

2021年工程建设行业 优秀科技成果汇编



中国施工企业管理协会

2021年12月

目 录

CNOTENTS

十项新技术篇

自航式沉管运输安装一体船及施工成套技术的研发与应用.....	3
稠油开发采出液高效处理及资源化利用技术.....	6
建筑垃圾模块化处置工艺及设备研发.....	8
一种循环施工升降机系统及实施方法.....	10
艰险山区高速铁路特大跨度混凝土拱桥关键技术及应用.....	13
天然气处理新工艺及设备关键技术.....	16
超高层建筑轻量化模块式智能施工平台创新技术.....	18
复杂地层中两千米级长距离顶管施工技术.....	21
振动碾无人驾驶机群作业关键技术.....	24
高速铁路 CRTSIII型先张轨道板自动化预制技术研究.....	27

房屋建筑篇

建筑工程 BIM 技术产业化集成应用研究.....	33
软土中心城区复杂环境下深大基坑群施工关键技术及应用.....	35
大型复杂建筑工程施工控制技术研究及示范.....	37
波音 737 完工及交付中心项目综合技术研究.....	39
雄安站复杂异形劲性清水混凝土施工技术研究与应.....	41
超 400m 的倾斜单向收缩偏心结构超高层建筑关键施工技术.....	43
大型儒家仿古建筑智慧建造技术.....	45
超限大跨度机库钢屋盖精准建造关键技术.....	47
庐山西海景区大跨度球类运动场馆空腹网格结构设计及建造关键技术研究.....	49
雷神山医院机电快速安装综合技术.....	51
工业化多高层钢结构住宅施工关键技术研究与应用.....	54
大型科技场馆绿色建造关键技术与应用.....	56

大跨度复杂场馆建造关键技术研究.....	59
基坑内地下水渗流机理及抗浮水头计算方法的研究与应用.....	61
复旦大学相辉堂修缮复原关键技术研究及示范.....	62
建筑物长距离及复杂移位关键技术研究与应用.....	65
高空百米跨度多层钢连廊整体提升和平移关键技术.....	66
城市中心区高层建筑改造关键施工技术研究与应用.....	68
受限空间大跨钢桁架经济建造关键技术研究与应用.....	70
滨海文化中心大型城市文化综合体关键施工技术研究与应用.....	72
超高层结构快速高效施工成套综合技术研究.....	74
高层吊脚楼设计与施工关键技术研究及应用.....	76
湖相地层中超高层建筑百米级基桩关键技术及应用.....	78
深大基坑自动化监测及智能化预警系统技术.....	80
预应力索网与格构式支撑组合柔性旋转平台施工技术.....	82

能源和工业篇

喜马拉雅地区复杂地质隧洞双护盾 TBM 关键技术.....	87
海上风机结构多源动力分析方法及全寿命设计技术.....	89
城市密集区叠合上盖建筑的超高压地下变电站建设关键技术与应用.....	91
复杂地质条件下深部凿井水害防治关键技术研究与应用.....	93
塔式太阳能光热发电站设计技术研究与应用.....	95
伊拉克哈法亚油田三期 1000 万吨/年地面工程关键技术研究及应用.....	97
高海拔、大温差、高烈度区压力钢管设计与施工技术.....	99
深厚粘土层多圈非等强复合冻结壁关键技术研究与应用.....	101
基于“IP+光”的电力通信网控制与防御关键技术及应用.....	104
多泥沙大中型水库增建减淤发电工程建设关键技术.....	106
复杂水利水电工程智能建管关键技术及平台.....	108
平原枢纽高落差大流速导截流关键技术.....	110
激光雷达复杂场景建筑物质量安全遥感检测技术研究与应用.....	112
深井松软极破碎巷道围岩内外承载协同控制关键技术及工程示范.....	114
城中采煤沉陷区人居环境与生态一体化重构关键技术.....	116

高砾质土心墙堆石坝复杂坝料关键技术与工程应用.....	119
丰满水电站重建工程碾压混凝土坝关键施工技术.....	121
400m 级全钢衬超长斜井施工技术.....	123
复杂条件引水隧洞长距离施工技术.....	125
一种核电站安全壳钢衬里模块化施工方法.....	128
“三大一高”消突技术在立井井筒揭突出煤层施工中的研究与应用.....	130
斜井井筒栈桥式全闭环整体液压模板台车研制与应用.....	132
水电工程防渗帷幕运行可靠性综合评价研究.....	135
煤化工（焦化）粗苯加氢装置成套施工技术.....	137

铁路桥梁篇

超大跨度双层公路悬索桥设计建造创新技术.....	141
高速铁路 445m 跨径混凝土拱桥设计关键技术.....	144
超大吨位转体桥关键技术及应用.....	146
大节段钢桁梁整体制造、架设关键技术.....	148
大跨度自锚式悬索桥先斜拉后悬索施工技术.....	150
艰险山区大跨双层公铁钢箱系杆拱桥关键技术.....	153
大型桥梁结构智能健康监测云平台研究及应用.....	155
超高超重拱形钢索塔提滑组合安装关键技术.....	157
新型高塔单索面大吨位非对称钢混结合梁斜拉桥设计与建造技术研究.....	160
青藏高原铁路大跨提篮式钢管混凝土拱桥拱肋安装技术.....	162
宽幅钢箱及钢箱结合梁斜拉桥上部结构关键技术及应用.....	165
艰险山区铁路框架式新型抗滑支挡结构工程技术研究.....	167
高精度激光移动扫描技术在铁路工程中的应用研究.....	169
高架站单双线箱梁架设施工方法.....	172
高铁隧道长距离穿越软塑性黄土地层施工技术研究.....	174
隧道快捷建造与智能监测关键技术.....	176
空间异形扭转钢主塔反对称公路斜拉桥建造关键技术.....	178
伶仃洋海域跨海大桥设计新技术.....	181
曲塔宽梁部分斜拉桥建造关键技术研究简介.....	183

BIM 环境下企业级项目管理数据采集与共享技术研究	185
强腐蚀低负温下混凝土性能劣化及对策的全寿命成套技术研究及应用	187
连续刚构拱桥主拱大节段异位拼装、纵移和提升施工关键技术研究	190
连续复合曲线高铁接触网精确测量计算及施工关键技术研究和应用	193
H 型钢柱智能车简介	195

基础设施篇

机械法联络通道建造成套技术研究与应用	199
远洋吹填珊瑚砂岛礁机场建造关键技术研究与应用	201
隧道掘进机高效破岩实验系统研制及应用	204
建筑固废资源化利用成套技术研究	206
富水复杂地层盾构渣土改良及安全保障关键技术	208
高海拔复杂地质特长公路隧道关键施工技术	210
复杂山区铁路隧道高位穿越巨型溶洞综合处置与安全控制关键技术	212
明挖综合管廊快速施工关键技术及其装备	214
复杂地层双护盾 TBM 设计、研制与施工成套技术研究	216
全断面掘进机刀具智能诊断系统	218
斯里兰卡汉班托塔海港发展项目二期工程设计与施工关键技术研究	220
中深层地热地埋管管群供热系统成套技术研究与应用	223
高瓦斯特长地铁山岭隧道建造关键技术	226
新型深层水泥搅拌船 (DCM) 研制	229
复杂海况长距离组合梁桥快速施工技术	231
恶劣海况复杂地质条件桥梁施工关键技术	234
数字化城市轨道交通工程建造管理系统研发及应用	236
城市地下综合管廊设计关键技术及全生命周期管理系统应用	238
干热大温差盐碱地区试车场超大斜面高速环道综合施工技术	240
复杂受限空间市政工程快速更新建造成套技术	242
地铁工程在城区特定敏感建 (构) 筑物环境下风险控制及关键修建技术	245
盾构管片钢筋笼自动化制造及应用	247
空间三维异形桥墩 BIM 建模应用技术研究	250

2019 年工程建设十项新技术名单.....	252
2020 年工程建设十项新技术名单.....	253
2021 年工程建设十项新技术名单.....	254



十项新技术篇

自航式沉管运输安装一体船及施工成套技术的研发与应用

深中通道是连接深圳市和中山市的世界级超大“桥、岛、隧、地下互通”集群工程，沉管隧道总长 6845m，是世界首例双向八车道钢壳混凝土沉管隧道，沉管段长度 5035m，由 26 段标准管节、5 节渐宽段管节和一节最终接头组成标，标准管节重约 77000 吨；沉管最大沉放水深约 40m。浮运吃水约 10.4m，工程地点距离桂山岛预制场 50km。

本项目的沉管隧道作为目前世界最长、国内首条长大公路沉管隧道具有以下难点：

①管节尺寸大、型号多、类型多；②基槽内抗横流长距离横拖和安装风险高；③穿越社会航道多，航道切换次数多，占用航道时间较长，海事安全管控难度大；④自然条件复杂；⑤航道等临时工程挖泥量大。

为解决上述难题，中交第一航务工程局有限公司主持研发集“功能一体、船管一体、结构一体、动力一体”的自航式沉管浮运安装一体船——“一航津安 1 号”，成功解决了超大型沉管长距离浮运安全风险高、施工难度大、施工效率低等技术难题，让沉管浮运安装步入了快车道，成为我国外海沉管施工的又一国之重器。

1. 方案比选

项目团队从预制设施投资、公共航道占用、挖泥量、工效、回撤可行性 5 个方面进行综合分析，通过对比沉放驳方案、半潜船方案和一体船方案，最终选定一体船方案作为浮运安装方案。

2. 一体船研发及施工成套技术研究

项目团队针对工程难点重点明确一体船研制应具备可运载多种结构形式和尺度的沉管、兼备浮运和安装功能、航行稳定性特别是抗横流稳定性、可长距离浮运、避免公共航道封航、减少挖泥量、适应外海施工和施工高效经济的八大目标。

在概念设计和方案设计两阶段期间，开展了沉管运输安装一体船运输航行快速性研究、航迹稳定性及回转性能研究、抗横流定位能力、船管动力响应及空间缆系协同、船管连接形式及受力研究、船体结构强度和船体稳性研究的七项主要研究工作，为一体船在不同航道限制下的主动力配置、侧动力配置、缆绳配置及支墩拉索等提供必要的技术依据。最终确定了船型及主尺度、总体布置、施工功能配置、推进器及动力配置、总功率和作业窗口条件

等六项主要内容。

自航式沉管浮运安装一体船主尺度为总长 190.4m，总宽 75m，型深 14.7m，为双片体式，配置 8 台 120t 移船绞车，6 台 80t 定位绞车，6 台 40t 提升绞车，8 台 25t 牵引绞车。主推配置 2 台 9280 kW 主机，船艏、船艉分别配置 4 台 3000kW 和 4 台 2600kW 侧推主机。具备施工操作、施工测控和视频监控 3 个子系统，共计 10 项功能，保障施工高效安全。

同时项目团队分别对“拓宽坞门和深坞区方案”与“建设坞外作业区”和两种预制厂方案进行了比选，最终选择“拓宽坞门和深坞区方案”并完成了桂山岛预制厂匹配性改造方案。通过舾装工艺和测量标定方法研究、一体船进出坞工艺研究、浮运工艺研究、定位安装工艺流程研究，确定管节沉放安装、管节对接、水力压接、管节精调等工艺步骤和关键控制指标。



自航式沉管浮运安装一体船施工图

3. 应用效果和效益

自航式沉管浮运安装一体船及成套工艺成功已应用于深中通道 E1-E13 管节浮运施工，经受了四个季节自然条件变化的实际检验，航行稳性和操控性能、自动循迹驾驶功能等各项指标全面达到预期。沉管浮运安装效率较传统工艺提升一倍以上，最大航速达到 5.8kn，航迹偏移量控制在 1.8m 以内，原地转向可达到 $10^{\circ}/\text{min}$ ，在 40m 水深条件下，安装精度控制在 4cm 以内，大幅减少每节沉管的封航时间 70%以上，综合估算降低油耗 35%，减少了海洋环境污染，经济和社会效益显著。

该项成果共获得 28 项专利，其中国际专利 2 项，发明专利 5 项，经中国水运行业协会评价，成果达到国际领先水平。

4. 创新点

(1) 首次提出了沉管浮运安装一体化概念，研发建造了“功能一体、船管一体、结构一体、动力一体”的沉管浮运安装一体船，解决了沉管长距离浮运安全风险高等技术难题。

(2) 首次研发了一体船沉管浮运安装成套施工工艺，实现了沉管浮运安装效率较传统工艺提升一倍以上，在 40m 水深条件下，安装精度控制在 4cm 以内。

(3) 首次研发应用了具有沉管测控等十大功能的数字化施工控制系统，提升了施工管理信息化水平。

(4) 首次研发了多缆协同的空间缆系船管同步安装缆系统，提高了安装定位精度和安装效率，降低了操控难度及安装缆刚蹭基槽边坡的风险。

(5) 首次将 DP 系统用于一体船循迹航行控制，航迹偏移量控制在 1.8m 范围内；并将 DP 系统应用于沉管浮运过程中，提高抵抗横流和稳定航行的能力，减少航道宽度，大幅降低航道疏浚量。

(6) 研发了实时动态监测船管姿态和相对运动状态、船体和船管连接结构受力和变形等关键安全指标，并实现了关键控制指标自动报警，保障了船舶施工安全。

5. 结语

通过深中通道和港珠澳大桥工程的实践，我们已经形成了一套以一体船为核心的沉管机械化、自动化施工的关键核心装备群和核心技术，为今后类似工程提供了一套高效、保质、安全、环保的解决方案。

完成单位：中交第一航务工程局有限公司、中交一航局第二工程有限公司、中交天津港湾工程研究院有限公司、深中通道管理中心、中交一航局第三工程有限公司

完成人：李一勇、潘伟、张乃受、宿发强、宋神友、李增军、王强、岳远征、宁进进、王洪涛、由广君、陈伟乐、刘德进、刘亚平、冯海暴、苏长玺、寇晓强、周延利、韩涛、黄涛

稠油开发采出液高效处理及资源化利用技术

新疆浅层稠油、超稠油属优质环烷基原油，被誉为原油中的“稀土”，是炼制火箭煤油、耐极寒机油、特种级沥青等国家重大工程和国防尖端装备急需产品的稀缺资源，是国家重大战略需求。该类资源主要分布在准噶尔盆地西北缘，资源量 10 亿吨，具有油藏埋深浅（125m~450m）、地层温度低（15~25℃）、原油粘度高（最高达 $500 \times 10^4 \text{mPa}\cdot\text{s}$ ）、黏土含量高（0.1%~5%）等特点，主要采用蒸汽吞吐、SAGD 等热采方式进行开发，传统地面工艺及设备不能满足高干度注汽和油水处理指标要求，水、热资源利用率低，具体体现在：

1.采出液乳化严重，油水分离困难，常规工艺处理 30 天无法交油。新疆稠油环烷酸含量高，分子极性很强，Zeta 电位高达 60~70mV，具有明显的胶体稳定特征；同时杂原子分布均匀，脱水温度下的油水密度差在 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ，极易发生自乳化，微观上呈稳定的 O/W、W/O 混合乳化状态。胶体和乳液的双重稳定特性决定了油水分离困难。

2.现有锅炉不能同时满足高干度注汽和净化水回用的双重要求。为提高超稠油开发效果，需大幅提高注入蒸汽的干度。而常规锅炉不能同时满足高干度注汽和净化水回用的要求，在新疆干旱缺水背景下，面临大量清水补充和污水外排的双重压力。此外，随着采出水中矿化度、硅含量的逐年升高，增加了采出水处理难度，进一步加剧了水资源供需矛盾。

3.传统的开式集输流程不能满足环保和热能利用的需要。“开式”集输工艺具有操作简单、运行稳定等优点，但生产过程伴随着蒸汽损耗和伴生气的无组织排放，不符合安全、环保要求。此外，稠油热采过程地面系统余热资源具有点多、面广、品位低的特点，热能利用率通常不足 70%，开式流程不具备热能回收条件。

对于超稠油开发而言，油藏、采油及地面是一个有机结合的整体，若上述生产难题不能在较短的时间内得到有效解决，将成为制约新疆环烷基特种油品稳产上产的因素之一。

为了填补国内超稠油开发地面配套技术空白，加快新疆油田超稠油工业化应用进程，从 2009 年开始，中油（新疆）石油工程有限公司联合新疆油田公司、新疆科力公司等多家单位，陆续启动近 20 项局级及以上科研项目，建立了 6 个先导试验工程，攻克了多项世界级难题，形成了新一代稠油热采地面工程配套技术体系，实现了稠油开发复杂采出液高效处理和资源化利用，经同行院士、专家鉴定，整体技术达到国际领先水平。

本项目形成的创新性成果包括：

1.发明高温复杂采出液高效脱水技术，脱水效率较常规大罐沉降工艺提高 30 倍以上。创新“先破胶失稳，再破乳脱水”的油水分离方法，发明基于环氧丁烷为共聚单体的耐高温（220℃）

有机化学剂产品，突破了有机药剂合成温度（ $\leq 140^{\circ}\text{C}$ ）禁区，发明了倾角 $9\sim 15^{\circ}$ 的高温仰角强制对流脱水装备，4 小时脱水率达 99.5%，原油黏度上限拓宽至 170000mPa.s。

2. 创新低成本净水技术，发明世界首台可回用含盐水的过热汽包注汽锅炉，稠油污水回用率达到 90% 以上。创新了具有除硅和净化协同作用的一体化水处理技术，发明了 RO-MVC 组合深度除盐工艺，创新“净段降盐保汽、盐段控热排盐”的分段蒸发水循环技术，发明世界首台回用高含盐水的循环流化床锅炉，给水矿化度限值由国际标准的 2mg/L 拓宽到 2000mg/L，蒸汽过热 30°C ，破解了污水回用产生过热蒸汽的难题，累计回用稠油污水 4.56 亿吨。

3. 发明高温无动力密闭集输和低品位余热高效利用技术体系，系统密闭率 100%，热能综合利用率同比提升 20 个百分点。创新了“多相复杂流体循环冷却”工艺和“直接接触式氧化还原”脱硫技术，发明了基于“注采一体化、双线集输、集中换热”特点的高温（ 180°C ）无动力密闭集输工艺和装备，形成热能高效回收利用技术体系，建成国内外首个全油田全流程密闭的超稠油生产基地，系统密闭率 100%，热能综合利用率由传统 70% 提高到 90% 以上，年节能 65 万吨标准煤。

本项目知识产权成果丰硕，获国家授权发明专利 18 项、加拿大国际发明专利 2 项、国家实用新型专利 49 项，形成中国石油技术秘密 13 项、集团公司自主创新重要产品 3 项、标准规范 2 项、软件著作权 2 项，发表论文 30 篇，研发并推广具有自主知识产权的一体化设备 12 类 309 台套。

基于上述关键技术，形成了“三高一低（高干度注汽、高温集输、高效脱水、低成本污水回用）+物联网”的地面标准化建设模式，并在新疆风城油田进行了工业化应用，建成了中石油首个超稠油密闭集输处理示范基地，系统密闭率 100%，水、热资源循环利用率达到 90% 以上。核心技术覆盖稠油产能 490 万吨，百万吨产能地面投资降低 14.6%，吨油单耗同比降低 21.4%，累计回用油田污水 4.56 亿吨，年节能 65 万吨标煤，累计节约生产成本 39.21 亿元，为国家的“绿水青山”战略做出了重要贡献，经济社会效益显著。本项目成果已应用到加拿大、哈萨克斯坦、委内瑞拉等稠油区块地面工程中，中石油海外矿权储量 126 亿吨，推广应用潜力巨大。

完成单位：中国石油工程建设有限公司、中国石油新疆油田分公司

完成人：黄强、蒋旭、夏新宇、单朝辉、张书华、胡筱波、卜魁勇、于庆、贺吉涛、张侃毅、周京都、李倩、于海洋、刁建华、马兵、杨立辉、贾庆鹏、高青、武文静、顾凯

建筑垃圾模块化处置工艺及设备研发

随着我国社会经济逐步进入高质量发展阶段，建筑垃圾排放量急剧增加，近年来每年建筑垃圾产生量达 20 亿吨，而其资源化率不足 10%，带来严重的环境负荷，成为城市发展与美丽中国建设中的新问题。2020 年新修订的固废法，对施工现场的建筑垃圾明确提出“应当编制建筑垃圾处理方案，采取污染防治措施，并报县级以上地方人民政府环境卫生主管部门备案”，“应当及时清运工程施工过程中产生的建筑垃圾等固体废物，并按照环境卫生主管部门的规定进行利用或者处置”，“不得擅自倾倒、抛撒或者堆放工程施工过程中产生的建筑垃圾。”2021 年 6 月发改委新颁布的《“十四五”循环经济发展规划》对建筑垃圾资源化率提出明确要求，2025 年将达到 60%。

作为建筑垃圾主要的产生源头之一，施工现场的建筑垃圾包括施工现场开挖的成分复杂的杂填土，大型场馆拆除产生的废弃混凝土，集中拆除产生的砖混建筑垃圾等，通常呈现出以下几个特点：①点位多，分布广；②处置场地面积较小；③垃圾产生后处置比较迫切；④垃圾的产生时间短，混入的生活垃圾和其他垃圾较少，垃圾的成分相对简单。这种类型的建筑垃圾若直接运至固定终端或临时设施处置，一方面运输距离较远，另一方面运输过程中穿行城区对周边环境和市容影响较大；若就地采用简单破碎筛分处置工艺，其杂物成分不能被有效分选出，“大垃圾”变“小垃圾”，无法实现建筑垃圾的资源化利用、就地消纳。因此，开发一种功能完整、灵活机动、满足施工现场占地面积特点的技术迫在眉睫。

项目组通过大量的市场调研、实验室试验、理论分析、中试以及生产线跟踪测试，开发了用于建筑垃圾资源化处置的模块化处置技术及装备，解决了建筑垃圾资源化处置行业受场地、投资成本、垃圾成分等难题的制约，实现了建筑垃圾资源化处置工艺的定制化设计、快速达产、灵活转场，年处置能力可达 30 万吨/年，建筑垃圾资源化率达 98%，再生产品被广泛应用于市政基础配套、湿地公园、海绵城市建设、水体治理、园林造景等领域，为推动我国循环经济发展提供了重要的科技支撑。

主要科技创新如下：

1.开展了建筑垃圾资源化处置的主体设备及非标件的小型化开发，并实现无地基安装。整条处置线占地面积不超过 60 米*8 米，占地面积降低约 85%；设备外形尺寸小满足道路运输要求，6 台 18 米车即可实现全部设备的运输。

2.开发了具有不同功能的模块单元，包含粗碎、分选、细碎、筛分、输送、环保、控制

等，根据市场需要可实现各模块的自由组合拼接，缩短建设周期至 7 天，降低建设投资成本 80%以上；

3.研发了建筑垃圾模块化智能管理系统，实现对建筑垃圾的在线计量、云平台监管、核心设备的预知维护、配电系统的智能管控，提升了处置线的智能化水平，提高了项目生产效率。

该技术成果获国家授权发明专利 5 项、实用新型专利 4 项、软件著作权 16 项，参编 2 项行业标准，在北京、上海等 7 个建筑垃圾处置项目的 10 条处置线实现了成果转化，应用引领和示范作用明显。该技术每年为企业新增营业收入约 2.13 亿元，年新增利润约 1704 万元，社会、经济和生态效益显著，推动了“无废城市”建设。

由北京市住房与城乡建设委员会组织的科技成果评价，对项目创新技术给予高度评价，认为项目总体达到国际先进水平，其中模块化设计达到国际领先水平。2019 年该技术入选生态环境部“无废城市”首批先进适用技术目录，2020 年入选国家发改委“绿色技术”目录，北京市新技术新产品（服务）认定，中国环境卫生协会 2020 年新装备典型示范，2021 年第二十二届中国专利优秀奖。

完成单位：北京建工资源循环利用投资有限公司

完成人：王 森、李 烁、王琦敏、张 磊、于家琳、赵国锋、陈向阳、崔福龙、袁振航，周 俊、姚家胤、刘文才、李岩凌、平庆海、张 颖、石玉春、刘 伟、许瑞卿、曹 建、许宝亮

一种循环施工升降机系统及实施方法

一、研究背景、目的及意义

施工升降机是高层建筑垂直运输的重要交通工具，现有常规施工升降机经过数十年的发展，虽取得长足进步，但仍逃不出“单根导轨架最多运行两部梯笼”的限制，在高层建筑施工中，需要布置多台施工升降机才能满足运输需求，升降机占用施工空间大，多机协同工作效率低下，极大的影响了高层建筑的建造工期。

中建三局研发的“单塔多笼循环运行施工升降机”（以下简称循环电梯）新技术，全球首创提出在单根导轨架上循环运行多部升降机梯笼。梯笼可以在高空中旋转 180° 变换轨道，施工升降机单根导轨架的运输能力可以提升 3-10 倍，具备多级安全保障措施和群控调度控制系统，安全高效，是高层建筑建造神器；循环电梯推动了建筑业的发展，减少钢材等资源消耗，对后续施工工序的影响小，有利于建筑业“双碳”目标的实现。

二、专利质量，包括评价“三性”和“文本质量”

新颖性：

本专利具有明显的新颖性。全球首次提出在单根导轨架上循环运行多部施工升降机梯笼，与常规施工升降机有明显的不同。经两次委托第三方专业检索机构对本专利技术查新，其结论均为：除委托单位获得的专利以外，单塔多笼循环运行施工电梯的研究与应用在国内外文献中未见报道。

创造性：

本专利具有以下创新点：1、发明了循环施工升降机系统，实现在单根导轨架上循环运行多部梯笼。2、发明了旋转换轨装置，实现梯笼在高空变换轨道。3、发明了竖向卸载附着装置，升降机导轨架可以无限制加高。全部为首创新技术。

实用性：

本发明专利属于基础性专利，专利成果已获得制造许可证，成为产品，可以在 150m 以上建筑中应用，目前已成功在一批重大标志性工程项目中应用。

说明书已经清楚、完整地公开发明的内容，并使所属技术领域的人员能够理解和实施；公布了一种循环施工升降机系统及其组成，公布了旋转换轨装置的主要形式和设置位置，公布了竖向卸力附着装置的设置原则。权利要求书清楚、简要；明确了循环升降机的主要布置形式，分区设置原则和方式，明确了曲线导轨架的组合方式，布置原则。权利要求说明有理

有据，保护范围合理；详细说明了循环升降机的实现方法和步骤，可以重复实施，权利要求保护范围合理；详细说明了曲线导轨架的实现方法和关键工艺，权利要求保护合理。

三、技术先进性

与常规施工升降机相比，本专利中的旋转换轨技术可实现 40s 一键自动换轨；分段卸载技术可减小导轨架材料厚度 50%以上，可无限加高；曲线导轨技术，良好贴合建筑外立面，平均缩短进站通道 20%以上；整个循环施工升降机系统，全球首创，单台设备运力可提升 4-10 倍，安全高效。

关键技术	国内外同类技术先进性对比
整体循环运行技术	“循环运行升降机技术”全球首创，在单根导轨架上能循环运行多部梯笼，其运载能力可提升 3~10 倍，而且高度越高，提升越大。
旋转换轨技术	“旋转换轨机构”全球首创，能实现吊笼一键高效安全地变换轨道，换轨时间最快仅需 40 秒，且具备自动检错纠错功能。
竖向附着技术	“竖向卸力附着”系行业首创，通过分段卸载导轨架荷载，减小底部导轨架壁厚 50%左右，架设高度不再受限，通用性强。
曲线导轨技术	适应楼层的微曲线导轨架技术，对超高层外立面适应性高，平均缩短进站通道 20%以上，适应性强。

循环施工升降机可以在超过 150m 高度的高层建筑建造中使用，能够适应建筑物外立面的曲线变化，技术通用性强。

四、运用保护措施及成效

本专利成果已成功在武汉中心工程，武汉绿地中心工程、深圳城脉中心工程等重大标志性工程项目成功应用，累计经济效益超 3400 万元。围绕本专利进行了系列专利的申报，目前已获 19 项专利授权，其中发明专利 12 项。专利完成单位建立了完善的科研课题管理办法和专利知识产权保护制度；签订专利知识产权成果转化内、外部合作协议，加大专利推广力度，强化落地应用。专利成果之新装备已通过国家权威机构型式试验，取得制造许可，可批量生产销售。同时，专利完成单位积极申报国际专利，已经通过 PCT 申请国际专利，即将进入国外市场。

