2016.0
3	Italy	241	7.83%	2015.9
4	UK	216	7.02%	2016.2
5	Australia	182	5.92%	2016.4
6	Iran	167	5.43%	2016.5
7	Germany	132	4.29%	2016.5
8	India	112	3.64%	2016.2
9	Singapore	96	3.12%	2016.1
10	France	94	3.06%	2016.3

表 1.2.4 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”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	Hunan Univ	150	18.82%	2016.4
2	Tongji Univ	131	16.44%	2016.4
3	Lehigh Univ	90	11.29%	2015.4
4	Dalian Univ Technol	76	9.54%	2016.5
5	Politecn Milan	66	8.28%	2016.0
6	Beihang Univ	65	8.16%	2016.7
7	Huazhong Univ Sci & Technol	57	7.15%	2016.6
8	Univ Sydney	55	6.90%	2016.3
9	Wuhan Univ	54	6.78%	2015.7
10	Northwestern Polytech Univ	53	6.65%	2016.4

沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

综合以上统计分析结果，在土木工程结构与系统全寿命可靠性研究前沿，我国目前处于领跑的态势，建议我国继续加大在该前沿前沿的研究投入，保持该前沿在世界上的领先水平。

1.2.2 超高性能与智能水泥基复合材料

随着社会经济、现代工业设计制造技术、工程结构设计理论方法以及施工技术的发展，工程结构朝着更高、更长、更深的方向发展，这对混凝土的性能提出了更高的要求。具有超高力学性能、超高延性、超高耐磨性、超高抗爆性和超高耐久性的超高性能混凝土使得复杂的工程结构得以实现。同时，人们对工程结构有了更为精细化和智能化的要求，以期获得更可靠、更安全的居住通行环境。

智能水泥基复合材料是智能化时代的产物，它在对重大土木工程结构应力、应变和温度等参数进行实时监测，对结构损伤进行无损检测评估并及时修复，对减轻台风、地震等冲击荷载作用具有潜在作用，对建筑室内环境进行调控产生节能、调温、调湿的效果。智能水泥基复合材料作为土工结构材料领域的高新技术，为传统材料的未来发展注入了新的内容和发展活力，也提供了全新的机遇。对其基础理论及其应用技术进行深入研究将使传统土工材料工业获得新的、突破性的飞跃，其发展必将使水泥基材料的应用具有更加广阔的前景和产生巨大的社会效益。

超高性能与智能水泥基复合材料的主要研究方向有：

(1) 超高性能水泥基复合材料制备技术与性能调控。这一方向主要涵盖了两个方面：一是超高性能水泥基复合材料的新拌特性；二是材料宏观性能及微结构与宏观性能的联系。前者关注超高性能水泥基复合材料的流变性、可泵性，以期能够将其应用到高、长、深的复杂工程结构中；后者关注超高性能水泥基复合材料的宏观力学性

能、耐久性能以及材料微观结构与这些宏观性能之间的联系。

(2) 超高性能水泥基复合材料工程应用研究。超高性能水泥基复合材料应用到工程结构中除了保证其自身性能要求外，还需充分研究由超高性能水泥基复合材料制成的各类结构构件的力学性能，在此基础上才能建立其成熟的可靠度设计计算方法。将这一具有超高性能的材料更广泛地应用于建筑、桥梁、路基、大坝等工程结构中还存在许多挑战。

(3) 智能水泥基复合材料智能监测特性。智能水泥基复合材料走向智能化的一个重要方向是使传统的水泥基材料具有自监测、自诊断的功能，人们较为关注工程结构应力、变形和温度等方面的自监测能力，结合碳纤维、碳纳米管、石墨烯等材料的发展，提升智能混凝土监测的灵敏度、稳定性、适用范围和耐久性等是当前的前沿。

(4) 智能水泥基复合材料智能调节特性。智能水泥基复合材料的另一智能化方向是具备自调节、自修复的自控能力。这类材料适应于服役环境的变化以及自身结构的变化，如对温度、湿度的调节，对形状、阻尼的自控，对微裂缝的自修复等。这一方向有着广阔的前景。

超高性能与智能水泥基复合材料的核心论文数为64篇（见表1.1.1），核心论文的篇均被引频次为40.53。核心论文产出排名前三的国家或地区为美国、韩国和中国（见表1.2.5），其中中国发表论文占比为17.19%，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或地区为印度、荷兰、意大利、韩国和中国，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为42.45，略高于平均水平。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或地区合作网络（见图1.2.3）来看，中国与美国及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），该前沿排名前三的产出机构为韩国大学、美国密歇

表 1.2.5 “超高性能与智能水泥基复合材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	18	28.13%	721	27.79%	40.06
2	South Korea	13	20.31%	552	21.28%	42.46
3	China	11	17.19%	467	18.00%	42.45
4	UK	6	9.38%	225	8.67%	37.50
5	The Netherlands	4	6.25%	215	8.29%	53.75
6	Italy	4	6.25%	174	6.71%	43.50
7	France	4	6.25%	119	4.59%	29.75
8	Canada	4	6.25%	106	4.09%	26.50
9	Malaysia	3	4.69%	89	3.43%	29.67
10	India	1	1.56%	102	3.93%	102.00

表 1.2.6 “超高性能与智能水泥基复合材料”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	被引频次比例	篇均被引频次
1	Korea Univ	8	12.50%	299	11.53%	37.38
2	Univ Michigan	7	10.94%	297	11.45%	42.43
3	Univ Connecticut	6	9.38%	271	10.45%	45.17
4	Korea Inst Construct Technol	4	6.25%	233	8.98%	58.25
5	Eindhoven Univ Technol	4	6.25%	215	8.29%	53.75
6	Univ Liverpool	4	6.25%	150	5.78%	37.50
7	Daegu Univ	4	6.25%	126	4.86%	31.50
8	Sejong Univ	3	4.69%	185	7.13%	61.67
9	Univ Perugia	3	4.69%	140	5.40%	46.67
10	Univ Suwon	3	4.69%	108	4.16%	36.00

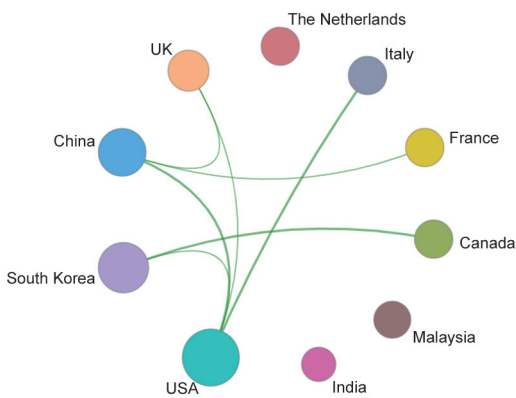


图 1.2.3 “超高性能与智能水泥基复合材料”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

根大学和美国康涅狄格大学。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，美国以及韩国国内机构合作较为密切，但不同国家或地区机构之间合作较少。

