

五、土木、水利与建筑工程领域

1 工程研究热点及工程研究焦点解读

1.1 工程研究热点发展态势

土木、水利与建筑工程领域组研判的 Top10 工程研究热点汇总见表 1.1.1，涉及建筑学、结构工程、桥梁工程、工程力学、土木建筑材料、岩土及地下工程、水利工程、市政工程和测绘工程等学科方向。其中，“高性能土水建工程结构”“超高性能与多功能水泥基复合材料”“复杂结构分析方法”“建筑环境与人的行为”“重金属等高风险污染物去除”“土木工程结构可靠度”“结构缺陷分析”和“流体-结构相互作用模拟”是传统研究的深入，“材料生物重塑”和“混合像元分解与时空位置大数据分析”是新兴热点。各个热点涉及的核心论文从 2011 年至 2016 年的逐年发表情况见表 1.1.2，其中，“高性能土水建工程结构”和“复杂结构分析方法”是近年核心论文发表数目增速最显著的两个热点。

(1) 高性能土水建工程结构

高性能土水建工程结构是指在全寿命周期具有高安全性能、高使用性能、高施工性能、高环保性能、高耐久性能、高维护性能和高经济性能的重大土木及水利工程和多功能建筑体系结构。其涉及的富有挑战性的科学与技术问题包括：建筑（布局）、功能与结构协调统一的全新设计思想与实现途径，结构方案理性优选与结构精细化设计有机结合的结构分析、设计新理念与方法，规划、设计、施工、运维和移除全寿命、多性能权衡的优化设计新理论与技术。解决上述问题，不仅需要立足现代科学发展的深厚基础，通过物理与数值结合、宏观与细观贯通、定性与定量综合集成等途径进行创新研究，甚至需要全新的观念与思想乃至实施体系的变革。当前的主要热点有：新材料的研究和应用、结构体系的创新和发展、结构精细化分析与建模理论的进展、结构性能监测与控制理论与技术和结构全寿命可靠性分析与设计理论。从 2011 年至 2016 年，核心论文

表 1.1.1 土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程研究热点

序号	工程研究热点	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	专利引 用篇数
1	高性能土水建工程结构	377	9948	26.39	2014.06	23.60%	3
2	超高性能与多功能水泥基复合材料	36	948	26.33	2013.78	11.10%	0
3	复杂结构分析方法	135	3699	27.40	2014.83	39.30%	2
4	建筑环境与人的行为	34	716	21.06	2013.88	17.60%	0
5	重金属等高风险污染物去除	29	1243	42.86	2012.79	20.70%	0
6	土木工程结构可靠度	42	1138	27.10	2013.43	23.80%	1
7	材料生物重塑	34	1345	39.56	2012.59	20.60%	0
8	混合像元分解与时空位置大数据分析	95	3887	40.92	2013.31	12.60%	1
9	结构缺陷分析	30	483	16.10	2013.90	0%	0
10	流体-结构相互作用模拟	89	2694	30.27	2012.89	7.90%	1

表 1.1.2 土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程研究热点逐年核心论文发表数

序号	工程研究热点	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1	高性能土木工程结构	28	37	58	73	122	59
2	超高性能与多功能水泥基复合材料	2	6	5	10	11	2
3	复杂结构分析方法	0	5	17	15	57	41
4	建筑环境与人的行为	2	3	7	9	11	2
5	重金属等高风险污染物去除	9	5	3	8	3	1
6	土木工程结构可靠度	6	6	11	7	7	5
7	材料生物重塑	11	6	8	4	5	0
8	混合像元分解与时空位置大数据分析	14	12	20	32	14	3
9	结构缺陷分析	3	1	6	7	12	1
10	流体 - 结构相互作用模拟	21	15	18	24	10	1

篇数为 377，被引频次为 9948，篇均被引频次为 26.39。

(2) 超高性能与多功能水泥基复合材料

随着建筑技术的高速发展，传统水泥基材料的低韧性、高脆性已不能满足诸多特殊场合对材料高性能的要求，超高性能与多功能水泥基复合材料成为当前的研究热点。碳纳米管自从被发现以来，以其优异的性能在物理、化学和材料等研究领域引起广泛关注，其超强的力学性能作为复合材料增强体可大幅度改善材料的强度或韧性，优异的电学性能作为改性体可极大提高材料的电导率以制备新型光电聚合物复合材料。在水泥基材料中添加碳纳米管和碳纤维等，是获得超高性能土木工程材料的主要途径。常见的超高性能土木工程材料包括：自感知碳纳米管水泥基复合材料、多壁碳纳米管增强水泥浆体和碳纤维加固波特兰水泥砂浆等。将碳纳米材料分散于水泥基体中可赋予复合材料良好的物理化学性能，能够很大程度地提升混凝土结构的安全性和可靠度，并可将其用于高强智能水泥基材料的检测，因此，用碳纳米材料改善以水泥为基础的传统建筑材料拥有广阔的应用前景。从 2011 年至 2016 年，核心论文篇数为 36，被引频次为 948，篇均被引频次为 26.33。

(3) 复杂结构分析方法

随着计算机技术飞速发展，结构数值模拟与分析在科学研究和工程设计中发挥着越来越重要的作用。复杂结构分析方法的研究主要从两大方面展开：材料性质复杂性和结构几何复杂性。工程材料在外部作用下将产生复杂的开裂和损伤，进而导致结构破坏。将裂纹考虑为场变量的不连续性，引入不连续插值函数，并基于单位分解(PU)方法逼近不连续场，从而较为精确地模拟裂纹产生和扩展，是扩展有限元类方法(XFEM)的基本思想。这类方法由于理论的严密性和应用的便利性，一经提出便成为世界性的研究热点，近年来仍有相当数量的研究成果涌现。将裂纹的作用在一定范围内连续化，采用材料刚度的连续变化表达裂纹的作用，是损伤力学类方法的基本思想。损伤力学类方法近年来的研究热点集中于非局部理论等领域，目的是为了了解决网格敏感性和尺寸效应等难题。对于新型的工程材料结构，如纤维复合材料结构和功能梯度材料结构等，针对性分析方法的研究近年来也集中涌现，这类研究基本上可以归结到多尺度类方法的范畴，其基本思路是基于材料的细观分析和模拟结果寻求材料的宏观代表性性质。对于具有复杂几何外形的结构，

从几何模型到有限元模型的转化往往十分复杂，其工作量有时甚至超过结构数值模拟本身的工作量。为了解决这一问题，研究者近年来提出采用结构几何模型的基函数（如 NURBS）作为力学分析的形函数直接进行分析和模拟的方法，称为等几何方法。等几何方法目前方兴未艾，主要研究工作集中于复杂空间结构的振动、屈曲和开裂等问题。从 2011 年至 2016 年，核心论文篇数为 135，被引频次为 3699，篇均被引频次为 27.40。

（4）建筑环境与人的行为

建筑环境与人的行为研究是指建筑环境与人体舒适、人行为之间的关系和相互作用，研究如何通过城市规划、区域下垫面设计、建筑设计、建筑设备系统设计来满足人的心理要求，以改善人的居住环境，并研究人与环境之间的交互和调控行为。主要研究包括：人对室内外温度、湿度、风速、辐射等环境因素的舒适性需求，基于适应性理论和动态热舒适理论的热舒适评价及预测，以及人对建筑环境调节行为的描述与模拟等。包含的分支工程科学包括：室外微气候与热舒适、人对气候的热适应和人对环境的调控行为。建筑环境与人的行为研究目前是国内外研究的热点方向，传统的建筑室内空调环境热舒适评价模型和设计理论已发展得较为充分和成熟，近年的研究热点集中在室外环境热舒适、动态热舒适和热适应、特殊环境下热舒适（如高海拔、公共交通和航空航天等）和热舒适与人行为的交互等方面，是对已有的热舒适和人行为理论的补充和发展。随着人对生活品质需求的提高以及绿色和可持续发展理念的普及，该领域将继续保持建筑环境领域研究热点的地位，并在传统理论的基础上发展出新的内涵。从 2011 年至 2016 年，核心论文篇数为 34，被引频次为 716，篇均被引频次为 21.06。

（5）重金属等高风险污染物去除

通过科学和工程手段对被重金属等高风险污染物污染的水、大气或土壤等载体进行修复，使载体

中的污染物转化成毒性较低的形态或浓度降低至安全范围以内。重金属污染指水、大气或土壤等载体中的汞、镉、铅、铬、砷等重金属离子及其化合物浓度超过安全限值，能对环境 and 植物产生显著危害。重金属污染防治应采取总量控制与浓度控制相结合的思路，应做到源头预防、过程阻断、清洁生产、末端治理，以重点防控区、重点防控行业和重点污染源防治为主要内容。除从源头上控制减少重金属的排放外，已排放重金属的去除尤为关键。目前的主要技术包括淋洗法、吸附法、离子液体萃取法、氧化还原法、电化学法和光催化法等。此外，如何将去除后的重金属回收利用也逐渐被关注。除重金属外，环境中的高风险污染物还包括药品和个人护理用品等，虽然其浓度较低，但是长期暴露风险较大。现有的去除方法主要包括吸附法和氧化法等。从 2011 年至 2016 年，核心论文篇数为 29，被引频次为 1243，篇均被引频次为 42.86。

（6）土木工程结构可靠度

土木工程结构可靠度是研究结构在正常使用和灾害性作用下满足预定功能、安全与耐久要求的概率与相应的设计理论。其关键科学问题包括工程结构特性与作用的不确定性识别与建模、结构服役全寿命 - 受力全过程性能和结构可靠度分析与设计。自 20 世纪 40 年代后期以来，结构可靠度理论逐步发展成为土木工程设计理论的核心，其发展经历了 60 年代末到 80 年代初的黄金时期，20 世纪 90 年代基于性能的设计理念为结构可靠度理论注入了新的内容。21 世纪初以来，随着世界范围内自然和人为灾害影响的加剧，工程可靠度的重要性更为突出。同时，数据获取成本的降低与大数据技术的兴起和力学基础理论与高性能计算的迅速发展，伴随着不确定性量化理论在多个领域中的方兴未艾，结构可靠度理论迎来了新的契机。当前，结构可靠度理论研究的热点包括不确定性的建模、工程结构与系统的降维和替代模型和高效随机分析方法等。

与此同时，研究对象从地上结构向岩土工程与地下结构拓展，数学基础从概率论到包括非精确概率和区间方法等多种不确定性建模理论扩展，物理-力学基础从简化半经验理想模型向现代精细化多尺度物理力学提升。结构可靠度理论正在从近似概率向全概率水平和基于风险的决策、从偏重数学处理向基于物理的整体可靠度分析与设计跨越。从2011年至2016年，核心论文篇数为42，被引频次为1138，篇均被引频次为27.10。