五、社会效益及发展前景

本专利成果受到行业及社会高度关注，登上央视“颶声”节目向全球推介，受邀做论坛报告二十余次，主流媒体报道数十次。专利成果之新装备亮相上海宝马全球机械展及中国建筑科技大会等，参观交流达数万人次。循环施工升降机将陆续在一批住宅和公建项目推广应用，预计建造工期平均节约超 1 个月，创造效益超过 1 亿元。

本发明之成果获中国建筑工程总公司科学技术一等奖；被认定为中国建筑重大科技成果；

荣获中建总公司工法；获评中施企协首届高推广价值专利大赛特等奖，获评中国建筑业协会行业年度十大创新技术。

完成单位：中建三局集团有限公司

完成人：张 琨、王 辉、孙金桥、李 迪、叶 贞、周 勇

艰险山区高速铁路特大跨度混凝土拱桥

关键技术及应用

为解决东西部发展不平衡，打好脱贫攻坚战，我国启动了新时代的“西部大开发”和“交通强国”战略，作为交通先行的高铁网向西部山区快速推进。然而，我国西部地形起伏剧烈，深沟峡谷和不良地质广泛分布，建造环境十分恶劣；另一方面，由于高速铁路曲线半径大，采用传统展线攀越高山峡谷及绕避不良地质十分困难，迫切需要建设更大跨度桥梁。混凝土拱桥具有刚度大、温差变形小等优点，与高速铁路高平顺要求最为契合，而且经济性好，是跨越深沟峡谷的首选桥型。沪昆高速铁路为绕避岩溶和煤矿采空区，在跨越北盘江峡谷时，需要修建 445 米跨度的混凝土拱桥。而当时国内最大跨度的铁路混凝土拱桥仅为 178 米，国外最大跨度的高铁混凝土拱桥也仅为 270m，要在峡谷地区建造跨度 445m 混凝土拱桥并满足时速 350km 运行要求，设计、建造和运营面临以下四大难题：1、对于平顺性要求极高的高速铁路大跨度拱桥，如何解决“特大跨度-高平顺性”的尖锐矛盾。2、国内外缺乏高速铁路大跨度拱桥变形控制基准和设计方法。随着拱桥跨度的增加，桥梁变形增大，在列车、收缩徐变、温度等联合作用下，桥梁变形随时间和季节不断变化，且山区复杂多变的温湿环境，传统的变形分析方法精度低、离散型大，无法支撑高速铁路桥梁毫米级变形控制。3、随着跨度增大，混凝土应力急剧增加，传统施工方法，拱桥施工工序复杂、建设周期长，峡谷大风环境高空作业风险高，成拱技术待创新。4、峡谷风影响列车运行安全，高山峡谷养护维修困难。

面向国家重大战略需求，结合铁道部及国家自然科学基金重点研发项目，项目组历经多年科技攻关，从结构体系、设计方法、成拱技术、运维系统四个方面创新了艰险山区高速铁路特大跨度混凝土拱桥的建造与运维关键技术，支撑了国家高速铁路在西部艰险山区的发展。项目的总体思路、创新成果和应用概况如图 1 所示。

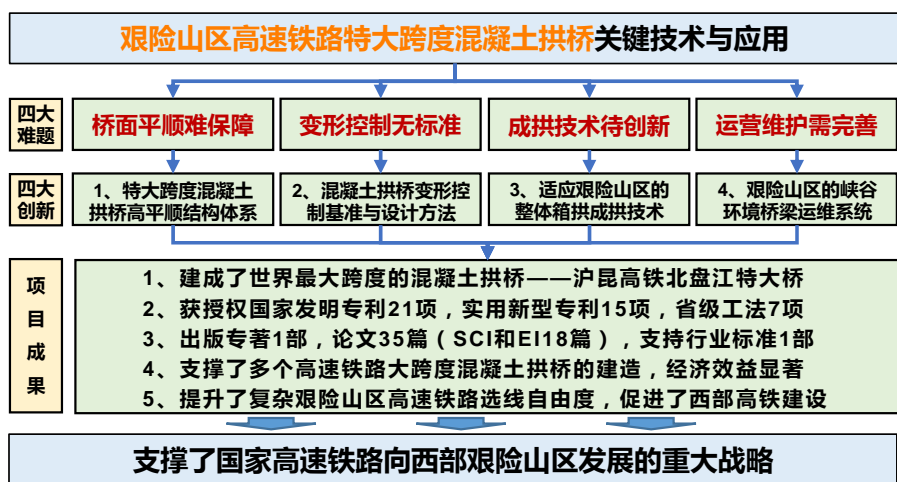


图1 项目总体思路、创新成果和应用概况

本项目成果成功应用于以世界最大跨度混凝土拱桥——沪昆高铁北盘江特大桥为代表的多个国家级重大工程，推动了高铁混凝土拱桥跨径从 270m 到 445m 的巨大提升。主要技术创新包括：

1.构建了高铁特大跨度混凝土拱桥高平顺结构体系。首创了“T 构—连续梁”拱上全连续结构，解决了桥面短波不平顺难题，提升特大跨度拱桥的平顺度；顺应拱圈内力分布特征和刚度需求，提出了“鱼尾形”等高整体箱拱结构，降低了劲性骨架设计安装难度。

2.提出了高铁特大跨度混凝土拱桥的变形控制基准与设计方法。揭示了桥面横向挠度与梁端相对折角的映射关系，提出了拱桥整体横向变形的控制基准，以线路竖曲线半径要求为牵引，建立了桥面竖向变形控制基准，填补了特大跨度高铁拱桥变形控制基准的空白。考虑山区温湿环境作用，建立了劲性骨架混凝土拱圈的收缩徐变修正模型，探明了厚壁空心拱圈结构在不均匀温度作用下的细观应变和宏观变形分布规律，实现了特大跨度混凝土拱桥在自然环境中变形的精准控制。

3.创新发展了艰险山区特大跨度混凝土整体箱拱的成拱技术。提出了“拱脚先期成形+分环平衡浇筑”的两阶段成拱方法，在拱脚处先期形成全断面拱圈，降低了拱圈分环平衡浇筑段的有效跨度，实现了拱圈断面应力的削峰填谷。研发应用了铁路拱桥 C80 高强混凝土劲性骨架，提出了带初应力的钢管混凝土承载力计算方法。创新提出了钢管拱劲性骨架无风缆悬臂安装、节段模块化集成化吊装等工艺，适应了艰险山区的恶劣建造环境，实现了劲性骨架和拱圈外包混凝土的高精度工业化建造。

4.研发了艰险山区峡谷环境中的高铁桥梁运维保障系统。研发了桥面导风屏障，保障了时速 350km 列车在峡谷紊乱大风环境下安全运行。研发了桥面竖向变形的实时智能监测、调节系统，为桥面长期高平顺性提供了保障。研发了特大跨度拱圈底面检查车系统，实现了艰险山区拱桥检查常态化。

本成果授权国家发明专利 21 项,实用新型专利 15 项,获省级工法 7 项,发表论文 35 篇,出版专著 1 部,为 1 部行业标准的编制提供了可靠数据,解决了艰险山区高速铁路特大跨度混凝土拱桥建造与运维的关键技术难题,支撑了沪昆高铁北盘江特大桥等国家重大工程建设。项目成果创造了经济效益 10.91 亿元,荣获了铁道学会科技一等奖、中国中铁科学技术特等奖等多项科技荣誉。

以秦顺全、陈政清院士领衔的评价委员会一致认为“项目成果总体达到国际领先水平”。

完成单位: 中铁二院工程集团有限责任公司、中铁广州工程局集团有限公司、中国铁路经济规划研究院有限公司、西南交通大学、中国铁道科学研究院集团有限公司、沪昆铁路客运专线贵州有限公司

完成人: 陈 列、吴克非、徐 勇、谢海清、柯松林、陈克坚、胡京涛、马庭林、李豪、张红旭、赵人达、黄嘉亿、何庭国、杜 锐、廖云沼、高芒芒、李小珍、黄 毅、陈让利、任 伟

天然气处理新工艺及设备关键技术

随着全球天然气工业的大发展和天然气处理工艺的不断变革，根据国家能源战略和节能环保政策，着力研究解决油气田地面工程中面临的设备防腐、天然气含汞、高温含硫尾气排放超标和硫磺回收高温设备衬里垮塌等重大工程技术难题，开展“天然气处理新工艺及设备关键技术”研究，势在必行。

金属涂层防腐技术通过分析金属涂层国内、外技术现状，结合材料力学、压力容器复合板技术特点和防腐机理，建立压力容器金属涂层性能指标评价体系，通过实验研发高含 H₂S 及高含盐工况下压力容器金属涂层材料配方、涂层成型工艺和施工方法；实现压力容器金属涂层与基体间的结合强度不低于 200MPa，远超现有技术（强度 \leq 80MPa），涂层孔隙率小于 0.1%，远超现有技术（孔隙率 \geq 1%），金属涂层在高含盐、含硫化氢环境下无点蚀，HIC、SSC、SCC 试验合格，均匀腐蚀速率 \leq 0.05mm/a；同耐腐蚀复合板设备相比，可节约成本 50% 以上。

天然气脱汞技术通过分析对比典型脱汞剂的性能特征，利用室内检测比对和现场试验验证筛选出国产天然气脱汞剂，开发气相脱汞工艺包，形成“低温分离+国产吸附剂”的国产脱汞工艺；国产脱汞剂的脱汞效率高于 99%，远超进口（90%）脱汞效率，天然气出口汞含量低于 2000ng/m³；国产吸附剂成本比进口低 60%。

高温含硫尾气处理技术分析现有高温烟气脱硫方法的优缺点，通过实验研究和现场试验测试，发明了高温、高浓度 SO₂ 尾气进行余热回收、新型浸没急冷、碱液脱除 SO₂ 工艺包及“急冷+脱硫除尘+烟囱排放”为核心的三合一多功能脱硫塔的成套技术；实现高温含硫尾气 SO₂ 脱除效率高达 99.9% 远超常规技术的 90%，烟气出口 SO₂ 浓度小于 100mg/m³，排放烟气温度小于 100℃；亚硫酸盐催化氧化率大于 99%，不产生外排水和二次污染；比引进装置节省投资近 50%，每吨脱 SO₂ 节约运行费 40%。

硫磺回收高效环壁保护燃烧炉集成技术利用热力设备测试平台进行测试和验证，开发新型环壁保护自动点火燃烧器，通过数值模拟分析优化设备结构，得出设备衬里厚度、温度和流量的关联优化公式，形成硫磺回收高温燃烧设备集成技术；新型高效环壁保护燃烧器，打破进口垄断，等当量燃烧时环壁衬里保护区温度控制在 1200℃~1600℃、远低于常规技术的 \geq 1700℃，在大型硫磺回收装置上使用，燃烧器燃烧平稳，无异常振动和噪声；国产大型燃烧器比进口产品节约成本 60%，高温燃烧设备降低成本约 30%。

本成果已经获得授权发明专利 6 件、实用新型专利 4 件，中国石油技术秘密 2 项、科技创新产品 4 项，论文 6 篇。经查新，国内外未见与本成果相同的创新技术；经专家鉴定，本成果整体水平达到国际先进，其中高温尾气脱 SO₂ 技术和硫磺回收高效环壁保护燃烧炉集成技术达到国际领先水平。

本成果先后获得中国石油工程建设有限公司技术发明一等奖，2020 年中国工程建设技术发明一等奖，2021 年中国工程建设十项新技术。

本成果已在塔中 1 号凝析气田中古 8 的 43 区块、中国石油青海油田采气三厂、重庆天然气净化总厂万州分厂、西南油气田公司磨溪天然气净化厂等工程上应用，一次投产成功，各项指标达到规定要求，效果良好，产生重大的经济效益、社会效益和环境效益。累计实现产值 9360.6 万元，新增利润 1236.8 万元，节省投资 7215.5 万元。

本成果的推广应用，解决了石油天然气行业重大工程技术难题，打破国外产品垄断，提高了石油地面工程装备的整体水平，推动了行业重大技术进步，经济效益、社会效益和环境效益十分显著。

完成单位：中国石油工程建设有限公司西南分公司

完 成 人：郭成华、雒定明、汤晓勇、于 庆、刘文广、张玉明、赵海龙、张 迅、施辉明、唐 昕、古剑飞、马 先、刘 俊、冯 琦、马艳林、高 兴、王 菲、曹建强、李 刚、向海云

超高层建筑轻量化模块式智能施工平台 创新技术

随着国内超高层建筑高度不断发展，超高层建筑具有施工难度大、技术要求高、效率要求高、总承包管理要求高等诸多特点。其中，核心筒施工是超高层建筑施工的关键。目前液压爬模技术存在的整体性差、承载力低、堆放面积小、爬升速度慢、解放塔吊程度低等特点。重型钢平台顶模系统自重大、施工效率低、安拆时间长、系统控制复杂、造价高等缺点也非常明显，严重制约了重型钢平台技术的市场应用和推广。

为此，华西工程科技（深圳）股份有限公司（简称华西科技）总结分析国内外超高层建筑施工工艺现状、施工装备的优缺点，在总结提炼成熟技术的基础上，研发出来一套集爬模及重型钢平台优点于一身的轻量化模块式智能施工平台技术。能够应对 600m 以下建筑各种技术路线施工要求，能够安全高效应对各种复杂工况。该技术在安全、进度、质量、成本、形象、节能环保等各个维度优势明显，符合国家政策方向，同时华西科技的创新团队积极与国内知名院校开展深度合作，引进全新理念和技术，为客户、社会带来切实的经济效益和社会效益，推广应用前景广泛。2018 年，由叶可明院士担任组长，郑皆连院士、叶浩文、林冰等组成的专家组对本关键技术给出了“国际领先”的评价。

本创新技术是以工程应用为基础，围绕既定的技术路线目标，创新研发轻量化平台的成套核心技术及形成关键设备设计制造能力；形成地面拼装、整体吊装、整体拆除、地面解体的全套安拆技术方案；形成基于 BIM 技术的施工模架系统碰撞检测方法；形成轻量化平台的标准化、模块化、智能化设计模式，实现多种模架系统的完美结合。

主要创新技术包括以下 5 个部分：

1. 创新性提出内顶外爬组合系统

提出了“顶模”、“爬模”、“提模”的组合设计方法，合理形成综合模架系统，充分结合“爬模”、“顶模”、“提模”的优势，提高施工模架系统的效率。提高了模架系统的可扩展性、实用性和模架钢结构体系的优化性、经济性与科学性。通过协同设计，在竖向结构功能分区，实现内顶模与外爬模的匹配与联动，相互适应。顶模与爬模始终可以任意组合适配，保证功能完整，达到各层空间通畅。整个平台具有堆载高、适应性强的优点。

2. 综合模架空间系统功能设计创新

平面通过增加（或减少）机位，来满足核心筒结构变化的要求。采用标准模块构件和非标构件的组合系统，实现非标尺寸结构定制化设计，平台更具灵活性和适应性。竖向总高度 3.5 个标准楼层高度，实现与施工电梯无缝对接、混凝土养护层、模板操作、钢筋绑扎等竖向分区功能需要。赋予爬模系统架体在 $\pm 15^\circ$ 内自由调整能力，以解决斜墙等模板爬升施工（斜度 $\pm 15^\circ$ ）。

3.综合模架平台“轻量化”

顶模体系的主要受力构件为锚固锥、上下支撑架、支撑立柱、堆载平台。每个小井筒均为相对独立的顶模系统，减少平台梁跨度；以锚固锥为受力点，固定上下构架支撑作为主塔顶升平台，避免采用大型钢构件；堆载平台采用单层 H 型钢，避免使用桁架，有效降低平台高度，从而降低平台重量，实现平台轻量化。

4.创造性“U”形施工工艺

平台可实现水平结构和竖向结构同步施工。创新性提出一套“U”形施工工艺流程，顶模设计时充分考虑-1、-2 层对水平梁板施工的影响，支撑立柱和千斤顶的布置避开楼板位置，平台顶升时避开水平结构楼板，使得本层剪力墙与本层水平结构同步施工。

5.模架系统整体安拆创新工艺

轻量化、模块化平台可实现构件在地面拼装，整体吊装、整体拆除、地面解体的全套安拆技术方案，缩短安拆工期，有效解决施工决场地紧张的难题。

该技术具有“轻、强、快、变、绿”的特点：

- （1）轻：构件轻，自重小（300t），混凝土强度达到 C10 即可顶升；
- （2）强：平台有效堆放面积 90%以上，堆放荷载 $1.0\text{t}/\text{m}^2$ ，大幅节省塔吊吊次；操作空间宽敞舒适，无错层施工；
- （3）快：顶升速度快，安拆速度快；
- （4）变：各模块自由组合顶升，满足流水施工；适应核心筒结构尺寸各种变化；
- （5）绿：用钢少造价低，维护和使用费用低，标准化设计构件周转率达 90%以上，节能环保。

本技术已在南宁华润中心东写字楼项目、深圳冠泽金融中心 2A 塔楼项目、西安环球贸易中心项目、银川丝路明珠塔项目、山东日照海韵广场项目等工程的成功应用。通过标准化的设计提高了周转次数，降本增效效果显著。预计在实际项目应用中，与同尺度工程相比，钢材用量可减少 44.2%，节约塔吊吊次 1/3 以上，施工效率提升 20%以上，综合工期达到 3-4 天/层，90 层超高层建筑同比可提前 180 天工期，节约 3000 万元以上费用，得到了业界的高度

认可，中央电视台、人民日报、广西日报等主流媒体均专题报道，得到了极大的好评和认可。

截止目前，围绕轻量化平台技术，已申报专利 35 项（其中发明专利 15 项，实用新型专利 18 项，国际发明专利 2 项），已取得 21 项专利（其发明专利 3 项，实用新型专利 18 项）；已获省级工法 2 项；核心期刊发表学术论文 19 篇，其中获评优秀一等奖论文 1 篇。

完成单位：华西工程科技（深圳）股份有限公司、四川华西集团有限公司、中国建筑第八工程局有限公司、中国华西企业有限公司、四川省第六建筑有限公司

完成人：刘东、唐际宇、陈跃熙、王华平、薛庆、林忠和、丁云波、唐阁威、赵立春、罗苓隆、赵崇贤、龙绍章、胡宁、李栋、雷富匀、徐帅、徐永亮、黎规梅、崔苗、江宇霄

复杂地层中两千米级长距离顶管施工技术

随着城市建设的发展，顶管技术的快速发展正不断向着“直径更大、距离更长”的方向发展。在超长距离顶管施工中，由于施工距离长，所穿越地质愈加复杂，面临的技术难度成倍增加。面对两千米级单次顶进距离顶管施工，其对顶管设备性能、顶进顶力及轴线控制、超长距离顶管智能化自动控制等方面提出了新的挑战。为此结合我司汕头过海管、北海铁山港尾水排海管、上海青草沙原水输送管、珠海平岗-广昌原水供应管等多项单级顶进两千米以上的顶管工程进行研究。针对不同地质条件和复杂环境、超长距离顶管施工关键技术进行攻关，在顶管施工设备与工艺、分析与测试技术等方面开展系统研究。系统研发了适应复杂地层的顶管施工掘进装备及辅助控制系统，集成了复杂地层两千米级长距离顶管的成套施工工艺。其主要技术创新如下：

主要科技创新一：适应复杂地质的超长距离顶管掘进机研制与应用

顶管施工针对不同土质和施工条件，必须研制与之适应的顶管掘进设备。本项目针对不同地质条件自主改进研发了系列顶管掘进机，包括复合式气压平衡顶管掘进机、复合式泥水平衡顶管掘进机和复合式土压平衡顶管掘进机，为复杂地层条件顶管施工提供了可选的完整掘进设备体系。

1.复合式气压平衡顶管掘进机研制

本项目研制了复合式气压平衡顶管掘进机，该掘进机具有全气压、局部气压、纠偏、压浆、封堵、爆破岩层功能，可适用于顶管穿越块石层和岩层施工。

2.复合式泥水平衡顶管掘进机研制

本项目通过研制高水头泥水平衡机头周边驱动装置及密封装置、高水头下顶管机可调可换式纠偏段密封装置，创新研发了可适用于 750kPa 高水头压力的复合式泥水平衡掘进机。

3.复合式土压平衡顶管掘进机研制

本项目研制了复合式土压平衡顶管掘进机，采用土压平衡顶进与泥水输送出土相结合的方法，综合了泥水平衡顶管和土压平衡顶管的工艺优势。将土压平衡顶管的出土方式改进为自动泥水出土，降低施工劳动强度，也确保顶管施工能连续出土、连续顶进，提高了施工效率，并有效控制环境影响。

主要科技创新二：长距离顶管施工配套设备系统集成研发

对顶管施工的主要配套设备系统进行集成创新，开发了具有中继环联动控制、注浆远程

遥控、自动测量系统、多参数数据采集显示等功能的长距离顶管大规模集成系统，为复杂地层中的长距离顶管施工提供了完整的控制体系。

1.长距离顶管的集成控制系统

本项目开发了适应特殊耐高压环境顶管中继间，顶管掘进施工、轴线控制、中继间联动、同步注浆及补浆的集成控制系统，实现了对长距离顶管施工的联动自动控制，解决了长距离顶管施工的难题。

2.长距离顶管跟踪测量与自动测量系统及轴线控制

本项目创新研发了一套成熟的超长距离，曲线纠偏控制，小曲率多型式管节联动转向控制技术和自动测量系统。解决了人工导线测量速度慢、精度差等技术问题。

3.长距离顶管供电与通风系统

本项目研发了长距离顶管通风控制系统——压缩空气呼吸空气保障系统和风管送风系统。该系统实现了大功率的远程优质空气输送供应，确保管内施工环境质量和作业人员健康。

主要科技创新三：长距离顶管顶进施工控制技术

针对不同地质条件和施工环境的长距离顶管工程，系统的研发了超长距离顶管开挖面稳定控制技术、姿态控制技术、顶力控制技术、中继环联动控制技术和长距离顶管减阻控制技术，形成了两千米级长距离顶管成套施工工法体系。

1.顶管的开挖面稳定和顶力控制技术

本项目提出了能满足微扰动顶进施工和周边环境变形控制的开挖面控制技术。理论分析结果结合顶管掘进机机头内压力测试系统，对顶管顶力和出土量进行严格控制与合理调节，从而实现开挖面和周边土体环境的合理控制，形成开挖面稳定和顶力控制施工技术。

2.超长距离顶管泥浆配比试验与注浆减阻技术

本项目研制了模拟顶管顶进施工和注浆减阻的整管摩阻试验系统、结构材料与土体泥浆的直剪试验装置。分析不同配方高分子材料泥浆和传统触变泥浆的基本性能和减阻效果并评估，研制出了针对不同土层、不同顶管的减阻泥浆标准配方体系。研发了长距离顶管泥浆减阻系统，采用新型注浆孔布置方案、优化砂土泥浆配比、实现注浆量和注浆压力的自动控制，结合多点多次自动补浆技术，形成长距离顶管顶力控制工艺。

3.长距离顶管整体稳定分析与中继间优化布置技术

通过对长距离顶管施工过程中的整体稳定和中继间之间管道的局部稳定进行理论分析，提出了中继间优化的理论分析方法和施工工艺。

主要科技创新四：超长距离顶管复杂地层及工况施工工艺

本项目研发了顶管精确穿越障碍物狭小间隙的施工控制技术,开发了顶管地下双向对接、垂直竖管与水平顶管水下对接的施工工艺,突破顶管穿越块卵石层、起伏岩层、不明地下障碍物的施工难题,解决了受限条件下顶管对接及排水口设置等难题,形成了穿越复杂地层的成套顶管施工工法体系。

本技术成果成功应用于上海白龙港污水干管工程、北海市铁山排海管、珠海平岗-广昌原水供应保障工程、汕头市第二过海水管、上海青草沙水源地原水工程等重大工程。在刚刚结束的上海临港排海管中,应用本技术成果成功实现单级顶进超 2600 米。

复杂地层中两千米级长距离顶管技术的成功应用,对全国同类工程的理论研究、设计及施工具有积极的示范意义,其社会、经济、环境效益显著。该技术作为低耗能、环境友好型的创新工艺,契合地下工程开发建设需求,市场巨大,具有极强的推广应用价值。

完成单位: 上海市基础工程集团有限公司

完 成 人: 李耀良、陈永飞、张海锋、罗云峰、刘桂荣、赵敏杰、徐英武、施 雨、李吉勇、黄泽涛、邹 峰、盛夏一、刘冠梁、路三平、熊 菲、陈 文、王理想、张哲彬、蔡素素、顾 欢

振动碾无人驾驶机群作业关键技术

水库大坝是优化配置水资源、有效开发水电能源、保障流域防洪安全、实现高质量发展的重要基础设施，其中碾压式土石坝是我国应用最广泛的一种坝型。压实质量是施工最重要的内在指标，事关坝体的抗滑、渗透和变形稳定安全。当前，土石坝正在向 300m 级高坝跨越，对压实质量提出了更高的要求。传统碾压方式采用振动碾人工驾驶操作，存在碾压合格率低、控制精度差、振动环境严重影响操作人员身心健康等问题。

智慧建造是国家信息化发展战略的重要组成部分，振动碾无人驾驶智能操作是唯一有效的解决办法。项目重点依托世界第一座深厚覆盖层上建设的特高砾石土心墙堆石坝—长河坝水电站大坝工程开展研究。长河坝水电站位于大渡河干流，大坝坝高 240m，建于 60m 深的覆盖层上，大坝和覆盖层变形体总高度 300m。工程地震设防烈度 9 度，填筑总方量 3400 万 m^3 ，设计压实指标高于已有工程。研究依托国家财政资助和中国电建科技项目，历经 5 年产学研联合攻关，对碾压机械及作业技术进行深入系统研究，提出了筑坝机械作业姿态的蛇形趋近智能控制原理和全液压控制方法，发明研制了无人驾驶振动碾；提出了无人碾压机群高效大规模协同作业关键技术，首创振动碾机群作业系统；首创铺筑、碾压、监控的无人驾驶智能化筑坝关键技术，破解了坝体密实度、均一性高质量精细控制难题，实现了土石坝精细化施工的重大创新。主要创新成果如下：

研究开发了振动碾机身电气及液压控制系统、集成应用卫星导航定位、状态监测与反馈控制、超声波环境感知等技术；提出了无人碾压单机和机群控制理论，首次实现了振动碾的无人驾驶作业和机群协同作业。

项目通过大量的现场试验对设备运行算法及运行参数进行调整改进，达成初步成果后又通过多年的生产性试验进行验证，历经 1 代机研发（电动推杆）、2 代机研发（电液控制）、现场试验与改进、振动碾机群（7 台）技改应用等阶段，发明研制了无人驾驶振动碾，首创振动碾机群作业系统。

研发了振动碾机身电气及液压控制系统，由电气主控制器完成参数设定，就地控制器控制行走、转向、振动等状态，实现振动碾工作状态的自动控制。

振动碾的液压转向系统包括转向（左转/右转）和转向速度的控制。在原车转向器部分增加电磁截止阀来实现原车转向液压系统与改造转向液压系统的切换，通过加装设计增加电磁截止阀来实现原车转向液压系统与改造转向液压系统的切换；通过控制比例节流阀线圈的电

流，可以改变比例阀的开度，实现转向速度的调节；通过控制电磁换向阀两端不同的线圈得电，控制转向油缸的伸缩，实现转向方向的自动控制。

将原有手动操纵手柄改为电控手柄，自动控制器采集手柄不同位置输出的模拟量值来进行前进/后退的判断与行驶速度的控制。通过控制加装的行驶电控比例阀两端线圈的电流，改变比例阀的开度，改变泵的斜盘角度和泵的输出排量，实现对自动行驶速度的控制；通过控制比例阀两端不同的线圈得电，改变泵的液流输出方向，实现了行驶方向的控制。

建立了单侧驱动铰接转向刚性结构的运动学、动力学非线性数学模型；提出了振动碾姿态蛇形趋近智能控制原理和假性偏移判定原则。

在不考虑侧转和考虑侧转的情况下的情况下，分别建立了车体运动学模型，同时构建了基于航向的直线跟踪控制算法，实时解算航向偏差、车身倾斜偏差。采取 100 次/s 的高频超量补偿纠偏，动态调整转向角度，实现了筑坝机械逐步趋近目标作业轨迹。根据车身倾斜度识别、判定假性偏差，进行航向控制。