施引核心论文产出前五的国家或地区为中国、美国、韩国、澳大利亚和意大利（见表 1.2.7），施引核心论文产出前三的机构为韩国大学、中国哈尔滨工业大学和韩国汉阳大学（见表 1.2.8）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前五的国家或地区施引核心论文数也比较多，其中中国

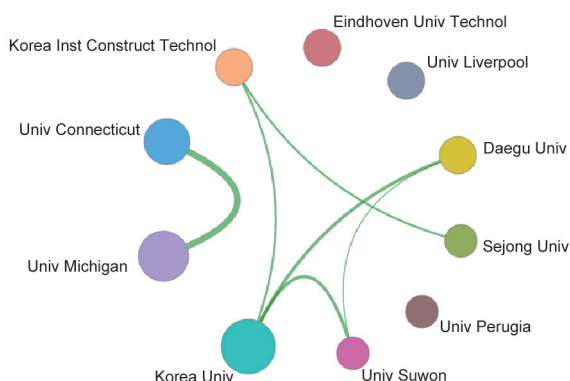


图 1.2.4 “超高性能与智能水泥基复合材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

施引论文数排名第一，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。

综合以上统计分析结果，在超高性能与智能水泥基复合材料研究前沿，我国目前处于与国外同类研究并跑的态势，建议我国继续加大在该前沿领域的研究投入，推动该前沿的相关研究向世界领先水平的加速发展。

1.2.3 道路铺面再生材料与材料再生

近年来，循环经济和可持续发展理念在道路铺

表 1.2.7 “超高性能与智能水泥基复合材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	452	31.45%	2016.5
2	USA	310	21.57%	2016.3
3	South Korea	142	9.88%	2016.2
4	Australia	107	7.45%	2016.6
5	Italy	96	6.68%	2016.5
6	Canada	73	5.08%	2016.5
7	India	72	5.01%	2016.3
8	UK	66	4.59%	2016.2
9	Iran	60	4.18%	2016.5
10	Malaysia	59	4.11%	2016.4

表 1.2.8 “超高性能与智能水泥基复合材料”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	Korea Univ	51	13.67%	2015.6
2	Harbin Inst Technol	41	10.99%	2016.6
3	Hanyang Univ	40	10.72%	2016.9
4	Southeast Univ	39	10.46%	2016.3
5	Dalian Univ Technol	37	9.92%	2016.6
6	Hunan Univ	35	9.38%	2016.5
7	Univ British Columbia	33	8.85%	2016.3
8	Northwestern Univ	33	8.85%	2015.9
9	Iowa State Univ	32	8.58%	2016.3
10	Missouri Univ Sci & Technol	32	8.58%	2016.9

面领域引起了极大关注，其中可再生的道路铺面材料成为研究关注的前沿。道路铺面再生材料与材料再生的内涵包括两个方面，再生材料是指借鉴仿生学原理同时又具备感知和激励双重功能的材料，主动感知、自动愈合和自我修复是其基本特征。开发新型再生材料，揭示其再生机理，构建再生复合材料设计体系是实现道路材料可持续发展的有效措施。材料再生是指工业与民用废弃物如钢渣、塑料颗粒、建筑垃圾、道路旧料等材料的再生利用过程。研发新型材料再生技术，探索其物化性能，揭示新旧材料共混机理是实现废弃材料资源化利用的重要手段。

国内外关于铺面再生材料的研究成果主要集中在自修复材料的应用，当前主要自愈合材料能够修复毫米级裂缝，但在宽深裂缝上的自修复亟待进行理论创新和技术研发。自我感知材料、形状记忆聚合物已成功应用在航空航天等高精尖领域的智能材料中，两者在欧美国家道路铺面中有部分应用，但总体尚处于起步阶段。材料再生的研究成果主要集中在固体废弃物在道路工程中的资源化利用，但其再生过程的共混机理尚未明确，导致路用性能欠缺。因此，进一步对再生材料和材料再生中的科学问题进行研究是非常必要的。

全球交通基础设施可持续发展促进道路铺面研究紧紧围绕再生材料与材料再生两方面展开。借助新型再生材料的自修复、形状记忆功能，可以有效提高路面性能，延长路面寿命，降低道路维护保养成本，促进科技与经济的发展。材料再生可以有效缓解全球资源紧张和环境污染问题，推动经济和环保的进步。因此进行道路铺面再生材料与材料再生研究，有利于开创道路工程领域技术、经济、环保等方面的新局面，符合我国可持续发展的目标。这一前沿的主要研究方向包括：

(1) 揭示再生材料物化性能、智能感知、自我修复机理；开发道路铺面再生材料；建立复合再生材料协同作用模型；分析再生体与原有体的协同作用机理；研发智能化、自适应的新型再生材料；优化多物理场耦合条件下再生材料性能。

(2) 揭示材料再生的不同组分长期协同工作机理（如新旧沥青混合料协同作用、外加组分与原有材料的协同作用、新型胶凝材料不同组分的协同作用等）；建立工业与民用废旧材料基因数据库；探明废旧材料性能优势与缺陷；利用材料计算设计理论，实现材料再生过程绿色化、精细化、高效化。

表 1.2.9 “道路铺面再生材料与材料再生”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Spain	9	33.33%	222	36.94%	24.67
2	Australia	5	18.52%	82	13.64%	16.40
3	USA	3	11.11%	88	14.64%	29.33
4	Italy	3	11.11%	64	10.65%	21.33
5	Portugal	3	11.11%	51	8.49%	17.00
6	Canada	2	7.41%	52	8.65%	26.00
7	Switzerland	2	7.41%	47	7.82%	23.50
8	UK	2	7.41%	45	7.49%	22.50
9	France	2	7.41%	34	5.66%	17.00
10	Sweden	1	3.70%	31	5.16%	31.00

道路铺面再生材料与材料再生的核心论文数为 27 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引频次为 22.26。核心论文产出排名前五的国家或地区为西班牙、澳大利亚、美国、意大利和葡萄牙（见表 1.2.9）。篇均被引数排名前五的国家或地区为瑞典、美国、加拿大、西班牙和瑞士。从排名前十的核心论文产出国家或地区合作网络（见图 1.2.5）来看，国际间合作不甚紧密。

根据核心论文的产出机构情况（见表 1.2.10），核心论文发表最多的是西班牙科尔多瓦大学。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，机构之间合作不甚紧密。

施引核心论文产出前五的国家或地区为中国、美国、西班牙、澳大利亚和英国（见表 1.2.11），施引核心论文产出前三的机构为澳大利亚斯温伯恩理工大学、西班牙科尔多瓦大学和英国诺丁汉大学（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五的国家或地区施引核心论文数也比较多，其中中国施引论文数排名第一，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。

