DOI 10.15302/J-SSCAE-2018.06.007

铁路、水利与建筑工程领域颠覆性技术研究

吴文伶[1]，卢海陆[1]，侯保灯[2]，严登华[2]，董亮[3]，潘永杰[3]

（1. 中国建筑股份有限公司技术中心，北京 101300；2. 中国水利水电科学研究院，北京 100038；
3. 中国铁道科学研究院集团有限公司，北京 100081）

摘要：历史上每次科技革命、工艺革命、能源革命，都伴随着颠覆性技术的出现，因此研究颠覆性技术对于各领域未来的发展方向具有重要的意义。本文分析了铁路、水利与建筑工程领域的发展方向和态势，认为铁路领域的发展方向为智能化发展和更高运行速度发展，水利领域的发展方向为人与自然和谐共生，建筑领域的发展方向为精益化、专业化、机械化、信息化、装配化、绿色化。在此基础上，研究总结了这三个领域的颠覆性技术，铁路领域的颠覆性技术包括智能高铁、低真空管道磁悬浮铁路；水利领域的颠覆性技术包括富自然功能协调流域建设技术、水利水电工程群多目标联合调度技术；建筑领域可能的颠覆性技术包括基于建筑信息模型（BIM）的智慧建造技术、工业化建造技术、3D 打印技术、绿色建造技术。最后本文提出了未来发展的建议，以期为铁路、水利与建筑工程领域的研究与发展提供参考。

关键词：铁路工程；水利工程；建筑工程；颠覆性技术

中图分类号：T-19　　**文献标识码：**A

Research on Disruptive Technologies in Railway, Hydraulic, and Architectural Engineering

Wu Wenling[1], Lu Hailu[1], Hou Baodeng[2], Yan Denghua[2], Dong Liang[3], Pan Yongjie[3]

(1. Technical Center of China State Construction Engineering Corporation Limited, Beijing 101300, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
3. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: Every technological and energy revolution in history was accompanied by the emergence of disruptive technologies. Therefore, it is of great significance to study disruptive technologies for the future development of various fields. This paper analyzes the development directions and trends of railway, hydraulic and architectural engineering, and points out that the development direction of railway engineering is intelligent and higher-speed development; the development direction of hydraulic engineering is conforming to nature and human-nature integration; and the development direction of architectural engineering is to be precise, professional, mechanized, informationized, assembled, and eco-friendly. On this basis, this paper summarizes the disruptive technologies in these three fields. The disruptive technologies in the railway field include intelligent high-speed railway, low vacuum pipeline maglev railway; the disruptive technologies in the hydraulic field include the construction technology of basins with rich natural functions, and the multi-objective joint dispatching technology of water resources and hydropower projects; and the possible disruptive technologies in the architecture field include BIM-based intelligent building technology, industrial building technology, 3D printing technology, and

收稿日期：2018-10-25；**修回日期：**2018-11-12

通讯作者：侯保灯，中国水利水电科学研究院，高级工程师，研究方向为水文学及水资源；E-mail: houbaodeng@163.com

资助项目：中国工程院咨询项目“工程科技颠覆性技术战略研究”(2017-ZD-10)

本刊网址：www.enginsci.cn

green building technology. Finally, this paper puts forward some suggestions to provide reference for the research and development of railway, hydraulic, and architectural engineering.
Keywords: railway engineering; hydraulic engineering; architectural engineering; disruptive technology

一、前言

颠覆性技术，又称破坏性技术、革命性技术、变革性技术等，目前尚无统一的定义。从技术属性讲，颠覆性技术可以是基于新概念、新原理的原始创新技术，可以是支撑装备创新的应用技术，也可以是多项技术交叉融合产生的新技术 [1~3]。

铁路、水利与建筑工程领域为传统行业，属于应用型技术。纵观其发展史，表现出很强的单一化特点，相应的工程技术的发展速度也非常缓慢。但随着物质财富的积累和社会的进步，人们对工程使用功能、经济性、环保性等的要求也越来越高。总的来说，铁路、水利与建筑工程技术呈现出覆盖面广、专业性强、技术衔接紧密、自动化程度低等特点。