研发了新型振动碾自动控制器（PLC），利用卫星定位导航技术实现机身位置、方向定位与路径控制，根据指定施工区域建仓规划，进行碾压路径自动设定及差异化调整。

自主设计编程制造的车载控制器是振动碾改造电控系统的核心控制器，主要功能分为信号采集及处理功能、逻辑运算及路径控制功能和输出驱动功能。根据设定的参数实现振动碾的行驶与振动控制，负责 GPS 数据和传感器数据的采集及处理，并结合设定的工作参数进行作业路径的规划和自动路径跟踪。

研发了振动碾姿态补偿控制和同步纠偏技术研究利用角度编码器、倾斜传感器等进行振动碾行驶状态、姿态的检测，实现了机身自动控制系统的补偿控制，提高作业精度。

在振动碾的车身及振动轮的铰接处安装角度编码器，采集钢轮与车身之间的转角信息实现车身的位姿检测。在振动钢轮一侧增加设计安装了倾斜传感器，以实现车身倾斜对 GPS 坐标进行补偿，得到更准确的 GPS 定位位置以提高振动碾自动作业的精度。角度编码器输出信号和倾斜传感器输出信号通过 CAN 总线输入到控制器。

研究设计的超声波环境感知系统，对作业影响范围的障碍物、临空临边进行实时监测，实现自动障碍避让；研发了基于无线载波传输网络的远机位遥控系统，可实现紧急情况的远程制动控制及任意时刻和位置的急停功能，保证了作业过程安全。

考虑到超声波传感器的检测范围和检测对象（人、设备）在振动碾前方和后方各均匀布置了三个超声波传感器。利用无线遥控技术实现对振动碾的远程控制。遥控器采用主副配置形式。主要遥控为智能化程度较高的集成遥控器，副遥控器非智能的控制遥控器，以避免智

能程度系统故障对作业过程的安全风险。

研发了振动碾控制及显示系统，进行碾压参数设定，实现作业区域、作业环境、施工参数及行驶状态等的实时显示和控制。

显示控制器作为自动控制系统中的控制终端，主要负责振动碾工作状态的实时监控和系统工作参数的设定。此外，显示控制器界面上还可选择工作模式(遥控模式或自动作业模式)，并设有自动启动控制和急停控制。工控机通过 USB-CAN 将工作参数和控制信号发送给控制器。作业控制系统可以实现坐标-作业区域、作业路径规划、作业速度、换行、转向、振动、启动寻找起点、碾压过程自动纠偏、应急避让、碾压状态监测八大功能。

项目成果在长河坝水电站、阿尔塔什水利枢纽、河北津石高速公路等工程成功应用，取得了显著的经济和社会效益。项目研究获发明、实用专利 7 项，国家、省部级工法 5 部，达到了“国际领先水平”，开创了国内外土石坝无人驾驶智能建造的先河，引领大型土石方工程碾压进入无人驾驶时代，有力地推动了行业科技进步，具有广阔的推广应用前景。

完成单位：中国水利水电第五工程局有限公司

完成人：吴高见、孙林智、袁幸朝、熊 亮、梁 涛、韩 兴、陈 曦

高速铁路 CRTSⅢ型先张轨道板自动化 预制技术研究

一、立项背景

中铁三局集团有限公司承建新建郑州至济南铁路郑州至濮阳段轨道板场，承担郑济 I、II、III 标 34255 块 CRTSⅢ型轨道板的预制任务，采用传统台座法预制轨道板存在建场周期长、土建费用高、设备重复利用率低、轨道板易翘曲变形等问题，为解决传统台座法预制存在的问题，提升轨道板预制质量和效率，我局将“高速铁路 CRTSⅢ型先张轨道板自动化预制技术”立为 2018 年度集团公司重大科研项目。鉴于该项目在高速铁路建设中的重要意义，中国中铁股份有限公司将此课题列为了 2018 年度重点科研项目(2018-重点-44)，并给予 50 万元专项资金支持。

CRTSⅢ型先张轨道板流水机组法生产线，采用模具清理、脱模剂喷涂、预埋套管及螺旋筋安装、钢筋笼入模与预紧、撑杆转运、预应力筋张拉、绝缘检测、混凝土搅拌与运输，混凝土布料与振动成型，养护，放张、开模与撑杆转运、脱模、封锚、打码标识、翻转、外形尺寸检测等工位设计，多个关键工位采用双工位设计，通过中央控制平台集成对各工位设备的控制，实现各生产工序的自动化、信息化、智能化。



二、主要技术内容及创新点

创新点 1：研发新型模具，解决预应力筋超张拉

首创了底模不受力双撑式整体内衬结构的新型模具，模具变形及作业安全可控，解决了蒸养降温过程中预应力钢筋超张拉的问题，该技术授权实用新型专利。

创新点 2：研发自动化生产线，提高轨道板生产效率

自主研发的 CRTSⅢ型轨道板流水机组生产线，形成了模具清理、脱模剂喷涂、套管安装、钢筋笼入模及预紧、预应力张拉、绝缘检测、振动密实、蒸汽养护、放张、脱模、打码、

翻转、外形检测等成套自动化装备及控制系统，实现了轨道板生产的高度机械化、自动化，大大提高了轨道板生产效率。该生产线的各关键工位授权 8 项专利(其中 3 项发明)，形成的工法荣获中国中铁优秀工法。

创新点 3：研发智能检测系统，实现轨道板快速检测

研发了激光传感器与磁栅尺融合技术，光学传感器二维立式靶向式测量的智能检测系统，实现了轨道板外形尺寸逐块快速检测，数据自动采集、处理并同时形成报表，工序衔接紧凑，提高了检测精度和效率，该检测方法获得国家版权局的软件著作权。

创新点 4：首创多项新技术，保证轨道板预制质量

(1) 首创了液压传动实现扳手自动咬合、液压自动锁紧张拉螺母及齿轮传动同步放张等技术，并采取一根钢筋对应一台张拉装置伺服控制，保证了张拉力同步、锁紧力相同。

(2) 首创了轨道板附着式振捣技术，具有模具损伤小、振捣效率高、噪音污染小等优点，设计单位将其列入轨道板设计技术说明。

(3) 研发了涵盖智能变轨小车和“目”字形养护通道的智能养护技术，轨道板可在通道内纵、横向自动移动，保证轨道板先进先出且养护过程中始终保持静止，提高了养护质量和效率，设计单位已在全国强制推广应用。

(4) 研发了一键自动脱模技术，可兼容多板型的自动脱模，全程自动控制、运行平稳可靠、脱模效率高。

创新点 5：创新信息管理技术，提升轨道板生产管控能力

创新了基于物联网技术的轨道板制造过程管控与全生命周期追溯技术，数据统计效率提高 20%，构建了流水生产线中央控制系统，搭建了轨道板制造信息综合管理平台，实现了轨道板场全要素的在线统一集中管理、建场车间布局优化、关键设备集中控制、工序信息自动采集、过程数据互联互通、“人、机、料”协同管理及产品质量可追溯。

三、指标先进性和实施效果

智能化生产的厂房占地面积减少 50%以上，人力需求降低 60%以上，有效降低轨道板综合生产成本；智能化生产线实现了全工序的高度机械化、自动化，各生产工位合理衔接，8 分钟内可完成各工位的操作，较传统生产模式提高 20%以上；自主研发模具清理、脱模剂喷涂、附着式振捣等先进技术，消除了噪音和粉尘污染；成套设备采用模块化设计，30 分钟内即可完成生产设备更换大修；放张、张拉速率可无级调节，生产控制精度得到了提高。

四、知识产权

该成果已成功应用于郑济铁路轨道板预制工程，并推广应用于深圳地铁轨道板预制工程，

成熟稳定，经中国中铁股份公司评审达到“国际先进”水平，授权 9 项专利(其中 3 项发明专利)、软件著作权 1 项，荣获 1 项中国中铁优秀工法。经四川省科学技术信息研究所的查新，自动识别板型、钢筋骨架精准定位、立式检测等多项技术为独创技术。

五、推广范围、发展前景及潜在效益

该技术填补了混凝土构件机械化、自动化预制的空白，成功解决了采用传统预制工艺中轨道板易产生翘曲、工人劳动强度大、安全风险高等问题，保证了轨道板的施工质量，节约了施工成本，提高了施工效率，为今后类似工程的施工提供了宝贵经验。

研发并运用的高速铁路 CRTSIII 型先张轨道板自动化预制技术，实现了 CRTSIII 型轨道板预制高度机械化、自动化，赢得了建设、监理单位的一致好评，节约人工费 425 万元、建厂费 500 万元、模具节省费 1253 万元，直接经济效益达 2100 多万元。

该成果可以在相似结构的混凝土预制构件工程的施工中进行推广应用，其核心技术的市场竞争力强，发展前景良好。

随着高铁 CRTSIII 型先张轨道板结构向地铁领域的拓展，将逐步成为城市轨道交通的主要结构形式，推广应用前景非常广阔。

完成单位：中铁三局集团有限公司、中铁三局集团桥隧工程有限公司

完成人：张俊兵、王红凯、屈 韬、王海员、苏雅拉图、张传顺、于善毅、侯彦明、谷波涛、郭发民、薛泽民、张国斌、杨玉华、梁卿恺、王 群



房屋建筑篇

建筑工程 BIM 技术产业化集成应用研究

BIM 技术是提升建筑企业核心竞争力的重要手段，其普及应用对推进建筑业转型升级意义重大。为打造具有全球竞争力的世界一流企业，落实企业新发展理念，中建从 2011 年持续立项对 BIM 集成应用和产业化进行系统、深入研究，经过近 8 年的持续研究和工程实践，形成了完善的企业 BIM 应用顶层设计架构、技术体系和实施方案。项目主要研究成果和创新如下：

1.建立应用模式，确定实施方案。结合中建投资、设计、施工和运维“四位一体”企业特点，对工程项目 BIM 应用的关键技术、组织模式、业务流程、标准规范、应用方法等进行了系统研究，建立了适合我国国情和企业特点的 BIM 软件集成方案和基于 BIM 的设计与施工项目组织新模式及应用流程，为 BIM 技术产业化应用奠定了基础。

2.汇聚国内 BIM 软件开发力量，组建“国家队”，开展科技攻关，建立 BIM 软件的“中国方案”。中建负责“中国方案”的顶层设计，并组织开发自主可控的设计和施工 BIM 应用软件。研发的软件已在 150 多个重大项目中应用，设计软件已有一千多家用户，施工软件已有两千多家用户，初步建立了国产化自主可控 BIM 软件的应用生态环境。

3.主编国家标准，填补领域空白。《建筑信息模型施工应用标准》（GB/T 51235）作为我国首部工程施工 BIM 国家标准，是多个国家重点科技支撑项目研究成果的升华，也是中建大量项目 BIM 实践经验的凝练。本标准既充分考虑了我国国情及土木、建筑工程施工的特点，又实现了与国际标准接轨，填补了我国 BIM 应用标准的空白，达到了国际先进水平。

4.建立企业标准，指导技术实施。结合中建企业特点和实践经验，编写了《建筑工程设计 BIM 应用指南》、《建筑工程施工 BIM 应用指南》两部企业标准。评审专家认为这两套指南代表了当前国内 BIM 应用的最高水平，对建筑设计和施工企业的技术创新和质量保障具有极高的指导作用。

5.结合工程应用，创新人才培养。项目注重实战能力培养，将基础培训与应用提高相结合，在企业级、项目级、专业级等三个不同层面，培养既有建筑专业能力又有 BIM 技术应用能力的人才。统计结果表明中建系统已有 30000 多名工程技术和管理人员掌握了 BIM 应用技能，人才培养成材率是行业的两倍以上。

6.开展示范工程，推进产业化应用。在业内率先开展 BIM 示范工程建设，依托中建实验基地工程在国内率先实现了集成项目交付（IPD）BIM 应用模式，打造了“规划-设计-施工-

运营”一体化 BIM 应用范例。BIM 示范工程建设带动了 6000 余个项目的 BIM 应用，应用成果在我国历年行业 BIM 大赛中获得近半数的一等奖项，天津周大福和北京中国尊项目 BIM 应用达到国际领先水平，分别获得国际大赛第一和第二名，形成了具有中建特色的 BIM 产业化应用模式。

7.分享成果经验，引领行业发展。主持起草了《关于推进 BIM 应用的指导意见》（建质函[2015]159 号）、《2016-2020 建筑业信息化发展纲要》（建质函[2016]183 号）、《中国建筑施工行业信息化发展报告》（2014-2018）等行业技术政策和发展报告，将企业研究成果和工程经验凝练融入到国家标准和行业技术政策中，有效带动了行业 BIM 普及应用。

8.开展超前研究，把握未来方向。开展“建筑工程新型建造方式技术政策研究”课题研究，提出了以品质为核心的“新型建造方式”理论（Q-SEE 理论），为行业智慧建造理论方法和技术体系的发展奠定基础。项目编制的《中国建筑 2025》（技术发展展望）报告为政府相关政策制定提供了技术支撑，验收专家认为成果达到国际先进水平。

项目获得发明专利授权 3 项，软件著作权 32 项，省部级工法 14 项，主编著作 10 部，取得了显著的经济和社会效益。评估专家认为项目创新了建筑工程设计与施工 BIM 一体化技术体系、应用模式和实施方案，示范工程、应用标准、实施指南和人才培养等成果对推动我国 BIM 普及应用和发展有显著作用，项目成果整体达到了国际领先水平。

完成单位：中国建筑股份有限公司、中建工程产业技术研究院有限公司、中建三局集团有限公司、中国建筑第八工程局有限公司、中国建筑一局（集团）有限公司、中国建筑第二工程局有限公司、中国中建设计集团有限公司、中国建筑西南设计研究院有限公司

完 成 人：毛志兵、李云贵、邱奎宁、孙金桥、韦永斌、明 磊、罗 兰、陈滨津、赛 菡、李六连、李锦磊、赵 璨、刘 辰、刘 石、黄 乾

软土中心城区复杂环境下深大基坑群施工 关键技术及应用

城市浅层地下空间已趋饱和，深层地下空间开发已是必由之路。软土中心城区因其复杂的地质条件和建设环境，对深大基坑群建设提出了巨大挑战。本项目开展软土中心城区复杂环境下深大基坑群施工关键技术及应用研究，取得了系列突破性创新成果。主要研究成果如下：

主要科技创新一：软土地区 100m 级超深地下连续墙施工技术

针对软土超深地下连续墙成槽工效低、垂直度控制难、槽壁易失稳、接头顶升困难且止水性能差等技术难题，首次研发了“抓铣结合”成槽、高精度套铣接头、超长钢筋笼制作与吊装等技术及系列施工装置，研制了软土百米级地下墙槽壁稳定的护壁泥浆。并在首次深度超百米（118 米）地下连续墙成功试验的基础上，实现了软土 110 米级地下连续墙规模化应用，垂直度达 1/1200 以上，形成了超深地下连续墙工法、标准体系，成为行业共有技术，具有重要的引领意义。

主要科技创新二：基坑竖向支承桩柱高精度高效施工技术

针对深大基坑群竖向支承桩柱施工精度和柱内混凝土密实度要求高等技术特点，开发了高精度液压下插钢柱 HDC 设备，研发了“后插法”和钢管内高强混凝土“干浇法”施工工艺，形成成套工法，保证了钢柱内高强混凝土的成品质量，实现了钢柱垂直精度 1/1000。研制了桩柱一体地面地下同步多点调垂的立柱“先插法”装置，研发了高低标号混凝土混浇连接工艺，提高了施工工效，确保了桩柱的施工质量。

主要科技创新三：基于刚度协调理念的深大基坑群开挖技术

针对深大基坑群施工交叉干扰、环境影响大、出土效率低、开挖周期长、风险高等难题，提出了分区阶次开挖与多层联合按需梯次降水施工技术，研制了自动伺服钢支撑体系，控制了坑间综合刚度差异，实现了基坑开挖过程中群坑刚度协调变化和 100 米深度内多层承压水的控制。研制了逆作基坑单元组合式土方立体高效长距离运输设备，实现土方连续、高效立体运输，运输效率提高 1/3。成功应用于上海多项深大基坑群，与基坑共墙运营地铁隧道实现毫米级微扰动，实现了工程和环境安全双控。

主要科技创新四：基坑群多源海量数据施工管控及风险预警平台

针对深大基坑群各类数据繁多、施工设备人员密集和工序彼此交叉制约等特点，研发并形成了集超深基坑成套设备参数化建模、高精度人员定位、4D 施工过程模拟及可视化监测为一体，具有多参数风险分析、海量数据交互、多源信息融合功能的基坑群施工管控及风险预警平台。

本项目获授权发明专利 21 项；发表论文 20 余篇；获国家级工法 1 项，上海市级工法 3 项；主编国家标准 2 部、地方标准 2 部，参编行业及地方标准 4 部；主编专著 2 部，参编 4 部。

本关键技术成果经中科院上海情报检索中心查新咨询报告和上海市建筑施工行业协会专家评价意见显示，研究成果总体达国际先进水平。其中 118 米地下连续墙施工技术和 100 米深度内多层承压水按需梯次降水技术达国际领先水平。

项目取得系列原创性技术成果，首次成功应用于软土超深群坑工程—上海轨道交通 13 号线淮海中路站（当时最深软土地区轨交车站）及地块开发共墙共生的基坑群；首次成功应用于软土百米级地下墙工程—上海轨道交通 14 号线豫园站（现已建设完成的最深软土地区轨交车站）及地块开发项目。并推广应用于上海徐家汇中心综合开发、上海轨道交通 17 号线淀山湖站及地块开发、北横通道、国家硬 X 射线大科学装置项目等市政、建筑、轨道交通软土中心城区多项深大基坑群工程，引领了软土地区深大基坑群施工技术的发展。

完成单位：上海市基础工程集团有限公司

完成人：李耀良、江 洪、杨子松、罗云峰、王海俊、朱敏峰、韩泽亮、邹 铭、李煜峰、王 瑾、许 花、曹俊逸、杨 陆、韩定均、叶松明

大型复杂建筑工程施工控制技术研究 with 示范

近年来，我国大型复杂建筑工程不断涌现，结构在向超高、大跨发展的同时，建筑造型也向个性化和多样化发展。结构体系复杂、工况多变给建造带来极大的挑战，对施工技术提出了更高的要求。建造过程中缺少科学、系统的过程控制，不仅会导致结构竣工力学状态偏离目标，给运营带来安全隐患，更严重的将会对施工过程产生重大安全风险，国内外已发生多起因控制不力导致的重大安全事故。本项目以大型复杂新建工程和改扩建工程为研究对象，以施工过程安全和结构竣工状态最优为目标，持续开展了近 20 年研究，期间获得了多项国家科技支撑计划和上海市重点研发项目资助，形成了一系列创新性研究成果，创新性与先进性如下：

1.建立了建筑工程施工控制体系。提出了建筑工程施工控制目标确定方法，建立了总原则、总目标、分目标多级一体的控制目标体系，形成了阶段目标控制与误差消除的控制方法，解决了结构体系复杂、工况多变带来的控制难题；创新了“初始参数+状态响应”双向多因素耦合的模型修正方法，提升了预测准确性，实现了结构施工状态始终可控；建立了适用于建筑工程的施工控制体系，提升了控制的系统性和科学性。

2.创新了建造过程结构状态高效预测技术。提出了高层建筑结构非弹性时变效应全过程分析方法，解决了构件内力与非弹性变形耦合计算的难题，实现了超高层结构构件内力与变形的准确预测；创造性提出了“温度调节法”用于模拟卸载过程与张拉施工等特殊力学问题，解决了多因素耦合导致的计算过程复杂且模拟不准的难题；提出巨型柱-核心筒结构体系快速模拟方法，实现了建造过程力学状态准确分析与预测效率的提高，模拟效率可提高 75%，解决了大型复杂建筑工程的高效预测难题。

3.研制了适用于复杂施工环境的结构状态实时监测成套设备。研发了超远距离低功耗自组网监测设备，设计了基于 ZigBee 与 NB-IoT 数据传输融合的异构组网方案，开发了嵌入处理器的 NB-IoT 数据传输模块，实现了超远距离传输，解决了监测数据缺失问题，提升了恶劣环境工程监测的可靠性与稳定性。研发了振弦类传感设备低功耗快速采集方法，实现振弦类采集设备长期在线工作。

4.开发了高效工程控制技术与装置。首创“以千斤顶行程”为控制变量的卸载控制方法，实现了多点非同步高效卸载；研制了新型临时支撑卸载装置，消除了卸载过程中结构倾覆的风险；提出了“算准原始状态参数、控制初始安装位置、监控过程安全”的柔性索-空间结构

控制方法，消除了过程因素对控制的影响，实现了目标的自动逼近；研发了超高层结构高效控制技术与装备，解决了差异变形及伸臂桁架残余内力等难题，有效降低了运营风险；提出了既有建筑改扩建结构参数识别与控制方法，实现了结构状态参数准确识别与施工过程安全可控。

本项目获授权发明专利 17 项，实用新型专利 17 项，软件著作权 7 项，发表论文 26 篇，其中 SCI/EI 检索 8 篇，获省部级工法 2 项，形成地方标准 1 部，高新成果转化 1 项；经权威机构查新，本项目整体达到国际先进水平，部分居国际领先水平。

本项目已成功应用于国家大剧院（当年世界最大跨度穹顶，主跨 212m，2004 年）、世博演艺中心（2010 年），上海中心大厦（国内第一高楼，632m，2016 年）、国家会展综合体（世界最大单体建筑，2016 年）、南京金鹰天地广场（三栋超 300m 塔楼相连，2019 年）等知名工程，并在 20 余项重大工程中推广应用。研究成果的推广应用，有力的提高了施工过程的安全性，降低了施工风险，减少了生命财产损失。同时，通过施工控制的实施，有力的保障了结构成型后的初始状态健康，能够有效提高结构耐久性，降低结构维护费用，提升结构全寿命周期价值。现已形成了系列无线监测产品，广泛用于重大工程监测。成果通过标准、工法等进行推广，促进了无线实时监测技术在建筑工程施工中的应用，推动了建筑业工业化、绿色化和信息化转型发展。

完成单位：上海建工集团股份有限公司、同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司、上海建工五建集团有限公司、中国建筑第八工程局有限公司、江苏英斯泊物联网科技有限公司、上海建工七建集团有限公司、同济大学、南京工业大学

完成人：伍小平、李鑫奎、赵 昕、潘 峰、焦常科、高振锋、雷 克、黄玉林、张少荃、严再春、李怀翠、王晓旻、闫雁军、况中华、何光辉

波音 737 完工及交付中心项目综合技术研究

波音 737 完工及交付中心定制厂房项目是习近平主席 2015 年访问美国西雅图时的重要成果之一，是波音公司成立百年来在海外设立的首家工厂，也是中美在飞机制造高技术领域合作的重大突破。厂房主要功能是对从美国西雅图总厂飞抵的波音飞机进行内饰安装、外饰喷漆、试飞交付。波音公司作为运营使用方，按照美标 DB 手册(设计和施工管理手册)、SHEILSS 手册(S 安全，H 健康，E 环境保护，ILS 国际劳工，S 安保)全程主导项目管理，同时以国内的工期和成本要求来实现美国的安全、质量管理标准难度大。

波音对飞机喷漆工艺全过程五种工况切换作业环境要求高，在国内外没有相应的技术参考；工程地处软弱土层厚达 40 米的吹沙填海岛屿，提出 12 万平米机坪在复杂地质条件下机坪要求总沉降不大于 20mm，机坪表面严禁不均匀沉降及发丝裂纹的质量新要求，实现与既有普陀山机场地坪衔接沉降协同难度大；要求建筑外围护系统抗风揭性能满足 FM 认证抵抗百年一遇的 17 级台风，国内没有一家供应商的产品能够满足要求，需要重新研发新产品并通过 FM 认证；波音公司对建成后的厂房运营节能环保目标要求高，厂房大型能源设备在复杂工况下高效运行和飞机漆面喷涂清洗废水的高效处理，是实现波音公司对工程节能环保管理目标的关键。对于波音公司对工程各项指标管理要求，在国内没有可借鉴的先例。

依托波音 737 厂房工程，项目综合技术研究成果在飞机厂房基础建设、飞机配套喷漆工艺和大型能源设备节能运行及环保创新方面推广价值高，具体创新技术成果如下：

1.软土地基大面积架空刚性停机坪创新技术。首次创新提出高强预应力管桩大板式结构刚性架空机坪形式及设计方法，大面积机坪累计沉降实测小于 2mm，远超国内相关规范标准；研发了适用于临海气候复杂环境的大面积架空机坪道面干硬性混凝土施工技术，形成了干硬性混凝土道面成套施工工艺；提出机坪刚性水泥道面与基础结构柔性双层油毡隔离技术，有效解决了上下层混凝土性能差异导致机坪道面被拉裂的技术难题。

2.基于 FM 认证下抵抗 17 级台风的建筑外围护系统创新技术。通过建立外围护系统模型进行风洞模拟试验研究，创新研发一套包括金属屋面、外墙、玻璃幕墙、机库大门等外围护系统新产品体系，填补了国内和国际的外围护系统抗超强台风标准的技术空白。

3.喷漆作业环境条件控制创新技术。创新进行飞机喷漆作业全过程工况性能模拟研究，首次采用沿机身造型设计高低速风口配合，末端采用新型均流装置的组合式送风技术，多传感器组合准确反馈控制多台能源循环及超大型空气处理设备，实现喷漆五种工况快速切换环境温湿度、风量风速工艺要求。

4.能源系统设计与性能保障创新技术。创新研究构建了多源多荷动态匹配的优化模型和多维时序负荷场景的缩减技术，解决了能源系统设计中源网荷、冷热电气的复杂协同决策难题；创新开发了基于仿真的变风量空调系统调试技术，以全工况性能预演攻克了系统调试的难题。

5.节能环保创新技术。能源系统在复杂多样的运行工况高效运行是工程低碳节能的关键环节，创新研究了智能负荷预测技术、耦合建筑热动态模型和机电模型的全性能仿真平台，解决了复杂能源系统高效运行策略自动寻优难题，赋予能源系统智慧大脑。针对飞机特有漆面废水金属颗粒成分难去除，可生化性差，有机物含量高的特点，创造出的一套针对飞机漆面废水的处理技术工艺，实现高效、环保对飞机漆面清洗废水的处理和回收利用，具备良好环保效益。

2019年10月23日，波音737完工及交付中心项目综合技术研究成果通过了中国中铁股份有限公司组织的专家评审会，评审专家组一致认为：整体技术达到国际先进水平。

2021年6月18日，建筑综合能源优化和性能保障技术专项成果通过了由中国建筑节能协会组织的专家鉴定会，鉴定委员会专家一致认为：该研究成果符合碳达峰和碳中和目标下建筑领域节能减排发展方向，总体达到国际领先水平。

2021年7月15日，软土地基大面积架空刚性停机坪及滑行道建造关键技术专项成果通过了中国土木工程学会组织的专家评价会。评价委员会一致认为：技术成果总体上达到了国际先进水平。

综合技术研究课题获国家授权发明专利6项，授权实用新型专利14项，省级工法1项，企业工法6项，发表国际SCI论文20篇，国内核心期刊8篇，其他期刊论文10篇，获得中国铁路工程总公司科学技术特等奖。

通过波音737项目综合技术研究，累计取得经济效益3880万元，得到运营方波音公司的高度认可，极大地促进了航空高端制造领域的科技进步，补充了飞机生产工艺配套领域的技术空白，为国产C919大飞机项目从基地建设到生产运营提供借鉴与经验，既有利于我国学习和掌握先进民机工艺技术，发展和完善相关领域人才储备，提高航空高端制造综合能力，对舟山航空产业园建设和中国航空产业发展起到推动和促进作用。该项目综合技术研究成果具有非常广阔的推广和应用价值。

完成单位：中铁建工集团有限公司、天津大学

完成人：陈超、钟世原、田喆、晁毅、沈龙飞、苏辉、李德军、熊永志、冯逸喆、王晓杰、张涛、董天成、许栋、赵宏翔

雄安站复杂异形劲性清水混凝土施工 技术研究与应用

本成果依托新建北京至雄安新区城际铁路雄安站站房及相关工程，该工程总建筑面积 47.5 万平方米，采用“建构一体”的设计理念，创新性地采用劲性清水混凝土结构作为承轨层和站房空间的承重结构。清水混凝土结构体量大，约 5.4 万平方米，梁柱均为劲性混凝土结构，且截面尺寸大、造型复杂，施工难度极大。其中，劲性清水混凝土柱截面尺寸为 2.7×2.7m，柱身底部、中间设计带凹槽，柱角为圆弧切角且随柱高圆弧切角逐渐增大；劲性清水混凝土梁最大跨度为 30m，为弧形变截面梁，梁宽 1.5~1.9m，梁高 3.2~5.4m，梁柱交接处弧形过渡呈“开花”造型。由于劲性清水混凝土结构体量大、梁柱造型复杂、弧形棱角较多，给清水混凝土施工和质量控制带来巨大的挑战。