综合以上统计分析结果，道路铺面再生材料与

表 1.2.10 “道路铺面再生材料与材料再生”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	被引频次比例	篇均被引频次
1	Univ Cordoba	6	22.22%	156	25.96%	26.00
2	Univ Granada	3	11.11%	57	9.48%	19.00
3	Univ Palermo	2	7.41%	46	7.65%	23.00
4	Univ Beira Interior	2	7.41%	35	5.82%	17.50
5	Swinburne Univ Technol	2	7.41%	34	5.66%	17.00
6	Paradox Access Solut Inc	1	3.70%	35	5.82%	35.00
7	Univ Kansas	1	3.70%	35	5.82%	35.00
8	Empa	1	3.70%	33	5.49%	33.00
9	KTH Royal Inst Technol	1	3.70%	31	5.16%	31.00
10	Univ Nottingham	1	3.70%	30	4.99%	30.00

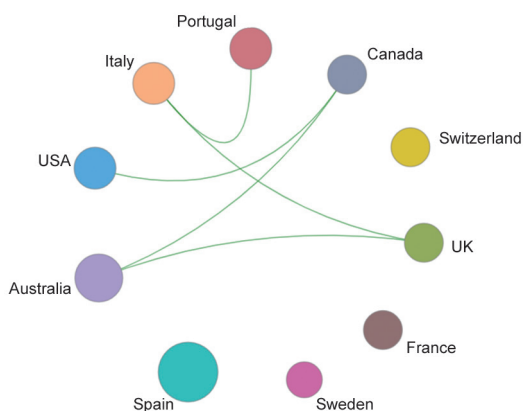


图 1.2.5 “道路铺面再生材料与材料再生”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

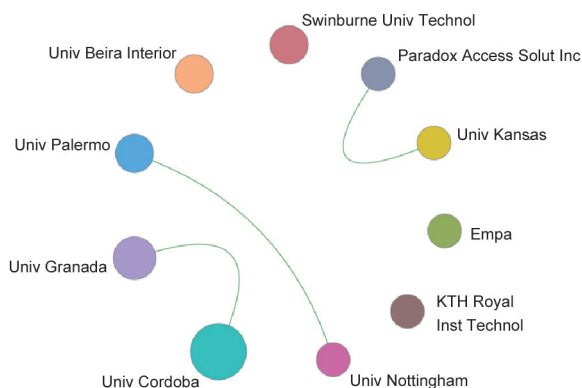


图 1.2.6 “道路铺面再生材料与材料再生”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “道路铺面再生材料与材料再生”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	151	18.48%	2016.8
2	USA	146	17.87%	2016.4
3	Spain	123	15.06%	2016.2
4	Australia	88	10.77%	2016.5
5	UK	74	9.06%	2016.2
6	Italy	64	7.83%	2016.5
7	India	49	6.00%	2016.8
8	Portugal	47	5.75%	2016.1
9	France	39	4.77%	2016.1
10	Thailand	36	4.41%	2016.4

表 1.2.12 “道路铺面再生材料与材料再生”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	Swinburne Univ Technol	37	16.30%	2015.9
2	Univ Cordoba	34	14.98%	2015.2
3	Univ Nottingham	30	13.22%	2015.9
4	Suranaree Univ Technol	29	12.78%	2016.0
5	Tongji Univ	20	8.81%	2016.7
6	Southeast Univ	19	8.37%	2016.9
7	KN Toosi Univ Technol	16	7.05%	2015.6
8	Univ Politecn Valencia	16	7.05%	2016.8
9	Univ Melbourne	13	5.73%	2016.8
10	Changan Univ	13	5.73%	2016.6

材料再生研究前沿，我国的相关研究目前处于跟跑的姿态，建议我国继续加大在该前沿的研究投入，推动该前沿的相关研究向世界领先水平加速发展。

2 工程开发前沿

2.1 Top10 工程开发前沿发展态势

土木、水利和建筑工程领域的 Top10 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、道路与铁路工程、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，“智能交通关键技术体系”“超长、超深埋隧道修建技术与智能装备”“新型深水基础及缆索承重桥梁抗风”“环境友好型建筑材料”“城市用水深度处理”“城市雨洪调控技术”和“高精度导航定位与时空大数据”是传统研究的深入，“智能建造及其 3D 打印技术”“绿色规划及绿色建造技术”和“城市地下空间协同开发与利用”是新兴前沿。各个前沿所涉及的专利自 2012 至 2017 年的逐年施引专利数见表 2.1.2。

表 2.1.1 土木、水利与建筑工程领域 Top10 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	智能建造及其 3D 打印技术	65	951	14.63	2014.45
2	绿色规划及绿色建造技术	49	245	5.00	2015.41
3	智能交通关键技术体系	85	1022	12.02	2013.44
4	超长、超深埋隧道修建技术与智能装备	14	34	2.43	2014.50
5	城市地下空间协同开发与利用	135	49	0.36	2016.61
6	新型深水基础及缆索承重桥梁抗风	179	240	1.34	2015.09
7	环境友好型建筑材料	254	380	1.50	2015.28
8	城市用水深度处理	153	1757	11.48	2013.67
9	城市雨洪调控技术	67	542	8.09	2014.28
10	高精度导航定位与时空大数据	570	20 781	36.46	2013.42

表 2.1.2 土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	智能建造及其 3D 打印技术	9	7	15	17	14	3
2	绿色规划及绿色建造技术	4	3	3	11	15	13
3	智能交通关键技术体系	22	31	16	8	5	3
4	超长、超深埋隧道修建技术与智能装备	4	1	2	1	3	3
5	城市地下空间协同开发与利用	0	3	0	3	34	95
6	新型深水基础及缆索承重桥梁抗风	21	10	32	36	28	52
7	环境友好型建筑材料	22	20	39	43	44	86
8	城市用水深度处理	39	29	43	30	9	3
9	城市雨洪调控技术	9	12	10	25	9	2
10	高精度导航定位与时空大数据	205	127	112	57	57	12

(1) 智能建造及其 3D 打印技术

智能建造是基于信息物理系统 CPS 的先进建造技术与信息技术的深度融合，在工业化建造和数字化建造的基础上，通过对建筑与基础设施的构件、部品、体系（即 Physical System，物理系统或实体系统）在其全生命周期中立项、设计、制造、运输、装配、运维及服务等环节的建造活动通过赛博空间（即 Cyber System）的孪生模型进行信息感知与分析、数据挖掘与建模、状态评估与预判、智能优化与决策，从而实现建造对象

自身以及建造过程、建造装备、建造系统的知识推理、智能传感和精准控制与执行。智能建造系统包含智能设计与规划、智能装备与施工、智能运维与服务三大子系统，涉及人工智能、3D 打印、数字建造、机器人、大数据、物联网、云计算等先进技术。随着建筑工业化的深入发展，建筑业生产力的提升愈发依赖于学科交叉，并进一步衍生出智能建造等新兴交叉学科，智能建造系统只有通过建筑、土木、计算机、机械、电信、材料、管理等多学科的深度交叉研究才能得以实现，同时相关技术