颠覆性技术打破了原有生产方式，改变了原有生产关系。工程技术往往是成套的，不是单一的某项技术，需要多种技术配合才能完成工程任务。因此，对于技术的主体 —— 技术人员，就构成了某种生产关系，产生了相应的生产方式。工程领域颠覆性技术的出现，是由于一种或者几种技术变革、颠覆或重组所引发的，是多种技术的或整体技术的“合力”而成，对外则表现出的是打破了原有生产方式。颠覆性技术除了打破原有生产方式外，还应该能跳跃式地提高生产效率。

二、铁路、水利与建筑工程领域发展态势分析

（一）铁路工程领域发展方向

1. 智能化发展

铁路是综合交通运输体系的骨干，在我国经济社会发展中的地位和作用至关重要。

当前，新一轮科技革命和产业变革从蓄势待发到群体迸发，变革的速度、广度、深度及影响前所未有。作为引领未来的创新性技术，智能技术的快速更迭为铁路行业的发展注入新活力。一些铁路发达国家主动把握新技术发展浪潮，积极推进学科交叉融合，加快布局铁路数字化和智能化战略。德国推出“铁路 4.0”发展规划，法国推出“数字化法铁”项目，日本已实施智能铁路运输系统（CyberRail）研发计划 [4,5]。

截至 2017 年年底，我国铁路营业里程达到 1.27×10^5 km，其中高铁营业里程达到 2.5×10^4 km，占世界高铁营业里程总量的 2/3。根据《“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》，全国高铁营业里程到 2020 年将超过 3×10^4 km，基本建成布局合理、覆盖广泛、功能完善的高铁网。高铁的发展紧密契合我国“一带一路”“交通强国”的重大国策与发展战略。在新一轮科技革命背景下，高铁行业孕育着重大的技术创新需求和发展机遇，进一步提升高铁智能化水平、引领世界高铁的发展成为当前铁路领域迫切需要解决的关键任务。

2. 向更高运行速度发展

我国高速铁路经过多年的联调联试、综合试验和载客运营，已经验证了 350 km/h 速度等级高速铁路基础设施的设计、建造、试验、运营和养护维修技术，形成了时速 350 km 及以下速度级高速铁路基础设施成套技术体系。

我国铁路一直践行以人为本的理念，致力于提高旅客的舒适度。但从实际来看，火车旅行时间在 4 h 以内时旅客舒适度较好，如果火车旅行时间超过 6 h 以上舒适度将降低，人们就倾向于转移到更快的交通运输方式。我国国土面积大、运距长，有必要发展速度更高、更节能的新型交通系统。

传统轮轨式轨道交通受空气阻力、轮轨黏着、蛇行失稳、运行噪声以及弓网极限速度等问题的制约，同时能耗和机械摩擦、磨损随着速度的提高而不断增大，既有轮轨高速铁路的最高经济与技术速度在 400 km/h 左右。目前航空巡航经济速度为 800~1 000 km/h，与 400 km/h 之间形成尚待开发的速度空白区。

为获得更高的经济运行速度，必须颠覆传统的轮轨关系模式，在利用悬浮技术减少车轨摩擦、振

动的基础上，再构建低真空运行环境以减小空气阻力和噪声将是未来更高速度轨道交通技术的重要发展方向。

（二）水利工程领域发展方向

1. 水问题治理发展方向

当前正处于气候变化和强人类活动影响的变革时代。变化环境下水问题治理的总体需求就是要构建健康的流域自然 – 社会水循环系统，并让水资源最大限度发挥生态环境和社会经济功能，且不造成灾害影响，核心是调控社会水循环 [6]。主要包括四大基本要求：①社会水循环不损害自然水循环变化的客观规律；②社会水循环不改变天然水生态过程，水生态系统按照自然规律发生演化，水的生态服务功能不受损害；③社会水循环过程不会导致污染物等在水体中的富集，不改变水体功能；④社会水循环过程不会影响水沙过程，泥沙“去其应去的地方”。