（7）材料生物重塑

自然界在长期的进化演变过程中形成了具有完美结构组织形态和独特优异性能的生物材料。受自然界的启发，材料研究者试图揭示生物系统中的结构特征和形成机制，从而将其进一步应用于材料科学设计与制备。结构仿生材料研究是仿生学的一个重要分支，通过研究生物材料的结构特点和构效关系，进而对材料、结构、系统进行仿生模拟，从而提高工程结构效率。材料生物重塑是土木工程仿生研究的主要内容之一，其关注凝胶材料和生物修复加固材料在固化变形和生物生长阶段的非均匀膨大大变形及其对力学特性的影响。主要研究包括：材料本构关系和力学分析方法，存在边界增长力学问题的建模，以及静、动力问题的求解等。通过不断从生物界获得灵感，结构仿生材料越来越向着微观化和智能化方向发展，由功能材料构筑各种仿生微器件，并用之组装不同结构和功能的仿生微系统是今后研究的重点，并将在军事、工业和建筑业等领域获得广泛应用。从2011年至2016年，核心论文篇数为34，被引频次为1345，篇均被引频次为39.56。

（8）混合像元分解与时空位置大数据分析

混合像元分解与时空位置大数据分析的内容包含混合像元分解、高精度实时单点定位和时空大数据分析。混合像元分解突破传感器空间分辨力的限制，在亚像元精度内刻画出混合像元的分布情况等真实属性，通过向下尺度转换从粗空间分辨率的影

像获取高空间分辨率分类结果，提高影像信息提取精度。高精度实时单点定位利用精密卫星星历、精密卫星钟差和全球导航卫星系统（GNSS）接收机采集的伪距与载波相位观测值来获取更高精度的时空位置数据。时空数据采集手段以更高的空间分辨率和时空位置精度为发展目标，实现海量、高维时空位置大数据的获取、存储和解译。而后通过时空大数据分析技术从海量、多源时空位置大数据中自动发现和提取隐含的、非显见的模式、规则和知识，从体量大、速度快、模态多样和真伪难辨的大数据中挖掘其价值。从2011年至2016年，核心论文篇数为95，被引频次为3887，篇均被引频次为40.92。

（9）结构缺陷分析

土木结构与材料在施工、运营过程中由于服役环境变化、材料劣化、火灾、地震和爆炸冲击等内外因素的共同作用，将产生裂纹、缺陷和材料性能退化等各种各样的病害，进而诱发各种严重安全问题甚至土木工程灾害。开展缺陷病害条件下土木材料的断裂力学基础理论研究以及土木结构的承载力分析与安全评估已成为土木、水利与建筑工程领域的迫切需求。其研究内容主要包括：土木结构材料的起裂判据、断裂理论、断裂指标、板壳断裂分析理论；复杂加载条件下含异型缺口的土木工程构件或结构的断裂行为、极限承载力分析、安全评估、塑性疲劳和断裂破坏；不同土木结构的病害分类、分布情况调查、损伤缺陷特征与统计分析、合理计算模型等研究；采用聚甲基丙烯酸甲酯、钢材、石墨等材料进行各种不同类型、不同研究需求的缺陷试件研制，以及相应的试验理论、试验方法和断裂分析新理论、新方法研究。当前结构缺陷分析领域的热点研究方向是结构断裂破坏过程模拟分析的新理论与新方法，如基于非局部理论的、能解决网格敏感性和尺寸效应等难题的裂纹结构损伤力学理论与方法，能够避免单元插值带来的裂纹动网格模拟困难、可较精确和方便地进行结构断裂破坏过程模

拟分析的扩展有限元法和无网格法等数值分析新方法，以及适用于纤维复合材料、功能梯度材料等新型工程材料结构的、从微观到宏观的多尺度分析理论与方法等。从 2011 年至 2016 年，核心论文篇数为 30，被引频次为 483，篇均被引频次为 16.10。

(10) 流体 - 结构相互作用模拟

流体与结构的相互作用（流固耦合）问题研究的是固体与周围流体之间的耦合作用，包括变形固体在周围流场作用下的各种力学行为，以及变形固体位形对流场的影响。由于纯流体问题已涉及大量非线性现象，同时流固耦合系统涉及非线性几何大变形、弹塑性材料非线性和接触截面上的不确定性以及耦合所带来的非线性，所以流体 - 结构耦合系统属于复杂非线性系统，其求解主要立足于数值分析。主要研究包括：结构与水流 / 气流的相互作用规律和流体 - 结构耦合分析的建模技术等。流体 - 结构相互作用模拟的关键在于采用统一坐标系和两相界面的协调问题，而针对非线性耦合问题，需要探讨全场求解途径。要真正地将两者各自有效的方法相结合求解流体 - 结构相互作用耦合问题，其任务仍十分艰巨。从 2011 年至 2016 年，核心论文篇数为 89，被引频次为 2694，篇均被引频次为 30.27。

1.2 工程研究焦点解读

1.2.1 高性能土水建工程结构

土木、水利与建筑工程结构是人类生活、生产活动及其成果的主要物质载体。现代社会、经济与科技的发展，对工程结构提出了更高的综合性能要求，为应对这一要求，形成了高性能工程结构的全新概念。概括地说，高性能土水建工程结构是指在全寿命周期具有高安全性能、高使用性能、高施工性能、高环保性能、高耐久性能、高维护性能和高经济性能的重大土木及水利工程和多功能建筑体系结构。高性能工程结构概念提出的现实需求是，随

着经济社会与科技的发展，人员与财富在空间上高度密集，基础设施系统的功能与结构日益精细与复杂，但自然与人为灾害对人类社会造成的损失反而成倍增加，因而对作为保障人民生命财产安全物质载体的工程结构提出了更高的性能要求。同时，现代科学技术，特别是材料科学、物理与力学基础理论、信息与数据科学和高性能计算技术的飞跃发展，为实现上述高性能工程结构提供了前所未有的契机。

针对人们对高性能工程结构的需求，提出了一系列富有挑战性的科学与技术问题，主要包括：建筑（布局）、功能与结构协调统一的全新设计思想与实现途径；结构方案理性优选与结构精细化设计有机结合的结构分析、设计新理念与方法；以及规划、设计、施工、运维和移除全寿命、多性能权衡的优化设计新理论与技术。解决这些问题，不仅需要立足现代科学发展的深厚基础，通过物理与数值结合、宏观与细微观贯通、定性与定量综合集成等途径进行创新研究，甚至需要全新的观念与思想乃至实施体系的变革。

当前，“高性能土水建工程结构”工程研究焦点的主要热点有：

(1) **新材料的研究和应用**：新材料的发展是工程结构创新的主要推动力之一。近十年来，材料科学正在从材料制备 - 力学性能研究和试验 - 工程应用的传统发展模式向宏 - 微观相贯通的材料设计与材料 - 结构设计一体化方向发展。针对土木、水利与建筑工程高性能结构的不同需求，智能材料、高阻尼材料、高弹模材料、高耐久材料等具有特殊或综合优良性能的开发和应用正方兴未艾。但土木、水利与建筑工程结构对大宗材料的要求使得材料的经济性成为一个重要的瓶颈。降低材料成本、提高材料的综合或特殊性能，特别是材料的改性功能，将是重要的发展趋势。

(2) **结构体系的创新和发展**：结构体系的创新是实现结构高性能的主要途径之一。近年来，新

型组合结构体系理论与实践的发展、可恢复结构和智能结构等新型抗灾结构体系的深入研究以及基于仿生与拓扑优化的新型结构自动生成等研究取得了令人瞩目的进展。

(3) 结构精细化分析与建模理论的进展：

物理 - 力学基础理论（如固体本构关系理论乃至软物质理论）的迅速发展以及高性能计算装备和计算力学与技术（如光滑粒子点方法（SPH）、无网格方法、扩展有限元方法、等几何分析、大变形和强非线性分析方法等）的飞速发展，极大地促进了复杂的土木、水利和建筑工程结构的精细化分析理论与方法的发展，并成为了重要的前沿问题。在此方面，结合现代实验技术与数值计算的物理 - 数值多尺度综合模拟将是未来重要的发展方向。

(4) 结构性能监测与控制理论与技术：

结构性能监测将成为重大土木、水利和建筑工程结构的常规维护工作之一。具有高精度、抗干扰强、高耐候性、长寿命、能耗小、无线或长距离传输等优异性能的新型多参量传感器与传感网络、大数据分析的高效特征提取技术、工程结构预警、智能控制乃至自恢复或自修复技术，将依然是具有挑战性的前沿问题。

(5) 结构全寿命可靠性分析与设计理论：

该方向的研究热点包括不确定性量化与建模理论、降维与替代模型理论以及大数据技术与全寿命管理系统等。特别是，近年来在不确定性量化与土木、水利和建筑工程结构抗灾可靠度方面形成了新的研究高潮，取得了一系列重要的突破。因此，结合监测与控制，在精细化物理 - 力学建模与大数据支持下的土木建工程结构全寿命整体可靠性分析与优化设计理论和方法将是富有生命力的方向。

由于各国地理环境、发展阶段、经济状况、科学技术水平乃至历史人文和社会思想的差异，该焦点在不同国家研究的侧重点有所差异。近二十年来，美国在实现从大规模工程建设到维护、管理和灾后恢复的转换过程中，提出了基于性能的抗震设计、

结构健康监测以及全寿命周期经济性等一系列引领性方向，近年又进一步从单一工程结构向社区系统层次发展。欧洲国家情况不一。挪威、丹麦、德国等国家在工程结构和系统可靠性分析与设计理论方面具有优势；法国、西班牙等在结构固体力学分析基础理论方面具有引领性；意大利等在工程结构抗灾性能试验与理论研究方面特色明显；日本学者在新型抗灾体系和装置的系统性研发和应用方面处于国际前沿。近十余年来，随着我国大规模基础设施建设的持续进行，我国学者几乎在上述各个方面都进行了大量深入而卓有成效的研究，逐步凝练总结提出了高性能工程结构的新理念。在新材料的研发与应用、结构体系的创新与发展、结构精细化分析的理论与方法、结构性能监测与控制以及结构与系统可靠性设计等方面，我国都已经在国际上占有一席之地，未来 5~10 年可能在一个或多个方面达到国际领先水平。

“高性能土木建工程结构”工程研究焦点的核心论文共 377 篇，核心论文的篇均被引频次为 26.39（表 1.1.1）。排名前 5 的国家为中国（除中国台湾）、意大利、澳大利亚、美国和阿尔及利亚，其中中国发表论文的占比达到了 31.03%（中国内地 21.48%，港澳台 9.55%）（表 1.2.1），在论文数量方面比重较大，是该焦点的重点研究国家之一。篇均被引频次排名前 5 的国家为葡萄牙、阿尔及利亚、德国、中国和美国，其中中国作者发表的论文篇均被引频次为 24.11，高于平均水平（表 1.2.1），说明中国学者在该焦点的研究工作受到了较广泛的关注。从论文产出国的合作网络（图 1.2.1）来看，论文数量排名前 5 的国家中，除阿尔及利亚之外，其余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（表 1.2.2），该焦点排名前 5 的产出机构为阿尔及利亚达吉拉里莱厄比斯大学（Univ Djillali Liabes Sidi Bel Abbes）、香港大学、香港城市大学、澳大利亚阿德莱德大学（Univ Adelaide）和意大利罗马第一大