在已有重庆西站清水混凝土雨棚施工技术研究的基础上，持续开展产学研技术攻关，成功解决了雄安站复杂异形劲性清水混凝土施工中的多项关键技术难题，形成以下创新成果：

1.自主研发了高流态、大体积饰面清水混凝土材料设计与制备技术。通过提出低水化放热、高匀质外观颜色混凝土配合比设计方法，保证了大体积清水混凝土基体不开裂、色泽均匀；同时形成低黏度、高和易性和气泡结构稳定的混凝土拌合物调控技术，解决了复杂劲性清水混凝土浇筑难题；自主开发了混凝土表观气泡结构优化技术，大幅降低了硬化混凝土表观气泡缺陷。

2.总结形成大截面复杂异形劲性清水混凝土柱施工成套技术。研发了清水混凝土柱钢模板柱箍体系，解决了弧形梁柱交接“开花柱”部位弧形钢模板的支撑加固难题；提出内部振捣和外部附着式平板振捣器振捣相结合的技术措施和钢模板等距离同步拆除技术，提升了复杂异形大截面清水柱的完整性和复杂造型棱角处的成型质量；设计了框架柱钢筋整体吊装装置，提高了大直径柱筋的安装效率。

3.总结探索形成大截面复杂异形劲性清水混凝土梁施工技术。提出钢模板与木模板结合体系，保障了梁柱弧形过渡区域清水梁混凝土的成型质量；创新采用双螺套筒+可调连接器的连接方式，提高了钢筋安装质量和施工效率。

4.应用多款信息化管理系统和 BIM 技术，并创新应用三维激光扫描、焊接机器人、BIM 放样机器人等技术，有效提高了复杂异形劲性清水混凝土结构的施工质量和效率。

本成果主要研究内容经江苏省科技查新咨询中心实施国内外科技查新，在国内外公开发表的中外文文献中未见相关报道。并经河北省建筑业协会组织进行科技成果评价，评价结论为：总体达到国际先进水平。

本项目获授权发明专利 2 项，受理发明专利 1 项，授权实用新型专利 9 项，获得企业级以上工法 4 项，公开发表论文 6 篇。

本成果成功应用于雄安站房工程，解决了复杂造型大体积劲性清水混凝土结构施工中的各种技术难题，提高了复杂造型劲性清水混凝土的成型质量和施工效率，降低了施工成本。研究成果可为类似的大跨度、大截面异形清水混凝土结构的设计、施工提供借鉴，具有良好的指导意义和推广价值。

完成单位：中铁十二局集团有限公司、中铁十二局集团建筑安装工程有限公司、江苏省建筑科学研究院有限公司

完成人：曹太然、张 昆、姜 骞、蔡英康、王中军、郑河舟、贾 玮、范 伟、何锦辉、孙亚男、田佳庚、黄直久、王益民、冯朝刚、田福太

超 400m 的倾斜单向收缩偏心结构超高层建筑 关键施工技术

南宁华润中心东写字楼（403m）为倾斜单向收缩偏心结构超高层建筑，给现有的模架体系设计、动臂塔吊安装、钢结构施工及机电安装带来了极大的挑战。针对项目特点，研发了超 400m 的倾斜单向收缩偏心结构超高层建筑关键施工技术，关键创新成果如下：

1.超高层核心筒轻量化内定外爬协同工作平台

研发了超高层建筑施工内顶外爬式模架施工平台，提出了超高层建筑的水平与竖向结构同步施工方法，解决了核心筒水平竖向多变施工难题。研发了模架体系轻量化设计技术，实现模架平台重量 $750\text{kg}/\text{m}^2$ ，较国内同期 400m 以上超高层整体顶模平台降低约 30%~60%。对内顶外爬模架平台进行了优化，提出了模板构造优化方法，解决大、重模板安装施工难题。发明了用于斜墙及变截面核心筒施工的爬模系统及其施工方法，创新了变层高剪力墙施工技术和核心筒收筒施工技术。

2.基于超薄多变核心筒超高层动臂塔吊施工技术

提出了动臂塔吊独立高度 60m 塔身设计技术，避免动臂塔吊与顶模、钢结构及施工电梯间的碰撞，减少了塔吊爬升次数 10%。创新了非标塔吊支撑架设计技术，满足 60m 塔身下各工况要求。研制一种可调节支墩装置，解决了 400mm 超薄剪力墙塔吊支撑架埋件加固设计以及核心筒墙体厚度 1500mm-400mm 不断变化的引起的附着难题。提出整体式倒梁技术方法，塔吊顶升效率提高了 60%。

3.带伸臂桁架倾斜超高层钢结构建造技术

创新了伸臂桁架施工技术，提高安装效率 50%。提出大跨度桁架支撑结构及系统以及屋盖支撑系统，保障施工安全。创新钢构件快速安装施工技术，创新钢筋混凝土柱埋入式柱脚与钢筋穿插施工技术，确保了安装精确度。创新了可拆卸式悬挑支撑结构，确保施工组织效率。研制了大型螺栓节点板开合装置，降低高空坠物风险。创新超高层核心筒移动式起重设备，解决封闭空间吊装钢梁难题。

4.超高层全过程全专业全方位 BIM 应用与装配式机电安装技术

创新应用了 AR、VR、互联网与 BIM 有机结合的新技术，创新了基于 BIM 技术的中央制冷机房模块化，同时实现了喷淋管、风管、桥架部件的工厂预制装配施工技术，实现了工

厂化预制生产，现场装配化施工。提高安装精度和效率 30%。

本成果形成省部级科技进步奖二等奖 2 项，发明专利 7 项，省部级工法 11 项，论文发表 42 篇，地方标准 1 项。超高层核心筒轻量化内定外爬协同工作平台由中建集团组织召开科技成果评价会，经叶可明院士、郑皆连院士等组成的评价委员一致认为，该成果总体达到国际先进水平，其中顶模与爬模优化组合及模架体系轻量化达到国际领先水平。其它 3 项成果经广西、广东建筑业联合会组织评价分别达到国际领先、国际先进和国内领先水平。

本成果适用于超高层施工，已在广西第一高楼南宁华润中心东写字楼（403m）等项目成功应用，近三年产生直接经济效益 1836 万元，经济与社会效益显著。

完成单位：中国建筑第八工程局有限公司、中建八局广西建设有限公司、华西工程科技（深圳）股份有限公司、中建科工集团有限公司、中建三局第二建设工程有限责任公司

完成人：唐际宇、王华平、林忠和、唐阁威、黄琳、梁月利、刘东、何旭、聂斌、颜家甲

大型儒家仿古建筑智慧建造技术

改革开放后，中国经济发展迅猛，国势强盛，国际影响不断扩大，中国在国际上的强大声望和良好形象受到了各国重视，了解中国和学习中国文化成为当今世界潮流。孔子作为世界十大文化名人之首，其孔子学说在国际上受到极大重视，联合国将世界最高教育奖命名为孔子奖。各国在不到十年的时间成立了 300 多家孔子学院。孔子学院在世界范围传播中国文化与国学教育，为中华文化走向世界奠定了基础。儒家仿古建筑就像一张名片，成为世界了解中国的一个重要窗口。目前大型儒家仿古建筑较少，且多以传统仿古工艺应用为主，缺少与现代化智慧建造技术结合的相关研究。

大型儒家仿古建筑智慧建造技术是以曲阜尼山圣境工程为研究载体，该工程位于曲阜尼山省级文化旅游度假区,占地面积 154.8 公顷，总体创意为“孔子的世界，世界的孔子”，功能定位为“文化修贤度假胜地”和“世界级人文旅游目的地”，核心文化主题为“明礼生活方式”，是一项集文化体验、修学启智、生态旅游、休闲度假、教育培训于一体的综合性文化载体。工程建造过程中攻克了孔子像设计加工、仿古施工、灯具排布、机电安装等六大难题，主要创新点如下：

1.创新采用手工泥塑+三维扫描+加数据逆处理相结合的方式，设计出世界最高、最复杂的孔子像。首先按照 1: 10 的比例用泥模创作孔子像 7.2 米的艺术造型。对头部、手部等特殊部位，创作 1: 1 模型。泥塑基体制作完成后，利用逆向工程数据处理技术，将三维扫描数据等比放大，进行缺陷调整。

2.利用 BIM 模拟进行像体超薄壁板分割，引进五轴联动加工中心，实现分块铜壁板精密加工。通过 BIM 模拟、优化，将像体分为 720 块。引进航空航天领域的五轴加工中心，并通过软件模拟，实现铜壁板数字化加工，提高了像体成型质量。

3.创新性地提出基于 IFC 通用模型的三维正向设计技术，避免了各专业在设计、施工中的冲突问题。利用 BIM 整体建模、效果渲染，呈现仿古装饰的艺术效果。利用 VR 技术的交互式体验，加快设计方案优化及确认。基于 BIM 模型的碰撞检查，实现了多专业协同，提高了效率和施工图设计质量。

4.研究出基于 BIM 模拟室内灯光灯具预排布方法，保证了灯具排布安装的精准性，营造出独特的儒学文化氛围。通过该方法，解决了根据二维图纸进行灯具排布的局限性，避免了因灯具布控不当造成的安装容量、费用增加等问题。

5.通过研发基于 BIM+AR 的智慧图纸、二维码云平台，实现了二维图纸到三维图纸的转变，提高了识图便携性、灵活性、准确性。基于移动端电子图纸与 BIM 模型自动匹配技术，实现了移动端查看三维图纸。基于移动端的 BIM 模型爆炸分解工艺，解决了因结构模型遮蔽、不能自由查看机电工程构件信息的问题。基于 BIM 模型的机电工程数据从 PC 端到移动端的提取及转化，解决了不能在移动端查看模型信息的问题。通过研发二维码云计算平台，利用二维码承载 BIM 模型，可在现场便捷获取电子图纸信息。

6.通过研发一种顶板定点画线装置及顶板定点画线方法，实现了无需高空作业即可快速进行顶板画线，节省人工且无安全隐患。该技术可以在短时间内以激光投线仪为辅助工具，进行便携作业。

2021 年 4 月 13 日，由中国化工信息中心有限公司对“大型儒家仿古建筑智慧建造技术”进行了查新，查新结论为：目前在国内外所查文献中未见相同报道。

该项目成果于 2021 年 4 月 24 日通过了山东省建筑业协会科技成果评价，评价专家委员会认为：该项目研究成果总体上达到国际领先水平。

本项目取得发明专利 1 项、实用新型专利 6 项、软件著作权 2 项、省级工法 2 项。

本项技术在曲阜尼山圣境工程成功应用，产生经济效益 2200 余万元。工程受到社会各界的高度关注，多次接待党和国家领导人视察，得到了各级领导的高度认可。工程交付以来，成功举办央视中秋节晚会、尼山世界文明论坛等，社会效益显著！

完成单位：中国建筑第八工程局有限公司、中建八局第一建设有限公司

完成人：于科、乔元亮、徐斌、赵海峰、姜树仁、张汝超、胡延涛、宋小龙、张先磊、葛明阳、刘昊、高庆辉、赵震、张文军、李应心

超限大跨度机库钢屋盖精准建造关键技术

为实现“发展成为具有国际竞争力的国际规模网络型航空公司”目标，中国南方航空股份有限公司将以北京大兴国际机场为主运营基地，其中北京新机场南航基地项目（1号机库及附属楼工程等24项）为主要组成部分。工程总体建筑面积超过20万 m^2 ，由10个编号共计14个单体工程组成。核心工程为1号机库及附楼，1号机库建筑面积4万 m^2 ，共设5个宽体维修机位和3个窄体维修机位。建筑规模为世界跨度最大的维修机库。

本项目以1号机库为研究对象，针对机库限高场地、大跨度屋盖设计，屋盖钢结构施工精度要求高，屋盖内机电主管道与钢结构同步拼装、同步提升、高空对接等一系列难题，研发并应用“超限大跨度机库钢屋盖精准建造关键技术”，主要创新及效果如下：

1.机库屋盖钢结构创新设计。突破机库屋盖设计常规布局，斜桁架及一字形桁架的设置改变了传力路线，斜桁架成为主要的竖向承载构件，分担了屋盖80%静载和88%活荷载，大门桁架实现了截面跨高比可以达到20~22，同时满足超低空域和超限大跨度两项指标要求；斜桁架方案的杆件及节点数量均减少10%以上，缩短钢结构拼装工期；有效节约钢材用量，屋盖主体结构用钢量仅170kg/ m^2 。

2.模块化吊装、两阶段整体同步提升施工技术。采用该项技术创造了用3个月时间安全优质完成4万平米超大跨度机库屋盖钢结构的施工速度记录。整个钢屋盖2万余根杆件98%拼装工作量均在地面完成，屋盖钢结构提升到位、屋面板安装完成后挠度值，符合规范及设计要求。钢屋盖实现了精准安装、精准建造。

3.定型土工钢管提升塔架技术。该技术的采用保证了超重超高提升塔架的整体稳定性和承载能力，塔架格构柱主肢采用租赁的 $\phi 609\text{mm}$ 定型土工钢管，特殊设计的节点板实现拆装方便和不损坏主管，节约塔架材料费用约75%；显著降低施工成本。

4.屋盖钢结构复杂节点深化、精细化制造及质量控制技术和三维激光扫描辅助屋盖钢结构安装技术此两项技术的应用确保构件加工尺寸精准，405m长屋盖钢结构整体拼装误差小于15mm，实现将扫描数据与BIM模型相结合，快速判断构件空间位置尺寸偏差，为类似工程提供了一种新型钢结构测量方式。

5.基于智能大数据平台的大跨度整体提升全过程实时监控技术在整体提升和卸载过程中的应用，实现了各级管理人员实时查看监测数据，是传统施工技术与互联网技术的创新融合，为以后的类似项目实施中对施工工艺和提升塔架设计优化可提供完整的数据支持，具有较大

的推广应用价值。

6.设备管道与大跨度网架同步提升安装技术。该技术的采用，解决了大跨度屋盖钢结构中设备管道安装高空作业难度大、风险高、工期长等难题，实现 15000m、600t 机电主管道随屋盖钢结构同时拼装、同时提升，最终实现高空精准对接。

该项目获得发明专利 1 项、实用新型专利 3 项，北京市工法 2 项，北京市建设工程 BIM 成果 2 项，发表论文 6 篇。成果经北京市住房和城乡建设委员会组织科学技术成果鉴定，综合技术整体达到国际先进水平，其中“超大跨度钢屋盖结构模块化吊装、两阶段整体同步提升施工技术”达到国际领先水平。

本项目在世界最大跨度机库-北京新机场南航基地 1 号机库中的成功应用，获得北京市建筑（结构）长城杯金奖、中国钢结构金奖年度杰出工程大奖、中国安装工程优质奖、鲁班奖；通过住建部绿色施工科技示范工程和北京市建筑业新技术应用示范工程验收。

完成单位：北京建工集团有限责任公司、中国航空规划设计研究总院有限公司、北京市建筑工程研究院有限责任公司、江苏沪宁钢机股份有限公司

完成人：刘伟、赵伯友、郭双朝、洪彪、王益民、兰春光、严擒龙、李世昌、王磊、杜钦、杨硕、杜春来、张昕宇、唐娜、周昊

庐山西海景区大跨度球类运动场馆空腹 网格结构设计及建造关键技术研究

一、研究背景

随着我国经济的发展，我国大跨度空间结构技术水平得到快速发展，各种场馆建筑层出不穷。然而针对大跨度单层公共与工业建筑的结构体系，大都由国外引进新型结构体系，如门式刚架、索膜结构等。本项目所涉及的新型大跨度空间网格体系为马克俭院士团队自主研发创造，可有效降低建筑层高，解决建筑空间不足、肥梁胖柱等关键技术难题，符合国家节能减排、绿色建筑的发展方向。

二、创新点

本项目依托庐山西海景区西海舰队球类运动休闲中心工程开展研究应用，取得如下创新点：

1.创新了“等代刚度”的实用设计方法，进一步研发完善了大跨度装配式组合空腹网格楼盖结构体系；基于梁格法理论以及空腹桁架理论提出了适用于钢空腹夹层板内力计算的修正空腹桁架法；针对庐山西海景区，基于连续化分析提出了大跨度装配式空腹网格组合屋盖简化计算方法；

2.在依托工程开展了大跨度组合空腹网格体系定点激励现场试验，开展了该新型结构体系的试验模态分析，构建不同工况下结构舒适度指标评价体系和可行性方法；

3.研发了大跨度组合空腹网格的体系构件单元制作技术、吊装技术、空腹梁临时固定技术和框架成型技术，形成了大跨度空腹网格结构辅助施工成套工艺；

4.提出了基于 BIM 的新型大跨度装配式组合空腹网格结构的数字化建造方法；形成了新型大跨度装配式组合空腹网格结构最优安装方法及成型建造技术；

5.提出并研发了“多层大跨度公共建筑与工业厂房装配式整体盒式结构及制作方法”等多项专利技术，应用效果显著。

三、国内外技术对比

1985年，马克俭院士在我国贵州省研发了首个钢筋混凝土空腹网架结构并开展了工程应用，至今团队陆续研发了正交斜放空腹网架结构、钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构、多层大跨度正交正放钢-混凝土组合盒式结构等成套体系，而该体系在庐山西海景区航母造型的球类运动

场馆得到进一步研发完善实属首次。

经委托亚太建设科技信息研究院有限公司（原建设部科技信息研究所）对研究成果进行的相关查新，显示在国内、国外均未涉及查新项目的报道。经北京市建筑业联合会科技工作委员会评价鉴定：研究成果总体达到国际先进水平，其中装配式空腹网格楼盖结构建筑技术达到国际领先水平。

四、推广应用

本成果依托庐山西海舰队球类运动休闲中心项目，并获得了成功应用。解决了依托工程的技术难点并提高工程质量，保证了工程完工及过程安全，同时还进一步验证了该技术体系的可行性与实用性，本项目的研究成果具有广阔的应用前景，可为类似大跨度运动场馆设计及建造提供重要的参考和依据。

五、经济及社会效益

大跨度球类运动场馆空腹网格结构与常规的网架屋盖结构相比，可减少总用钢量 30%，近 900 吨，关键线路施工工期缩短 10 天，创造综合效益达 1703 万元。本项目成果在工程中取得成功应用并得到当地政府的高度认可，荣获了“中国建筑工程钢结构金奖”等 3 项省部级质量奖；授权专利 10 项，发表高水平学术论文 8 篇，其中 SCI 论文 2 篇，EI 论文 1 篇，核心论文 5 篇；成功助力庐山西海风景区创建国家 5A 级旅游风景区；极大的改善了北码头人民的休闲娱乐方式，带动了当地的经济的发展。

完成单位：中交第四公路工程局有限公司、贵州大学、中交四公局第九工程有限公司

完成人：张克胜、马克俭、魏海丰、肖建春、刘文超、郭利明、温志宏、魏艳辉、谢炜、张鹏勃、胡庆康、管成喜、李远方、杨永辉、陈靖

雷神山医院机电快速安装综合技术

为了缓解武汉市抗击新型冠状病毒疫情期间定点医院的收治压力，使得更多的患者得到较好的医治，2020年1月25日下午3点30分，武汉市疫情指挥部召开专题会议，决定由中建三局牵头，建立雷神山应急医院，主要目的是增加重症病例定点医院数量，进行集中救治管理，加强重症患者救治力量，提高重症救治成功率。

雷神山应急医院总建筑面积约8万 m^2 ，其中隔离病房区4.62万 m^2 ，共设30个病区，约1500个病床，医技楼6000 m^2 ，含ICU检测、CT室、血库等功能用房，医护休息区、后勤楼、专家楼15000 m^2 ，同时设污水处理站、液氯加药间、垃圾焚烧站、液氧站、正负压站房等配套设施。项目整体按照三级传染病医院标准设计。病区内系统复杂、医疗功能齐全且要求很高，机电专业除常规照明、动力用电、空调、冷热水外，还要求配备综合布线、计算机网络、视频安防监控、病房呼叫等系统，另外还设有医用气体系统以及负压通风系统。

面对如此工期超短、环境恶劣、系统复杂的医院机电安装工程，有几大技术难点需要突破：一是常规的设计方法不能满足快速建造的需求；二是部分常规条件下的施工工艺无法满足快速建造的需求；三是医院雨污水、医疗废弃物、空气流向等防扩散要求高；四是传统的智能系统建造模式无法满足应急医院快速建造、移交需求。

针对以上难点我司展开技术攻关研究，最终快速、高品质完成雷神山医院建造的历史性任务。主要关键技术内容包括：

一、雷神山医院机电设计、深化设计关键技术

1.创新应用机电逆向设计方法，由应急情况下实际可提供的材料、设备倒推系统设计，实现逆向设计。

2.创新机电深化设计方法，通过虚拟程控交换机技术和病房呼叫系统优化，污废水及医疗气体管路优化，助推机电系统快速建造。

3.创新在应急医院设计中采用模块化拼装设计技术，将整体卫浴、强弱电设施等高度集成化，实现标准化“即插即用式”模块设计。

4.创新采用高精度实时负压控制系统设计技术，通过新风稀释、过滤除菌、气流和压差控制技术等措施保证各功能区负压环境要求，解决呼吸类传染病应急医院院内感染的难题。

二、雷神山医院机电安装快速建造关键技术

1.研发了一套模块化装配施工技术，包括采用整体卫浴集成化模块、医疗设备带模块、UPS 模块等，通过预制装配式组合技术，最大化实现机电系统快速建造，在极限工期内完成了应急医院建设。

2.创新应用高分子聚合物圆形管道做通风系统管材，一方面解决了材料采购及管道加工的难题，另一方面也借助高分子聚合物圆形管道的轻便性实现了现场高效安装。

3.开发了一套应急医院机电系统验收新体系，采用“独立成区，分区调试验收，验收参与方提前介入”等验收手段，革新验收内容、优化验收流程，达到了快速验收、快速交付的效果。

4.创新成品支吊架体系，根据集装箱式结构的特殊性，采用标准化、工厂化、网格化方式，灵活组合成不同的支架形式，适应现场情况，满足紧张工期需求的同时达到质量可靠。

三、雷神山医院机电安装防扩散技术

1.首次采用高效医疗废物无害化焚烧处理系统，针对医疗、生活污染废弃物处理无害化率接近 100%，实现高减容比的同时，满足烟气达标排放标准要求。

2.开发了一套雨、污水系统防扩散控制方法，通过采用“两布一膜”作为应急医院基底防渗层，塑料模块调蓄池调节场内雨水流量，运用“活性炭吸附+UV 光解”工艺对污水处理系统产生的废气进行除臭消毒，有效杜绝了“新冠”病毒通过雨、污水扩散。

3.研发了一套应急医院气压控制及防扩散技术，通过四道密闭措施使房间漏风量小于 5%，在此基础上，进行分区域，逐级对通风系统进行调试，通过以新风为主，排风为辅的调试控制，满足负压梯度之间的值不小于 5Pa，最终实现气流合理的组织及过滤排放。

四、雷神山医院机电安装数字化关键技术

1.创新将数字化技术应用于应急医院建设与运维。集成无线烟感消防报警、5G 智慧医疗、智慧医疗感知系统等功能，实现医院机电系统数字化运营管理。

2.创新采用一种基于 AI 技术的防疫工程智慧监控系统。以云服务为基础平台，解决大数据应用的关键技术及数据融合，实现对各种信息资源的共享、处理和分析研判，形成全过程智慧监控体系。

3.开发了应急医院维保平台，将云计算技术、信息化技术引入防疫工程维保，实现应急医院“零接触”维保的新模式、新方法。

该成果获得发明专利 2 件，获得实用新型专利 7 件，获得省级工法 5 项，获得软件著作权 3 项，编制中建集团企业标准 1 项，中施企协团标 1 项，出版专著 1 部，发表论文 12 篇，

目前还有受理发明专利 4 项。

通过应用雷神山医院机电综合技术，雷神山医院有效控制了疫情的传播速度，为全国乃至全世界抗击疫情争取了宝贵的时间，在一系列应急医院投入使用后，国内疫情扩散速度明显降低，治愈效率明显提高，为全世界人口五分之一人民的生命健康做出了巨大贡献。其总结的建造经验为本次疫情期间国内其他地区建设或改造小型的应急呼吸系统传染病医院提供了宝贵的参考资料。随着“新冠”肺炎疫情全球蔓延，俄罗斯、哈萨克斯坦、伊朗、非洲等多个国家和地区在参考中国经验建造本国应急医院，中国建设者的经验和智慧走出国门与世界共享。

完成单位：中建三局第一建设工程有限责任公司、中建三局集团（深圳）有限公司

完成人：尹奎、刘波、何庆国、张淇、文平均、孙照付、刘林、曹灵玲、万和新、赵达功

工业化多高层钢结构住宅施工关键技术 研究与应用

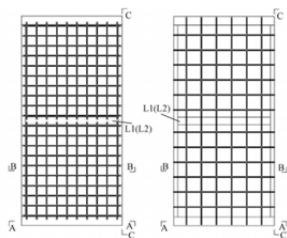
一、成果简介

本项目以北京槐新公租房项目和杭州金茂项目为研究对象，针对现存装配式钢结构楼板导致的隔墙布置不灵活、管线安装无法实现个性化布置、维修改造难问题，梁柱连接节点现场焊接工程量大、焊接质量控制难、变刚度装配式钢结构梁柱连接节点耗能机理研究不足的问题，装配式钢结构住宅安装精度控制难、塔吊附着难、钢管束结构焊接和内灌混凝土效率低等重难点，组织开展技术研发攻关，主要创新成果如下：

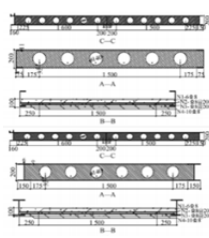
1. 装配式隐形梁和楼板施工阶段承载力研究

发明了新型装配式隐形梁和楼板，揭示了其破坏机理，建立了能准确反应新型楼板力学性能的有限元模型，提出了新型楼板施工阶段受弯承载力计算方法。

本研究形成：授权专利 2 项（发明专利 2 项）；发表论文 2 篇。



新型楼板平面图



新型楼板剖面图



新型楼板配筋

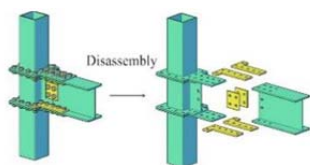


新型楼板浇筑混凝土

2. 全螺栓连接装配式多高层钢结构梁柱节点抗震性能研究

发明了三种新型全螺栓装配多高层钢结构梁柱节点，揭示了节点的耗能机理，重点揭示了板间滑移对节点耗能能力的影响，揭示了盖板上螺栓个数、规格、螺栓杆和螺栓孔壁间距、盖板厚度等因素对节点耗能能力的影响规律，提出了节点承载力计算方法。

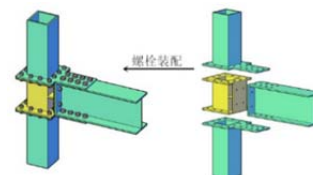
本研究形成：授权专利 3 项（发明专利 3 项）；发表论文 8 篇。



全螺栓连接节点形式一

assemble

全螺栓连接节点形式二

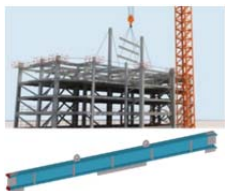


全螺栓连接节点形式三

3. 装配式钢结构住宅施工技术研究

发明了自动放线喷墨系统，研发了钢结构住宅精准安装施工方法，研发了塔吊与装配式钢结构住宅的新型连接体系，研发了钢结构住宅施工用作业平台。

本研究形成：授权专利 10 项（发明专利 1 项）；发表论文 2 篇；省部级工法 1 项。



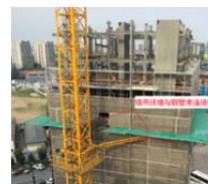
BIM 模拟吊装、辅助设计



钢管束安装、内灌混凝土



混凝土养护



塔吊附着

二、关键科学技术成果鉴定

2020 年 12 月，经北京市住房和城乡建设委员会组织的鉴定，《工业化多高层钢结构住宅施工关键技术研究》成果总体达到国际先进水平。

三、产生效益和对行业进步的影响

研究成果直接应用于北京槐新公租房项目，通过采用装配式隐形梁和楼板施工阶段承载力研究成果、装配式钢结构住宅施工技术研究成果，解决了装配式钢结构楼板导致的隔墙布置不灵活、管线安装无法实现个性化布置、维修改造难问题，解决了钢框架支撑体系塔吊附着的难题，提高了钢结构安装精度；研究成果直接应用于杭州金茂项目，通过采用全螺栓连接装配式多高层钢结构梁柱节点抗震性能研究成果、装配式钢结构住宅施工技术研究成果，解决了变刚度装配式钢结构梁柱连接节点耗能机理研究不足、钢管束钢结构塔吊附着难得问题，提高了钢结构安装效率和精度。