因此，水问题的综合治理就需要在遵循流域水循环多过程自然演变机理及规律的基础上，全面提高流域对其的综合调节能力；充分发挥流域的自然调节能力，整体提升流域的综合调节性能，有效应对水循环过程的“极值化”态势；治水还需建设健全流域的综合服务功能，保育“山水林田湖草”生命体功能，实现自然与社会相协调；多种水问题交织，需进行水循环过程、水生态过程、水化学过程和水沙过程等多过程进行综合调控，建设富自然功能协调流域。

2. 水利工程管理的发展方向

随着人类活动对流域水循环影响的加剧，水资源系统由单纯的水文系统转变为一个包含社会、经济、水循环、生态等基本功能的复杂系统，系统中内在因素的相互制约、相互促进、相互影响形成了复杂水资源系统的内部运行机制。这种内在机制使得在现有的技术条件下，人类社会的发展与水资源系统之间的矛盾逐渐形成一种恶性循环。一方面，随着社会的快速发展和经济的飞速增长，对水资源系统的开发利用不断提出更高的要求，不合理的开发利用方式导致水资源危机的产生和生态环境的恶化；另一方面，水资源的短缺、水环境和生态破坏又制约着经济与社会的发展。解决社会经济与水资源系统之间的矛盾，使人类社会的发展进步与自然环境健康之间处于一种相对平衡的状态，关键是要有效地对水资源系统进行调控。水利水电工程群多目标联合调度是实现水资源系统调控的重要手段，可有效协调社会、能源、生态等系统的用水矛盾，最大限度地提高水资源的利用效率，实现经济 – 社会 – 生态综合效益最大化 [7]。

（三）建筑工程领域的发展方向

建筑工程建造包括工程策划、设计和施工三个阶段。建造技术发展具有 6 个方面的发展趋势，即精益化、专业化、机械化、信息化、装配化和绿色化 [8]。

（1）精益化。精益建造的过程能够促使有效的资源得到最合理的应用，增加了建筑施工企业的利润，提高其业绩。通过实施精益建造，提高组织中的生产效率，降低建造成本，提升工程质量。

（2）专业化。就目前建筑行业的需求，结合国家对建筑行业绿色可持续的发展需要，推进建筑从业人员专业化培养，具有重要意义。一方面，解放了劳动力，减轻了劳动强度，实现了人力资源的高效利用；另一方面，从工程管理和实施双渠道进行优化，避免了资源的消耗，减少环境污染。此外，专业化还为提高工程安全建造和提速、提质提供了可靠保障。

（3）机械化。现代建筑施工，机械设备的需求量也越来越大，机械化程度越来越高，在今后的工程建设中工程机械将逐渐替代人工劳动，而占据主体地位。机械化施工的优势包括：①提高了建筑施工效率；②保障了工程质量；③降低了生产成本。

（4）信息化。建筑信息化是建筑技术和新兴信息技术相结合的产物，是科学技术、社会经济、信息通信发展的必然。在现代信息社会，建筑物不仅仅是遮风避雨的场所，更是人、信息和工作环境的智慧结合，充分运用信息化技术将成为未来建筑的标志。

（5）装配化。装配式建造是通过工业化方法在工厂制造的工业产品（构件、配件、部件），在工程现场通过机械化、信息化等工程技术手段，按不同要求进行组合和安装，建成特定建筑产品的一种建造方式。装配式建造要实现建筑设计标准化、构（配）件生产工业化、临建设施装配化、结构构件

装配化、配件安装整体化、设备管道集成化、现场施工机械化、构（配）件供应配套化、工程管理信息化、操作人员专业化、建筑形式多样化。与传统现浇模式相比，装配式建造把施工现场大量的高强度的作业移向“工作环境可实现人为控制的厂房内”进行现代化生产，随着现场作业量的减少，扬尘、噪声和废弃物排放也大大减少，可改善工人作业条件，减轻劳动强度，保护环境、减少污染，提升绿色水平，促进产业链融合，实现建筑多样化，减少施工安全隐患，保证建筑品质。装配式建造是用现代工业化的大规模生产方式代替传统的手工业生产方式来建造建筑产品，是建筑业重要的发展方向之一。