体系的攻关对高校、企业之间的联合创新机制和能力提出了更高的要求。从2012年至2017年，智能建造及其3D打印技术的专利公开量为65，被引频次为951，平均被引频次为14.63。

（2）绿色规划及绿色建造技术

绿色规划及绿色建造技术应用是城乡发展历程中保护地球资源，认同“我们只有一个地球”达成的共识，是实现可持续发展人类命运共同体的规划及建造战略。其主要研究方向不仅包括绿色生态及开放空间规划，且涵盖在城市规划、建设、发展与建筑建造的全生命周期中。在确保满足功能需求的前提下，提倡尽量节约资源能源、提高能源资源利用效率、积极开发利用可再生能源，通过数据分析、参数化设计和人工智能技术实现设计结合自然。具体应用包括海绵城市建设（低影响开发，水敏性城市），气候适应性规划和建造（涉及日照、采光、通风及热舒适度调控）。目前的研究尺度可以是单栋建筑，也可以是城市局部地段和整个城市。从2012年至2017年，绿色规划及绿色建造技术的专利公开量为49，被引频次为245，平均被引频次为5.00。

（3）智能交通关键技术体系

智能交通系统以信息技术、通信技术、控制技术、智能技术和系统工程等当代高新技术和新理论为基础，以建设高效、安全、绿色和智能的综合交通系统为目标，从人、车、路、环境等不同维度探索 and 解决交通问题。不同国家的智能交通系统发展有所侧重，但主要内容上大体一致，包括：智能化交通信息服务系统，智能化交通管理系统，智能化公共交通系统，智能化车辆控制系统，营运车辆管理系统，电子收费系统，安全保障、紧急事件管理与救援系统等。在新技术的引领和推动下，智能交通系统的发展进入一个全新的时代，跨界融合创新催生出了许多新的模式和服务内容，推动了智能交通系统的技术内容及模式的升级换代。目前，智能

交通系统技术创新主要集中在以下方面：交通状态全息精确感知与交互、综合交通系统智能化协同管控与服务、共享交通调度与服务、载运工具智能化与智能生态驾驶及车路协同系统及主动式交通安全保障等。从2012年至2017年，智能交通关键技术体系的专利公开量为85，被引频次为1022，平均被引频次为12.02。

（4）超长、超深埋隧道修建技术与智能装备

超长、超深埋隧道一般是指长度10 km以上、埋深500 m（山岭隧道）或水压0.5 MPa（水底隧道）以上的隧道工程。随着隧道建造技术与装备的进步，在穿越崇山峻岭或跨越江河湖海时，国内外也出现了长度达50 km以上、水压达1 MPa以上的隧道工程。由于长度长、埋深深，超长、超深埋隧道工程建造面临着极大的技术难题与挑战。其主要技术方向包括：超深埋隧道工程地质和水文地质精细化探测技术与装备；超深埋隧道荷载及结构设计计算新方法；超长、超深埋隧道新型智能材料与结构形式；高应力、高地温、高水压环境下的隧道施工新技术与装备；超高水土压力及超长距离隧道掘进施工技术与装备；适应超深埋复杂环境的智能化、小扰动、高性能施工装备；超深埋隧道建造运维期防水控水新技术与装备；超长隧道安全与服役性能智能感知、维护技术与装备；超长、超深埋隧道运营安全与智慧防灾减灾救援技术；超长、超深埋隧道建造全过程动态风险管理与监控等。从2012年至2017年，超长、超深埋隧道修建技术与智能装备的专利公开量为14，被引频次为34，平均被引频次为2.43。

（5）城市地下空间协同开发与利用

城市地下空间协同开发与利用是指以城市总体规划及相关法律法规为基础，根据城市发展对不同功能、规模和性质地下空间的需求，对城市地下空间进行统一规划、布局、开发和利用，建立一种资源共享的地下空间开发和利用模式，构建不同功能

城市地下空间协同开发技术,实现地下空间的可持续发展。其技术方向包括:城市地下空间适宜性评价技术;不同功能、规模、性质城市地下空间协同开发与利用的相互适应性研究;城市地下空间功能、形态等协同开发和利用模式;城市地下空间协同开发的合理结构与共建技术;协同开发地下空间的运维管理模式及方法;城市地下空间多功能协同开发与利用灾害安全管控与智慧监控。我国城市的快速发展和严格的耕地保护制度,使城市未来建设用地十分紧张。而城市地下空间的协同开发与利用,则会使原来功能相对单一、孤立开发的地下空间向多功能、多元化、共享的方向发展,在城市土地资源高度紧缺的条件下,通过协同开发与利用技术,实现地下空间的整体有序开发和利用,从而提升城市地下空间可持续发展能力。从2012年至2017年,城市地下空间协同开发与利用的专利公开量为135,被引频次为49,平均被引频次为0.36。

(6) 新型深水基础及缆索承重桥梁抗风

跨越海峡深湾的桥梁通常采用深水基础及大跨缆索承重桥梁相结合的技术方案。深水基础的构造形式和缆索桥梁的抗风措施是控制结构长期性能演化的关键因素。相关主要技术方向包括:深水基础时变力学行为分析及控制;深水基础波流作用下长期承载性能劣化分析及控制;深水基础冲刷特征分析及控制;近地边界层风特性及模拟;桥梁结构构件气动导纳识别;桥梁颤抖振精细化分析及控制;湍流涡脱形态分析及结构效应等。技术动态包括:碎石垫层沉箱基础冲刷机理及防护方法;带桩沉箱复合基础承载非线性振动特性分析及优化;吸力式基础长期承载沉降行为观测及优化;台风气候条件风场空间分布及非平稳抖振分析;不同来流下颤振主动控制分析及验证;大跨桥梁风致振动全过程模拟及气动极限研究等。从2012年至2017年,新型深水基础及缆索承重桥梁抗风的专利公开量为179,被引频次为240,平均被引频次为1.34。

(7) 环境友好型建筑材料

环境友好型建筑材料是指以节能环保为导向,通过材料性能优化和废弃物综合利用等手段生产的绿色土木工程材料。城市建设、工业生产产生了巨大的废弃物,环境保护和城市发展之间的矛盾,人与自然之间的矛盾日趋尖锐,将废弃物资源化是一条行之有效的物质循环途径。利用城市建设中产生的大量建筑垃圾如废弃混凝土和废弃砌块生产出可再生骨料,通过一定的制备工艺将之用于制备普通混凝土甚至是高性能或超高性能混凝土。针对工业生产产生的大量钢渣、镍渣、粉煤灰、废石膏等工业废渣,研究合理的活性激发技术与组分相容技术,制备出具有良好力学性能和耐久性能的大掺量工业废渣绿色高性能混凝土。同时,通过优化材料性能,制备出具有高力学性能、高耐久性、高耐磨性和高抗爆性的超高性能混凝土材料。以上环境友好型建筑材料可用于多类土工结构,具有广阔的前景。从2012年至2017年,环境友好型建筑材料的专利公开量为254,被引频次为380,平均被引频次为1.50。