表 1.2.1 “高性能土水建工程结构”工程研究焦点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	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	China	117	31.03%	2821	33.03%	24.11	31	1
2	Italy	71	18.83%	1191	13.94%	16.77	0	0
3	Australia	69	18.30%	1524	17.84%	22.09	23	0
4	USA	43	11.41%	1032	12.08%	24.00	10	0
5	Algeria	39	10.34%	1169	13.69%	29.97	5	0
6	Germany	31	8.22%	858	10.05%	27.68	6	2
7	Singapore	24	6.37%	544	6.37%	22.67	6	0
8	Portugal	20	5.31%	712	8.34%	35.60	5	1
9	France	20	5.31%	276	3.23%	13.80	0	0
10	Iran	19	5.04%	306	3.58%	16.11	4	0

表 1.2.2 “高性能土水建工程结构”工程研究焦点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	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	Univ Djillali Liabes Sidi Bel Abbes	39	10.34%	1169	13.69%	29.97	5	0
2	Univ Hong Kong	38	10.08%	930	10.89%	24.47	14	0
3	City Univ Hong Kong	29	7.69%	790	9.25%	27.24	10	0
4	Univ Adelaide	23	6.10%	644	7.54%	28.00	8	0
5	Univ Roma La Sapienza	23	6.10%	310	3.63%	13.48	0	0
6	Lab Struct & Mat Avances Genie Civil & Travaux Pu	21	5.57%	629	7.36%	29.95	3	0
7	Wuhan Univ	20	5.31%	460	5.39%	23.00	7	0
8	Univ Sci	19	5.04%	672	7.87%	35.37	6	0
9	Bauhaus Univ Weimar	18	4.77%	620	7.26%	34.44	5	1
10	Univ Aquila	16	4.24%	256	3.00%	16.00	0	0

学 (Univ Roma La Sapienza)。从核心论文产出机构排名前 10 的合作网络 (图 1.2.2) 来看, 同一国家 / 地区的机构之间有一定的合作关系。

根据论文的施引情况来看(表 1.2.3 和表 1.2.4), 施引核心论文数排名前 5 的国家是中国、澳大利亚、美国、意大利和葡萄牙, 中国施引核心论文比例为 24.30%(其中施引排名前 5 的中国机构有香港大学、香港城市大学和武汉大学), 说明中国学者对该焦点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“高性能土水建工

程结构”工程研究焦点, 我国目前处于与国外同类研究并跑的态势, 并有逐渐向领跑状态发展的趋势, 建议我国继续加大在该工程研究焦点的研究投入, 推动该工程研究焦点的相关研究向世界领先水平的加速发展。

1.2.2 建筑环境与人的行为

“建筑环境与人的行为”由传统的基于稳态的热舒适研究发展而来, 已有近一个世纪的历史, 其主要特征是考查人体在稳态热环境条件下的热反

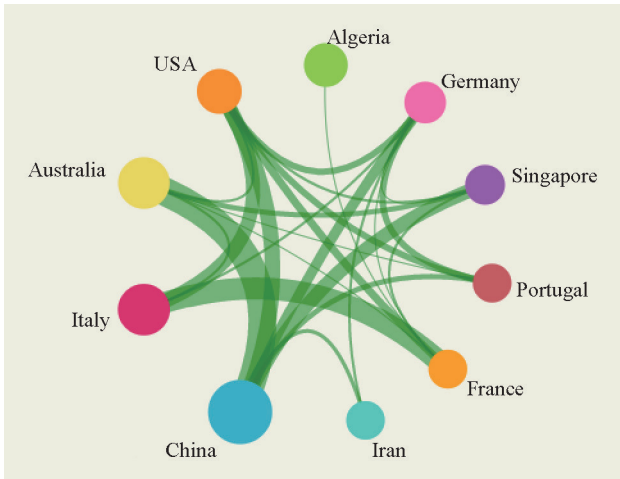


图 1.2.1 “高性能土木建工程结构”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络¹

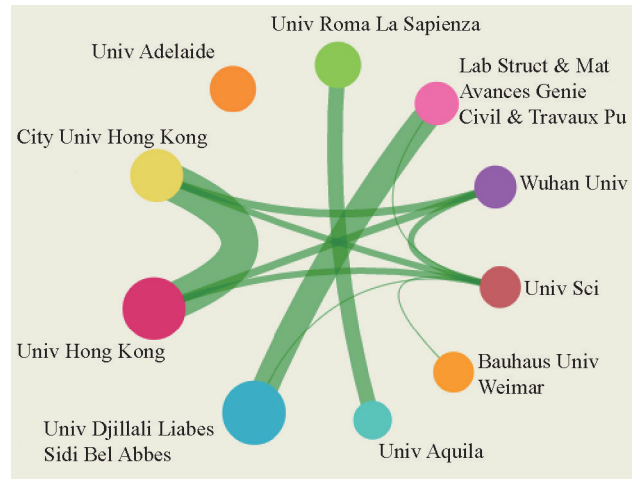


图 1.2.2 “高性能土木建工程结构”工程研究焦点主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “高性能土木建工程结构”工程研究焦点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	87	24.30%	2014.17
2	Australia	54	15.08%	2014.11
3	USA	27	7.54%	2014.07
4	Italy	24	6.70%	2014.67
5	Portugal	16	4.47%	2013.56
6	Iran	15	4.19%	2014.93
7	Algeria	15	4.19%	2015.33
8	Germany	14	3.91%	2014.21
9	Singapore	12	3.35%	2014.42
10	Korea	8	2.23%	2013.88

表 1.2.4 “高性能土木建工程结构”工程研究焦点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	Univ Hong Kong	28	5.32%	2014.61
2	City Univ Hong Kong	23	4.37%	2014.57
3	Univ Adelaide	21	3.99%	2013.86
4	Univ Sci	18	3.42%	2013.94
5	Wuhan Univ	18	3.42%	2014.61
6	Univ Djillali Liabes Sidi Bel Abbas	15	2.85%	2015.33
7	Univ Minho	12	2.28%	2013.33
8	Bauhaus Univ Weimar	10	1.90%	2014.30
9	Natl Univ Singapore	10	1.90%	2014.60
10	Hong Kong Univ Sci & Technol	9	1.71%	2013.78

¹ 图中，节点表示国家 / 地区，节点大小表示论文数量，节点连线表示有合作发表论文，连线粗细表示合作论文数量，全文相同。

应，以丹麦技术大学的 P.O. Fanger 教授提出的人体的热舒适模型为代表，并成为美国采暖、制冷与空调工程师协会(ASHRAE)和国际标准化组织(ISO)制定室内热环境标准的依据。我国所用热环境设计标准大体上也引用这些标准。

由核心论文关键词聚类分析可知，此工程研究焦点包含的工程科学主流及各焦点分支工程科学包括：室外微气候与热舒适、人对气候的热适应和人对环境调控行为。

(1) 室外微气候与热舒适研究包括：通过建筑布局设计、室外地面铺装、遮阳部件的应用、住区和城市绿化、雨水蓄积利用以及设置挡风墙和喷水池等技术措施调节室外微气候参数，营造舒适的室外热环境，以及提出室外热环境的安全性和舒适性的评价指标。拟解决的关键技术包括：短波和长波辐射对室外热舒适的影响；室外热舒适评价指标与室外微气候评价；基于热舒适的室外微气候调控措施等。发展趋势包括：由室外微气候调控向城市级别的规划理论发展；解决城市热岛、城市通风廊道等城市尺度气候问题；由室外劳动保护安全性指标向舒适性指标发展；解决大型园区室外等候、居民文化娱乐活动等室外空间场所的热舒适调控需求。在此分支研究的重点国家和地区有：中国台湾、埃及、马来西亚、新加坡、希腊、中国大陆、澳大利亚、法国、阿根廷、意大利、中国香港等。

(2) 人对气候的热适应研究包括：非空调自然通风建筑和自由运行建筑中人体舒适指标与传统空调环境的差异；人对于环境的热适应性机理，如生理习服、心理适应和行为调节；反映热适应的热舒适预测模型等。拟解决的关键技术包括：反映人体热适应的生理参数指标；人体热适应模型与传统热舒适模型的统一；反映热适应的室内环境设计参数和调控措施等。发展趋势包括：建立全世界范围内的热舒适现场调查和实验结果数据库；医学和生理学指征与热舒适研究的交叉；发展应对不同气候区、不同经济发展情况的人体热适应动态评价模型

和室内环境设计理论。在此分支研究的重点国家和地区有：澳大利亚、中国大陆、中国香港、日本、印度、美国等。

(3) 人对环境调控行为研究包括：通过数据测试采集、模型建立验证、问卷调查与案例研究等手段，分析建筑环境下人的调控行为驱动因素，提出人行为的定量化描述方法和软件模拟工具，考察人行为与环境参数之间的交互作用以及建筑能耗的影响，以满足科学研究和工程应用的实际需求。拟解决的关键技术包括：建筑环境人行为的标准化测试方法；人行为模型参数的描述和回归方法；人行为模型的模拟与验证。发展趋势包括：多人员位移和动作的标准化测试技术与定量化描述方法；人行为的环境驱动因素和多人员交互影响；人行为模型与室内环境参数及建筑能耗的耦合计算平台的开发。在此分支研究的重点国家和地区有：中国大陆、美国、德国、英国、澳大利亚、加拿大等。

“建筑环境与人的行为”工程研究焦点目前是国内外研究的热点方向，传统的建筑室内空调环境热舒适评价模型和设计理论已发展地较为充分和成熟。近年来的研究热点集中在室外环境热舒适、动态热舒适和热适应、特殊环境下热舒适(如高海拔、公共交通和航空航天等)以及热舒适和人行为的交互等方面，是对已有的热舒适和人的行为理论的补充和发展。随着人对生活品质需求的提高，以及绿色和可持续发展理念的普及，该领域将继续保持建筑环境领域研究热点的地位，并在传统理论的基础上发展出新的内涵。

“建筑环境与人的行为”工程研究焦点的核心论文共 34 篇，核心论文的篇均被引频次为 21.06(表 1.1.1)。核心论文产出排名前 5 的国家/地区为意大利、美国、印度、中国(除中国台湾)、日本和澳大利亚，其中中国发表论文占比为 14.71%(中国内地 8.83%，港澳 5.88%)(表 1.2.5)，是该焦点的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前 5 的国家/地区为英格兰、中国台湾、德国、日本和印

度，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为16.2，约为平均水平的87%（表1.2.5），说明中国学者在该焦点的研究工作还有进一步上升的空间。从论文产出国的合作网络（图1.2.3）来看，论文数量排名前5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（表1.2.6），该焦点排名前3的产出机构为意大利罗马大学（Univ Roma La Sapienza）、罗马第三大学（Univ Roma TRE）和日本东京城市大学（Tokyo City Univ）。从核心论文产出机构排名前10的合作网络（图

1.2.4）来看，机构间合作不甚紧密。

根据论文的施引情况来看（表1.2.7和表1.2.8），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，其中中国施引论文数排名第二（与印度、意大利并列），表明中国学者对该焦点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“建筑环境与人的行为”工程研究焦点，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焦点的研究投入，推动该焦点的相关研究向世界领先水平的加速发展。