（6）绿色化。总的来说，建造发展的趋势是绿色建造。绿色建造是着眼于建筑全生命周期，在保证质量和安全的前提下，践行可持续发展的理念，通过科学管理和技术进步，最大限度地节约资源和保护环境，实现绿色施工要求，生产绿色建筑产品的工程活动。绿色建造的基本理念是“资源节约、环境友好、过程安全、品质保证”。

三、值得关注的潜在颠覆性技术

（一）铁路工程领域

1. 智能高铁技术

智能高铁技术是高铁技术的无条件颠覆，在高铁原有模式的基础上，广泛应用建筑信息模型（BIM）、云计算、物联网、大数据、人工智能、下一代通信等新技术，通过对高铁移动装备、固定基础设施及相关内外部环境信息的全面感知、泛在互联、融合处理和科学决策，高效综合利用高铁所有移动装备、固定基础设施、空间、时间和人力等资源，覆盖智能列车、智能客运、智能基础设施、智能调度指挥、智能工程建设、智能经营管理、智能安全监控、智能养护维修等各个环节，致力于全业务流程、全价值链条、全生命周期、全生态体系的整体智能化，颠覆了原有的高铁工程建造、动车组、列车控制、牵引供电、运营管理、风险防控等模式，属于范式颠覆。

目前铁路部门正开展京张、京雄铁路的智能建造转型，预计到 2020 年，完成智能京张、智能京雄铁路的整体典型示范，优化站车服务功能，为旅客出行提供更加便捷的智能服务；研制智能列车，实现自动驾驶；采用智能化列车调度和防灾预警系统，全面提升铁路安全和运营管理水平。到 2035 年，以智能建造、可储能源的绿色高速动车组，自主无人条件下的列车智能运行等为标志，实现高速铁路全过程、全生命周期的高度智能化，智能高铁网初步建成。

2. 低真空管道磁悬浮铁路技术

低真空管道磁悬浮铁路技术属于高铁的独立型颠覆。该技术将颠覆成熟的轮轨理念和相对成熟的高速磁悬浮理念，将在系统综合、移动装备、基础设施、运控通信、运营服务、安全保障等方面构建一套完全不同的技术体系。

理论上，采用真空管道技术，让列车处于真空环境中，没有了空气阻力，将大幅提升磁悬浮列车的速度，但高速磁悬浮低真空管道系统毕竟是一种全新的极具挑战的系统，还存在诸多问题：真空管道技术的实现尚有多个问题需要解决；安全问题需要着重考虑；难以成为大运量、大众化的交通运输方式；工程要求高；真空管道内部的维护保养有待论证；舒适度方面尚有不少难题和经济性仍需要进一步论证。在此前提下，该技术目前主要由市场主导，仍处于孕育期。

因此针对上述难题和不确定性应开展前瞻性研究，并开展试验线建设的筹划和可行性研究，以便为后续运营做好实证基础。

（二）水利工程领域

1. 富自然功能协调流域建设技术

富自然功能协调流域建设，就是要以流域水循环多过程为主线，充分挖掘和发挥天然系统对水循环的调节作用；规范人类水土资源开发活动，减少对自然水循环的扰动；系统布局地表灰色基础设施（水库、堤防、渠系、泵站、水井等）与绿色基础设施（林草地、湿地等），建设棕色水库（土壤水）和蓝色水库（含水层和其他地下空间）；融合现代信息技术的新进展，建设红色基础设施（智能水网与智慧水务），实现地表 – 土壤 – 地下多过程、水量 – 水质 – 泥沙 – 水生态的联合调控，最大限度实现“去极值化”，系统解决流域水问题。富自然功能协调流域建设的总体目标就是通过系统布局五色基础设施，从水资源、水安全、水环境、水生态、水管理、水景观、水文化、水经济八个层次进行协