(8) 城市用水深度处理

随着城市化的发展,用水量不断增长与淡水资源有限的矛盾日益突出。工业及生活污染废水排入水体导致供水水源污染,主要污染物分为微量有机污染物、微小颗粒污染物、水体富营养化元素,如:氨、磷等,传统混凝、沉淀、过滤净水工艺已不能满足正常生活饮用水的水质要求,为此需要开发针对自来水的深度处理技术及装备,以高级氧化技术、原水预处理技术和以膜过滤技术为核心的净化工艺为第三代饮用水深度处理技术的代表。

城市污水是一种非传统水资源,经深度处理的污水回用可作为非直饮水的城市用水,不仅是解决供水不足和生态环境的有效途径,还能提高回用的水质、水量及其经济附加值。采用物理、化学、生物及组合技术进行处理,使污水达到可以重新利用标准的整个过程系统,代表性处理技术有生物强

化处理、催化氧化、膜过滤等。从2012年至2017年，城市用水深度处理的专利公开量为153，被引频次为1757，平均被引频次为11.48。

（9）城市雨洪调控技术

随着城市化进程的加快和经济的高速发展，城市雨水问题愈发凸显，主要表现在城市洪涝灾害风险加大、雨水资源大量流失，雨水径流污染严重，城市生态环境破坏严重等方面。城市雨洪调控技术正是应对城市雨水问题提出的概念，通过对城市降雨径流采取“渗、蓄、滞、净、用、排”措施，实现城市雨洪和非点源污染从源头、中途到末端的控制。源头控制技术包括屋顶绿化、低势绿地、透水铺装、雨水花园、植被浅沟、雨水桶等；中途控制技术包括截污雨水井、渗透沟（管）渠、雨水过滤池等；末端控制技术包括雨水塘、雨水湿地、缓冲带、生态堤岸、生物浮岛等。这些技术已在资源利用、防洪减灾、生态环境保护等方面得到了很好的应用。近年来，我国城市雨洪调控利用发展较快，个别城市尝试构建雨洪调控利用的相关体系，建设了一些示范性工程，但总体水平和推广应用程度仍然较低。城市管网雨污分流改造缓慢，雨水利用设施规模偏小，普遍缺乏应对超过管网排水能力降雨的内涝防控设施，缺少雨水设施、地下空间等数据信息和权威性国产模拟软件，难以实现城市雨洪资源综合利用。因此，今后需要加快推进大排水系统、多时空尺度的城市水量水质模拟软件、数字化雨洪资源平台、雨洪资源的分类调度等方面的技术研发与成果推广。从2012年至2017年，城市雨洪调控技术的专利公开量为67，被引频次为542，平均被引频次为8.09。

（10）高精度导航定位与时空大数据

高精度导航定位与时空大数据技术是测绘工程领域的开发前沿之一，在物联网、智慧地球、节能减排、救灾减灾等领域发挥着重要的基础性支撑作用。高精度导航定位技术是借助于导航定位系统所

提供的位置、速度及时间信息实现对各种目标的定位、导航及监管，要求实现广域覆盖，定位、导航精度达到分米级甚至更高精度；时空大数据技术则通过数据处理、分析、融合和挖掘，提高空间定位、空间感知和空间认知能力。其主要研究方向包括：①全球连续覆盖的高精度实时卫星导航定位技术，如第三代GNSS技术等；②室内外协同的高精度无缝定位与导航技术，如Wi-Fi/WSN/RFID/UWB等室内定位技术；③时空大数据技术，对地理时空大数据进行时间序列和空间趋势的统计分析和数据挖掘，发现知识，为空间决策支持系统提供知识服务。从2012年至2017年，高精度导航定位与时空大数据的专利公开量为570，被引频次为20781，平均被引频次为36.46。

2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 智能建造及其3D打印技术

传统建筑业仍处于劳动密集型阶段，对社会资源的消耗极大，尤其是建筑耗能及建筑材料生产过程消耗，在社会总耗能的占比达到46%，已成为国民经济的巨大负担，绿色、低碳、环保型产业发展势在必行。基于信息物理系统CPS的先进建造技术与信息技术的深度融合应运而生的智能建造系统能够有效地解决上述问题，同时也是建筑业转型升级的必然趋势。构建高效的智能建造体系需要有机集成人工智能、3D打印、数字制造、机器人、大数据、物联网和云计算等先进技术，确保建筑物在全生命周期内全链条的各阶段、各专业、各参与方之间协调工作，实现物理空间和虚拟空间的相得益彰，以实现建筑业的生产方式的升级以及生产力的大幅提升。

当前，“智能建造及其3D打印技术”的主要技术方向有：与智能建造相匹配的结构体系及智能设计、智能装备与施工、智能运维与服务。

(1) 与智能建造相匹配的结构体系及智能设计

传统建筑行业的建筑与结构设计大多仍针对单个项目进行人工设计,需要设计人员进行大量重复性工作,各工种之间协同效率相对低下;尤其是基于节省材料原因,构件和配件的尺寸各异,施工工业化、智能化、施工过程管理等难度增大且效率不高。智能建造的基本技术特征是规划设计的智能化、加工制作自动化、现场施工智能装配化、运维管理信息化、拆除废件资源化;从而确保建造质量、建造效率、减少劳动力需求,同时实现建筑的全生命周期维护。结构设计体系化、结构构件及配套部品的模数化和标准化是实现建筑设计智能化的基础和效率保证。此外,高效的结构体系和连接节点技术是实现智能设计的关键技术之一,相关技术发展水平是衡量一个国家智能建造产业水平的重要指标。

(2) 智能装备与施工

现代建造技术通过标准化部品制造、装配化体系建造、智能化施工技术和信息化过程管理来建造桥梁、建筑、隧道及地下工程等各类建(构)筑物,通过建造模式变革以实现传统建筑业的转型升级。因此,现代建造装备在地下空间开发、大型土方工程、大型结构安装、应急救援救灾、交通运输、空间及海洋探索等领域具有广阔的应用前景。现代化高效的施工工艺和建造装备具有技术含量高、产业关联度大、带动能力强等特点,是国家综合实力和国际竞争力的重要体现之一。正因为如此,研究和发​​展建造装备技术一直受到世界各国的重视,许多国家都把建造装备技术列入本国的高技术发展计划或国家关键技术进行研究和开发。

当前,传统的建筑施工作业方式正逐渐被一些高新技术所颠覆。建筑施工行业正在加速转型升级,由劳动密集型向技术、知识和管理密集型转变。《中国建筑施工行业信息化发展报告(2016)

互联网应用与发展》深度论述了建筑施工行业互联网应用的现状与未来发展趋势,认为建筑施工行业转型升级离不开互联网的支持与深度应用,智能建造、智能企业将是未来建筑施工行业转型升级和发展的方向。