表 1.2.5 “建筑环境与人的行为”工程研究焦点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	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	Italy	10	29.41%	164	25.04%	16.40	1	0
2	USA	6	17.65%	105	16.03%	17.50	2	0
3	India	5	14.71%	90	13.74%	18.00	1	0
4	China	5	14.71%	81	12.37%	16.20	1	0
5	Japan	4	11.76%	91	13.89%	22.75	1	0
6	Australia	4	11.76%	53	8.09%	13.25	1	0
7	Taiwan of China	3	8.82%	74	11.30%	24.67	0	0
8	Germany	3	8.82%	70	10.69%	23.33	0	0
9	England	2	5.88%	61	9.31%	30.50	0	0
10	Greece	2	5.88%	33	5.04%	16.50	0	0

表 1.2.6 “建筑环境与人的行为”工程研究焦点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	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	Univ Roma La Sapienza	7	20.59%	118	18.02%	16.86	0	0
2	Univ Roma TRE	6	17.65%	114	17.40%	19.00	0	0
3	Tokyo City Univ	4	11.76%	91	13.89%	22.75	1	0
4	Univ Calif Berkeley	4	11.76%	72	10.99%	18.00	2	0
5	Univ Tokyo	3	8.82%	61	9.31%	20.33	1	0
6	Natl Formosa Univ	2	5.88%	65	9.92%	32.50	0	0
7	Univ Freiburg	2	5.88%	56	8.55%	28.00	0	0
8	Indian Inst Technol	2	5.88%	47	7.18%	23.50	0	0
9	Univ Hong Kong	2	5.88%	37	5.65%	18.50	1	0
10	Tianjin Univ	2	5.88%	33	5.04%	16.50	0	0

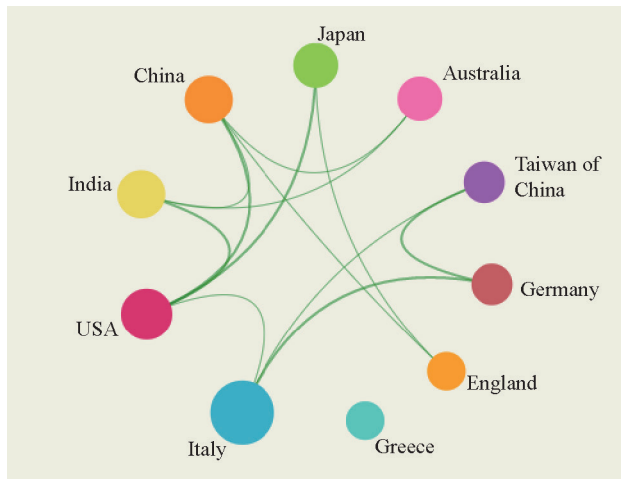


图 1.2.3 “建筑环境与人的行为”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络

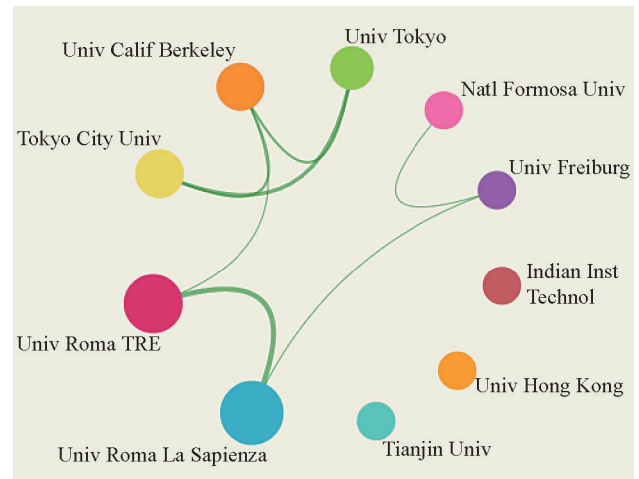


图 1.2.4 “建筑环境与人的行为”工程研究焦点主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “建筑环境与人的行为”工程研究焦点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	USA	5	18.52%	2014.00
2	India	4	14.81%	2015.00
3	Italy	4	14.81%	2015.25
4	China	4	14.81%	2014.50
5	Australia	2	7.41%	2015.50
6	Japan	2	7.41%	2013.50
7	Taiwan of China	2	7.41%	2014.00
8	Argentina	1	3.70%	2015.00
9	Germany	1	3.70%	2015.00
10	Greece	1	3.70%	2014.00

表 1.2.8 “建筑环境与人的行为”工程研究焦点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	Univ Calif Berkeley	3	6.98%	2014.00
2	Univ Roma La Sapienza	3	6.98%	2015.33
3	Purdue Univ	2	4.65%	2014.00
4	Tianjin Univ	2	4.65%	2014.00
5	Tokyo City Univ	2	4.65%	2013.50
6	Univ Rome Tre	2	4.65%	2015.50
7	Univ Tokyo	2	4.65%	2013.50
8	Built Environm Grp	1	2.33%	2014.00
9	CEPT Univ	1	2.33%	2016.00
10	China Vanke Co Ltd	1	2.33%	2014.00

1.2.3 混合像元分解与时空位置大数据分析

《Nature》和《Science》分别于2008年、2011年出版了“Big Data”和“Dealing with Data”专刊，指出了大数据时代的到来。测绘科学与信息科学技术的交叉、渗透与融合，正推动对地观测、感知和认知向多平台、多尺度、多分辨率、多时相的空、天、地一体化方向发展，集成各种手段、方法对地球及地球上的实体目标和人类活动进行时空数据采集、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，为地球科学问题的研究提供空间信息框架、数学基础和信息技术方法，也为人们全面精确判断与决策提供海量可靠的时空信息。

在核心论文数据检索结果中所呈现出来的“混合像元分解与时空位置大数据分析”工程研究焦点正是这一发展趋势的具体体现，其内容包含混合像元分解、高精度实时单点定位和时空大数据分析。混合像元分解从粗空间分辨率的影像获取更高空间分辨率的分类信息，高精度实时单点定位获取更高精度的时空位置数据。时空数据采集手段以更高的空间分辨率和时空位置精度为发展目标，实现海量、高维时空位置大数据的获取、存储与解译。而后通过时空大数据分析技术从海量、多源时空位置大数据中自动发现和提取隐含的、非显见的模式、规则和知识，从体量大、速度快、模态多样和真伪难辨的大数据中挖掘其价值。

(1) 混合像元分解：由于传感器空间分辨率限制以及地面的复杂多样性，遥感影像中广泛存在着混合像元，即单一像元中同时存在着数种不同的地物类型。混合像元分解能够突破传感器空间分辨率的限制，在亚像元精度内刻画出混合像元的分布情况等真实属性，通过向下尺度转换从粗空间分辨率的影像获取高空间分辨率分类结果图，提高影像信息提取精度。混合像元分解的关键问题在于确定像元内存在的不同地物类型及其所占的空间比例。

根据混合像元内不同地物的相互作用，目前光谱混合模型主要分为线性模型和非线性模型，其中以线性模型应用最为广泛。混合像元分解的发展方向主要包括如下几个方面：不同散射模型下的非线性分解研究；光谱变异下的端元提取模型研究；结合空间信息的光谱分解研究；基于光谱混合模型的多源影像融合研究；以稀疏分解、深度学习为代表的机器学习技术与混合像元分解的结合；混合像元分解的精度验证与真实性检验问题；混合像元分解在植被变化、水质调查、环境监测等领域的成熟应用。目前国内外混合像元分解研究的重点更多着眼于已有光谱混合模型的解决算法。由于使用的模型缺乏足够的物理依据，使用的数据也存在着较大局限性，在实际中存在着难以泛化的问题。

(2) 高精度实时单点定位：是一种利用精密卫星星历、精密卫星钟差和GNSS接收机采集的伪距与载波相位观测值来获得用户精确位置的绝对定位方法。与多站网解方式相比，高精度实时单点定位拥有全球尺度的作业范围、灵活的布站方式以及简单的作业模式；与基于双差观测值的数据处理策略相比，高精度实时单点定位采用非差数据处理方式，提高了数据的利用率。高精度实时单点定位在地壳变形监测、近实时GPS气象学、低轨卫星轨道测定、移动载体的精密定位、海平面监测、海啸、地震监测与预警等多个领域有广泛应用。其发展方向主要包括如下几个方面：

研究实时精密卫星钟差的估计理论和方法，提供高精度的实时卫星钟差产品；研究相位未校准硬件延迟与非差模糊度的分离方法，恢复非差模糊度整数特性，探讨用户端高精度实时单点定位的模糊度固定方法；研究多系统的融合精密单点定位，加快精密单点定位的初始化时间，增强定位结果的可靠性。

(3) 时空大数据分析：时空大数据是大数据与地理时空数据的融合，即以地球为对象、基于统

一时空基准、活动于时空中并与位置直接或间接相关联的大数据。时空大数据分析从海量、多源时空位置大数据中自动发现和提取隐含的、非显见的模式、规则和知识，具有重发现不重实证、重关系不重因果和重预测的特点。其主要发展方向是研究时空大数据表示、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。

“混合像元分解与时空位置大数据分析”工程研究焦点的核心论文共 95 篇，核心论文的篇均被引频次为 40.92（表 1.1.1），排名前 5 的国家为中国（除中国台湾）、澳大利亚、美国、德国和荷兰，其中中国发表论文占比达到了 56.84%（中国内地 47.37%，港澳 9.47%）（表 1.2.9），在论文数量方面比重较大，是该焦点的重点研究国家之一。篇均被引频次排名前 5 的国家为葡萄牙、西班牙、法国、美国和比利时，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 26.3，约为平均水平的 60%（表 1.2.9），说明中国学者在该焦点的研究工作还有进一步上升的空间。从论文产出国的合作网络（图 1.2.5）来看，论文数量排名前 5 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（表 1.2.10），该焦点排名前 5 的产出机构为武汉大学、中国科学院、澳大利亚科廷大学（Curtin Univ）、西班牙埃斯特雷马杜拉大学（Univ Extremadura）和荷兰代尔夫特理工大学（Delft Univ Technol）。从核心论文产出机构排名前 10 的合作网络（图 1.2.6）来看，国外机构之间有较为密切合作关系。

根据论文的施引情况来看（表 1.2.11 和表 1.2.12），施引核心论文数排名前 5 的国家是中国、澳大利亚、荷兰、德国和英格兰，中国施引核心论文比例达到 45.59%（其中施引排名前 5 的中国机构有武汉大学、中国科学院、香港理工大学），表明中国学者对该焦点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“混合像元分解与时空位置大数据分析”工程研究焦点，我国目前处于与国外同类研究并跑的态势，并有逐渐向领跑状态发展的趋势，建议我国继续加大在该焦点的研究投入，推动该焦点的相关研究向世界领先水平的加速发展。

表 1.2.9 “混合像元分解与时空位置大数据分析”工程研究焦点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	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	China	54	56.84%	1420	41.36%	26.30	9	0
2	Australia	17	17.89%	476	13.87%	28.00	3	1
3	USA	11	11.58%	708	20.62%	64.36	0	0
4	Germany	11	11.58%	385	11.21%	35.00	1	0
5	The Netherlands	11	11.58%	266	7.75%	24.18	0	0
6	Spain	8	8.42%	1010	29.42%	126.25	1	0
7	France	7	7.37%	748	21.79%	106.86	3	0
8	Belgium	7	7.37%	315	9.18%	45.00	1	0
9	Portugal	6	6.32%	900	26.22%	150.00	1	0
10	England	6	6.32%	150	4.37%	25.00	0	0