本项目主要科技成果为企业承接工程带来了直接的影响力，实施项目的直接效益来自于本项目成果的应用及方案优化，为工程带来了工期节约，降低了材料费、人工费、机械费以及其他各种措施费；北京槐新和杭州金茂项目为中建八局钢结构住宅标志性工程累计接待观摩 37 次，观摩人数达 2589 人次，得到了社会各界的一致好评。



完成单位：中国建筑第八工程局有限公司、北京工业大学、中国矿业大学、上海浦东建筑设计研究院有限公司、上海天华建筑设计有限公司

完成人：刘学春、武念铎、张文莹、万展君、张营营、黄彬辉、符宇欣、李俊、许诺、陈学森

大型科技场馆绿色建造关键技术与应用

一、立项背景

科技会展场馆作为会展建筑新的业态类型，因其标志性及示范性引领着城市建筑的发展，逐渐向多层、大跨、绿色、多功能等方向发展，设计理念及建造方式发生着根本性的改变。面对这一转变，如何有效协调建筑与周围环境、短期建设与长期运维、建造效率与工程品质的关系，是设计及施工过程中亟待解决的问题，研究新一代场馆建筑的设计及建造方法变得十分迫切。

在这一背景下，本课题组从绿色设计及装配式建造理念出发，围绕会展建筑的结构、围护、机电核心系统及绿色施工关键技术开展研究，形成了大型科技场馆绿色建造关键技术，本课题创新点及关键技术如图 1 示。

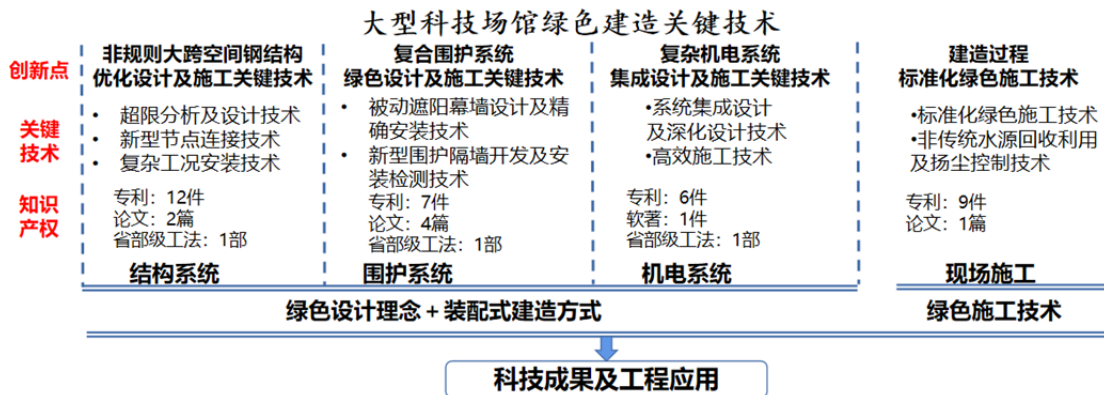


图 1 研发思路及关键技术

二、创新点及关键技术

本项目重点形成 4 大创新点，包含 9 项关键技术，申请专利 33 件（授权发明 7 件、实用新型 21 件），获得软件著作权 1 件，发表核心期刊论文 7 篇，获批省部级工法 3 部，省级科技成果鉴定达“国际先进”水平 2 项，中冶科技进步奖二等奖 1 项。

创新点 1：非规则大跨空间钢结构优化设计及施工关键技术。

针对大型科技场馆结构设计过程中存在的结构不规则、刚度突变等设计难题，基于性能设计理论及方法，利用减震隔振技术，创新性地优化了结构形式及连接措施，开发了系列新型结构构件及连接节点，有效地解决了结构设计中的超限问题。针对大型科技场馆层数多、单层面积大（118m×198m）、中心区域钢构件超重（54t）等安装难题，研发了基于复合支撑体系和在线智能监控系统的钢结构安装技术，实现了重型履带吊（200t）地下室顶板行走跨

内安装，显著提升了工效。

创新点 2：复合围护系统绿色设计及施工关键技术。

基于绿色设计理念，合理利用“光”资源，精确分析光照参数，创新幕墙形式，提出了带格栅的被动遮阳幕墙设计技术。针对遮阳幕墙立面形式复杂、安装精度要求高的难题，开发了异型遮阳系统分片安装的高效工。针对轻钢龙骨墙体连接螺钉多、安装效率低等问题，发明了帽形截面钢龙骨轻质混凝土组合墙体，有效提升了大空间围护系统延性及抗震性能。针对作业面受限，研发了利用可移动式卷扬机支臂架的条板墙吊装方法，实现了自动精确定位钻孔、运输一体化。

创新点 3：复杂机电系统集成设计及施工关键技术。

针对场馆建筑管线众多、交叉严重、局部空间狭小等设计、安装难题，基于 BIM 技术开发了三维管线集成设计系统，研发了狭小空间内管道传送装置及吊装方法，发明了小管径钢管弯管装置、新型桥架固定支架及电缆固定装置，提高了安装效率。

创新点 4：大型场馆建筑建造过程绿色施工技术。

针对大型科技场馆施工过程中安全风险大及环保要求高的特点，发明了基于钢骨梁的高空模板支撑方法，显著节约施工材料；提出了高空作业标准化安全防护技术，研制了系列新型装配式操作平台及便携式吊篮等标准化工具，提高了周转利用率；通过对基坑降水等非传统水源收集及太阳能等可再生能源的利用，开发了施工现场非传统水源回收利用及扬尘控制技术，实现了施工过程中的有效节水、节能。

三、国内外同类先进技术比较

非规则大跨空间钢结构优化设计及施工关键技术，通过新节点的开发减少用钢量约 0.2%，楼板行走吊装技术减少措施用钢量约 46%，提升工效约 23%以上；复合围护系统绿色设计及施工关键技术，采用双层吊篮协同安装技术及内引外控测量定位技术是工效提高了约 40%，条板一体化施工方法是安装效率提高 43%；三维管线综合设计系统是深化设计效率提升 50%，复杂机电管线高效施工技术提高了安装效率约 28%；标准化绿色施工技术提升了施工作业及材料周转效率，降低了高空作业风险，非传统水源回收利用技术实现了人工智能，非传统水源利用率提高了 30%。

四、推广应用情况及综合效益

该关键技术先后在光谷科技会展中心、平煤神马金融资本运营中心等工程中成功应用，使施工效率整体提升 33%，累计新增利润 4436 万元人民币，对于大型会展类建筑建造起到了引领作用，具有重要的参考价值和广阔的应用前景。基于该技术建造的光谷科技会展中心项

目于 2019 年斩获国家优质工程奖等 19 余项奖项，建设过程中多次受到央视等媒体报道，其中，2017 年 10 月 11 日，CCTV10《走进科学》栏目对其进行了专题报道，为企业赢得良好声誉。光谷科技会展中心在新冠疫情肆虐武汉时迅速改造为方舱医院，为抗疫的成功发挥了重要的作用。

完成单位：中国二十冶集团有限公司、中南建筑设计院股份有限公司、武汉理工大学

完成人：岳 锩、肖 飞、孙千伟、罗 放、王小平、陈焰周、马如建、张凯静、杨迎春、康 星

大跨度复杂场馆建造关键技术研究

当前，我国经济取得了长足发展，为了使经济红利更好惠及民生，政府加大了对文化、体育等基础设施的投资。然而，我国人均文体设施面积仍远低于发达国家，文体场馆需求数量巨大，随着文化建设的推进，人们对大型场馆建设提出了更高需求，除满足大空间使用功能外，场馆建设向兼具文化特色、艺术美观、现代科技、绿色生态等众多特点于一体的建筑发展。造型新颖化、功能多样化、体系复杂化、空间超大化的发展需求，给场馆建造技术带来空前挑战。本项目依托数字化、信息化技术发展，结合应用技术创新，对大型复杂场馆建造中的测量、施工支撑工作平台、预应力屋盖整体提升与卸载和封闭室内预制构件运输四项关键技术进行了研究，取得的创新成果如下：

创新点 1：基于近景摄影测量技术，提出了空间结构测量控制方法，实现了大跨度复杂空间结构施工过程的非接触、自动、精准、高效测量。

实施效果：基于近景摄影的测量技术避免复杂环境对测量工作的限制，实现了对模板支撑和幕墙安装精度的实时检测纠偏，偏差控制在 2mm 以内，精度满足安装要求，测量工效提升了 80%以上。

创新点 2：研发了装配式、标准化、模块化的工作平台，形成了集重型大跨度外挑混凝土结构模板支撑、外倾斜曲面幕墙安装及安全防护的一体化施工技术。

实施效果：研发的工作平台拆卸组装方便，满足不同施工项目需求；研发的滑移系统，爬行及制动控制灵敏、精准，实现了 30m 高钢结构、10m 长距离安全平稳移动；标准型钢构件可以回收循环使用，具有绿色、高效、经济的特点；应用经济效益高，实现节约材料 37.1%、节约工期 3 个月，已成功应用到 5 个类似工程中。

创新点 3：提出了大跨度预应力空间钢桁架屋盖整体提升与分阶段同步等比卸载技术，实现了复杂预应力钢桁架屋盖快速提升与安全卸载。

实施效果：借助数字化手段，建立了大跨度钢屋盖提升和卸载的全过程结构内力-变形反演，通过提升-卸载施工方法设计和改进吊点、支撑架设计、优化施工工序，建立了施工操作控制步骤和实时监测预警控制目标，实现了高效、平稳、安全施工，为类似工程提供参考借鉴，技术成果已成功应用于成都大魔方 2300t 钢屋盖及南充博物馆 7800t 钢屋盖提升与卸载。

创新点 4：开发了封闭受限空间内预制部件快速运输技术，解决了封闭室内空间大型预制部件的快速运输及安装难题。

实施效果：利用屋盖承载裕度，研发了附着式缆索吊系统，结合设计的环向水平运输小车实现轻量化运输，显著减少了高差大、距离长、作业面广吊装作业所需的措施投入，且悬挂式作业减小了地面复杂情况对施工的影响，形成的技术安全、高效、成本低，目前该系统已成功应用大魔方演艺中心、南充博物馆等 9 个场馆室内预制部件吊装作业，效益显著。

2021 年 3 月 26 日，四川省建筑业协会对本项目“大跨度复杂场馆建造关键技术研究”的关键创新技术组织了专家评价会，专家组专家一致认为：技术成果达到了国际先进水平。

课题获授权专利 43 件，其中发明专利 15 件；获省级工法 3 项；发表论文 8 篇，其中 SCI/EI 论文 3 篇，应用项目获鲁班奖 1 项、国家优质工程奖 1 项。

与常用技术相比，措施工程量减少约 40%，成本减少约 60%，施工效率提高约 35%；本课题研究成果在 14 个场馆项目中的成功应用，并成功助力 3 所大学校区建设，实现了创收 120.28 亿元，创利 6.61 亿元。

该课题通过技术创新，推动了大跨复杂场馆建造技术进步；应用工程成为了当地地标性建筑，获得了国资委、人民网、央广网等众多报道，应用工程营用获得业主一致好评；形成的技术成熟先进，获得四川省行业协会的高度评价，极具参考价值，应用前景广阔。

完成单位：中国五冶集团有限公司、四川大学、西南石油大学

完成人：谭启厚、熊峰、肖东升、叶小斌、吕洋、葛琪、高长玲、周斌、李永帅

基坑内地下水渗流机理及抗浮水头 计算方法的研究与应用

随着高层建筑的日益增多，人防工程及其他配套设施的需要，地下空间得到了充分开发利用，地下混凝土结构的埋置深度和体量也不断增加，地下水对建筑物设计、施工和使用过程的影响也不断加大。不同地质情况下，基坑内地下水的来源、汇水量及地下室底板水头压力的取值等问题存在着许多错误的认识，导致抗浮设计水头取值过小，引发地下室抗浮承载力设计不足，造成工程事故，影响建（构）筑物的结构安全和使用功能。

为了有效避免抗浮事故的发生，本课题围绕基坑内外地下水之间的渗流问题，分别针对不同地质条件、支护结构、止水帷幕形式进行研究，通过理论分析提出极端暴雨天气条件下，基坑内地下水抗浮水头取值公式，以便设计和施工单位根据研究成果采取相应抗浮措施，满足工程实际需要。主要技术内容如下：

1.分析了不同地质条件、不同支护止水形式基坑的地下水赋存状态、渗流机理及渗流计算方法，为抗浮水头的合理取值奠定了理论基础。归纳总结了不同地质条件、不同支护止水形式对基坑内外地下水渗流的影响，并进行了常见回填土、喷射混凝土渗透系数试验测定，为渗流计算提供关键参数取值。同时，基于现场试验和数值模拟相结合的研究手段，进行了基坑内外地下室渗流机理研究，并验证了理论计算的合理性。

2.结合汇水面积、地形地貌等因素，进行了降雨条件下基坑内地下水位理论计算，为降雨条件下抗浮水头的计算奠定基础。对建造与使用过程雨水汇水面积分析，建立了相应过程的汇水量计算方法。并结合实际工程情况细化公式中相关参数的取值方法，主要包括降雨量（包括降雨强度和降雨持时）、回填土的孔隙率及渗透系数、汇水面积等，定量分析不同地质条件、不同支护止水形式的基坑内外地下水渗流量，提出了渗流平衡概念。

3.考虑渗流和降雨影响的抗浮水头是动态变化的，渗流与雨水汇集在同一时刻进行，提出了考虑渗流影响的抗浮水头取值方法及“抗排”结合的地下工程抗浮综合措施。

本课题的研究成果，可以用于采用不同基坑支护与止水帷幕形式的地下结构工程建造过程和使用阶段的抗浮设计，能够有效避免抗浮失效所造成的严重质量问题和工期延误，成果已应用于青岛红岛汇科技金融中心项目，青岛市市立医院东院二期工程门诊住院楼项目，金华路33号改造项目一标段等项目，具有广阔应用前景和较好的经济、社会效益。

完成单位：青建集团股份公司、青岛理工大学

完成人：李翠翠、许卫晓、刘汉进、杨淑娟、王 帅、王爱华、王文浩

复旦大学相辉堂修缮复原关键技术 研究与示范

城市更新是城市现在和未来发展永恒的主题，近年来住房和城乡建设部和上海市都提出了“留改拆并举、以保留保护为主”的城市有机更新理念，而历史建筑的修缮改造升级正是城市更新的重要组成部分。由于历史建筑修缮时常存在原始图纸缺失、原有结构定量检测困难、风险预测评估不完善等问题，如何引入数字化技术手段，对历史建筑修缮改造过程进行风险评估和控制，是目前历史建筑保护亟需解决的难题，对城市有机更新具有重要意义。

相辉堂是代表复旦大学精神文化的标志性建筑，属于上海市杨浦区区级文物保护单位和上海市第四批优秀历史建筑。本项目针对历史建筑修缮标准高、安全风险大、地基扰动控制难度大、周边环境复杂等难点，以结构风险评估和控制为核心，引入三维扫描、物联网监控和模拟仿真等数字化技术手段，深入研究了历史建筑风貌修缮复原、历史建筑结构安全状态分析、历史建筑风险评估与预警等关键技术，取得以下创新成果：



技术成果一：基于三维扫描的历史保护建筑模型快速重构与修缮复原技术

研发了基于三维扫描的历史保护建筑空间结构及环境场景模型快速重构技术，改变了历史保护建筑原始数据勘测难、效率低及精度不高的现状。开发了 BIM 项目管理协同平台、集成交付平台和模拟仿真可视化展示平台，实现了点云模型与 BIM 模型的快速对比分析与偏差识别，为历史保护建筑的修缮复原设计、施工与交付提供了保证。研发了后着色外墙拉毛饰面与屋顶东吴挂瓦修缮复原技术，解决了历史保护建筑墙屋面系统整体更新的技术难题。研发了建筑砌块外墙防水结构制作方法和木门窗构件局部替换的斜插口连接施工技术，实现了

历史保护建筑细部历史风貌特色的复原。

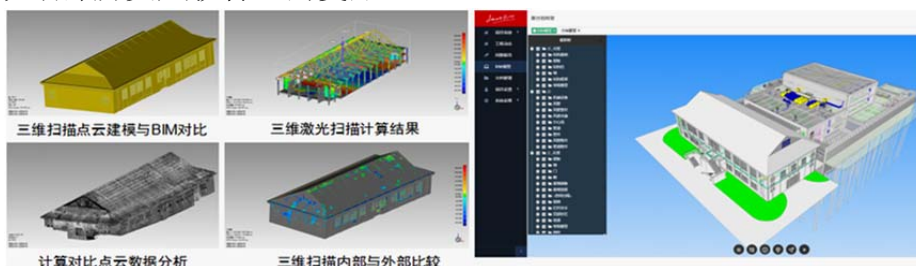


图1 相辉堂三维扫描点云模型重构

图2 BIM项目管理协同、集成交付平台

技术成果二：基于数据融合的历史保护建筑结构安全状态分析

研发了基于物联网的建筑物变形实时监测系统，形成了成套高精度、高灵敏的无线信息化监控技术体系，实现了建筑结构变形的实时监测。开展了施工全工况下建筑结构的数值模拟研究，提出了基于差值拟合的实时监测与数值模拟的数据融合方法，提升了历史保护建筑安全状态分析的准确性。开展了木结构节点加固组合连接件和节点强度影响试验，开发了木结构温湿度在线监测平台，实现了木结构不同温湿度环境下安全状态的实时监测。提出了墙柱增大截面加固的井字形固定预埋盒施工方法，研发了墙体局部加固阳角模板固定装置与薄弱下弦梁加固用卡箍组件，实现了历史保护建筑局部构件的快速安全修复。

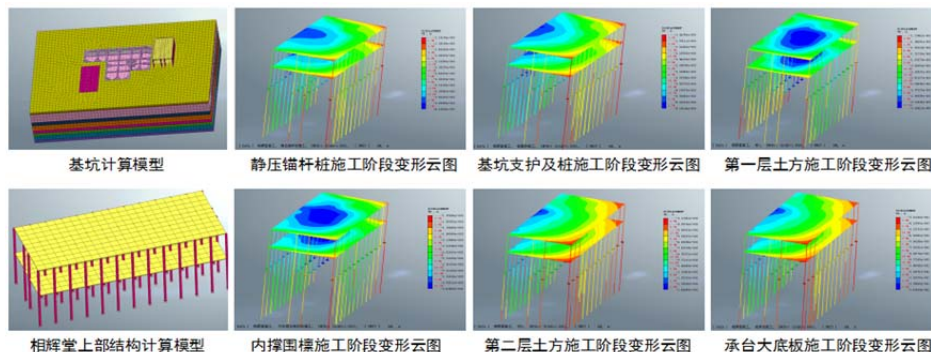


图3 建筑结构安全状态仿真模拟分析

技术成果三：基于强度储备比的历史保护建筑结构风险评估体系与预警系统研究

提出了历史保护建筑多级预警安全风险评估方法，通过引入强度储备比指标理论，对建筑结构构件进行重要性系数分析，将结构局部构件强度储备比值扩展至整体结构，形成一整套建筑结构风险评估体系，实现了历史保护建筑安全健康的评估分析。研发了历史保护建筑结构安全监测预警系统，以监测数据实时反馈和结构动态重分析为核心，以可视化模型为载体，实现对建筑结构安全状态的实时分析，提高对建筑安全风险的预警能力。

实施效果：成果已申请专利 23 项（授权发明专利 5 项、实用新型专利 10 项）；获得计算机软件著作权 7 项；发表论文 7 篇。经专家鉴定与科技查新，成果总体达国际先进水平。技术成果获上海市科技进步奖、上海市优秀发明奖、上海市建设工程白玉兰奖等奖项，取得显

著的社会经济效益，为城市更新中大量历史建筑的修缮保护提供了重要参考价值。

完成单位：上海建工五建集团有限公司、上海建工集团股份有限公司、上海慧之建建设顾问有限公司

完成人：金少翥、左自波、曾维强、张淳劼、应宇垦、付鑫、周向阳、李天际、韩振华、卢磊

建筑物长距离及复杂移位关键技术的研究与应用

我国正处于基础设施建设与改造提升时期，建筑物的保护、提升与拆除之间矛盾突出，建筑物移位是解决以上问题的有效途径之一。

传统移位采用滚轴、滑块加千斤顶的方式，造价高、速度慢。上世纪末，国外出现了采用车辆进行建筑物移位的工程。国内 09 年首次采用拖车对一栋老别墅进行了远距离移位。

目前拖车移位的实施还是基于经验，对移位时建筑物的受力性能未进行研究；距离远、移位方式复杂的工程，出现有害变形的概率大，对施工和控制的要求高；移位施工的绿色高效与经济性需进一步提高。

项目组对长距离复杂移位中设计、施工及控制等进行了研究，形成了以下创新性成果。

进行了砌体结构夹墙式托换梁的受力性能研究，确定了托换梁与砌体界面的抗剪强度及托换梁的设计方法。数值模拟了托换梁刚度对上部结构变形的影响，确定了托换梁刚度的合理取值。基于车辆反力和自动控制特性，提出了移位过程中拖车、托换与上部结构协同受力的分析方法。

研发了利用钢与被托换构件间的摩擦传递竖向荷载的工具式钢托换装置。通过试验确定了托换装置与被托换构件的界面摩擦系数。发明了电动螺旋跟随千斤顶及其控制方法，解决了顶升千斤顶卸压时结构下降不均匀的问题；发明了同步顶升方法，提高了施工效率。基于以上工具及方法，形成了 PLC 液压伺服多点同步控制的建筑物整体顶升施工工法。

针对顶升、装车、平移、就位等关键施工步骤进行了攻关。发明了移位导向装置，可防止建筑物移位中发生偏离；发明了水平监测装置，可更直观监测移位中建筑物的倾斜状态；发明了就位指示装置，可确保建筑物的快速精准就位；确定了建筑物拖车移位全过程的施工及控制要求。

本项目已申请发明专利 13 项，授权 8 项。发表论文 5 篇，获省级工法一项，软件著作权一项。评价委员会专家评价该项目成果达到了国际先进水平。

本项目已成功的用于海南某酒店、明湖壹品苑项目地块天主教方济圣母传教修女会院、济南时尚创意中心等工程。该项目成果不仅应用于移位工程，还成功的用于了建筑物纠倾、结构病害及损伤构件置换等工程。本项目为建筑物的移位保护、病害处理及功能提升提供了技术支持，促进了社会可持续发展和文化传承。

完成单位：山东建筑大学、山东三箭建设工程股份有限公司、山东建大工程鉴定加固研究院、山东建固特种专业工程有限责任公司、中国外运大件物流有限公司

完成人：夏风敏、贾留东、武玉强、张鑫、王继国、徐阳、刘闵、孙谦、傅传巍、王亚伟

高空百米跨度多层钢连廊整体提升和平移关键技术

钢结构连廊，通常意义上就是一种大跨度连接两个建筑的钢结构，用来作为空中廊道、建筑构造或其他使用和视觉功能。钢结构连廊一般具有超高、超重、大跨度的特点，安装施工难度较高。目前常用的安装方法主要有高空散装、平台拼装、整体吊装和整体提升 4 种。其中，高空散装因高空作业量大，安全性差；高空平台拼装临时支撑量大，安全风险高，施工措施费高；整体吊装速度较快，但受场地条件约束大，吊装施工难度大；整体提升则无需搭设高空平台，安全性较好，可在狭小场地完成作业。

在上海松江 G60 科创云廊一期新建生产及辅助用房工程中，6#楼和 8#楼间高空钢连廊，顶标高 78.4m，4 层，高度 16.8m，最大跨度约 99m，总重约 1800t；2#楼和 4#楼间高空钢连廊，顶标高 74.35m，3 层，高度 12.6m，最大跨度约 68m，总重约 1700t；8#楼和 10#楼间高空钢连廊，顶标高 36.68m，3 层，高度 12.6m，最大跨度约 60m，总重约 1200t。针对多处大跨度多层多点支座的钢连廊施工的特点及难点，围绕液压整体提升施工工艺，进行了一系列技术攻关，取得了丰富的创新技术成果。主要包括：

1.百米跨度异形钢连廊整体提升和高空悬挂斜向平移施工技术。针对高空跨度 99m、重 1800t 的钢连廊，形成了一套超高超重异形钢连廊工程的整体提升和高空悬挂斜向平移施工技术，主要包括滑移轨道系统、提升系统、结构干涉处理、高空安全措施等关键技术。采用液压同步控制整体提升平移技术，由地面拼装钢连廊成整体后，通过高空布置的多组液压提升平移机构，使用钢绞线分别穿过提升油缸，将钢连廊整体同步提升 61m 至设计标高，再高空斜向 45° 同步悬挂平移 2.12m 就位高空。最后同步卸载就位于钢筋混凝土牛腿支座。由于钢筋混凝土牛腿的干涉，钢连廊地面拼装时与牛腿位置错开，提升后需要 45° 斜向平移方可就位。

2.多层多点支座钢连廊施工过程支座反力控制技术。针对多层多点支座多次超静定钢连廊卸载就位中存在的支座反力调整难题，采用现场应力监测和数值分析两种方法对支座反力进行分析、调整和控制，设计了一种可调节牛腿支座垫板，形成了一套卸载就位过程中支座反力调整方法，实现了多层多个球形滑动支座桁架结构钢连廊的顺利就位。对于钢结构支座和加工制作的偏差，应控制在 mm 级别。由于支座测量涉及了钢筋混凝土牛腿、球形滑动支座、钢桁架支点等多个不同测量精度控制标准的部件和装置，涉及主体结构本身的变形，因此为使多层群支座钢连廊顺利完成支承转换，应严格控制标高和加工精度等关键参数。

3.钢连廊整体提升和平移全过程数字建造技术。针对钢连廊设计、加工、制作、分析、施工和监测全过程，利用 TEKLA、SAP2000、ANAYS、MADIS、3DMAX、VR 技术等数字建造和信息化技术，利用钢结构三维建模加工制作和提升支架设计，通过虚拟施工进行主体结构和钢连廊提升和平移干涉构件进行识别，对施工工艺总体流程进行了模拟分析，分析计算钢连廊牛腿支座卸载就位过程中的支座反力，为钢连廊全过程施工控制提供了技术指导和支撑。

经中国科学院上海科技查询咨询中心查新咨询和上海市住房和城乡建设管理委员会组织专家验收，项目综合技术总体上达到国际先进水平。授权发明专利 1 项，授权实用新型专利 11 项，申请发明专利 6 项，获上海市级工法 1 项，发表期刊论文 7 篇，获得上海建工集团科技成果一等奖 1 项，上海市工程建设优秀 QC 成果一等奖 1 项，上海市建设工程优秀项目管理成果一等奖 1 项，第 31 届上海市优秀发明选拔赛金奖，上海市建设协会“示范项目、创新技术”奖和上海建筑施工行业第四届 BIM 应用大赛二等奖。

项目的整体成果在上海松江 G60 科创云廊一期新建生产及辅助用房项目中得到了应用，因地制宜改进优化了多种施工工艺，为类似的高空钢连廊工程的施工提供了丰富的参考经验，经济及社会效益显著。

完成单位：上海建工七建集团有限公司、上海建工集团股份有限公司、上海临港松江高科技发展有限公司

完成人：陈喆、金翔鹰、孙韩盛、毕政根、胡奕、吴素红、邓伟、张源、余向辉、陈洪帅

城市中心区高层建筑改造关键施工技术 研究与应用

既有建筑市场体量较大,2008年以后,中国建筑的维护、加固和改造需求量年增长近50%。据统计,我国现有既有建筑的总量约613亿平方米,但真正的节能建筑不超过100亿,还有500多亿的既有建筑,且每年新增量约20亿平方米。国家发布优化存量政策以来,通过改造而获得绿色建筑标识的既有建筑面积仅为307万平方米,占比不足0.7%,建筑加固改造行业存在巨大的发展空间。