(3) 智能运维与服务

集成式智能化建造通过将建筑内部各部品的工厂化生产和现场集成装配施工,可实现安全耐久、施工快捷、低碳环保等建设目标,可大幅减少建筑垃圾和建筑污水,降低建筑噪声,提高施工质量和施工效率。同时,通过各种传感器、智能家居以及相关管理软件系统等来实现建筑系统的全生命周期健康监测和维护管理。在整个建筑系统管理方面,只有通过管理的信息化、智能化和生产流程的标准化,才能更好地降低造价、缩短工期、确保质量和安全性,从而发挥建筑工业化技术的优势,进一步提高整个建筑业的生产效率,实现真正的智能建造。在建筑的全生命周期过程中,使用以现代网络、通信、电子设备等为载体的信息化手段,优化管理流程和实现生产流程的标准化,对建筑的设计、施工、验收、维护管理、拆除和回收利用等进行实时化、精细化、智能化管理,将对智能建造技术的快速发展起到了强有力的推动作用。

“智能建造及其3D打印技术”工程开发前沿的核心专利为65篇,平均被引频次为14.63(见表2.1.1),排名前三的国家或地区为美国、中国(除中国台湾)和韩国(见表2.2.1),申请专利量最多的国家为美国,占比达到了41.54%,平均被引频次为22.41。中国机构或个人所申请的专利占比达到了40%,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8.69。基于当前的样本数据,从核心专利产出排名前十的国家或地区之间的合作网络(见图2.2.1)来看,国家或地区之间无合作。

根据核心专利的产出机构情况(见表2.2.2),

表 2.2.1 “智能建造及其 3D 打印技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

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	USA	27	41.54%	605	63.62%	22.41
2	China	26	40.00%	226	23.76%	8.69
3	South Korea	5	7.69%	27	2.84%	5.40
4	Denmark	1	1.54%	12	1.26%	12.00
5	Finland	1	1.54%	20	2.10%	20.00
6	India	1	1.54%	21	2.21%	21.00
7	Japan	1	1.54%	13	1.37%	13.00
8	The Netherlands	1	1.54%	22	2.31%	22.00
9	Russia	1	1.54%	3	0.32%	3.00
10	Germany	1	1.54%	2	0.21%	2.00

表 2.2.2 “智能建造及其 3D 打印技术”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	STTS(Makerbot Ind LLC)	USA	8	12.31%	243	25.55%	30.38
2	CSCE(China State Construction Engrg. Corp. Ltd.)	China	3	4.62%	19	2.00%	6.33
3	SMSU(SAMSUNG Electronics Co., Ltd.)	South Korea	3	4.62%	17	1.79%	5.67
4	IROB(Irobot Corp)	USA	2	3.08%	92	9.67%	46.00
5	APRECIA Pharm Co	USA	2	3.08%	77	8.10%	38.50
6	GENE(General Electric Co)	USA	2	3.08%	32	3.36%	16.00
7	CISC(Cisco Technology Inc)	USA	2	3.08%	17	1.79%	8.50
8	GLDS(LG Display Co., Ltd.)	South Korea	2	3.08%	10	1.05%	5.00
9	UYTJ(Tongji University)	China	1	1.54%	41	4.31%	41.00
10	View Inc	USA	1	1.54%	37	3.89%	37.00

该前沿排名前三的产出机构为 Makerbot Ind LLC、中国建筑集团有限公司和 SAMSUNG Electronics Co., Ltd。基于当前的样本数据，从核心专利产出机构排名前十的合作网络（见图 2.2.2）来看，机构之间无合作。

2.2.2 绿色规划及绿色建造技术

绿色规划是构建可持续发展社会战略的必然发展趋势和关键落脚点。其核心内容是在城市发展与建筑全生命周期中，在确保健康舒适居住环境前提

下，节约资源能源、提高能源资源利用效率、积极开发利用可再生能源，实现与自然的协调和环境可持续发展。绿色建筑的研究从建成环境的节能与生态技术入手，在充分利用被动技术实现建筑降耗的基础上，积极开发绿色能源的利用和绿色建筑的综合技术创新。从全球绿色建筑发展的背景看，研究发展的战略咨询将紧密围绕绿色城市与绿色建筑两方面展开，通过关注生态城市、气候环境、自然资源、被动技术、能效技术、人的舒适健康、综合评价技术等，形成一套完整的咨询前沿技术。技术动

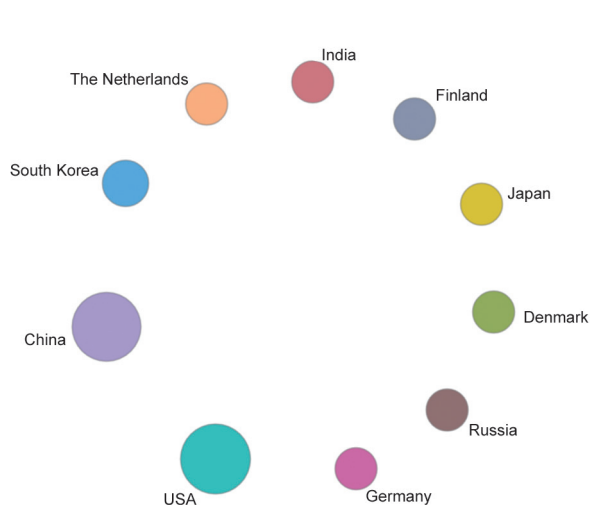


图 2.2.1 “智能建造及其 3D 打印技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

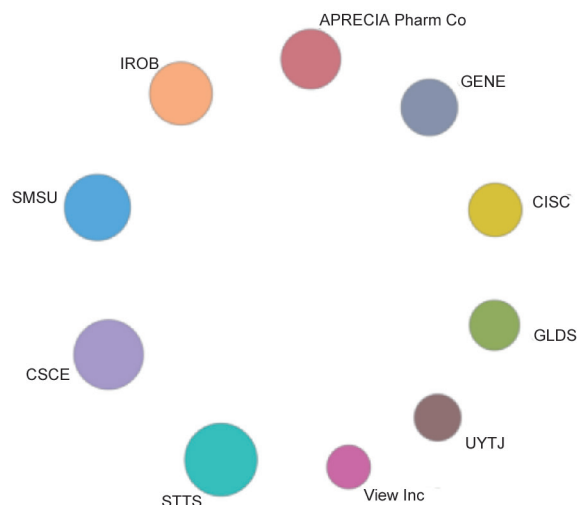


图 2.2.2 “智能建造及其 3D 打印技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

态包括：高密度城区气候与能耗评价方法及信息图谱研究，气候响应的绿色建筑性能优化设计与技术体系，城市建筑能源互联网技术研究，被动技术在绿色建筑中的应用与创新研究，绿色建筑的人舒适性、行为模式、评估与评价分析，主被动结合、互补协调的绿色建筑协同技术体系等。

中国的绿色规划如火如荼的发展，80% 的国家级新区所在城市或其部分城区是国家绿色低碳相关示范项目所在地，在新区绿色能源、蓝绿生态格局、绿色交通系统、绿色建筑和绿色基础设施等方面进行了试点，并发布了《绿色生态城区评价标准》。