表 1.2.10 “混合像元分解与时空位置大数据分析”工程研究焦点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	常被引论文数	专利引用篇数
1	Wuhan Univ	24	25.26%	618	18.00%	25.75	4	0
2	Chinese Acad Sci	13	13.68%	264	7.69%	20.31	1	0
3	Curtin Univ	11	11.58%	283	8.24%	25.73	1	1
4	Univ Extremadura	8	8.42%	1010	29.42%	126.25	1	0
5	Delft Univ Technol	8	8.42%	169	4.92%	21.13	0	0
6	Hong Kong Polytech Univ	7	7.37%	128	3.73%	18.29	1	0
7	Inst Telecomunicacoes	5	5.26%	881	25.66%	176.20	1	0
8	Inst Super Tecn	5	5.26%	850	24.76%	170.00	1	0
9	Curtin Univ Technol	5	5.26%	169	4.92%	33.80	1	1
10	Univ Toulouse	4	4.21%	661	19.25%	165.25	2	0

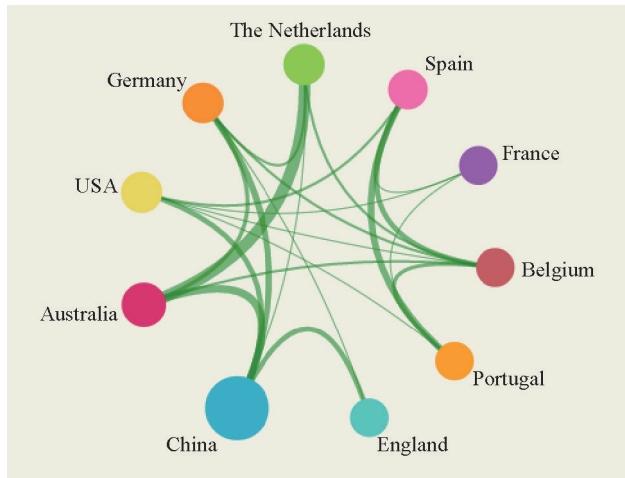


图 1.2.5 “混合像元分解与时空位置大数据分析”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络

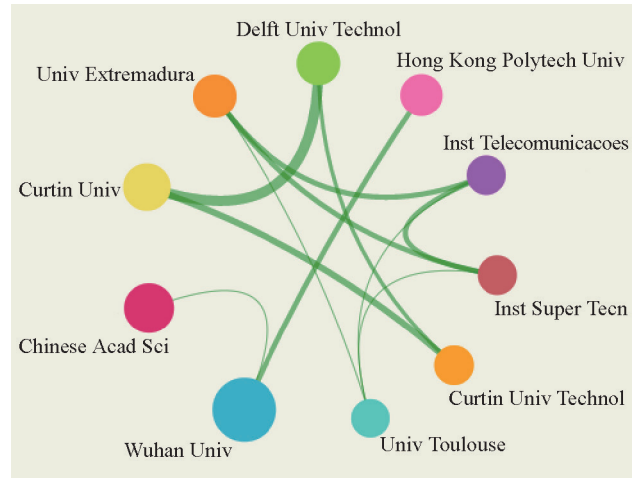


图 1.2.6 “混合像元分解与时空位置大数据分析”工程研究焦点主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “混合像元分解与时空位置大数据分析”工程研究焦点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	31	45.59%	2014.10
2	Australia	11	16.18%	2014.64
3	The Netherlands	7	10.29%	2015.14
4	Germany	7	10.29%	2014.00
5	England	3	4.41%	2014.67
6	USA	2	2.94%	2013.50
7	Belgium	1	1.47%	2015.00
8	Canada	1	1.47%	2013.00
9	Czech	1	1.47%	2014.00
10	Italy	1	1.47%	2016.00

表 1.2.12 “混合像元分解与时空位置大数据分析”工程研究焦点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	Wuhan Univ	15	15.63%	2014.33
2	Chinese Acad Sci	8	8.33%	2013.88
3	Curtin Univ	7	7.29%	2014.86
4	Delft Univ Technol	6	6.25%	2015.17
5	Hong Kong Polytech Univ	6	6.25%	2014.33
6	CSIRO	3	3.13%	2014.33
7	Curtin Univ Technol	3	3.13%	2014.00
8	Deutsch Zentrum Luft & Raumfahrt	3	3.13%	2013.67
9	E China Normal Univ	3	3.13%	2014.33
10	German Res Ctr Geosci GFZ	3	3.13%	2014.00

2 工程开发热点及工程开发焦点解读

2.1 工程开发热点发展态势

土木、水利与建筑工程领域组所研判的 Top10 工程开发热点及统计数据见表 2.1.1，上述热点涉及了建筑学、结构工程、桥梁工程、工程力学、土木建筑材料、岩土及地下工程、水利工程、市政工程、测绘工程等学科方向。其中，“绿色城市建筑”“土木建筑新材料”“智能化建造”“智能城市交通系统”“数字城市规划”“抗震及振动控制”“岩

土及地下工程监测、检测与信息化”“全球定位导航”是传统研究的深入，“桥梁及钢结构工业化制造”和“城市雨洪调控利用”是新兴热点。各个热点所涉及的专利自 2011 年至 2016 年的逐年核心专利公开量见表 2.1.2。

(1) 绿色城市建筑

绿色城市建筑是新型城镇化的必然发展趋势和构建可持续发展社会战略的关键落脚点。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

表 2.1.1 土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程开发热点

序号	工程开发热点	公开量	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	绿色城市建筑	889	5 907	6.64	2012.82
2	土木建筑新材料	848	10 274	12.12	2012.39
3	智能化建造	334	1 797	5.38	2012.91
4	智能城市交通系统	609	5 531	9.08	2012.52
5	数字城市规划	165	1 625	9.85	2012.08
6	抗震及振动控制	444	5 230	11.78	2012.30
7	岩土及地下工程监测、检测与信息化	537	6 907	12.86	2012.39
8	全球定位导航	731	11 470	15.69	2012.50
9	桥梁及钢结构工业化制造	316	2 533	8.02	2013.04
10	城市雨洪调控利用	192	310	1.61	2014.96

表 2.1.2 土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程开发热点的逐年核心专利公开量

序号	工程开发热点	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1	绿色城市建筑	225	215	171	115	100	63
2	土木建筑新材料	274	213	176	139	32	14
3	智能化建造	75	78	55	70	40	16
4	智能城市交通系统	166	158	135	112	31	7
5	数字城市规划	68	41	35	17	4	0
6	抗震及振动控制	155	115	86	68	12	8
7	岩土及地下工程监测、检测与信息化	153	139	150	79	11	5
8	全球定位导航	211	205	147	102	41	25
9	桥梁及钢结构工业化制造	56	69	73	54	53	11
10	城市雨洪调控利用	0	0	0	37	125	30

然的协调和可持续发展。所涉及的研究领域广泛，需要多学科交叉融合。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。从全球绿色城市建筑发展的背景看，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，被动技术在绿色城市建筑中的应用与创新研究，绿色城市建筑的人舒适性与行为模式、评估与评价分析，主被动结合、互补协调的绿色城市建筑协同技术体系等。从 2011 年至 2016 年，专利公开量为 889，被引频次为 5907，平均被引频次为 6.64。

(2) 土木建筑新材料

随着人类环保意识以及对建筑材料的使用性能要求的不断提升，区别于传统的土木建筑材料（如石灰、水泥、沥青、混凝土、钢筋混凝土和钢结构等），土木建筑新材料呈现出可持续化（如

再生化、利废化、节能化和绿色化等）、功能化（声、光、磁、电等，智能化）和高性能化（如质轻、高强、高耐久等）的发展趋势，其主要包括绿色水泥、可再生混凝土、工业废渣混凝土；地聚合物材料（碱激发材料）、碳纤维增强材料、聚合物基材料、陶瓷材料等。对于新材料研发，其关键技术是不同组份长期协同工作技术（如新旧混凝土协同作用、增强组份和原有体系的协同作用、新型胶凝体系不同组份的协同作用等）以及低能耗制备技术、高性能化技术与功能化技术。探索长寿命土木建筑新材料设计理论、开发适合于土木建筑新材料的关键材料等（如多功能矿物掺合料和化学外加剂）以及探索高效低耗新材料制备方法是解决上述技术的有效途径。以上新材料可以用于土木建筑的多个领域（如房屋建筑、桥梁隧道、港口码头等），目前正在应用，未来将有更广阔的前景。从 2011 年至 2016 年，专利公开量为 848，被引频次为 10 274，平均被引频次为 12.12。

(3) 智能化建造

作为国家战略“中国制造 2025”的重要内容，建筑智能化建造是建筑产业从科技革命向产业革命转化的必由之路。以建筑信息模型（BIM）和建筑

机器人建造技术为核心，建筑智能化建造以建筑信息模型为载体，整合建筑设计、施工建造、运营管理等全过程的工程信息，通过建筑机器人建造工艺与建筑信息模型的对接，实现建筑施工建造过程的自动化和信息化升级，促进建筑全生命周期的精准分析和精确建造，推动建筑产业从劳动密集型向技术、知识和管理密集型转变。建筑信息模型结合物联网、云计算技术，能够有效整合建筑项目生命期不同阶段的数据、过程和资源，对工程对象进行完整描述，是支撑建筑智能化建造的主要平台和模式。作为建筑智能化建造的关键，建筑机器人建造技术通过“数字建造装备集成系统”及“数字建造创新工艺”的研发，将航天与汽车工业的先进制造技术运用于建筑产业，有助于解决行业生产方式粗放、生产效率低下、技术和管理手段落后等落后现状，实现高度灵活、个性化的建筑产品服务和生产模式。建筑智能化建造是建筑产业升级的重要抓手，是实现建筑产业绿色、高效、定制化发展的必然选择。从2011年至2016年，专利公开量为334，被引频次为1797，平均被引频次为5.38。

（4）智能城市交通系统

智能城市交通系统是以交通流基础理论为核心，系统地运用现代信息、通讯、传感、控制及计算机等先进技术，建立的实时、准确、高效的城市综合交通管理系统。系统以减少交通流的盲目性、提高既有交通基础设施的使用效率和安全水平、降低交通系统能耗和污染排放等为主要目标。传统的智能交通系统（intelligent transportation system, ITS）以交通信号控制系统与区域交通诱导系统的研发为核心，这两方面的关键技术至今仍是ITS开发的热点所在，并逐渐显示出控制与诱导协同化的技术发展方向。智能车辆/自动驾驶与智能交通基础设施技术是这一领域的新兴工程开发热点，而车路协同系统成为智能交通领域的颠覆性工程开发热点。从2011年至2016年，专利公开量为609，被引频次为5531，平均被引频次为9.08。