面对城市化进程的快速发展、资源储量有限的现状,“大拆大建、用后即弃”的粗放型建设方式和“拉链式”缝缝补补的改造方式,已不能适应新时代“高质量、绿色发展”战略需求。“存量优化和新建提升并举”的新型建设方式,是建设领域落实绿色发展、解决重大民生问题的重要途径。推进既有建筑绿色改造将是城镇化与城市发展领域的重要发展方向。

目前对建筑加固改造领域投入较少,加固改造行业处于发展初期,产业链上的多个环节均不成熟。与新建建筑相比,既有建筑改造受到条件限制、改造难度大,拆除、加固施工过程中造成的废弃垃圾、粉尘、噪声及有害气体对周边环境影响大,相关标准、技术、政策、产品、机制等各方面都还有待进一步完善。

本项目基于国家“十三五”重点研发计划示范工程的研究与应用,针对城市中心区高层建筑改造技术开展了多项研究,形成创新成果如下:

1.发明了基于3D扫描技术与MR混合现实技术的建筑结构拆除方法,将3D扫描逆向建模技术应用于既有建筑球形钢网架拆除,将点云数据转化后导入BIM软件,进行三维可视化计算分析,解决了狭小空间球形钢网架拆除的安全问题,降低了施工安全风险。

2.创新了一种塔式起重机安装技术,解决了城市中心区场地狭小条件下垂直运输设备难以布置的问题,加快了施工进度,提高了施工效率。

3.研发了一种加层钢柱柱脚节点施工方法,解决了既有建筑梁柱核心区钢筋分布密集、钢结构加层锚固难的问题。

4.提出了一种既有建筑电梯井道结构加建及其施工措施,实现了既有建筑结构加层垂直运输的需求。

5.开发了BIM技术在既有建筑改造工程中的特色应用,提高了既有建筑改造施工信息化

管理水平。

本项成果于 2021 年 4 月 2 日由北京市住房和城乡建设委员会组织召开了“城市中心区高层建筑改造关键施工技术研究与应用”科技成果鉴定会。鉴定委员会认为：项目研究成果整体达到国际先进水平。

本项目取得发明专利 1 项，实用新型专利 6 项，省部级工法 2 项，科技论文 9 篇，入选专著 1 部，

本项目研究成果在北京航华科贸中心 A1、A2 楼、北京东直门外小街 18 号、天津某部队招标大厅、廊坊市民服务中心等改造项目全周期应用效果良好，通过关键技术和创新技术等合理选用，累计节约工期 300 余天，节省费用 1500 余万元，经济效益显著。

通过对既有建筑综合性能提升与改造，可以在满足使用者对既有建筑功能和环境不断提升需求的同时最大限度地节约各种资源，提高建筑的安全性、舒适性，利于促进建筑行业朝着绿色、集约的方式转型发展，对转变城乡建设模式，缓解城市发展的资源供需矛盾，具有十分重要的意义和作用。在既有建筑改造的同时，结合绿色施工技术和废弃物的充分利用，可大大降低建材的使用量，减少建筑垃圾，保护环境，符合可持续发展的绿色建造理念。

完成单位：中国建筑一局（集团）有限公司、中建一局集团华北建设有限公司

完成人：王玉泽、陈 蕾、童 晶、张福江、王 玲、肖晓娇、刘登辉、赵志宇

受限空间大跨钢桁架经济建造关键技术 研究与应用

为了充分利用空间，更多的设计师喜欢在建筑内部设计大跨度钢桁架。随着国家对钢结构建筑的大力支持、地下大空间的持续利用和市场竞争的日趋激烈。大跨钢桁架的建造方法和建造经济性均受到了挑战。与此同时，为了升华建筑效果，在大跨度钢桁架下部设计下沉广场、半架空层或大高差结构造型的情况愈来愈多。此类大跨钢桁架的安装总面临着大型移动式吊装设备无法驶入、没有大型拼装场地和空间、采用整体提升、结构滑移等方法建造时措施费占比巨大等问题。

中建五局第三建设有限公司成立了《受限空间大跨钢桁架经济建造关键技术研究与应用》研究组，以长沙黄花综合保税区进出口商品展示交易中心、长沙爱尔眼科大厦、驻马店市青少年宫科技馆综合体建设 PPP 工程项目为依托，研究与开发的具体内容如下：

1. 重型大跨钢桁架均衡定荷分段及节点深化技术研究与应用；
2. 新型多功能支撑胎架连续精准调控技术研究与应用；
3. 受限空间可调点式支撑技术研究与应用；
4. 重型大跨钢桁架安装全过程虚拟预拼装及监测控制技术研究与应用。

本研究项目紧密结合国家大力发展装配式钢结构的背景，开展了受限空间重型大跨钢桁架经济建造关键技术研究，总结了重型大跨钢桁架均衡定荷分段及节点深化技术、新型多功能支撑胎架连续精准调控技术、受限空间可调点式支撑技术、重型大跨钢桁架安装全过程虚拟预拼装及监测控制技术等一系列技术。获得了发明专利 2 项、实用实型专利 7 项，省部级工法 3 项、参编标准 2 项、合著 1 项、核心论文 15 篇、BIM 成果 7 项等一批具有自主知识产权的技术成果。形成的主要创新成果如下：

1. 提出了受限空间重型大跨钢桁架均衡定荷分段、快速安装节点的建造方法，形成了重型大跨钢桁架均衡定荷分段及快速节点建造技术，解决了受限空间下重型大跨钢桁架安装的难题，实现了重型大跨钢桁架在受限空间下的建造综合效益。

2. 提出了挠曲线下驻点处点式可调点式支撑和新型多功能支撑胎架连续精准调控技术，解决了受限空间下支撑精准调节以及支撑胎架拆除的难题。

3. 提出了重型大跨钢桁架在受限空间下安装全过程虚拟预拼装和监测技术，保障了受限

空间下重型大跨钢桁架杆件拼装、高空组对的成型精度要求，解决了重型大跨钢桁架杆件拼装、高空组对累积误差同步消除的难度，实现了受限空间下重型大跨钢桁架建造一次成优。

2021年3月25日，中国建筑集团有限公司在长沙组织召开了项目科技成果评价会。评价委员一致认为，该成果整体达到国际先进水平。

本项目的研究成果解决了受限空间下大跨钢桁架的安装时大型移动式吊装设备无法驶入、没有大型拼装场地和空间、采用整体提升、结构滑移等方法建造时措施费占比巨大等难题。同时又缩短了工期，降低了造价。在发挥着巨大的社会效益的同时也产生了显著的经济效益。对类似工程有重要的理论指导意义和实用价值。其中，长沙黄花综合保税区进出口商品展示交易中心和驻马店市青少年宫科技馆综合体建设PPP工程项目分别获得第十四届一批中国钢结构金奖。

完成单位：中建五局第三建设有限公司

完成人：戴超虎、蒋卫、何杰、刘艳华、陈学永、张位清、黄虎、赵春林、吴智、曾波

滨海文化中心大型城市文化综合体

关键施工技术研究与应用

随着我国城市化进程的发展和人们文化消费能力的提高，由剧院、科技馆、图书馆等公益文化场所组成的文化中心综合体越来越多的出现在现代城市的核心区域，它具有如下特点：①城市空间参与者文化体验丰富；②结构类型多样，造型复杂，高大空间多；③业态功能多样，不同业态的温湿度、灯光、声学等要求各不相同；④平面面积大、工期紧、专业多，管理要求高。本技术成果依托天津市滨海新区文化中心进行创新总结，为后续类似工程提供借鉴。

滨海文化中心是新区“十大民生工程”之首，是滨海新区核心区开发建设重点工程，项目位于天津自由贸易试验区内。工程总建筑面积 31.2 万 m²，以天津滨海文化中心项目为载体，形成了一整套文化中心综合体关键施工技术：

1.研发了高大独立伞形钢结构安装单柱对称技术、排柱对顶组合吊装的自平衡技术，将伞形自平衡体系分为支撑柱、伞座、一段弧形梁、二段弧形梁、屋面梁五部分，共计 64 个拼装单元进行安装。安装完成后复核最大变形量 23mm，解决了独立支撑的伞形结构施工难题。

2.研发了 3200 吨、54m 跨、11m 高特大跨度连体桁架结构整体提升技术，采用变频传感智能监控技术，通过泵源系统控制液压提升器将组合结构同步提升就位，解决了复杂环境下的重型大跨钢结构安装难题

3.探索馆椎筒结构，研发出大角度锥筒支撑柔性拉杆安装技术和“米”字辐射梁结构无支撑安装技术，通过人字形斜向转换节点安装、三维空间定位等技术手段，采用临时支撑将米字节点安装到位后，再安装辐射梁的方法。

4.研发了自由冷暖智能化中央空调系统，实现同一套系统中室内机同时制冷和制热的需求，小巧的室外机机身与探索馆的独特风格融为一体，提供空间舒适性的同时达到高效节能的目的。

5.创新应用剧场结构自反声技术，依靠结构墙面自反声、“透明”格栅装饰，既可保证设计声学混响时间要求、又能降低造价。

6.施工阶段远程能耗综合管理系统，通过对现场能耗实时监测，实现对电路的优化、设备合理布置、降低能源损耗，形成了一项具有能耗数据实时采集、数据整理与分析、报表制

作、分类分项对比等功能的综合技术。

7.基于 BIM 的无人机+AR 进度管控、三维扫描、VR 等技术的创新应用，为专业配合提供串联协同，为组织管理提供分析优化，提高了项目可视化、数字化等信息化管理水平。

2020 年 8 月 25 日，由天津市科学技术信息研究所对“大型城市文化综合体关键施工技术研究与应用”进行了查新，查新结论：经检索，国内外未见与本查新项目研究内容相同的大型城市文化综合体关键施工技术研究与应用文献报道。

2021 年 3 月 26 日，相关技术经天津市建筑业协会组织专家进行科学技术成果评价，评价委员会一致认为，该成果达到国际先进水平。

本项目形成省部级工法 2 项、授权专利 17 项（发明专利 2 项）、发表论文 58 篇。同时获得中国建设工程鲁班奖、全国 AAA 示范工地、全国绿色施工示范工程等多项荣誉。迎接了国内外相关单位 15000 余人次的观摩交流，受到社会各界的广泛好评与关注。

通过科技开发与技术创新，项目科技进步效益达 1438.32 万元。该综合技术已在天津国际金融会议中心、北京新机场、国家会展中心等项目成功应用，具有广泛的应用推广前景。

完成单位：中国建筑第八工程局有限公司

完成人：周志健、宋素东、覃 琨、沈禹光、王 乾、王岩峰、李 勇、韩 阳、杨帆、肖 龙

超高层结构快速高效施工成套综合技术研究

目前，国内在建 300 米以上超高层建筑多数采用“外框架+混凝土核心筒”的结构体系，通常采用核心筒先行，外框架后施工的“不等高同步攀升”的施工组织形式，针对核心筒结构施工可以有爬模、提模、滑模、顶模等工艺，其中顶模为大吨位、长行程液压油缸整体系统顶升，在整体性、安全性、工期等方面优势明显，已成为超高层建筑建造技术的主流施工工艺。但是传统顶模多数为核心筒竖向结构领先施工，其水平结构单独组织滞后竖向结构 4~7 层进行施工；要么与外框架水平结构同步施工，滞后核心筒竖向结构 10~15 层。这两种方式不仅使得核心筒水平结构施工组织难度大，而且机电设备安装、电梯安装等后期的关键工序无法及时穿插，导致不能有效利用前期竖向结构高效施工的工期优势。

为此，本项目以南宁市龙光世纪、天龙财富中心等项目为依托，创造性提出了轻型化、装配式的顶模技术，最大限度实现顶模竖向和水平结构同步施工，并对与其配套的大型机械设备进行系统研究，形成一套完整的超高层结构快速高效施工成套综合技术，主要创新内容如下：

1.主体结构互补型成套施工技术，其中包括：（1）核心筒钢铝轻型贝雷架装配式顶模系统研发，与传统顶模相比，节约钢材，标准件可循环周转使用，提高了材料的使用率，节约成本，保护环境。（2）超高层核心筒竖向与水平同步施工技术，有效解决了传统顶模工艺中核心筒水平结构需滞后施工的难题，首次高效的实现水平结构与竖向结构同步施工。（3）超高层核心筒局部结构逆做设备与技术，创造性的实现了多层楼板连续逆作施工，提高了施工效率及自动化水平。

2.超高层大型设备综合配套技术，其中包括：（1）外挂式塔吊不等高同步设计、不等高同步爬升施工技术，实现了外挂塔吊错层的固定流水步距爬升及倒运方式。（2）施工电梯双导柱、大悬臂钢结构基础及其高空状态下原位转换技术，解决了施工电梯直达顶模平台的难题。

3.超高层多系统融合快速建造技术，主要包括：（1）内筒多图融合、两构同步技术，（2）多专业错层流水施工组织技术。

经过鉴定，该项成果整体达到国际先进水平，其中核心筒顶模系统水平与竖向结构同步施工技术成果达到国际领先水平。

获得发明专利 2 项，实用新型专利 3 项，省级工法 4 项，华夏建设科学技术奖三等奖 1 项。

多年来，项目组通过不断的技术优化与设备革新，形成了技术成熟、管理先进的超高层结构快速高效施工方法与技术体系，该项技术已在多个项目中取得了良好的经济与社会效益，节约了工期与成本，项目研究成果可以推动我国超高层建筑施工高效化，符合可持续发展理念，具有良好的推广应用价值。

完成单位：中建三局第一建设工程有限责任公司

完成人：张少林、李 国、杜君子、李文睿、李 直、薛 宇、陈 波、张 楠、夏志材、任绪强

高层吊脚楼设计与施工关键技术研究及应用

我国地形复杂多样。在我国五种地形类型中，占我国陆地面积比例最大的是山地（33%），其次为高原（26%）、盆地（19%）、平原（12%）、丘陵（10%）。伴随国家“西部崛起”战略，我国西南部重庆、贵州、云南、广西等地区，山地建筑呈现高层、高密度建设趋势。高层吊脚楼作为山地建筑中的一种特有的结构形式，由于其依山而建不改变坡地环境、对山体及周边环境影响小、节约土地资源等优势，近年来发展迅速，但又因其刚度分布不均匀、所处陡坡环境复杂，对结构设计、边坡稳定、施工组织带来了巨大挑战。

本项目针对高层吊脚楼抗震设计及减震技术、所处不连续高边坡综合防护技术、高层吊脚楼群施工技术展开系统研究，形成三大创新技术：

1. 高层吊脚楼抗震分析及减震设计技术

通过静力弹塑性分析，首次揭示了加强高层吊脚楼第一层结构刚度的机理；并提出了高层吊脚楼沿高度渐进加强的设计优化理论。此外，引入弹簧单元模拟桩-土之间非线性动力相互作用，给出了坡地走向与吊脚楼层方位的最不利状态；并提出调整设计方位等安全设计建议。针对吊脚楼刚度分布不均匀，提出了基于现象学的自复位计算模型，发明了吊脚结构自复位减震技术和基于楼层阻尼耗能需求的阻尼器优化设计方法，设计了新型自复位梁柱节点形式，有效解决了高层吊脚楼受力复杂和抗震不足的难题。

2. 不连续高边坡综合防护技术

首次提出不连续多级边坡全过程动态施工技术，实现了边坡开挖、建筑物修建和回填等不同荷载变化下多级边坡的整体安全稳定。提出基于地质调绘辅以勘察的边坡土石方量进行估算的方法，解决了复杂环境边坡土石专项勘察时坡面无法布点难题；研发了一种边坡复绿美化装置及美化方法，有效实现了边坡绿化由平面向立体的完美过渡；提出山体高边坡施工材料运输装置，解决了超高边坡的材料运输难题。

3. 高层吊脚楼群施工技术

针对高层吊脚楼周边所处陡峭环境，开发了一套考虑吊脚部分及背面回填协同作用的高效、安全的高层吊脚楼单体施工技术。开发了山坡塔吊基础施工装置等工具及施工方法，加快了陡坡条件下材料周转。同时，结合工程地势走向及吊脚楼分布，开发了一种多级陡坡条件下高层吊脚楼群施工规划方法以及一种进度控制方法，并通过分阶、分区、分步、分时确定及优化陡坡条件下的吊脚楼群荷载增加方式（施工速度差值按最小值为 $100\%/n+5\Delta$ 数值控制），平

衡整个陡坡区域内荷载分布，保证吊脚楼群和边坡的整体安全。

本项目获授权发明专利 12 件；授权实用新型专利 8 件；发表国内外论文 9 篇（其中被 SCI、EI 收录 6 篇，全国中文核心期刊 3 篇）；获省部级工法 2 项；2 项科技成果通过省部级鉴定（1 项国际先进、1 项国内领先）。

本项目先后在重庆万硕、贵州望谟等项目上应用，解决了高层吊脚楼建造技术难题，施工安全、可靠，工期节约 10%，同时，填补了该领域的技术空白，为国内外同类工程的建造提供了成套解决方案，对推动山区山地建筑安全、高效、绿色发展具有重要意义。

完成单位：中国二十冶集团有限公司、重庆大学、上海二十冶建设有限公司

完成人：徐 宁、杨 溥、贾传果、原育兵、赵建立、郑永恒、谢 非、谷科路、武猛、徐长会

湖相地层中超高层建筑百米级基桩 关键技术及应用

当前城市超高层建筑建设日益增加，要求建筑物桩基础承载力更高，建筑物基桩长度甚至达百米以上，但湖相地层中超高层建筑百米长度级基桩技术仍处初步发展阶段，缺乏相关工法和经验。为解决湖相地层中超高层建筑百米级基桩施工中桩成孔难、沉渣清理难、试桩难，以及沉渣厚度、桩身垂直度、桩承载力控制难等难题，本项目依托高原湖相地层场地昆明“春之眼”商业中心桩基础工程（桩径 1.0m、基桩最长 102m）等工程，形成了湖相地层中超高层建筑百米级基桩成孔技术、桩底沉渣控制及后注浆技术、桩身质量控制及检测技术、承载力测算及 3200 吨级载荷试验技术、基桩设计方法与沉降控制技术 5 项关键技术，并取得了工程示范，解决了湖相地层中超高层建筑百米级基桩理论、设计和施工等重大问题。项目主要创新成果包括：

1.研发了湖相地层中超高层建筑百米级钻孔灌注桩基桩施工专用设备及机具，集成了湖相地层中超高层建筑百米级钻孔灌注基桩施工专用设备，突破了湖相地层中超高层建筑百米级基桩施工设备瓶颈。

2.研发了湖相地层中超高层建筑百米级基桩系列工法及关键技术，提出并实施了湖相地层中超高层建筑百米级基桩整体施工技术。

3.研制了湖相地层中超高层建筑百米级基桩专用质量检测装置，提出了承载力测算、质量控制及检测技术，首次在高原湖相地层场地开展了百米级基桩 3200 吨级极限载荷试验。

4.总结了湖相地层场地工程勘察方法，揭示了云贵高原湖相地层场地土层分布特征及超高层建筑百米级基桩承载变形特性；研制了湖相地层中百米级基桩振动沉桩试验物理模型，创新了复杂湖相地层中高层建筑百米级基桩单桩设计、群桩基础设计方法与沉降控制设计技术，解决了超高层荷载不完全对称及岩层表面起伏引起的超高层建筑主塔楼倾斜问题。

项目获发明专利 2 项，公开发明专利 3 项，获实用新型专利 13 项、软件著作权 1 项、省部级工法 6 项，参与起草行业标准 2 项，出版专著 1 部，发表论文 12 篇，获省级科技进步三等奖 1 项、地厅级科技进步一等奖 1 项、省级优秀工程勘察设计奖 4 项、地厅级科技示范工程项目 1 项。

目前，项目成果已成功应用于昆明“春之眼”商业中心桩基础工程、武汉中心桩基础工

程、昆明滇池国际会展中心 4 号、8 号地块桩基础工程等工程。项目成果可推广应用于建筑、交通、水利、能源工业高层建筑、水工结构、桥梁桩基础领域。2015 年 6 月至 2020 年 3 月，成果应用已新增合同 11.99581 亿元、获利润 12880.74 万元、节省成本 7092.08 万元，成果应用产生了良好的经济、社会和环保效益。

2021 年 4 月 28 日，云南省建筑业协会科学技术委员会对该项目成果的评价意见为：“该成果已在依托工程中成功应用，经济社会效益明显，该成果达到国际先进水平”。

完成单位：云南建投第一勘察设计有限公司、云南省建设投资控股集团有限公司、华东建筑设计研究院有限公司、云南大学、昆明军龙岩土工程有限公司

完成人：刘克文、谢建斌、吴江斌、王 勇、王剑非、翁彦梅、普国泰、贾荣谷、张颖、谢林冲

深大基坑自动化监测及智能化预警系统技术

本单位依托日益提高的计算机技术以及日臻成熟的各种监测设备、采集技术、无线传输技术，研究了一套集自动化、智能化为一体的基坑、盾构隧道监测及预警系统，实现了监测数据即时连续的自动采集、远程无线传输、自动分析处理以及智能化的预警反馈，保证了在各种气候条件下基坑形变状态 24 小时连续监控，极大地提高了基坑监测的施工效率，减少了人员成本的投入。

1. 主要技术内容:

(1) 深大基坑监测数据自动化采集及传输技术研究；(2) 监测数据整理与分析技术研究；(3) 深大基坑智能化及 3D 动态模型预警技术研究；(4) 面向暗挖隧道、盾构收敛的自动化监测技术。

2. 主要技术成果:

(1) 开发了一项监测数据的自动采集系统，研制了监测数据采集器、光电式应力计，实现了监测数据的实时采集。(2) 提出了一种异常数据自动识别及筛除方法，对采集及传输过程中产生的无效数据进行识别与清洗，提高了监测数据的可靠性。(3) 研发了智能化预警反馈闭环处理技术及深大基坑 3D 模型动态预警技术，实现了所有现场监测点及预警情况的全方位立体展示。(4) 研发了一种盾构收敛监测传感器、一种基于力矩式夹角测量的隧道收敛在线监测装置，实现了盾构管片变形的自动化监测。

3. 授权专利情况:

获得“光电式应力计”(专利号: ZL201310566190.9)、“基坑自动化监测异常数据识别方法”(专利号: ZL201410196639.1)、“一种基于力矩式夹角测量的隧道收敛在线监测装置”(专利号: ZL201611037330.3) 3 项发明专利;“无线低功耗的深大基坑数据采集器”(专利号: ZL20140123369.7)、“无线低功耗的深大基坑数据采集箱”(专利号: ZL201420123367.8) 等 4 项实用新型专利;“深大基坑自动化监测及智能化预警系统 V1.0”软件著作权 1 项。

4. 工法、标准规范情况:

《深大基坑自动化监测及智能化预警施工工法》获评省级工法。

5. 技术经济指标及推广应用情况:

研究一套集自动化、智能化为一体的基坑监测及预警系统，实现了监测数据即时连续的自动采集、远程无线传输、自动分析处理以及智能化的预警反馈，减少人工投入，可直接节

约监测人工成本 70%。

此项技术在在郑机城际新郑机场车站工程和长沙地铁 4 号线基坑监测中成功应用，取得了良好的经济效益和社会效益，该技术处于国际先进水平，为今后类似工程施工提供了成功的范例，具有广阔的推广前景。

完成单位：中铁四局集团有限公司、中铁四局集团第一工程有限公司

完成人：何宏盛、周健宝、林冬、何佳明、赵风岭、张波、罗盼璇、梁秀春、张宏斌、程静敏

预应力索网与格构式支撑组合柔性旋转平台 施工技术

本工程为武威万达广场工程，由地下 1 层及地上 4 层的商业综合体广场组成，总建筑面积约 10.34 万 m²。本工程采光顶为环形，长度超过 400m，主要由长廊、椭圆和正圆中庭构成，采光顶高度最低处 20.7m、最高处 27.2m；屋顶采光顶采用钢结构支撑，上部铺设中空钢化玻璃和铝板岩棉。

预应力索网与格构式支撑组合柔性旋转平台施工技术，是把采用型钢制作的格构柱布置在正圆、椭圆中心处，格构柱为租赁的塔吊标准节，可降低使用成本，顶部制作一个固定平台，用于钢结构中心的圆环固定及精确定位，同时用于临时承重，在软平台上构建可伸缩式旋转操作平台，以格构柱平台为圆心旋转移动使用。

本工程业主采用的是万达集团 18 个月模块计划，并且本工程 1 个月提前开业，因绝对工期与模块周期存在差异，地下一层地上四层主体，单层面积大，施工周期短，主体结构封顶工期节点紧张，为保证后期安装及装修等节点按模块工期顺利完成，势必导致大量专业分包进场时间提前，对招采、工作面移交及分包协调等工作造成巨大压力。

传统施工方法的支撑体系主要是采用钢管扣件式脚手架、占地大、工期长，不能满足 BIM 总发包项目的工期需要，尤其在椭圆、正圆中庭部位，安全性要求高，密切影响其他专业的施工。由于工期短、穿插作业大，采取传统的满堂架搭设无法保证工期、造价高、无法解决采光顶断水问题，并且频繁发生采光顶 LOW-E 玻璃自爆现象，单纯的格构柱无法保证安全性。采用预应力索网与格构式支撑组合柔性旋转平台施工技术，无需搭设高度超过 25 米的支撑架体，能减少周转材料租赁、节省人工；格构柱采用塔吊标准节租赁使用，材料易得、成本较低；木方模板采用主体结构拆除的废旧木方模板，重复利用；软平台采用预应力钢丝绳搭建，组装、拆除速度快，能有效节省工期；平台搭建完成后，封闭严密，可以规避上方作业坠物，安全、可靠，组合旋转可伸缩式小车可在软平台上旋转减少脚手架的搭设，给平台减轻重量；施工过程中下方可以正常通行，不影响室内交通路线，为其他专业施工提供充足的操作空间。在成本及工期上有很大的节约，并保证了施工质量及安全管控。预应力索网与格构式支撑组合柔性旋转平台施工技术为国内首次推广使用，给钢结构采光顶施工带来了极大的便利。

国内传统施工方法的支撑体系主要是采用钢管扣件式脚手架、占地大、工期长，不能满足 BIM 总发包项目 13.5 个月的工期需要，尤其是椭圆、正圆中庭部位，因此在综合考虑下，采用预应力索网与格构式支撑组合柔性旋转平台施工技术解决了项目的施工难题。

与传统工艺相比，省了搭设钢管支撑架的时间，格构柱标准节吊装和拆除只需 1 天/个，钢丝绳敷设和张拉需 1 天/个，吊装和拆除共节约工期 20 天以上。

经广东省情报信息所鉴定，国内未见与该技术相同文献报道，经河南省工程建设协会评价，达到国内领先水平。本项目获得省级科技奖 1 项，省级工法 1 项，获得国家发明专利 1 项，实用新型专利 2 项，软件著作权 1 项，科研论文 1 篇。项目获得甘肃省建设工程飞天奖，甘肃省建设工程文明工地，全国建设工程施工安全生产标准化工地。

本技术在武威万达广场成功进行应用，正圆、椭圆中庭穹顶采光顶施工不但速度快、质量好，保证了如期完成，同时也减少了空间的利用，为后续其他工序的开展提供了较好的条件，利于大规模使用，所有综合体的采光顶工程均可大规模推广使用，也可用于类似工程。

完 成 人：王山峰(中建二局第二建筑工程有限公司)、王富强(中建二局第二建筑工程有限公司)、葛长江(中建二局第二建筑工程有限公司)、李四化(中建二局第二建筑工程有限公司)、唐洪波(中建二局第二建筑工程有限公司)、孙鹏飞(中建二局第二建筑工程有限公司)



能源和工业篇

喜马拉雅地区复杂地质隧洞双护盾 TBM 关键技术

一、项目背景

喜马拉雅地区水能资源丰富,雅鲁藏布江下游(简称雅下)水电可装机容量相当于3个三峡工程,是资源最为富集的区段。雅下水电开发已作为国家重大战略工程,列入十四五规划纲要。雅下水梯级电站位于喜马拉雅山脉东麓,山势险峻、河谷深切,构造运动活跃,地应力极高,地质条件极其复杂,自然条件十分恶劣,世属罕见。引水发电与交通系统隧洞规模宏大,单体隧洞长达34.6km, TBM成为了长大隧洞工程建设的首选。