同调控，构建健康的自然 – 社会水循环系统。

我国率先提出富自然功能协调流域的概念，在理论框架、顶层设计和关键技术方面取得了一定进展 [6]，在国际上处于领跑位置。目前，正在淮河流域的典型小流域开展试点示范，下一步将逐步增加试点流域示范研究，预计 2030 年后可在全国各大流域推广，2050 年可全面建成富自然功能协调流域。

富自然功能协调流域建设具有三大特征及优势：

（1）充分融合了“山水林田湖草”生命体理论，丰富了治水内涵。高度关注自然地理实体调节能力的发挥，统一调配绿色、灰色、棕色、蓝色和红色基础设施建设，革新了治水模式。

（2）重在系统治理和功能提升，不同于生态流域和清洁流域建设。生态流域和清洁流域侧重于生态和水质状态的改变，治理对象也未能充分考虑水循环多过程，且难以适应变化环境下水安全综合应对的需求，长效机制缺乏。富自然功能协调流域建设不仅关注水量调蓄，还要净化环境与保育生态系统。

（3）全面吸收了海绵田和海绵城市建设的精髓，实现多维立体调蓄。相对于流域来说，海绵城市建设只是“点”尺度的调控，海绵田建设只是“斑块”尺度，均是单一过程的调控；富自然功能协调流域将以流域为基本单元，进行多维立体调控。

开展富自然功能协调流域建设，既是流域综合治理的需要，也是人类文明发展的必然趋势，经济效益明显、社会意义重大。

2. 水利水电工程群多目标联合调度技术

水利水电工程群多目标联合调度以人与自然和谐共生、维系和保育河湖生态完整性为指导思想，以水系统为核心构建水 – 生态 – 能源耦合系统一体化调控，并耦合大数据、云计算等智慧化技术，实现复杂巨系统的多目标联合调度，是对相互间具有水文、水力联系的水库以及相关设施进行统一协调调度，从而获得单独调度难以实现的更大效益。

随着水文气象预报、计算机应用技术以及复杂系统控制科学的不断进步，必将产生一些适用于水库群系统调度的新理论和新技术，具有广阔的发展应用前景，主要可概括为以下几个方面：①在实时预报调度方面，对变化环境下气象水文预报不确定进行量化分析，以及实现耦合预报不确定滚动调度决策；②在面向生态的调度方面，建立河流生态健康评价机制以及面向生态的水库群多目标综合调度模式；③在多能源互补调度方面，结合系统论、控制论等理论方法解析水库群系统与新能源系统的互馈关系，建立水 – 能一体化的联合调度机制。

按照发展主推力量分类，虽然水利水电工程建设以政府主导为主，但其管理与运营逐步市场化，故水利水电工程群多目标联合调度应属于政府与市场相结合类别；按照颠覆程度进行分层，水利水电工程群多目标联合调度不仅涉及到整个水利行业，还涉及到生态领域、环保领域、气象领域、能源领域等，属于水 – 生态 – 能源系统的耦合，实现人与自然和谐共生，体现了习近平新时代中国特色社会主义思想，故应属于时代颠覆；按照发展状态进行分段，水利水电工程群多目标联合调度已经过了萌芽期，正在开展典型案例探索与关键技术突破，故正处于突破期；对关键突破点进行判断，水利水电工程群多目标联合调度涉及多学科交叉，涵盖水文、气象、生态、防洪、发电、供水、航运、电力等，需要综合运用多项技术，故应属于技术交叉。综合来看，开展水利水电工程群多目标联合调度，既能最大限度地提高水资源的利用效率，发挥水资源的经济效益，又能协调社会、能源、生态等系统的用水矛盾，经济效益明显、社会意义重大。

（三）建筑工程领域

纵观建筑工程发展历史，预测未来建筑领域的颠覆性技术可能有以下几个方向：一是基于 BIM 的智慧建造技术；二是工业化建造技术；三是 3D 打印建造技术；四是绿色建造技术。