（5）数字城市规划

数字城市规划（digital urban planning）以计算机技术、多媒体技术和大规模存储技术为基础，以宽带网络为纽带，运用遥感、全球定位系统、地理信息系统、遥测、仿真-虚拟等技术，对城市进行多分辨率、多尺度、多时空和多种类的三维描述，即利用信息技术手段把城市的过去、现状和未来的全部内容在网上进行数字化虚拟实现。在虚拟实现的基础上，进行数字化的规划分析和诊断评估，进行多方案比较和公众参与，从而更加理性地做出规划判断和决策。其技术方向包括：大数据（大规模存储），遥测，仿真虚拟，智能城市，智慧城市，人流及运营模拟等。借助城市中的多层传感系统，以及政府和企业的数据和基于网络的其它大数据，支撑和推动城市规划设计和管理数字化变革。从2011年至2016年，专利公开量为165，被引频次为1625，平均被引频次为9.85。

（6）抗震及振动控制

抗震及振动控制是指以抵抗地震为主的建筑物振动控制技术。传统抗震结构体系基本上通过主体结构及承重构件消耗地震输入能量，导致建筑主体结构的变形、损坏甚至倒塌，这对建筑的安全性造成了很大程度的影响。与之相反，抗震及振动控制技术通过某种工程技术手段来防止结构在地震下的破坏与倒塌，或者通过某种控制手段来控制结构在地震下的损伤模式与位置，从而降低结构的地震响应，尽可能地减少生命与财产损失。其中，抗震包括地震的数据采集，从震源、传递途径和结构影响等三个环节进行干预的方法；振动控制是降低震源或其它振动激励馈入结构的振动能量，并减小来自外界环境的振动传入结构或控制结构振动。主要的研究趋势与分支包括：基于各种原理的耗能阻尼器；结构物吸振减震装置；结构物隔震器；自复位技术等。从2011年至2016年，专利公开量为444，被引频次为5230，平均被引频次为11.78。

（7）岩土及地下工程监测、检测与信息化

岩土及地下工程信息化是以场地勘探、工程监测和检测为基础，将地下工程及其所处复杂岩土环境的时空变异数据进行数字化、网络化、智能化和可视化，是最终实现岩土及地下工程的智能精细化施工和运营的关键支撑技术之一。关键技术难题源于：高度空间变异的复杂岩土地质环境、强非线性的岩土体与地下结构相互作用行为。技术突破方向包括：深地/深水特殊场地环境的钻探技术、新型物探技术应用、微震监测/检测技术、光纤和激光技术应用、海量数据信号处理和信息化等。应用领域涉及边坡、基础、基坑、隧道等岩土及地下工程在设计、施工和运营等阶段的场地评价、施工监测和健康检测等，快速和精确获取复杂岩土地质环境定量特征和地下结构实时动态是当前技术开发的重心，面向智能岩土与地下工程的大数据信息集成和虚拟现实技术是未来动态。从2011年至2016年，专利公开量为537，被引频次为6907，平均被引频次为12.86。

（8）全球定位导航

全球定位导航泛指全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)及其提供的全球全天候连续高精度导航定位服务。自1989年美国成功发射第一颗GPS工作卫星，到2016年底国内外在轨运行导航卫星共108颗，全球卫星导航领域已初步形成了GPS、GLONASS、北斗、Galileo等多系统共存的格局，多系统应用极大地提高了导航定位的成果精度和实时解算速度。随着技术的发展，全球导航定位的可用性、连续性、可靠性、定位精度与解算效率将不断提高。差分定位技术、精密定位技术、GNSS掩星技术、GNSS-R技术、组合导航技术和各类移动终端的嵌入式应用是当前及未来的一段时期内全球定位导航的关键技术问题。GNSS成功地应用于大地测量、工程测量、航空摄影测量、运载工具导航和管制、地壳运动监

测、工程变形监测、资源勘察、地球动力学等多种学科，给测绘领域带来一场深刻的技术革命。从2011年至2016年，专利公开量为731，被引频次为11470，平均被引频次为15.69。

（9）桥梁及钢结构工业化制造

桥梁是指从空间上方跨越障碍物的结构，钢结构是指由钢材制作的结构，工业化是指设计标准化、生产工厂化、安装机械化和组织管理科学化。其关键技术问题包括：大跨柔性支撑与纵横联结构体系设计、高性能桥梁钢构件及预制、栓焊铆接拼装与组合结构连接、耐疲劳隔震耗能等附属设施、桥梁施工工法及监控等。桥梁和结构工程中间大量采用大跨和高耸结构形式，广泛采用钢结构或以钢构件为主的组合结构体系。桥梁及钢结构工业化制造现状为：由型钢和钢板等制成钢梁、钢柱、钢桁架等标准预制构件，各构件或部件拼装组成力学性能最优的大跨柔性结构体系来完成桥梁功能，各部件运输到位后采用焊缝、螺栓或铆钉现场拼接，通过光机电设备监控桥梁施工线型以致设计成桥状态，并安装隔震支座、阻尼器、风障等附属设施保障结构防灾安全。技术动态包括：主缆索网柔性支撑体系与锚定、高性能主桁斜撑波纹腹板正交异性桥面板预制、高强螺栓群钉与剪力钉连接、可修复隔震支座阻尼器与沥青桥面铺装、基于信息建筑模型的桥梁施工监控等。从2011年至2016年，专利公开量为316，被引频次为2533，平均被引频次为8.02。

（10）城市雨洪调控利用

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现，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。城市雨洪调控利用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”主要措施，实现城市雨洪和非点源污染从源头、中途到末端的

控制。源头技术包括屋顶绿化、地势绿地、透水铺装、雨水花园、植被浅沟、雨水桶等；中途技术包括截污雨水井、渗透沟（管）渠、雨水过滤池等；末端技术包括雨水塘、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 2011 年至 2016 年，专利公开量为 192，被引频次为 310，平均被引频次为 1.61。

2.2 工程开发焦点解读

2.2.1 绿色城市建筑

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，国际学术界在发展气候响应型绿色建筑、被动技术优先、主动技术优化、积极利用低碳及可再生能源方面逐渐达成共识并形成合力；以绿色城市建筑新设计理念为引领、通过绿色城市建筑的创新设计与综合技术集成应用，实现多学科、多领域的联合研究体系和技术支撑，开创具有中国特色的绿色城市建筑发展之路。

从全球绿色城市建筑发展的背景看，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、综合评价技术等等，形成一套完整的咨询前沿技术，主要有以下方面：

（1）高密度城区气候与能耗评价方法及信息图谱研究：在当前城市高密度发展的现实与趋势背景下，在城市更新时做到科学合理的形态布局和设计，从而提高城市环境气候的舒适性，降低城市整体能耗，研究城市形态对城市气候及能耗负荷影响的评估方法体系及其信息图谱系统。研究主要包括两方面，一、城市气候部分。对气象信息进行采集及编译分析，数据采集通过实地测量及调研获取典型气象数据；数据编译分析利用地理信息系统 GIS 观察分析数据，通过对气象数据与地形数据的相关性分析，得到城区微气候预测模型，从而形成城市形态对城市气候影响的分析评估方法体系。二、城市能耗负荷部分。利用获得的气候数据以及数值模拟得到的数据，开发形成城市形态及其微气候对街区能耗影响的数学模型。探寻决定城市街区能耗的城市形态参数的矩阵阈值，从而建立城市能耗分析评估方法体系，研究绿色城市走环境保护、资源节约的可持续发展战略咨询与应用技术。

（2）气候响应的绿色建筑性能优化设计与技术体系：在全球化高速发展的过程中，地域性建筑特征与绿色建筑的方法创新成为了绿色城市建筑领域的重要主题。战略咨询以气候环境因素作为推动绿色建筑的先导条件，在纵向上提取传统建筑节能留存技术精华，分别对气候环境影响因素、建成环境的性能需求、气候响应技术策略等方面做出系统的分析和总结，探寻适用范围和应用特点，建立气候响应的绿色建筑性能设计的决策方法；其次，在横向上对现代数字化信息技术在绿色建筑，性能模拟仿真和优化评估过程中的数控原理和技术方法进行应用探索，为气候响应的绿色建筑性能优化设计提供技术支持，实现将具象绿色建筑设计 with 抽象性

能问题相互融合的研究目的。

(3) 城市建筑能源互联网技术研究：以低碳可持续发展为导向的能源互联网技术是未来城市能源系统的发展方向，各国在开展积极研究。基于 GIS 平台的能源、环境、经济综合信息系统和基于城市综合体建筑群能源需求响应的能源需求预测与规划技术是支撑未来城市绿色能源互联网系统的关键所在。积极融入太阳能、地热能在城市建筑分布式能源系统中的应用，实现低碳城市绿色建筑的发展目标。

(4) 被动技术在绿色城市建筑中的应用与创新研究：被动技术体系是通过自然通风、自然采光、保温隔热、遮阳、新材料利用等的技术最大限度利用自然环境控制手段降低建筑对空调供热等人造环境技术的依赖，实现节能降耗的目的；同时，积极利用建筑太阳能一体化技术进行采暖与致凉、替代化石能源消耗。创新性地理解并解读传统设计概念，利用城市风廊、城市立体景观、建筑剖面及高差设计，建筑的围护更新体系等，进行创新的城市建筑设计。

(5) 绿色城市建筑的人舒适性 with 行为模式、评估与评价分析：目前国际绿色城市建筑研究越来越关注人的舒适性、行为特征在节能与环境控制领

域的作用与影响，通过 PMV 与 TSV 来评价绿色城市建筑的建成环境的舒适条件与性能，利用现场测试、问卷投票与数字化模拟等方法研究气候环境参数与绿色节能多目标决策办法，在对地域环境、民族习惯、年龄结构、性别组成的差异性本源问题，进行系统研究，找到绿色城市建筑的建成环境的人舒适性本源需求与实质问题，创造一个“可持续、舒适性、健康的”三结合一体化的绿色环境。

(6) 主被动结合、互补协调的绿色城市建筑协同技术体系：由于全球气候的趋劣倾向，冬夏两季的极端气候频现，现代绿色城市建筑科学地认知现代环境与现代技术，研究在绿色城市建筑中协同利用主动技术、被动技术，协调好主被动技术的合理利用，实现主被动结合、互补协调的绿色城市建筑的建成环境控制体系。

“绿色城市建筑”工程开发焦点的核心专利 889 篇，平均被引频次为 6.64（表 2.1.1），排名前五的国家为中国（除中国台湾）、美国、韩国、法国和日本（表 2.2.1）。其中，中国机构或个人所申请的专利占比达到了 40.94%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发焦点的重点研究国家之一，平均被引频次为 5.35（表 2.2.1）。从专利产出的

表 2.2.1 “绿色城市建筑”工程开发焦点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	364	40.94%	1946	32.94%	5.35
2	USA	329	37.01%	3084	52.21%	9.37
3	Korea	46	5.17%	228	3.86%	4.96
4	France	28	3.15%	126	2.13%	4.50
5	Japan	26	2.92%	122	2.07%	4.69
6	Germany	23	2.59%	87	1.47%	3.78
7	Canada	21	2.36%	84	1.42%	4.00
8	UK	13	1.46%	62	1.05%	4.77
9	Belgium	9	1.01%	55	0.93%	6.11
10	Australia	7	0.79%	23	0.39%	3.29