“绿色规划及绿色建造技术”工程开发前沿的核心专利 49 篇，平均被引频次为 5 (见表 2.1.1)，排名前三的国家或地区为中国（除中国台湾）、美国、日本（见表 2.2.3）。中国机构或个人所申请的专利占比达到了 95.92%，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 4.96。基于当前的样本数据，从核心专利产出国家或地区之间的合作网络（见图 2.2.3）来看，国家或地区之间无合作。

根据核心专利的产出机构情况（见表 2.2.4），该前沿排名前三的产出机构为太空智造股份有限公司、常州绿建板业有限公司和恒元建筑板业有限公司。从核心专利产出机构排名前 12 的合作网络（见图 2.2.4）来看，机构之间合作较少。

2.2.3 智能交通关键技术体系

智能交通系统以信息技术、通信技术、控制技术、智能技术和系统工程等当代高新技术和新理论为基础，以建设高效、安全、绿色和智能的综合交通系统为目标，从人、车、路、环境等不同维度探索 and 解决交通问题。不同国家的智能交通系统发展

表 2.2.3 “绿色规划及绿色建造技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	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	China	47	95.92%	233	95.10%	4.96
2	USA	1	2.04%	8	3.27%	8.00
3	Japan	1	2.04%	4	1.63%	4.00

表 2.2.4 “绿色规划及绿色建造技术”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	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	Beijing Taikong Panel Ind Corp	China	3	6.12%	9	3.67%	3.00
2	Changzhou Lvjian Plate Ind Co., Ltd.	China	3	6.12%	9	3.67%	3.00
3	Hengyuan Building Board Ind Co., Ltd.	China	3	6.12%	9	3.67%	3.00
4	Shandong New Century Municipal Eng Co	China	2	4.08%	10	4.08%	5.00
5	Univ Northeast Petroleum	China	2	4.08%	6	2.45%	3.00
6	CNPW(Power Construction Corporation of China)	China	2	4.08%	4	1.63%	2.00
7	Shenzhen Inst Building Res Co., Ltd.	China	2	4.08%	3	1.22%	1.50
8	Lifengwang Shishi Environmental Protection Building Material	China	1	2.04%	13	5.31%	13.00
9	CRTC(Railway Eng Res Inst China Academy Railway Sciences)	China	1	2.04%	10	4.08%	10.00
10	Dongguan Yueyuan Packaging Co., Ltd.	China	1	2.04%	9	3.67%	9.00
11	Guangdong Yuansheng Eco-environment Prot	China	1	2.04%	9	3.67%	9.00
12	UYZH(Zhejiang University)	China	1	2.04%	9	3.67%	9.00

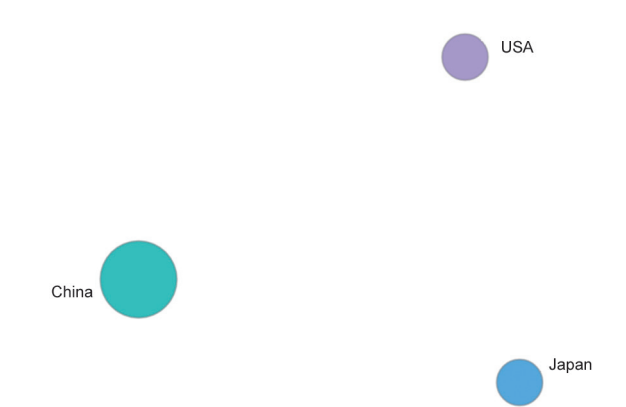


图 2.2.3 “绿色规划及绿色建造技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

有所侧重，但主要内容上大体一致，包括：智能化交通信息服务系统，智能化交通管理系统，智能化公共交通系统，智能化车辆控制系统，营运车辆管理系统，电子收费系统，安全保障、紧急事件管理与救援系统等。

在新技术的引领和推动下，智能交通系统的发展进入一个全新的时代，跨界融合创新催生出了

许多新的模式和服务内容，推动了智能交通系统的技术内容及模式的升级换代。目前，智能交通系统技术创新主要集中在五大领域：①交通状态全息精确感知与交互：实现前端感知设施的智慧化和网络化，准确、实时、透彻、全面掌握路网整体运行状态，为出行者和交通管理部门提供科学的决策依据；②综合交通系统智能化协同管控与服务：利用大数据、云计算、自动驾驶、车联网、人工智能等新技术，提升交通系统的智能化管控水平，逐步实现对交通个体的精准控制和诱导，提升交通设施的容量和效率；③共享交通调度与服务：以出行即服务为导向，以共享交通为背景，设计多模式共享交通系统，实现对多模式共享交通一体化管理、组织、调度和服务；④载运工具智能化与智能生态驾驶：以网联化为基础的智能汽车，成为代表未来先进技术发展趋势及产业升级方向的战略制高点，相关技术研发已经进入了现场规模测试阶段，未来将给交通系统带来巨大的变革和挑

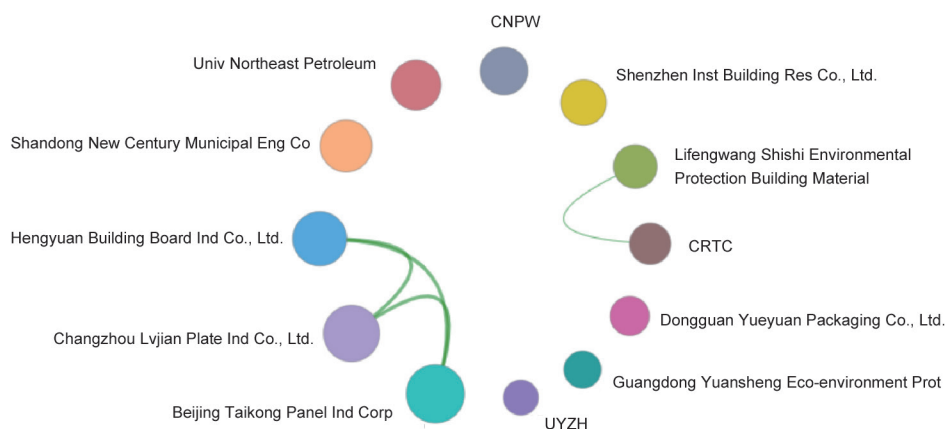


图 2.2.4 “绿色规划及绿色建造技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

战；⑤车路协同系统及主动式交通安全保障：基于无线通信、传感探测等技术获取车辆和道路信息，通过车车、车路通信进行交互和共享，实现车辆和基础设施之间智能协同与配合，达到优化利用系统资源、提高道路交通安全、缓解交通拥堵的目标。车路协同是目前世界交通运输领域的前沿领域，已成为世界各国极力投注资源推动的重点之一，如美国 IntelliDriveSM、日本 Smartway、欧盟 eSafety 等。