1. 基于 BIM 的智慧建造技术

BIM 技术是未来建筑工程项目数字化建设的基础性技术，是利用数字模型对工程进行规划、设计、建造和运营的全过程管理，将在项目全寿命周期内各个阶段都能有效地实现建立资源计划、控制质量安全资金风险、节省能源、节约成本和提高效率，将大大提升工程建设运维管理信息化水平和中国技术“走出去”软实力，将成为未来工程建设领域的又一次革命，具有颠覆性意义 [9,10]。

按照发展主推力量不同，基于 BIM 的智慧建造技术属于市场主导的类型；按照发展阶段不同，基于 BIM 的智慧建造技术属于突破期。基于 BIM 的智慧建造技术将设计、施工、运维统一起来，能够提高建造和管理效率，并且具有节材和节约工人的效果，具有良好的经济价值。智慧化建造方式，能够大大节约劳动力，改善建造工人的工作环境，提高其幸福感，具有重要的社会价值。

2. 工业化建造技术

建筑建造方式的发展路径如图 1 所示，随着挖土机、混凝土泵车、塔机等机械的成熟和发展，机械化施工方式逐步替代了原有的以人力为主的作业方式。而随着建筑材料和部品工厂生产方式的推广，以及装配式施工方式和绿色施工的发展，在未来，工业化建造可能替代现有的以湿作业为主的建造方式，成为颠覆性技术。

随着施工技术的发展和进步，未来工业化建造方式将成为主流，它能够提升建筑品质、减少环境污染、保证安全和健康、提高建造效率。在工业化建造方式中，预制构件在工厂进行标准化的生产，再通过现场专业工人进行装配式施工，符合绿色低碳、可持续发展的理念，相对于现有的以湿作业为主的建造方式，工业化建造是未来的发展方向，可能会成为颠覆性技术 [11,12]。

按照发展主推力量不同，基于工业化建造技术属于政府与市场相结合的类型；按照发展阶段不同，工业化建造技术属于突破期。工业化建造方式是按照工业化大生产的方式建造建筑，能够提高建造效率和产品性能，具有良好的经济价值；工业化建造方式可以改善建造工人的工作环境，提高其幸福感，具有重要的社会价值。

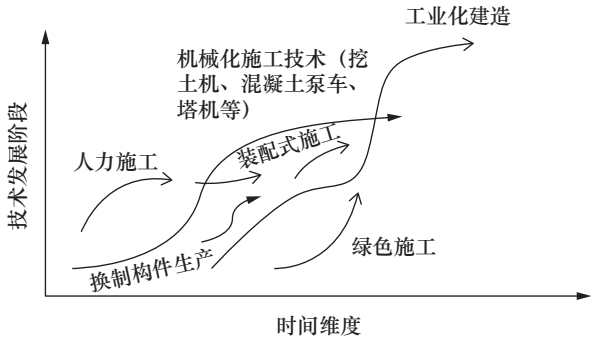

图 1　建筑建造方式的发展路径

3. 3D 打印建造技术

3D 打印建造技术可以完全实现机械化，可以完全颠覆传统的建造方式。3D 打印建造能够建设更复杂的建筑，是建筑业一个重要的发展方向。目前，3D 打印建造在国内还处于起步阶段，其设备工艺和建造过程也很少得到批量生产和应用，尚未形成针对特定工艺和方法进行系统化的推进条件。然而，建筑 3D 打印以信息化和机械化为技术手段，可缩短工期、节约人工，很大程度上缩小了对劳动力的依赖，也在很大程度上降低了建筑工人的劳动强度，改善了工作环境，提高了工作效率。因此，未来有可能成为颠覆性技术 [13~15]。

按照发展主推力量不同，3D 打印技术属于市场主导的类型；按照发展阶段不同，3D 打印技术属于萌芽期。 使用 3D 打印技术能够更方便、更节约地建造异形建筑和部品，丰富建筑的造型多样性，具有良好的经济价值。3D 打印技术可提高机械化程度，节省人力成本，具有重要的社会价值。