本项目依托的多雄拉隧洞,全长4789m,构造应力38MPa,是雅下水电开发的前期工程,也是解决隧洞TBM施工关键难题的试验工程。基于研发团队丰富的TBM实践经验,优选效率高、安全性好的双护盾TBM施工,重点针对雅下工程极强岩爆、挤压大变形等世界级难题,系统开展了超前地质预报、超前卸压、自适应TBM装备和衬砌结构型式等四方面研究工作,形成了高地应力隧洞双护盾TBM施工关键技术体系,实现了工程安全优质高效施工,为雅下长大隧洞施工方案确定和实施提供了全面支撑。

二、主要创新点

创新点 1: 研发了超前地质预报新技术、新装置,创建了双护盾 TBM 综合超前地质预报技术体系。

一是研发了基于岩渣分析的原岩地质条件反演新技术,研制了岩渣取样和自动筛分新装置。二是针对双护盾 TBM 空间封闭的特点,发明了实时动态盾体围岩性态和收敛变形扫描观测系统,研制了超前地质钻探、掌子面岩体强度测试新装置。三是开展了双护盾 TBM 超前地质预报技术适应性研究,提出了由宏观到微观、由远及近、定性与定量分析相结合的多维度综合分析超前地质预报技术体系。上述成果,提高了双护盾 TBM 地质预报的精细化水平。

创新点 2: 研制了成套装置,首创了双护盾 TBM 条件下的高地应力围岩卸压技术。

一是基于微震监测和引力搜索算法,提出了岩爆等级预测和定位方法,为超前卸压处理提供依据。二是提出了不同等级岩爆预卸压技术。对中等烈度岩爆采用钻孔卸压,对高烈度极强岩爆,需采用钻孔爆破方式释放应力。三是研制了双护盾 TBM 双断面全周向钻孔成套装置,研发了钻孔超前卸压技术。上述成果,破解了双护盾 TBM 条件下高地应力围岩卸压的技术难题。

创新点 3: 研制了双护盾 TBM 新型自适应装备,首创了双护盾 TBM 管片衬砌与锚喷支

护转换模式。

一是研制了阶梯形新型盾体结构和刀盘抬升扩挖机构（最大扩挖量达 50cm），提升了双护盾 TBM 适应围岩大变形的防卡能力。二是研制了双护盾 TBM 大脱离行程内外盾结构，提出了卡机脱困快速施工工法。三是研制了世界首台“双护盾 TBM+锚喷”的一体化装备，提出了管片衬砌与锚喷支护的快速转换成套技术，有效降低了隧洞衬砌结构成本。上述成果，提升了双护盾 TBM 应对复杂地质条件的能力。

创新点 4：研制了多种管片衬砌结构型式，构建了不同地应力条件下的衬砌技术。

一是针对不同岩爆和挤压变形级别，研制了管片衬砌回填柔性释能新技术，降低了岩爆、挤压变形对衬砌结构的影响。二是研发了恒载锚杆+管片的新型联合衬砌支护结构及施工方法，提高了衬砌结构的承载能力。三是提出了适应不同地应力水平的管片型式，研制了破裂围压达 6MPa 的双护盾 TBM 新型钢结构管片。上述成果，保障了高地应力条件下的隧洞结构安全。

项目研究获得发明专利 13 项、实用新型 6 项、软件著作权 1 项，省部级工法 5 部，主编行业标准 1 项，出版专著 1 部，发表核心论文 14 篇。

三、国内外同类技术水平对比

经技术查新和国内外技术对比，本项目形成的多项技术均为首创或国际领先。成果经冯夏庭、邓铭江院士和史玉新大师等专家鉴定，认为“研究成果在复杂地质条件双护盾 TBM 施工技术上取得突破，达到国际领先水平”。

四、推广应用及经济社会效益

项目成果在依托工程成功应用，并在北江引水等工程推广，产生直接经济效益 1.6 亿元，间接效益 2 亿元。同时作为派镇与墨脱公路交通项目的高难度工程，对墨脱县经济发展、民生改善、乡村振兴战略实施起到极大促进作用。

项目成果解决了雅下水电开发面临的重大技术难题，有力推动了水利水电行业技术进步，对跨流域大型调水工程、高原地区基础设施和国防建设等类似工程具有重要借鉴作用，经济社会生态环保效益显著，推广应用前景广阔。

完成单位：中国水利水电第十工程局有限公司、华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司、成都理工大学、中国铁建重工集团股份有限公司、中铁十九局集团第二工程有限公司

完成人：陈茂、李超毅、郝元麟、秦鹏翔、韦猛、刘勇、苏小明、程锦中、徐应中、刘绍宝、张世殊、傅支黔、邓兴富、余挺、王泽林、陈炜韬、杨洋、王利、徐立新、张龙斌

海上风机结构多源动力分析方法及全寿命设计技术

海上风能资源开发是我国实现能源结构调整和能源转型的重要途径，海上风电已成为我国战略性新兴产业，近年来发展迅猛，相关设计开发技术进步迅速。然而，海上风电开发所面临的海洋环境严酷，工程设计除需考虑常规的风、浪、流荷载外，还需考虑台风、地震等灾害荷载的严重影响。传统的陆上地质勘察技术及界面强度评价体系已不适用，如何实现复杂海洋环境条件下海床土的准确测试及参数评价，关系到工程建设及运行安全；在海洋环境、风机及地震等动力耦合作用下，风机基础倾覆力矩急剧增大、多个关键部位高度应力集中等问题突出，传统的基于荷载线性叠加的半整体设计技术，难以揭示多源融合作用下的多场耦合效应；海床土体及风机基础在施工安装期和在位服役期分别经历不同机制的动力作用，引起的承载弱化及结构疲劳缺乏量化评价方法，给海上风机全寿命设计及运行安全保障带来巨大挑战。

本项目在 6 项国家级课题的支持下，针对上述技术挑战开展研究攻关，在海上风机结构多源动力分析方法及全寿命设计技术方面取得了显著创新：

1.研发了复杂应力路径及温度环境下软黏土强度评价系列技术，首创了复杂海洋环境海床土多场耦合作用下基础-土体的界面力学特性测试及分析技术，构建了用于海上风机基础设计的系统性地质参数获取、分析和评价体系。

2.首创了浪致海床土体渗蚀弱化定量评价方法，提出了兼顾土体弱化及界面软化的桩基退化分析模型，创新建立了海洋桩基动力受荷相互作用计算方法；构建了多源受荷海上风机结构动力响应工程计算方法，构建了包含众多耦合项的海上风机结构动力响应高精度分析方法。

3.创新建立了施工安装过程中桩基和吸力桶与土体动态响应弱化评价方法，研发了海上沉桩施工和桶基负压沉贯动态控制方法；构建了服役过程风浪联合作用全方位疲劳评估方法，创新构建了包含施工期和服役期的海上风机结构全寿命周期设计分析方法。

浙江省科技信息研究院对本项目海上风机结构多源动力疲劳分析及全寿命设计技术进行了科技鉴定，鉴定结果如下：该技术特点除委托单位和协作单位的相关文献部分涉及外，在上述所检其他国内外文献中，未见具体报道。

项目技术成果已成功应用于数个海上风电项目全过程工程建设之中，积累了丰富的海上风电工程建设经验，研究成果填补了多项技术和标准空白，推动了海上风电行业的科技进步，助力了项目所在地的产业结构调整，有效促进了地区经济发展，具有推广应用前景。

完成单位：中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、浙江大学、江苏海上龙源风力发电有限公司、大连理工大学

完成人：王 滨、国 振、沈侃敏、季晓强、王宽君、李 昕、章杞龙、高 山、芮圣洁、周文杰、张 杰、梁 宁、李 瑜

城市密集区叠合上盖建筑的超高压地下 变电站建设关键技术与应用

在城市中心建设超高压地下变电站既是提高电网供电可靠性、提升土地利用效率的最佳方式，也存在诸多世界级难题。虹杨 500kV 变电站工程位于上海城市密集区，场界为高敏感环境，建设方案经历了“户外站→户内站→地下站”的演进。在本项目之前，世界仅两座 500kV 地下变电站，均为圆形建筑设计，但虹杨站受地块形状和退界局限，圆形设计不具备可行性。此外为提高土地利用效率，虹杨站是国内第一个上盖建筑的 500kV 地下站。本项目依托产学研用协同攻关，攻克了矩形地下空间布局受限、叠合建筑功能冲突、周边环境敏感等现实问题，高质量建设了世界首个矩形设计、叠合上盖建筑的超高压地下变电站。主要创新点如下：

1.首次提出了基于多因素的紧凑型超高压地下变电站空间拓扑设计方法，结合首创的复合立体接地网、自主研发的世界最大容量 750kV 小型可移动式金属封闭耐压局放成套装备、国内首套 GIS 微型洁净安装系统，实现了全球首例矩形平面的 500kV 地下变电站，占地面积比同类工程缩减 14%以上；

2.提出了解决联建建筑非通柱异构结构和弱抗震性能的转换层设计技术，研制了高落差（约 45m）上下分体水冷系统，创建了联建地下站消防安全体系，形成了超高压地下站-上盖建筑的竖向空间多安全要素配置方法，提升了地震、施工和火灾工况下本质安全水平；

3.开发了视觉低冲击的逆作法施工工艺和软土地层的基坑周边环境变形计算、预测与控制技术，提出了自防水性能混凝土和温度裂缝结构治理相结合的渗漏水病害防治技术，研制了控制设备噪声传递的阻断方法和装置，实现不利影响精准控制的环境友好型变电站，保障工程高效平稳实施；

4.首次实现超高压地下变电站基建全过程技术体系及应用系统建设。基于自主开发的电网工程数字化设计平台，实现紧凑型最优方案的全域自动搜索与施工仿真验证方法；建立了多专业多平台数据无损转换技术，实现跨专业跨平台数据和信息共享；首次搭建超高压地下变电站工程全景监控平台，打通现场感知数据与数字模型信息同步及映射关联。

本项目研究成果包括专利 39 项（发明专利 12 项），论文 37 篇（核心及以上 21 篇），国家和行业标准规范标准 3 部，专著 1 部，省部级工法 2 项，软件著作权 3 项。开发的数字化系统平台通过权威机构评测。项目成果经中国电力企业联合会鉴定为“国际领先水平”。

本项目研究成果已全面直接地应用于 500 kV 虹杨变电站工程、220 kV 即墨变电站工程等一批与上盖建筑结合的地下变电站建设中，累计产生经济效益超 11 亿元。其中虹杨站荣获建筑工程鲁班奖、中国电力优质工程和中国电力优秀工程设计一等奖。项目被《文汇报》、《国家电网报》等多家知名媒体广泛报道，从周边环境保护、生态绿色工程、上下叠合建设、智能高效运维、综合性能国际领先等方面给予了高度评价。在杭州、宁波、洛阳和雄安新区等一批城市中心区域的各电压等级地下变电站工程中得到应用，也取得了显著的经济、社会和环境效益。

完成单位：上海电力设计院有限公司、国网上海市电力公司、上海送变电工程有限公司、中国电力科学研究院有限公司、华东电力试验研究院有限公司、华东建筑设计研究院有限公司

完成人：叶 军、王固萍、王 斌、李宾皑、马 骏、褚 强、姜 波、王晓锋、周筱晟、钱 毅、吕征宇、周 亮、贺 雷、高 凯、翁其平

复杂地质条件下深部凿井水害防治关键技术 研究与应用

煤炭为我国最主要的能源，其中深部煤炭资源储量大，开发面临诸多技术难题。项目研究基地平顶山煤田为我国的煤炭主产区之一，煤田整体呈向斜构造，前期开采主要在两翼进行，近年来开采向核部挺进，为此而建立了多条千米深立井。受区域地层岩性、地质构造及水文气象诸因素的综合制约，深部区域的水文地质条件相对复杂，水害问题突出，比如一矿北三回风井、六矿北二回风井、十矿三水平进风井、梁北二井主副井建设过程中均多次出现淹井、缓建等问题，严重影响了深部资源开发的进程。

本项目针对中国平煤神马能源化工集团近年建设的多个复杂地质条件深部千米井筒为研究背景，在保证井筒安全合格竣工的同时，对平顶山煤田深部建井的相关技术问题进行深入系统研究，建立了平顶山煤田深部凿井水害防治技术体系，并制定了能源行业相关标准。研究获得的主要创新成果有：

- 1.系统研究了平顶山煤田第四系松散层、刘家沟组砂岩、平顶山砂岩等三个凿井水害层段的赋存规律、结构特征、水文地质条件，构建了煤田三维地质模型；采用综合指数法，构建了平顶山煤田建井地质环境评价模型，指导未来煤田凿井工艺的选择，进一步划分了不同建井方案的适应范围。

- 2.研究了水泥浆液、化学浆液的微观结构及微细裂隙细观渗流特征，建立了高承压微细裂隙岩体渗透模型，揭示了两类浆液在微细裂隙中的可注性机理、渗流扩散规律及减渗机理，开发了深部注浆孔安全钻进孔口装置，提出了井筒分段涌水量、微细裂隙岩体注浆压力、减渗率、注浆帷幕厚度的计算方法，形成了微细裂隙含水层帷幕预注浆治理的技术控制体系。成果应用于平煤十矿三水平进风井建设，井筒建成后漏水量控制在 2m³/h 以下。

- 3.开发了一套冻结壁解冻过程围岩水压、水温等参数动态监测系统，研究了平顶山煤田基岩冻结壁解冻及井壁水害演化规律，发明了立井壁后注浆井壁变形分布式光纤监测方法，研究了多含水层冻结管导水机理及水害防治技术，提出了冻结壁解冻返渗水注浆治理时间确定方法、压力控制标准，形成了井壁注浆治理的技术工艺。研究成果在平煤一矿北三回风井、六矿北二回风井，梁北二井主副井推广应用，井筒治理后漏水量符合国家规范要求。

- 4.制定了国家能源行业标准《煤矿立井井壁注浆施工规范》，对于规范煤矿立井井壁注浆

的设计、施工及验收，避免次生灾害的发生等具有指导意义。

2020年12月15日，由教育部科技查新工作站组织对项目成果进行了查新，查新结论：在国内外公开发表的文献中，未见有与本课题查新点综合研究内容相同的研究报道。

该技术成果于2021年4月29日通过了中国煤炭建设协会的技术评价，评价委员会认为：该项技术达到国际领先水平，具有良好的推广应用价值，

该技术成果在实施推广期间获得国家授权发明专利6件、实用新型专利8项，出版专著1部、发表代表性论文17篇（其中SCI2篇、EI2篇、中文核心5篇）、制定国家能源行业标准1部。

项目技术方案科学合理，保障了井壁安全施工，提高了井壁施工质量，缩短了井筒施工工期，解决了现场治水难题，对本行业科技进步有明显推动作用。其研究成果在中国平煤神马集团五条千米深立井建井水害治理中应用，井筒建成后长期稳定渗漏水量均大幅低于国家标准，经济、安全、社会效益显著。

通过项目研究，构建了以“一个评价模型、两大技术体系、一项行业标准”为内涵的平顶山煤田复杂地质条件下深部凿井水害防治的关键技术体系，为煤田深部资源开发提供了有力的技术支撑，下一步将继续在平顶山及临近煤田的多条新建千米深立井中应用。随着我国深部煤炭资源开发步伐的加快，该技术成果将有更广阔的推广应用价值。

完成单位：中国平煤神马能源化工集团有限责任公司、中国矿业大学、平顶山天安煤业股份有限公司

完成人：郭建伟、钱自卫、张曙光、朱术云、张仲春、孟波、李欣凯、赵秋培、赵万里、张波、朴春德、朱伟强、黄震、刘帅涛、孙小平

塔式太阳能光热发电站设计技术研究与应用

本项目属于新能源太阳能光热发电技术领域。

塔式太阳能光热发电技术作为一种可再生能源发电方式，具有聚光比高、系统综合效率高、发电品质好等优点，配备储能系统的光热电站具有调峰功能，能够显著提高风电、光伏发电的消纳水平，助推中国“碳达峰、碳中和”目标的实现，适合大规模、大容量商业化应用。

项目组结合国内外塔式光热电站建设的实践，对塔式光热电站设计关键技术进行专题研究，形成了塔式光热电站综合设计技术，主编 IEC 标准、国家标准等 10 余项，取得发明专利 14 项、实用新型专利 52 项、软件著作权 2 项，编制专著 1 部，发表论文 20 篇，编制专题技术报告 14 篇。创新性与先进性如下：

- 1.提出了集热、传热、储热、换热系统以及电控、辅助系统的设计方案，给出了厂址选择和系统设计方法，明确了各系统及设备的选型要求和性能指标，推动了塔式太阳能光热发电行业的发展。主编并发布世界首部光热发电站设计标准《塔式太阳能光热发电站设计标准》（GB/T 51307-2018）。

- 2.提出了在低负荷工况下熔盐吸热器运行策略，形成了低辐照强度下安全高效运行的集热系统设计技术。提出了优化定日镜布置方法，大幅提高设计效率。

- 3.提出了针对冷热非对称储热系统的控制方案，实现了太阳能收集与电力生产的解耦，提高了储热系统规模化后的可靠性和稳定性。

- 4.提出了塔式太阳能光热发电站控制系统优化方案，有效降低控制系统成本，提高了控制品质。

该项目成果于 2021 年 4 月 9 日通过了中国电力规划设计协会组织的“塔式太阳能光热发电站设计技术研究与应用”鉴定会。由中国工程院院士岑可法担任主任委员、全国工程勘察设计大师沈又幸担任副主任委员的权威专家组成的鉴定委员会认为：项目对塔式太阳能光热发电站设计技术进行了深入系统的研究，形成了完整的设计体系，规范了设计标准，鉴定委员会一致认为该项目成果整体达到国际领先水平。

2021 年 3 月 16 日，委托中国科学院文献情报中心对“塔式太阳能光热发电站设计技术研究与应用”进行了查新。查新结论：该查新项目“塔式太阳能光热发电站设计技术研究与应用”提出的技术点，除委托方发表的成果外，在国内外公开文献中未见报道。

2017年6月21日-23日，由中国电力企业联合会标准化管理中心组织对工程建设国家标准《塔式太阳能光热发电站设计规范》送审稿进行了审查，审查意见：《塔式太阳能光热发电站设计规范》的发布将为塔式太阳能光热发电站的工程设计提供依据。《塔式太阳能光热发电站设计规范》填补了我国塔式太阳能光热发电站设计标准的空白，达到国际领先水平。

主要技术已成功应用于摩洛哥努奥三期 150MW 塔式光热电站、浙江中控德令哈 50MW 塔式光热电站、中电哈密 50MW 塔式光热电站、玉门鑫能 50MW 熔盐塔式光热电站、迪拜 DEWA 100MW 塔式太阳能发电项目、盾安敦煌 100MW 太阳能热发电项目、浙江中控敦煌 100MW 塔式太阳能发电工程等的咨询、设计和建设中，新签合同额超 5 亿元。

该项目研究成果对我国首批光热发电示范项目以及后续光热电站的开发、建设、运营等发挥重要指导作用，增强了中国在太阳能光热发电领域的国际话语权，为“一带一路”太阳能光热发电项目建设起到支撑和保障作用。

完成单位：中国能源建设集团有限公司工程研究院、中国电力企业联合会、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司、东方电气集团东方锅炉股份有限公司、内蒙古电力勘测设计院有限责任公司、中国电力工程顾问集团有限公司、中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司

完成人：许继刚、汪毅、赵晓辉、仇韬、奚正稳、李心、吕平洋、彭兢、王小春、陈玉虹、张开军、闫晓宇、丁路、田启明、陈永安

伊拉克哈法亚油田三期 1000 万吨/年地面工程

关键技术研究及应用

伊拉克哈法亚项目是中国石油作为作业者在海外规模最大的投资项目，是国家“一带一路”战略的重要节点，也是中国海外能源战略的关键布局。项目执行过程中，课题组为攻克一系列技术难题，开展了单列单台 300 万吨/年重质原油处理工艺及配套技术研究、伊拉克哈法亚油田地面工程数字化管理系统技术研究、海外油田孤网燃气电站及配套技术研究等 3 项技术课题研究，形成主要科技创新 16 项，研究成果获得国家专利 16 件（其中发明专利 4 件）、计算机软件著作权 2 件、专有技术 2 件。

哈法亚油田为典型的“六高”原油（高密度、高粘度、高 Cl⁻、高 H₂S、高 CO₂、高气油比），处理指标比国内同类原油严苛 5-10 倍，处理难度极大。为了最大化降低油田工程建设投资，解决设备高效化、大型化和材料防腐等一系列技术难题，开展了“单列单台 300 万吨/年重质原油处理工艺及配套技术”研究，项目组通过技术攻关，研发出具有自主知识产权的“单列单台 300 万吨/年重质原油处理工艺包”，研制了新型高效油气分离器，强化了顽固乳化层破乳-聚积-沉降模型，形成了智能响应多梯度深度电脱技术，将重质原油脱后含水率由 0.2~1%降低至 0.1%，获中国专利奖；自主开发了电脱级内自循环掺水洗盐工艺，淡水节约率 50%以上。将千万吨级集中处理站设施由采用常规技术 5 列优化为 4 列，减少设备台数 20%，一次建站 1000 万吨/年，单列单台处理规模 300 万吨/年，世界同类最大。

针对“六高”复杂油田多因素耦合腐蚀环境，无标准可依的关键技术难题，国际上首次建立了不锈钢含硫体系下钝化膜三层结构理论模型，揭示了高硫高盐工况不锈钢钝化膜退化机制和腐蚀机理，提出了温度-H₂S-CO₂-Cl⁻下耐蚀材料和玻璃钢失效评价体系及服役边界，创新构建了油田用耐蚀材料和玻璃钢管选材图谱，形成油田地面设施材料选择指南和国际标准化材料选择图，极大拓展了国际标准中耐蚀材料适用边界。

为提升油田建设水平和投资回报能力、减少油田运营维护成本、降低中东战乱地区高昂的人工成本和安保费用，项目技术人员瞄准国际一流水平，开展了“伊拉克哈法亚油田地面工程数字化管理系统技术”研究，经过不懈努力，攻克了多项关键技术难题，逐步建立了哈法亚油田地面工程一系列数字化技术应用。开展了油田全方位自动监控、运行状态实时显示、安全风险等级自动识别、地面系统故障报警及自动控制等功能于一体的油田自动控制系统，

有效提高了油田自动化管理水平和生产监控能力,实现了生产和管理的高度自动化、数字化、可视化、一体化。实现单个百万吨产能集中处理站定员约 5 人,远优于国际先进水平。

哈法亚油田无电网依托、柴油燃料价格昂贵、建设处理厂获取干气燃料投资巨大,如何将油田大量的高含硫、高重烃、组分不稳定的伴生气直接作为燃气轮机电站燃料是急需解决的难题;现场环境温度高达 55℃,燃气轮机现场出力衰减严重,如何提升高温环境下的轮机出力是迫切需要;油田生产滚动开发,实现孤网集中调控远距离同期,减少停电时间、维护电网稳定性成为确保生产目标关键因素。项目课题组开展了“海外油田孤网燃气电站及配套技术”研究,首次研发了高效一体化电站湿气处理技术,开创了油田含硫伴生气大规模直发电的先河,减少碳排放 140 万吨/年;建立了同期合闸参数自动捕捉补偿数学模型,形成了大型孤岛电站多点近远端自由并网控制技术,实现了远距离稳定并网,为海外油田孤网燃气电站可靠运行奠定基础。

主要技术指标与国内外同类油田指标对比,整体达国际领先水平。

研究成果成功应用于伊拉克哈法亚油田地面建设三期工程,目前已平稳运行 3 年,实施效果显著。伊拉克政府、法国道达尔公司、马来西亚国家石油公司、埃克森美孚、英国 BP 等多个国际油公司及知名国际工程公司对哈法亚三期工程给与了高度评价。

科技成果转化度高,仅哈法亚油田三期工程,即节省直接建设投资约 2.25 亿元,3 年节省运维成本约 2 亿元,成果还推广应用于伊朗北阿油田,伊拉克艾哈代布、马季努、Block-9、祖拜尔等中东地区大型油田地面工程建设,节省工程投资巨大,降低运营维护费用明显,近年创收数百亿元。

该成果打破了西方公司的长期技术垄断,在国际高端市场与国际巨头同台竞技中优势突出;推动行业技术进步作用特别明显,填补了地面工程学术领域多项空白,社会效益特别显著,国际影响力重大。

完成单位: 中国石油工程建设有限公司、中国石油集团工程设计有限责任公司、北京迪威尔石油天然气技术开发有限公司

完成人: 张红、刘中民、房昆、邢明、董磊、张国栋、马坤、黄京俊、任新华、宋江涛、李辉、寇志军、王亚彬、李世洪、邓海军

高海拔、大温差、高烈度区压力钢管 设计与施工技术

国内外由于线路布置、结构设计或施工方法不当，造成的钢管事故不少，已有震害表明，敷设在构造破碎、地基软弱等地段的明管，地震时损害严重，如日本某明钢管敷设在陡峻山坡，地震时造成锚定支座破坏。在高地震区和地震高发区，现行行业标准不推荐采用明钢管。本项目依托工程特国水电站，为修建在复杂地质条件高地震烈度区域的引水式电站。电站设防烈度 9 度，DBE 加速度 0.36g，MDE 加速度 0.42g，引水线路跨活断层、山脊、溶坑、深槽，在岩体软弱破碎、裂隙发育和覆盖层深厚地段敷设的压力明管和地面厂房，亟需解决“HD 值高、地基软、活断层、错距大、冲沟深、覆盖厚、溶坑大”等前所未有的技术难题。因此压力钢管设计施工方案选择至关重要，需要结合工程具体情况深入研究，寻求建设工期短、工程造价合理的技术方案与措施，确保工程安全可靠、经济合理、利于施工和管理。项目主要创新点包括：

1.创新提出了利用洞内明钢管跨越活断层的综合布置方案，即地下埋藏式钢岔管前置于上平段、支洞设置调压井、洞内明管跨活断层、断层前设置支洞应急蝶阀的引水系统综合布置方案，解决了大流量引水系统跨越活断层的安全稳定问题，提高了压力钢管应急能力。

2.发明了压力明管支座新型减振限位装置，解决了钢管支座脱位、强震工况下钢管跌落的问题；开发了可感知地震振动及异常水流的蝶阀自动关闭系统，在工程遭遇强烈地震受损后可快速切断高速水流，减少泄漏水量，防止事故损失扩大并可快速修复，有效减少了强震等极端工况下压力钢管损坏产生的二次灾害。

3.发明了大型压力钢管安装下放装置及安装方法，实现了长距离多弯道高陡边坡等复杂地形条件下的大直径明钢管安全高效运输安装；研发了伸缩节安装变形适应装置和安装方法，解决了大温差条件下伸缩节安装难题；为简化空间弯管施工，首创一种 CAD 简易作图法获取斜平面弯管安装旋转角的方法，简化空间复合弯管安装工艺，解决了大管径复合弯管现场安装施工难度大的关键技术问题，提高了工作效率。

本项目技术成果主编及发布实施行业标准 1 部、获评四川省工法 4 部、获发明专利 5 项、实用新型专利 10 项、软件著作权 2 项、发表论文 6 篇，核心技术 2019 年经中能建和中国水电学会组织鉴定为“国际领先水平，”工程建设获得伊朗能源部高度评价，为“一带一路”

国家战略实施提供了助力。

与国内外同类技术相比，本技术安全高效，实施效果优良，技术水平居于世界领先水平，本技术的成功实施，填补了大型水电工程大 HD 值管道系统跨越活断层的空白，对于类似工程项目具有推广应用价值。项目对中特“一带一路”合作、中国制造走出去、缓解当地电力短缺、改善民生等方面发挥了积极作用。经济效益和市场竞争力优势明显。

四川省科学技术信息研究所 2018 年 12 月 6 日的查新结论，国内外尚未见与本项目主要科技创新点相同的成果。

完成单位：中国葛洲坝集团机电建设有限公司、中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司、三峡电力职业学院、华电郑州机械设计研究院有限公司

完成人：令强华、周复明、张为明、刘昌桂、卫书满、张战午、盛国林、雷亚萍、熊启明、胡美玲、左路军、徐 斌、赵承刚、朱建波、卫学识

深厚粘土层多圈非等强复合冻结壁关键技术 研究与应用

1、项目的研究背景

我国中东部地区有上千亿吨煤炭资源埋藏在地下深部，由于这些矿区的地质条件复杂，其冲积层厚度均大于 600m，最深将达 800m，基岩为强含水岩层，因凿井技术水平的限制，一直未能开采这些资源。冻结法是解决复杂地层和基岩强含水的有效方法，当前采用冻结法穿过的最大表土层厚度约为 754m（万福煤矿风井），最大冻结深度为 950m（核桃峪煤矿副井）。