国家之间的合作网络(图 2.2.1)来看,美国在图中处于核心的位置。

根据核心专利的主要产出机构情况(表 2.2.2),该焦点排名前五的产出机构为北京工业大学、中国建筑第八工程局有限公司、Certain Teed Corp.、Vermont Slate & Copper Services Inc.、天津大学。从核心专利产出机构排名前十的合作网络(图 2.2.2)来看,机构之间的合作较为稀疏。

2.2.2 智能城市交通系统

智能交通系统(intelligent transportation system, ITS)自 20 世纪五六十年代开始起步,早期系统仅面向道路交通,是在车辆自动控制和电子路径诱导方面完成的一些零星产品研发。随后的三四十年间,包括我国在内的众多国家和地区在 ITS 研发方面投入了巨大的资金和人力,以交通信号控制系统与区域交通诱导系统为研发重点的传统 ITS 得以迅速发

表 2.2.2 “绿色城市建筑”工程开发焦点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	UYBT	23	2.59%	235	3.98%	10.22
2	CSCE	15	1.69%	76	1.29%	5.07
3	CERT	14	1.57%	140	2.37%	10.00
4	Vermont Slate & Copper Services Inc.	14	1.57%	189	3.20%	13.50
5	UTIJ	11	1.24%	57	0.96%	5.18
6	OWEN	10	1.12%	97	1.64%	9.70
7	COMP	9	1.01%	30	0.51%	3.33
8	UYQI	9	1.01%	53	0.90%	5.89
9	Huahui Eng Design Group Co., Ltd.	8	0.90%	49	0.83%	6.13
10	Jiangsu Huning Steel Mechanism Co., Ltd.	8	0.90%	34	0.58%	4.25

* 此处机构如为数据库规范化后的机构,则采用专利权人代码显示,非规范化的机构采用原始名称显示,专利公开量 Top10 机构为: Beijing Univ Technology、China Constr Eighth Eng Bureau Co., Ltd.、Certain Teed Corp.、Vermont Slate & Copper Services Inc.、Tianjin Univ、Owens-Corning Intellectual Capital LLC、Cie De Saint-Gobain (Saint-Gobain Glass France)、Tsinghua Univ、Huahui Eng Design Group Co., Ltd.、Jiangsu Huning Steel Mechanism Co., Ltd.。一个专利权人代码代表归并后的若干机构,此处列出的为主要申请专利机构。

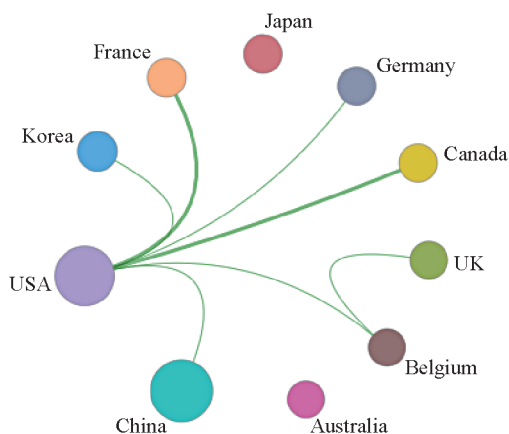


图 2.2.1 “绿色城市建筑”工程开发焦点主要国家或地区之间的合作网络

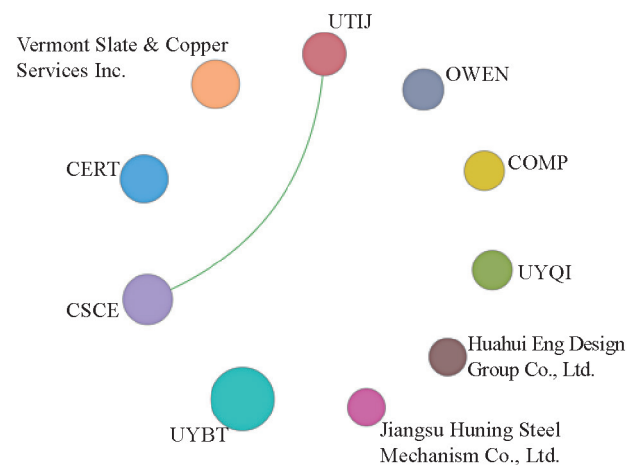


图 2.2.2 “绿色城市建筑”工程开发焦点主要机构间的合作网络

展。传统 ITS 致力于在固定和移动式数据采集设备采集的交通数据的基础上，通过交通诱导、区域交通控制、交通拥挤管理等关键技术帮助管理者实现交通的智能化管理，控制与诱导协同技术成为传统 ITS 的深入研发方向。

(1) 智能车辆 / 自动驾驶与智能交通基础设施技术：作为这一领域的新兴开发热点，车辆、基础设施通过先进的电子感知、通讯、智能材料等技术的运用逐渐成为了交通系统中的智能元素。目前这一方面的技术研发已经进入了现场规模测试阶段。智能车辆 / 自动驾驶与智能交通基础设施技术的发展带来了传统交通管理技术与系统的挑战。近年来，智能车辆 / 自动驾驶与智能交通基础设施技术成为 ITS 研发的新兴前沿，并已进入现场规模测试阶段。智能车辆 / 自动驾驶技术自 2011 年正式被提出以来，一直以汽车企业、互联网企业等为研发主体，并在近年各国制定的 ITS 发展战略中占据主体地位，涉及环境自动感知、车车通讯、车路通讯等关键技术。

(2) 车路协同技术与系统：为了适应这一新兴技术发展趋势，车路协同系统成为近年来智能交通领域的颠覆性开发热点。车路协同系统将传统 ITS 技术与现代智能车辆 / 自动驾驶 / 智能设施技术贯穿于城市交通的数据采集、智能分析、科学决

策的全过程，以构建适应新兴技术的全新城市综合交通系统并引导新兴技术的发展为主要目标。车路协同技术旨在充分运用、融合新兴技术和传统 ITS 技术的研发成果实现车辆和基础设施之间的智能协同与配合，进而构建全新的城市综合交通系统。车路协同是 ITS 领域的颠覆性开发热点，涉及物联网技术、云计算等关键技术。

(3) 交通设施状况智能环境感知、损伤修复、能源收集与污染吸收技术：随着传统 ITS 技术研发的深入和新兴技术的迅速发展，上述两方面技术融合的趋势开始显现，车路协同技术开始萌芽，成为各国 ITS 未来发展的主导方向。因此，催生了智能感知、损伤修复、能源收集与污染吸收的智能化技术。

“智能城市交通系统”工程开发焦点的核心专利 609 篇，平均被引频次为 9.08（表 2.1.1），排名前五的国家为中国（除中国台湾）、美国、日本、德国和韩国。其中，中国机构或者个人所申请的专利占比达到了 55.34%，超过半数，是该工程开发焦点的重点研究国家之一，平均被引频次为 8.19（表 2.2.3）。从专利产出的国家之间的合作网络（图 2.2.3）来看，美国在图中处于核心的位置。

根据核心专利的主要产出机构情况（表 2.2.4），该焦点排名前五的专利产出机构为日本丰田汽车

表 2.2.3 “智能城市交通系统”工程开发焦点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	337	55.34%	2759	49.88%	8.19
2	USA	122	20.03%	1806	32.65%	14.80
3	Japan	55	9.03%	354	6.40%	6.44
4	Germany	34	5.58%	190	3.44%	5.59
5	Korea	21	3.45%	125	2.26%	5.95
6	Canada	6	0.99%	56	1.01%	9.33
7	UK	5	0.82%	28	0.51%	5.60
8	Austria	4	0.66%	37	0.67%	9.25
9	The Netherlands	4	0.66%	24	0.43%	6.00
10	Taiwan of China	4	0.66%	63	1.14%	15.75

表 2.2.4 “智能城市交通系统”工程开发焦点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	TOYT	19	3.12%	117	2.12%	6.16
2	UYSE	18	2.96%	172	3.11%	9.56
3	Dalian Shuangdi Innovative Technology	15	2.46%	72	1.30%	4.80
4	Inrix Inc.	9	1.48%	275	4.97%	30.56
5	BOSC	8	1.31%	35	0.63%	4.38
6	AMTT	6	0.99%	51	0.92%	8.50
7	Beijing CenNavi Technologies Co., Ltd.	5	0.82%	45	0.81%	9.00
8	GOOG	5	0.82%	44	0.80%	8.80
9	HOND	5	0.82%	42	0.76%	8.40
10	IBMC	5	0.82%	68	1.23%	13.60

* 专利公开量 Top10 机构为：Toyota Jidosha KK、Southeast Univ、Dalian Shuangdi Innovative Technology、Inrix Inc.、Bosch Gmbh Robert、AT&T Intellectual Property I LP (AT&T Mobility II LLC)、Beijing CenNavi Technologies Co., Ltd.、Google Inc.、Honda Motor Co., Ltd.、Int Business Machines Corp.。

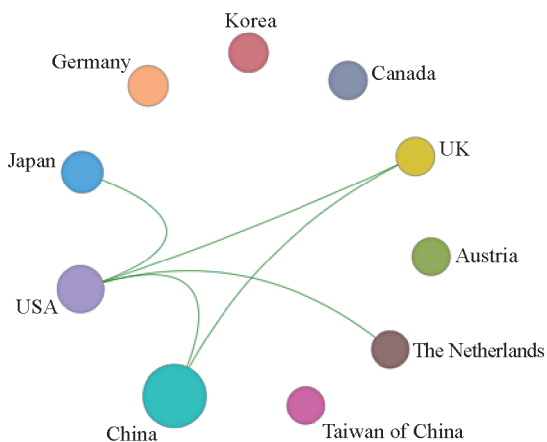


图 2.2.3 “智能城市交通系统”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

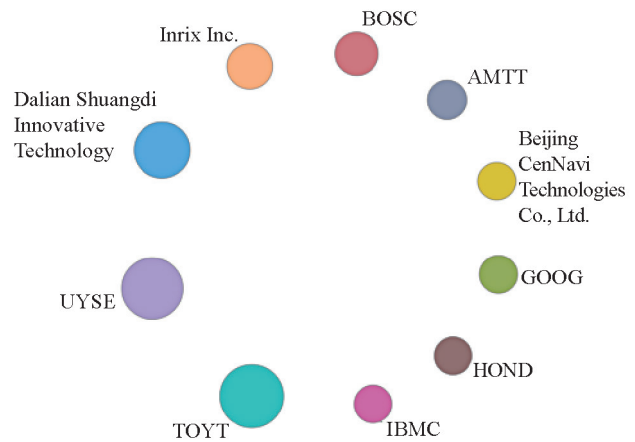


图 2.2.4 “智能城市交通系统”工程开发焦点主要机构间的合作网络

(Toyota Jidosha KK)、东南大学、Dalian Shuangdi Innovative Technology Inc.、美国因瑞克斯公司(Inrix Inc.)、德国博世公司 (Bosch Gmbh Robert)。