4. 绿色建造技术

绿色建造是指工程建造的全过程，包含工程立项绿色策划、绿色设计和绿色施工三个阶段；但绿色建造不是这三个阶段的简单叠加，而是有机整合。绿色建造能够促使参与各方立足于工程总体角度，从工程立项策划、设计、材料选择、楼宇设备选型、施工过程等方面进行全面统筹，有利于工程项目绿色目标的实现和综合效益的提高，有可能成为颠覆性技术 [8,16]。

按照发展主推力量不同，绿色建造技术属于政府与市场结合的类型；按照发展阶段不同，绿色建造技术属于突破期。

四、结论及建议

本文研究了铁路、水利和建筑领域的颠覆性技术内涵，分析了颠覆性技术发展态势，给出了工程领域可能会出现颠覆性创新的技术发展方向。在以上研究成果的基础上，提出铁路、水利和建筑领域的颠覆性技术发展建议。

1. 积极推动工程项目智能化建造和运维技术的研究与应用

积极研究和推广基于 BIM 的工程设计建造与管理，深化推进工程装配式技术发展和高附加值构

（配）件的 3D 打印技术，实现设计、制造、装配为一体的工业化生产目标。大力提高工程建设自动化和信息化水平，研究发展复杂工况下的机器人建造技术，发展基于物联网的低能耗监测传感器网络、故障预测与健康管理（PHM）技术，全面推进传统工程与现代技术的深度融合，构建以人为本的高安全、高质量、低能耗、绿色环保的工程绿色建造模式，实现以 BIM 技术为基础、现代信息和人工智能技术为支撑，面向全生命周期的建设工程新业态。

2. 推进“智能铁路”和低真空管道磁悬浮铁路关键技术的研究与应用

研究智能铁路建设、智能设施与装备、智能调度与运维、智能安全保障等关键技术与应用，推进我国铁路智能化发展，带给旅客更好体验、牵引经济和社会更好发展，有力支撑“交通强国”国家战略。

结合都市、都市圈地下空间开发利用方向，以及我国高铁隧道比例高的工程实际，将建造形成地下封闭管道，与磁悬浮高铁等技术系统集成，形成低真空管道磁悬浮铁路系统，运营时速 600 km 及以上，填补航空与轮轨高铁之间的速度空白，对于持续保持我国高铁技术国际领先地位具有重要的战略意义。

3. 加快推进富自然功能协调流域建设

通过富自然功能协调流域的建设，健全流域的综合服务功能，打造“山水林田湖草”生命体，实现人与自然和谐共生，将是新时代治水的新模式。通过基础设施的优化布局，实现水循环多过程间、坡面 – 河道过程间、地表 – 土壤 – 地下过程间、常态过程与极值过程间的协调，让水和沙“去其应该去的地方”，让资源赋存在其应该赋存的区域，让土地上生长其应该生长的生物。

4. 积极探索水 – 风 – 光多能互补的流域联合调度

水 – 风 – 光一体化开发调度符合事物存在的自然规律，市场需求巨大。通过风电、光电、水电互补运行，联合调度，充分利用水电的调节性能对光伏发电及风力发电进行补偿，可显著消弱风 – 光发电的随机性、波动性和间歇性弊端。水 – 风 – 光多能立体开发调度，能够充分利用国土面积，增加优质、清洁电力供应，为国民经济健康发展提供不竭动力。

5. 积极推进绿色建造

节约资源、保护环境是实现人类社会可持续发展的基础，因此，在铁路、水利和建筑领域的工程建造过程中，均应贯彻这一理念，践行绿色建造。

参考文献

[1] 荆象新, 锁兴文, 耿义峰. 颠覆性技术发展综述及若干启示 [J]. 国防科技, 2015, 36(3): 11–13.
Jing X X, Suo X W, Geng Y F. Review and revelation on disruptive technology development [J]. National Defense Science and Technology, 2015, 36(3): 11–13.

[2] 黄鲁成, 成雨, 吴菲菲, 等. 关于颠覆性技术识别框架的探索 [J]. 科学学研究, 2015, 33(5): 654–664.
Huang L C, Cheng Y, Wu F F, et al. Study on identification framework of disruptive technology [J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(5): 654–664.