“智能交通关键技术体系”工程开发前沿的核心专利为 85 篇，平均被引频次为 12.02 (见表 2.1.1)，

排名前四的国家为中国（除中国台湾）、美国、日本和澳大利亚（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 72.94%，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 10.31。从核心专利产出国家或地区之间的合作网络（见图 2.2.5）来看，国家或地区的合作较为稀疏。

根据核心专利的产出机构情况（见表 2.2.6），核心专利产出最多的是 Qualcomm Incorporated。从目前样本数据来看，核心专利产出排名前十的机构之间基本不存在合作（见图 2.2.6）。

表 2.2.5 “智能交通关键技术体系”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	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	China	62	72.94%	639	62.52%	10.31
2	USA	17	20.00%	301	29.45%	17.71
3	Australia	2	2.35%	23	2.25%	11.50
4	Japan	2	2.35%	24	2.35%	12.00
5	Finland	1	1.18%	23	2.25%	23.00
6	India	1	1.18%	16	1.57%	16.00
7	The Netherlands	1	1.18%	39	3.82%	39.00
8	Saudi Arabia	1	1.18%	16	1.57%	16.00
9	Sweden	1	1.18%	10	0.98%	10.00

表 2.2.6 “智能交通关键技术体系”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	QCOM(Qualcomm Incorporated)	USA	5	5.88%	61	5.97%	12.20
2	UYQI(Tsinghua University)	China	2	2.35%	35	3.42%	17.50
3	UYXN(Xidian University)	China	2	2.35%	25	2.45%	12.50
4	ZGTH(China Railway Signal & Communication Corporation Limited)	China	2	2.35%	25	2.45%	12.50
5	HAIT(Harbin Institute of Technology)	China	2	2.35%	24	2.35%	12.00
6	IBMC(International Business Machines Corporation)	USA	2	2.35%	23	2.25%	11.50
7	Xi'an Feisida Automation Eng Co., Ltd.	China	2	2.35%	21	2.05%	10.50
8	Wuhan Fenghuo Zhongzhi Digital Technology	China	2	2.35%	17	1.66%	8.50
9	Bravioz Oy	Finland	1	1.18%	40	3.91%	40.00
10	TTTA(Tata Consultancy Service Co., Ltd.)	India	1	1.18%	39	3.82%	39.00

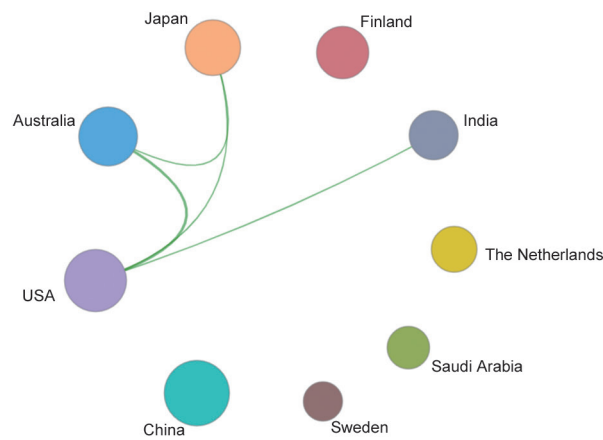


图 2.2.5 “智能交通关键技术体系”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

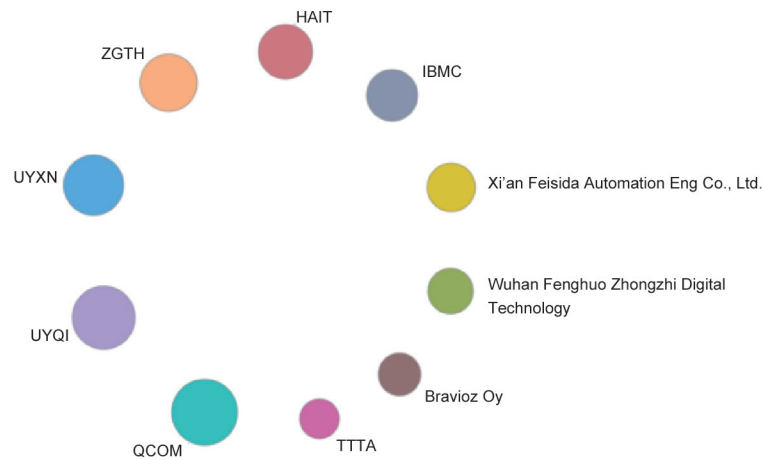


图 2.2.6 “智能交通关键技术体系”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

课题组长：崔俊芝 陈以一

院士专家：

崔俊芝 欧进萍 梁文灏 龚晓南 杜彦良
胡春宏 钮新强 肖绪文 吴志强

其他专家：

陈仁朋 池明旻 樊健生 高 军 顾冲时
郭蓉寰 韩继红 洪开荣 李安桂 李德英
李 惠 刘加平 刘仁义 罗尧治 马 军
孟凡超 乔丕忠 曲绍兴 任伟新 沈果毅
时蓓玲 孙 剑 谈广鸣 唐海英 王发洲
王卫东 吴 昊 熊鲁霞 徐 斌 徐赵东
杨 峰 张洛先 赵铁军 郑飞飞 郑 刚
朱若霖

工作组成员：

工程院土木、水利与建筑工程学部办公室：

唐海英 邢慧娴

FSCE 期刊编辑部：

结构工程：陈以一 赵宪忠 王 伟

桥梁工程：葛耀君 孙 智

岩土及地下工程：朱合华 庄晓莹 刘 芳

水利工程：黄文锐 蔡 奕

交通运输工程：凌建明 肖飞鹏

同济大学相关学科专家：

建筑学：李振宇 谭 峥

城乡规划与风景园林：张尚武 庞 磊

结构工程：顾祥林 张伟平 吕西林 李国强
周 颖

桥梁工程：李建中 孙利民

岩土及地下工程：黄宏伟 丁文其 蒋明镜

袁 勇

暖通空调：张 旭 周 翔

土木建筑材料：蒋正武 陈 庆

市政工程：夏四清

工程力学：李 岩 王华宁

测绘工程：童小华 陈 鹏

水利工程：刘曙光

同济情报所：陈 欣 姚俊兰

秘 书：

吴宇清 刘 芳，FSCE 期刊编辑部

李 敏，同济土木工程学院

姚俊兰，同济情报所

桂晓澜，高等教育出版社

报告执笔人名单：

负责执笔人：

陈以一 葛耀君 朱合华

其他执笔人：

结构工程：顾祥林 赵宪忠 张伟平 贾良玖

桥梁工程：孙 智

岩土及地下工程：张冬梅 闫治国 刘 芳

水利工程：蔡 奕

建筑学：李振宇 谭 峥

暖通空调：张 旭

城乡规划与风景园林：张尚武 庞 磊

道路与铁路工程：肖飞鹏

土木建筑材料：蒋正武 陈 庆

测绘工程：陈 鹏

市政工程：夏四清

同济情报所：姚俊兰