2.2.3 抗震及振动控制

抗震及振动控制主要的研究趋势与分支包括：基于各种原理的耗能阻尼器；结构物吸振减震装置；结构物隔震器；自复位技术等。

(1) 耗能阻尼器：是指能够通过某种耗能机

理使工程结构在地震动动力响应下的达到消能减震目的的装置。从产生阻尼力的原理来看，主要分为位移型阻尼器和速度型阻尼器。位移型阻尼器包括软钢阻尼器和摩擦阻尼器。软钢阻尼器利用低碳钢优良的塑性变形性能，根据需要将软钢板（棒）往复变形来吸收能量；摩擦阻尼器利用两块固体之间的相对滑动产生的摩擦来耗散能量。速度型阻尼器的阻尼力以速度为主要自变量，如液体黏滞阻尼器（墙）、粘弹性阻尼器等，它一般不显著改变结构

的初始刚度，只对结构提供附加阻尼；有些阻尼材料带有一定的刚度。液体黏滞阻尼器（墙）是利用液体的黏性提供阻尼来耗散振动能量；粘弹性阻尼器是由粘弹性材料和约束钢板构成，钢板和粘弹性材料通过硫化过程结合成为整体，粘弹性材料通过产生往复的剪切变形来耗散能量。耗能阻尼器技术动态包括：高耐久性阻尼器原理与工艺、高抗疲劳能力的阻尼器、具有特殊功能的阻尼器、基于智能材料的阻尼器等。

（2）吸振减震装置：通常是通过附加子结构使结构的振动能量在原结构与子结构之间重新分配，从而达到减小结构振动的目的。其基本原理是当结构在外激励作用下产生振动时，带动子结构系统一起振动，子结构系统相对运动产生的惯性力反作用到结构上，调谐这个惯性力，使其对结构的振动产生控制作用。常见的吸振减震装置有调谐质量阻尼器、调谐液体阻尼器以及悬吊质量摆阻尼器。调谐质量阻尼器由弹簧、阻尼器和质量块组成，当其自振频率与结构某一振型频率一致时，控制效果最佳。调谐液体（柱）阻尼器是一种结构被动控制装置，它是装有液体并固定在结构上的刚性容器。悬吊质量摆减振体系是将摆悬挂在结构上，当体系在地震动作用下产生水平方向振动时，带动摆一起振动，而摆振动产生的惯性力反作用于结构本身，当这种惯性力与结构本身的运动相反时，就产生了制振效果。吸振减震技术动态包括：新型吸振减震机理、主被动联合吸振减震技术等。

（3）结构物隔震：是在地面以上部分的底部设置隔震层，使之与固结地基中的基础顶面分开，限制地震动向结构物的传递。目前采用的结构物隔震主要用于隔离水平地震作用，隔离层的水平刚度显著低于上部结构的侧向刚度，这样可延长结构的地震周期，使结构的加速度大大减小。结构物隔震包括橡胶垫隔震、滚轴隔震以及滑动摩擦隔震。橡胶垫隔震采用橡胶支座，一般由橡胶片与薄钢板叠合

而成，并将钢板边缩入橡胶内，以防止钢板锈蚀。一般来讲，橡胶垫隔震具有足够的初始剪切刚度用以抗风；大变形下刚度下降，大大降低结构的振动频率。滚轴隔震是在基础与上部结构之间设置上下两层彼此垂直的滚轴，滚轴在弧沟槽内滚动起到隔震的作用。滑动摩擦隔震是在上部结构与基础之间设置可相互滑动的滑板，风载或小震时产生静摩擦力，大震时结构水平滑动，通过摩擦耗能。通常使用的摩擦材料包括涂层滑层和粉粒滑层。结构物隔震技术动态包括：高耐久性隔震器原理与工艺、隔震器在恶劣环境下的裂化行为与保护措施、基于智能材料的隔震器、多向多功能隔震器等。

（4）自复位结构：是指以减少建筑震后残余变形为目标，达到震时自适应，震后变形自回复效果的新型结构体系，是结构可恢复功能的重要实现方式之一。从自复位实施手段来讲，目前主要的研究方案包括预应力方案和形状记忆合金方案。预应力方案在传统结构上采用预应力钢筋或钢索，配合预设耗能段，通过一定模式的变形发展-回复循环达到自复位的效果。基于形状记忆合金的自复位策略是利用材料伪弹性使高达8%~10%的伪应变变形瞬时自动回复，并产生耗能滞回环，从而提供自复位和耗能能力。从自复位实施位置和构造来讲，自复位技术又可分为自复位梁柱节点、自复位支撑、自复位柱脚以及自复位剪力墙。其中，前三类构件可采用预应力方案或形状记忆合金方案，而自复位剪力墙通常是预应力方案配合钢板剪力墙来达到自复位和耗能效果。自复位技术动态包括：自复位体系的高效施工技术、自复位体系的维护技术、碳纤维预应力自复位钢筋、低造价形状记忆合金自复位技术、基于混合耗能的自复位技术。

“抗震及振动控制”工程开发焦点的核心专利444篇，平均被引频次为11.78（表2.1.1），排名前五的国家为中国（除中国台湾）、美国、德国、日本和法国，其中中国机构或者个人所申请的专利

占比达到了 49.55%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发焦点的重点研究国家之一，平均被引频次为 11.23（表 2.2.5）。从专利产出的国家之间的合作网络（图 2.2.5）来看，各个国家合作较为密切。

根据核心专利的主要产出机构情况（表 2.2.6），该焦点排名前五的专利产出机构为法国地球物理公

司（CGG Services SA）、美国贝克休斯公司（Baker Hughes Corp）、美国斯伦贝谢公司（Schlumberger Canada Ltd.）、西方地球物理公司（Westerngeco LLC）、北京工业大学。从核心专利产出机构排名前十的合作网络（图 2.2.6）来看，机构之间的合作较为稀疏。

表 2.2.5 “抗震及振动控制”工程开发焦点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	220	49.55%	2471	47.25%	11.23
2	USA	129	29.05%	2000	38.24%	15.50
3	Germany	23	5.18%	205	3.92%	8.91
4	Japan	22	4.95%	212	4.05%	9.64
5	France	21	4.73%	129	2.47%	6.14
6	UK	14	3.15%	115	2.20%	8.21
7	Canada	9	2.03%	37	0.71%	4.11
8	The Netherlands	9	2.03%	77	1.47%	8.56
9	Norway	7	1.58%	53	1.01%	7.57
10	Korea	6	1.35%	45	0.86%	7.50

表 2.2.6 “抗震及振动控制”工程开发焦点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	CGGV	16	3.60%	105	2.01%	6.56
2	BAKO	14	3.15%	278	5.32%	19.86
3	SLMB	14	3.15%	178	3.40%	12.71
4	WGSC	11	2.48%	168	3.21%	15.27
5	UYBT	10	2.25%	125	2.39%	12.50
6	CNPC	9	2.03%	86	1.64%	9.56
7	ESSO	9	2.03%	159	3.04%	17.67
8	HALL	8	1.80%	235	4.49%	29.38
9	China Univ Petroleum	8	1.80%	92	1.76%	11.50
10	PGSG	7	1.58%	66	1.26%	9.43

* 专利公开量 Top10 机构为：CGG Services SA、Baker Hughes Corp、Schlumberger Canada Ltd.、GECO Technology BV、Beijing Univ Technology、China Nat Petroleum Corp、Exxonmobil Upstream Res Co. (Exxonmobil Res & Eng Co.)、Halliburton Energy Services Inc.、China Univ Petroleum、PGS Geophysical AS。

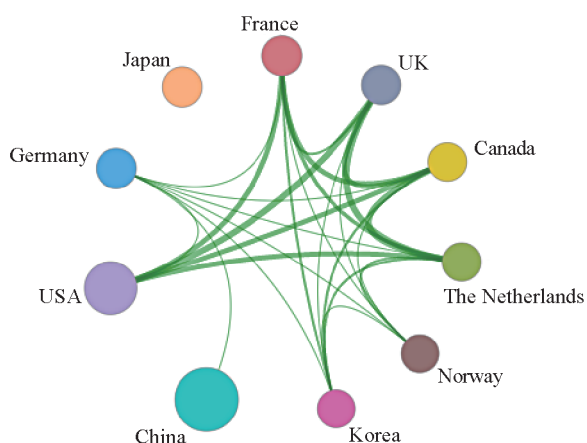


图 2.2.5 “抗震及振动控制”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

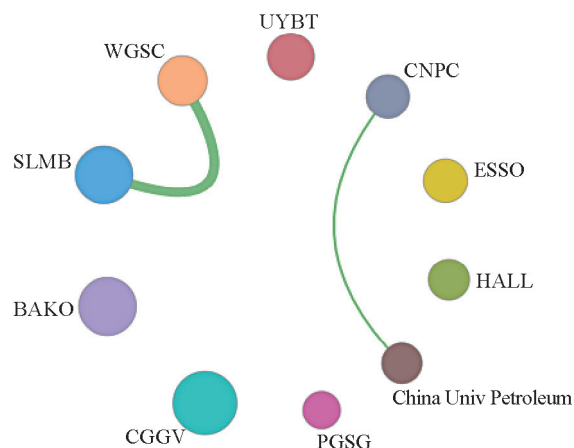


图 2.2.6 “抗震及振动控制”工程开发焦点主要机构间的合作网络

项目参与人员

领域课题组人员

领域课题组专家

领域课题组长：崔俊芝 沈祖炎

院士专家：

崔俊芝 江欢成 江 亿 周福霖 欧进萍

沈祖炎 梁文灏 缪昌文 刘加平 肖绪文

聂建国 胡春宏 郭仁忠 陈政清 郑健龙

其他专家：

陈以一 葛耀君 顾冲时 郭容寰 韩国瑞

韩林海 贺鹏飞 洪开荣 李安桂 李大鹏

李德英 李 惠 李国强 刘仁义 刘曙光

刘旭锴 凌建明 罗尧治 马 军 毛志兵

牛荻涛 钱 锋 乔丕忠 任伟新 茹继平

史才军 时蓓玲 孙立军 孙利民 谈广鸣

谭忆秋 唐海英 童小华 王卫东 吴志强

伍 江 徐世娘 徐赵东 于水利 张建民

张喜刚 张 旭 赵铁军 郑 刚 朱合华

朱若霖

工作组成员名单

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

同济大学相关学科：

建筑学：李振宇 贺 永

暖通空调：张 旭 周 翔

城乡规划与风景园林：张尚武 庞 磊

道路与铁路工程：孙立军 凌建明 邵敏华

土木建筑材料：蒋正武 陈 庆

工程力学：李 岩 王华宁

测绘工程：童小华 陈 鹏

市政工程：戴晓虎 徐 斌

同济情报所：陈 欣 姚俊兰

秘书：

吴宇清，FSCE 期刊编辑部

潘钻峰，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：赵宪忠 李 杰 陈建兵 王 伟
吴宇清 任晓丹 潘钻峰
桥梁工程：李建中 孙 智

岩土及地下工程：庄晓莹 蔡永昌 刘 芳

水利工程：黄文锐 蔡 奕

建筑学：李振宇 袁 烽 贺 永

暖通空调：张 旭 周 翔

城乡规划与风景园林：张尚武 庞 磊

道路与铁路工程：孙立军 凌建明 邵敏华

土木建筑材料：蒋正武 陈 庆

工程力学：李 岩 王华宁

测绘工程：童小华 陈 鹏

市政工程：戴晓虎 徐 斌

同济情报所：陈 欣 姚俊兰