[3] 刘秋艳, 吴新年. 国内外颠覆性技术发现方法研究综述 [J]. 图书情报工作, 2017, 61(7): 127–136.
Liu Q Y, Wu X N. Review on disruptive technology discovery methods [J]. Library and Information Service, 2017, 61(7): 127–136.

[4] 何华武. 中国铁路: 智能发展与创新 [R]. 上海: 中国铁路总公司, 2017.
He H W. China railway: Intelligent development and innovation [R]. Shanghai: China Railway, 2017.

[5] 何华武. 智能高铁战略研究 [R]. 北京: 中国铁路总公司, 2018.
He H W. Strategic research on intelligent high speed railway [R]. Beijing: China Railway, Co., 2018.

[6] 严登华, 王浩, 张建云, 等. 生态海绵智慧流域建设——从状态改变到能力提升 [J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 145–153.
Yan D H, Wang H, Zhang J Y, et al. Construction of an ecological sponge-smart river basins: From changing status to improving capability [J]. Advances in Wate Science, 2017, 28(3): 145–153.

[7] 雷晓辉, 蔡思宇, 王浩, 等. 河流水资源调度关键技术及通用软件平台探讨 [J]. 人民长江, 2017, 48(17): 37–45.
Lei X H, Cai S Y, Wang H, et al. Discussion on core technique and general software platform of river water resources regulation in China [J]. Yangtze River, 2017, 48(17): 37–45.

[8] 肖绪文. 绿色建造发展现状及发展战略 [J]. 施工技术, 2018, 47(6): 1–4.
Xiao X W. State and development strategy for green construction [J]. Construction Technology, 2018, 47(6): 1–4.

[9] 李云贵, 邱奎宁, 刘金樱. 我国BIM 发展现状与问题探讨 [J]. 江苏建筑, 2018, 4: 6–9.
Li Y G, Qiu K N, Liu J Y. Current situation and problems of BIM in China [J]. Jiangsu Architecture, 2018, 4: 6–9.

[10] 邱奎宁, 李洁, 李云贵. 我国BIM 应用情况综述 [J]. 建筑技术开发, 2015, 42(4): 11–15.
Qiu K N, Li J, Li Y G. A summary of BIM applying in China [J]. Building Technology Development, 2015, 42 (4): 11–15.

[11] 肖绪文. 装配化是建筑业的战略性选择[J]. 建筑, 2016, 20: 8–10.

Xiao X W. Assembly is the strategic choice of the construction industry [J]. Construction and Architecture, 2016, 20: 8–10.

[12] 肖绪文, 冯大阔. 基于绿色建造的施工现场装配化思考 [J]. 施工技术, 2016, 45(4): 8–12.
Xiao X W, Feng D K. Study on site assembly based on green construction [J]. Construction Technology, 2016, 45(4): 8–12.

[13] 肖绪文, 马荣全, 田伟. 3D 打印建造研发现状及发展战略 [J]. 施工技术, 2017, 46(1): 5–8.
Xiao X W, Ma R Q, Tian W. Research and development status and development strategy of 3D printing construction [J]. Construction Technology, 2017, 46(1): 5–8.

[14] 田伟, 肖绪文, 苗冬梅. 建筑3D 打印发展现状及展望 [J]. 施工技术, 2015, 44(17): 79–83.
Tian W, Xiao X W, Miao D M. Development and prospect of 3D printing for architecture [J]. Construction Technology, 2015, 44 (17): 79–83.

[15] 肖绪文, 田伟, 苗冬梅. 3D 打印技术在建筑领域的应用 [J]. 施工技术, 2015, 44(10): 79–83.
Xiao X W, Tian W, Miao D M. Application of 3D printing technology in architecture [J]. Construction Technology, 2015, 44 (10): 79–83.

[16] 尤完, 肖绪文. 中国绿色建造发展路径与趋势研究 [J]. 建筑经济, 2016, 37(2): 5–8.
You W, Xiao X W. Study on the development path and trend of green construction in China [J]. Construction Economy, 2016, 37 (2): 5–8.