山东新巨龙能源有限责任公司，位于山东省菏泽市巨野县龙堭镇，矿井于 2004 年 6 月开工建设，2009 年 11 月建成投产，为满足矿井安全生产要求，新巨龙能源有限责任公司新建一个东副立井。东副立井井筒净直径 7.0m，净断面积 38.5m^2 ，表土厚度 631.11m，井深 1054.8m，设计冻结深度 958m，为当时冻结深度最深井筒。

东副立井有以下地质特点和施工难点：

（1）黏土层厚。新巨龙东副立井 631m 以上砂层厚度只有 39m，黏土层厚度达到 592m，为黏土层厚度最厚矿井。

（2）含水量大，冻土强度低，井帮易变形位移，东副立井最底部黏土层含水量 25.16% 与类似井筒比较含水量较高；冻土抗压强度（ -20°C ）6.17Mpa 与同等煤矿相比偏低。

（3）基岩风化带疏松破碎，基岩构造复杂，断层构造破碎带以及多处裂隙发育段，破碎，断层带易遇水泥化。

（4）基岩深部地温高达 43°C ，地层含热量大，冻结困难。

2、主要研究内容

（1）深厚黏土层冻结管纵向温度分布规律研究

通过数值计算研究供液管内、环形空间内核冻结管外壁温度的变化规律及其影响因素，同时对冻结壁外壁温度进行现场实测。

（2）深井高地温冻结壁发展规律

通过现场实测和数值分析，研究高地温情况下冻结壁的发展速度的影响因素，提出高地温冻结的应对策略。

(3) 深厚黏土层多圈非等强冻结壁特性及设计方法研究

通过数值分析，研究冻结温度场的非均匀特性。通过实验室试验，研究冻土热物性指标随温度的变化规律。基于几种典型参数下的非等强冻结壁受力和变形规律，找到对冻结壁受力和变形的关键因素，在此基础上提出深厚黏土层非等强冻结壁系统设计方法。

(4) 深厚黏土层冻结壁冷量调节及提取技术

通过理论分析、数值计算和现场应用，研究冻结孔分期冻结对冻结温度场以及装机台数的影响，研究提取停冻后防片孔冻结壁内冷量用于加强外圈孔冻结的效果以及完全停冻以后冻结壁冷量的提取利用技术。

(5) 信息化施工监测技术

通过现场实测，获得深厚非等强冻结壁冻结施工参数，掌握冻结壁内应力随冻结时间以及掘进施工的变化规律，基于实测数据和有限元反演预测分析，对下部地层的施工工序提供建议。

3、主要的创新性成果

(1) 首次提出深厚黏土层多圈动态复合冻结壁的设计理念，建立了“等效温度”代替“平均温度”的计算方法，突破了冻结深度 958m (631m 连续深厚黏土层) 的冻结工程技术难题。

传统上把冻结壁简化成温度均一的冻结壁，实际上多圈孔冻结时，由于每圈冻结孔之间的距离要小于两圈冻结孔之间的距离，因此，每圈内的冻结孔先交圈，很快形成低温条带，而不同圈之间的温度相对较高。用传统方法计算平均温度的做法，与实际复合冻结壁的力学状态和位移情况有较大差别，用平均温度来计算，可能会有较大的误差。考虑到冻结壁内温度分布并不均匀，且强化内圈孔冻结对于限制冻结壁径向位移、水平位移和井筒内底鼓效果最好，提出了冻结壁等效温度的概念，并给出了等效系数 ζ 的具体计算方法。

(2) 揭示了深井（900m 以深）供液管内外及冻结管外壁温度、以及高地温（43℃）情况下的冻结（盐水温度-32℃~-34℃）温度场发展规律，为解决深井冻结工程技术难题奠定了理论基础。

通过数据模拟，供液管内盐水在向下流动的过程至 960m 深度温升不超过 0.5℃。冻结管外壁温度随着管内环形空间内的盐水温度的变化而变化，均随着埋深的减小而升高。通过多次数据模拟试验，在不同盐水温度下供液管内的盐水温度以及冻结管的延米换热量大致呈平行的直线，而冻结管外壁温度与管内流体的温差几乎不随盐水温度的变化而变化，降低盐水温度有助于强化早期冻结效果。现场实测发现，冻结管外壁温度与盐水温度的变化趋势大致相同，随着盐水去路温度的变化而变化，变化幅度小于盐水去路温度。

通过东副立井实测和温度场分析、模拟等发现，700m 以下各层位测温孔温度随着时间的延续（250 天~350 天）地温升高的同时冻结壁向外发展速度越来越慢，地温在 40℃时冻土发展速度急剧减小，速度只有 6mm/d 左右；400d 以后发展速度不足 3mm/d，冻结至 480 天时，内侧冻结壁发展到掘砌荒径而不再增长，此时外侧冻结壁的发展速度也十分缓慢，几乎不再增加。实验室试验发现，不同盐水温度（-30℃、-35℃、-40℃、-45℃）情况下，冻土发展速度变化并不明显。考虑现有技术若想采用降低盐水的方法来提高冻土向外扩展的速度并不经济。

（3）创立了动态复合冻结壁的冷量调配成套技术，实现了安全（无断管）、高效、节能的深井绿色冻结施工。

1) 分区控制冻结技术，各圈冷冻机分组安装又互相协助，不同圈间根据冷量需求适时调整冷冻机数量，从而减少冻结站冷冻机的装机台数，缩小了系统占地面积，同时还可以加快制冷设备的周转，降低了能源消耗。

2) 异径管冻结技术，对外圈 320m 以上段采用 $\phi 133\text{mm}$ 无缝钢管，下部采用 $\phi 140\text{mm}$ 无缝钢管。达到既能保证施工安全，又利于夹层冻胀水释放和节能的三个目标。

3) 在井筒掘砌至井筒荒径不片帮后，用盐水泵提供动力使已经停止冻结的防片孔内的盐水在冻结孔和冷却水池内的盘管之间循环，在确保井帮温度不偏高的情况下降低了冷却水温度，提高了冷凝器冷却效果。

完成单位：中煤第一建设有限公司、中煤邯郸特殊凿井有限公司、中国矿业大学

完成人：陈跃文、孙 猛、郭永富、张 勇、牛鹏翔、石荣剑、李锐志、高 涛、王杰、张立刚、陆 路、岳丰田、任东彬、魏京胜、杨岩斌

基于“IP+光”的电力通信网控制与防御 关键技术及应用

电力通信网作为电网的神经系统，承载电网生产、调度、管理等业务，关于电网安全稳定运行。历经不同阶段演进，电力通信网呈现地域分布越来越广，控制逐步向末梢延伸的态势，结构复杂、技术异构、资源跨域所导致的统一调度难与业务保障难问题愈发突出，亟需打通 IP 层与光层网络固有界面，实现电力通信网络的融合控制与防御。

自 2014 年开始，在系列化的国家电网有限公司总部科技项目支持下，由中通服咨询设计研究院有限公司牵头，联合全球能源互联网研究院有限公司、北京邮电大学、北京工业大学、国网河南省电力公司信息通信公司、国网冀北电力有限公司信息通信分公司、中通服网盈科技有限公司等单位，基于跨域异构存量通信资源，提出了基于“IP+光”的电力通信网控制与防御关键技术，攻克了 IP 网络与光传输网络联合优化调度、全场景感知的分布式业务安全接入控制、多源驱动的融合控制策略风险等技术，研发了系列化设备与系统，实现了电力业务安全、可靠、快速、灵活的接入承载和风险的有效控制。项目主要创新如下：

1.提出了基于“IP+光”的复杂异构电力通信控制与防御模型。构建了电力通信 IP 网络与光网络协同的“云网边端”资源通用孪生模型，由屏蔽资源技术易购性的通用孪生体组成叠加控制网络，将电力控制类业务开通由小时级缩短至分钟级，自愈时延缩短至秒级，有效提升了电力通信网敏捷管控能力。

2.提出了电力业务的确定性时延弹性保障与防御体系。构建了基于时间敏感网络分组调度机制的复杂异构接入网络切片编排器与安全联动防御机制，将大、小尺度差异化业务控制时延稳定在 30~40ms 内，研制了多业务安全接入专用网关，实现了非法终端接入阻断率 100%，全面提升了“IP+光”网络的边界安全防护能力。

3.提出了多层次主动感知网络智能运维方法。构建了“电网-通信网”双网资源协同调度优化控制机制，发明了多源数据驱动的融合控制策略风险分析方法，研制了面向运维决策的通信仿真系统与专网量测系列装置，实现了双网互动推演，调度方案评估时间从小时级压缩至分钟级，性能劣化和故障定位时间由分钟级缩短至秒级。

项目授权发明专利 20 项，发表论文 11 篇，发布电力通信网行业、企业标准 5 项，授权软件著作权 9 项，自主研发了电力通信网专用通信设备与控制系统、多业务安全接入专用网

关、支持专网量测的运维工具等系列化产品。

由中国工程院院士沈昌祥担任主任委员，工信部通信科技委常委周建明担任副主任委员，联合慈松、成秀珍等专家组成的科技成果评价委员会，一致认为：“项目攻克了电力通信资源弹性调度、多业务接入按需保障、多层全息网络智能运维等核心技术，研制了系列化设备与系统，在电力通信控制领域，整体达到国际先进水平。”

项目成果已推广至国家电网 20 多家网省公司，近三年产生直接经济效益 12.65 亿元，有效提升了电力通信网络的柔性控制能力与安全防护能力，形成了可复制、可推广的模式样板，并延伸应用于电信、交通、航天等领域，提升了工业网络与综合通信网络基础设施的建设水平，增强了企业核心技术竞争力和国际影响力，培养了一大批科技创新人才，创造了显著的经济和社会效益。

完成单位：中通服咨询设计研究院有限公司、全球能源互联网研究院有限公司、北京邮电大学、北京工业大学、国网河南省电力公司信息通信公司、国网冀北电力有限公司信息通信分公司、中通服网盈科技有限公司

完成人：刘川、鞠卫国、刘世栋、公备、陆继钊、阮琳娜、费稼轩、朱晨鸣、邢宁哲、李文萃、郭少勇、卜宪德、陶静、卢林林、杨建明

多泥沙大中型水库增建减淤发电工程建设关键技术

我国目前拥有约 9.8 万座水库（其中大中型水库约 4700 座），接近 90% 是上世纪 80 年代以前建设的。由于受当时科技水平及建管模式限制，众多工程出现了严重的泥沙淤积和工程缺陷，水沙关系严重失衡，降低或限制了水库原有功能的发挥，有的水库甚至面临报废，缩短了水库的使用寿命，影响了综合功能和效益的发挥。

本项目依托的黄河刘家峡水电站，是新中国乃至亚洲第一座百万千瓦级大型水利枢纽工程，是建国后“百项重大经典建设工程”之一。水库建成以来，发挥了发电、防洪、灌溉、防凌、养殖等多种功能，产生了巨大的综合效益。目前为止，全库共淤积泥沙 16.86 亿 m^3 ，剩余库容 40.15 亿 m^3 ，库容损失 29.6%。洮河在大坝上游约 1.5km 处汇入黄河干流，是一条水少沙多的河流，洮河库段死库容于 1978 年已淤满，洮河淤积三角洲顶点河床高程约 1720m，比水库死水位 1694m 高出 26m，水库调沙能力逐步降低，有效库容减少，且出现沙坎阻水、过流能力不足现象；泥沙大量向坝前推移，过机粗泥沙增多变粗，加剧了水轮机的泥沙磨损，严重影响了电站正常安全度汛和经济运行。水库建成后，先后采用了上百次异重流排沙和低水位拉沙，对缓解坝前淤积起到了一定的积极作用，但既有的排沙设施已不能彻底解决水库泥沙淤积及其危害。刘家峡水电站坝前泥沙淤积主要是洮河泥沙引起的，如何处理好洮河泥沙问题是研究解决刘家峡水库泥沙危害的关键。

黄河是世界上泥沙含量最大的河流，因水少沙多，水沙关系不协调，是其复杂难治的症结所在，泥沙淤积问题始终是黄河生态保护和高质量发展要面对的首要问题，也是世界水利水电建设中尚未彻底根治或解决的重大技术问题。

项目研究针对刘家峡水库泥沙淤积现状、运行中存在的泥沙问题，从 1986 年开始，科研、设计及运行等单位历时 30 余年“产、学、研、用”联合攻关，突出理论研究、模型试验、数值模拟、分析预测、实施应用等多手段融合，取得了一系列重大理论与技术突破，依托工程建成后 6 年来运行效果良好，具备推广实用条件。项目创新性与先进性如下：

1. 提出了水库异重流输沙与旁道排沙耦合技术

揭示了异重流动力演化过程、支流异重流入汇干流多因子响应机理及扩散规律；提出了异重流入汇区淤积机理及不同水沙条件水库调度响应机制；探明了泥沙迁移路径，提出了在支流对岸库底设置旁道排沙洞进行水库排沙减淤技术，异重流排沙比高达 95.3%，有效地解决了坝前淤积和机组磨损问题。

2. 首创国际领先的深水厚覆盖大型岩塞爆破关键技术

发明了深水厚覆盖下大型岩塞爆破陀螺分布式药室布置、爆破计算理论和方法，首创了为岩塞爆破创造自由面的爆破成腔理论及测试技术、高精度三维钻孔迹线定位法、岩塞灌浆、深水高密度厚覆盖层中冲水系统、岩塞爆破与冲水排沙相结合的新理论等多项新技术。

攻克了本工程 75m 高水头、40m 厚覆盖、17.2m 大直径复杂条件下大型岩塞爆破难题，综合难度 HD 值（有效水深×岩塞直径）达 2116 m²，居世界首位。

3.研发了“水·沙·电”一体化调控、防淤抗磨与节水增效建设技术

研发了节水增效、扩机增容建设体系，形成排沙为主、兼顾冲淤排沙弃水发电的“一洞两用”新技术，提出了排沙发电系统全链条防淤抗冲磨技术和水、沙、电一体化调控技术，解决了排沙洞进口淤堵及弃水再利用问题，实现了水资源的集约节约利用，结合水沙测报，实现水、沙、电联合化调控，提高了电网的安全、稳定运行。

项目研究成果全部应用于刘家峡洮河口排沙洞及扩机工程建设，近三年，共排出泥沙 1050 万 t，弃水再利用 30.68 亿 m³，发电量 30.35 亿 kW.h，累计节支总额 10.8 亿元。实现了刘家峡水库的排沙减淤，增加了水库有效库容，提升了水库发电效益、改善了水库水质，并为水资源长远空间调配提供支撑。部分成果还成功推广应用到兰州市水源地、长甸扩机、吉林中部引水等 10 余项水利水电工程，同时还在尼泊尔上崔树里一级水电站等“一带一路”项目中得到了推广应用，研究成果推广具有较高的推广价值。

近 5 年来，完成科研项目 32 项、自然科学基金 10 项；发表学术论文 34 篇；获得科技奖励 18 项；编制或在编的标准规范 7 部，获得授权发明专利 17 项、实用新型专利 18 项；获批的施工方法 4 项；获得专著 1 项、软著 1 项；依托工程——黄河刘家峡洮河口排沙洞及扩机工程获得中国水电行业优秀工程设计一等奖。

本项目各主创新技术及主要参数均明显优于目前国内外同类技术，2020 年 7 月 23 日，中国水力发电工程学会组织召开本项目成果鉴定会，经由包括 2 名中国工程院院士和 1 名全国工程勘察设计大师等组成的鉴定委员会鉴定，认为：研究成果达到了国际领先水平。

本课题研究全面、运行效果突出，高度践行了习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话中提出的“协调水沙关系、解决泥沙问题、推进水资源节约集约利用，大力发展节水产业和技术，实施全社会节水行动，推动用水方式由粗放向节约集约转变”的发展理念，与区域生态保护相配合，促进了周边社会经济高质量发展。

完成单位：中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司、中水东北勘测设计研究有限责任公司、黄河水利委员会黄河水利科学研究院、中国水利水电第六工程局有限公司

完成人：周 恒、孙海涛、苏加林、叶 明、杨经会、陆 希、王福运、高 垠、刘静、李新杰、李 江、王 婷、杨忠敏、费秉宏、余晓华

复杂水利水电工程智能建管关键技术及平台

一、立项背景

本项目以国内首个EPC模式的百万千瓦级水电站——杨房沟水电站为依托，运用数字化、智能化技术实现了复杂水利水电工程智能建管的系统性创新。

杨房沟水电站具有高拱坝、高边坡、大规模地下洞室群等工程特点；大型水电工程管理要素和流程复杂，且EPC模式下百万千瓦级大型水电工程管理国内尚无经验可循；参建方众多，信息数据不统一；工程建设周期长，资料管理和归档面临严峻挑战。为充分发挥EPC模式在大型水电工程建设中的优势，项目组针对上述难题开展智能建管关键技术及平台研究，取得系统性创新成果。

二、创新点及相关技术内容

1、创新成果

创新成果1：基于复杂水利水电工程总承包建设管理模式，构建了覆盖全工程、全要素、全过程和全参建方、多层级的智能建管平台，建立了一个中心、两个平台、N个系统的“1+2+N”智能建管体系。

创新成果2：基于动态精细化施工信息模型，建立了包括高拱坝混凝土全时空防裂控制、全过程浇筑实时管控与电子文件“单轨制”数字归档等的智能工程技术体系，6项智能建造技术取得突破。

创新成果3：构建了复杂水利水电工程的“组织-制度-技术-业务-应用”五位一体智能建管体系，有效保障了智能建管关键核心技术的全面应用，实现了项目全生命周期高效优质建设。

2、指标先进性

本研究在7个方面优于国内外同类技术，其中6项属首次提出。

(1)基于云架构的工程数据中心，融合全专业三维协同设计平台与数字化建设管理平台，集成智能建造管理系统，实现设计施工一体化管理；

(2)研究建立适用于全时空联动的高拱坝混凝土防裂控制体系，综合考虑大坝混凝土全时空联动的温控要求，实现精细化控制；

(3)提出全面感知-精细分析-智能控制-评价管理的多维仿真立体渗控，实现地质、设计、施工、科研等各方数据共享与协同工作、辅助决策；

(4)构建了危岩体及地下洞群智能动态反馈分析与风险管控体系，深度融合地质、结构、

计算、监测四大模型，实现智能动态管控；

(5) 创建了贯穿“设计-采购-施工-验收-归档”全过程的数字化质量管理体系，首次实现大型水电站全专业电子质量验评，工作时间缩短 68%；

(6) 行业首创电子文件“单轨制”在线归档，具有行业先进性；

(7) 行业首创“五位一体”智能化应用保障与推广体系，重塑数字化手段下的 EPC 管理模式。

3、经济指标

经过 5 年以上整体技术应用，杨房沟水电站工程质量优良，单元工程综合优良率高达 97.4%，连续五年通过电力安全生产标准化一级达标，首台机组提前 5 个月发电，末台机组提前 12.5 个月发电，全部四台机组平均提前 9 个月发电。

三、应用推广和经济社会效益

本项目成果应用为杨房沟水电站带来经济效益约 2.2 亿元，推广至其他工程项目产生效益约 2.5 亿元。在水利水电行业影响力显著，30 余家单位到杨房沟电站现场调研学习，受到多家央媒、官媒专题报道。

本项技术在水利水电行业市场前景广阔，对优化和提升水利水电工程建管模式和智能化水平、推动行业数字化转型、促进行业科技进步起到了重要作用。

完成单位: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、雅砻江流域水电开发有限公司、中国水利水电第七工程局有限公司、天津大学、中国水利水电科学研究院

完成人: 王继敏、侯 靖、徐建军、曾新华、殷 亮、陈雁高、鄢江平、张 帅、关涛、张 磊、王国光、王雨婷、申满斌、周 强、魏海宁

平原枢纽高落差大流速导截流关键技术

一、立项背景

本项目主要依托柬埔寨桑河二级水电站开展，该电站是柬埔寨最大的水电工程，是“一带一路”建设和柬埔寨能源建设重点项目。电站总装机容量 400MW，约占柬埔寨当时全国总发电装机容量的 20%；电站大坝全长 6.5km，是亚洲第一长坝。明渠道流设计流量为 14200m³/s，截流设计流量 1200m³/s，龙口最大流速 9m/s、最大落差 8m，综合技术难度居世界前列。

二、关键技术和创新成果

1.首次提出并系统研究了预控式截流技术。针对高落差、大流速截流的技术难题，首次提出了预控式截流风险控制技术，发明了壅拦坎+楔形裹头等新型截流工型式，推求了龙口主要水力指标计算的半经验公式，研究采用了抗冲变截面戗堤技术，减小了龙口流速和单宽功率，有效降低了截流难度。

2.研发了平原枢纽导流明渠水流流态多工况控制结构。采用“首部斜坡式引流段+中部壅拦坎+尾部叶脉式潜坝”等组合结构，改善了大流量导流明渠内的流态，在证明渠抗冲安全条件下，实现了明渠无底板衬砌过流，优化了岸坡防护结构。

3.完善了海外乏资料条件下施工导流风险控制方法。针对水文资料缺乏的难题，利用多源卫星降水数据的水文模拟方法，完善了海外乏资料条件下的水文序列延拓及导流标准选定，构建了计入洪水、进度及投资的多属性风险决策方法。

成功实施了桑河二级水电站明渠截流，三期明渠截流龙口水位最大落差高达 8m，龙口最大流速高达 9m/s，综合截流水力学指标和截流难度居于世界前列。实现了高技术含量、低施工能耗、轻环境干扰的绿色施工导截流。保证桑河二级水电站提前发电，每年减少碳排放约 138 万 t，促进“一带一路”绿色发展。

获得授权专利 21 项（其中发明专利 9 项），发表论文 38 篇（SCI、EI 检索 5 篇），成果纳入 4 部技术标准。

经张楚汉院士任组长的科技成果鉴定，本项目成果总体达到国际领先水平。

三、应用推广和经济社会效益

项目的成功实施助力桑河二级水电站成为“一带一路”水电工程标杆、绿色减排典范。经济社会效益显著，直接节约工程投资约 1.1 亿元，直接节约工期 1 个月。应用推广前景广阔。

在截流方式和水力学研究方面有重大技术突破，显著推动水电工程施工导截流方面的技术进步。实现大流量下的环保截流和低能耗导流，对促进水电工程建设绿色发展和对中国标准走向海外起到了积极的示范作用。

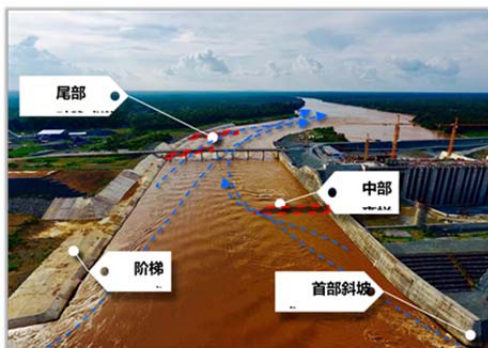


图1 预控式截流技术部署



图2 高落差大流速截流实施

完成单位：中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、桑河二级水电有限公司、武汉大学

完成人：任金明、李飞、邱亚锋、胡志根、郑鹏翔、李梦森、胡小禹、王哲鑫、朱约喜、吴彬、吕国轩、叶建群、王永明、周双全、李国庆

激光雷达复杂场景建筑物质量安全遥感 检测技术研究与应用

本项目属土木工程、遥感测量和软件开发等新设备、新技术的交叉应用技术领域。主要依托国家自然科学基金重点项目、行业重大专项科研项目、行业规程规范制定项目以及工程需要而自选的项目，通过对拥有的 8 款国内外激光雷达设备和 26 款主流设备使用功能研发挖掘，经长期实践应用和总结提升而形成了研究成果。

随着高端装备、国防军工和精密加工的迅猛发展，激光雷达技术已经成为三维空间信息数据获取的主要手段之一，并得到广泛应用。但在狭小空间、环境恶劣场景的建筑物质量安全检测如暗涵排污口调查及渗漏水检测、地铁盾构隧道内型面检测、风电场风机塔筒垂直度检测、滑边坡变形监测等方面应用甚少。

针对以上难点和问题，本项目根据不同建筑物实施环境特征，以“应用理论→技术方法→工程实践”为框架，采用理论分析、现场测试、对比试验等遥感技术和手段方法，通过对辅助设备自主研制，以及数据处理软件与系统管理平台开发等，主要在点云数据采集与获取、数据误差分析与处理、狭小空间暗涵质量检测、地铁盾构隧道内型面检测质量与收敛变形检测、风电场风机塔筒垂直度检测、复杂异形构筑物复原测量、滑坡与高边坡变形监测等技术进行应用研究和系统创新，取得了丰富的科技成果。主要创新点如下：①提出了百米级风电场高耸塔筒垂直度检测计算原理和数学模型。②发现并给出了地铁盾构隧道内型面不圆度计算原理、轴线拟合原理和数学模型。③提出了复杂场景、狭小空间、恶劣环境城市暗涵质量检测与全信息场精准测量系列技术。④创建了大型滑坡与高边坡蠕变演化全信息场变形监测系列集成技术。经中国大坝工程学会组织专家评价，成果总体达到国际领先水平。

依托项目成果，出版科技著作 2 部，主编和参编行业标准 5 部，取得各类知识产权 43 项，省部级工法 8 项，发表科技论文 16 篇，获得厅局级各类科技进步奖 3 项。研究成果成熟度高、转化程度高。

成果关键技术已在 16 个典型工程得到成功应用，并积极服务于 5.12 汶川地震等抢险救灾工作中，应用效果好，解决了复杂场景建筑物质量安全检测技术难题。9 个工程经济效益证明其直接利税达 2.57 亿元，尤其在城市供水、灌溉、发电等效益巨大，降低了生产成本、节约直接安全生产费用，为国家能源开发及基础设施建设作出了贡献，为抢险救灾和灾后重

建作出了服务,社会效益显著。有力促进了地面激光雷达遥感测量技术应用的科技进步,具有重要工程实用价值。

完成单位: 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司、成都理工大学

完成人: 吕宝雄、李祖锋、尚海兴、董秀军、王小兵、刘潇敏、赵悦、唐兴华、杨晓辉、张群、何小亮、曹钧恒、赵延岭、赵志祥、张旭杰

深井松软极破碎巷道围岩内外承载协同控制

关键技术与工程示范

为加快推进“向地球深部要资源”国家战略、提升深部资源获取能力、加快绿色文明矿山建设，针对平顶山矿区近千米深部巷道围岩松软破碎、应力水平高，巷道开挖后应力调整过程中浅部围岩极易变形破坏，破碎区、塑性区迅速扩大，围岩大范围松动、各部位变形不协调等加剧了外承载结构向深处转移，使得支护结构普遍容易失效、巷道变形大、支护维护困难为背景，自主研发了强力锚注一体化支护材料，构建实施了围岩破裂无损探测及变形监测系统，有效控制了深井巷道变形，并取得一系列创新成果，其主要创新性和先进性如下：

1.开展了深部软岩巷道锚注支护技术研究。采用现场监测、理论分析及试验模拟三种研究手段进行综合研究，掌握了巷道围岩条件、地应力场、支护体系三者之间的相互作用特点和规律，系统地分析了平顶山矿区深部软岩巷道锚、注一体化支护机理、技术优势和承载结构特征。

2.建立了以加固、改性和再造为主要方式的承载圈层构建方法，集成了聚能切割巷道成型控制技术和分阶段加固施工技术，配套锚索锁棚、双层喷浆、深浅复注等工艺，一次构筑、分次加固，实现了围岩承载结构协同作用的整体控制效果。研究成果应用于平煤五矿己三轨道下山，三年后巷道变形量小于 300mm。

3.针对不同巷道稳定性控制特点，制定了科学合理的锚、注一体化支护方案。根据平顶山矿区深部软岩巷道在掘进支护、二次补强支护和修复支护的不同特点，摒弃了传统的支护与注浆分阶段进行的地压治理模式，分别提出了全断面锚注支护、强化锚注支护、锚网索与锚注相结合的技术方案，有效控制了巷道围岩变形。研究成果在平煤一矿北三-950m 井底车场、一矿四水平戊一回风上山应用，巷道围岩状况保持稳定，满足安全生产需求。

4.采用先进可靠的矿压监测手段开展了深部高应力软岩巷道围岩变形监测研究工作。构建了围岩破裂红外无损探测、围岩应力精准监测、顶板离层激光量测和围岩破裂可视化观测等“波-光-电”一体监测系统。研究成果在平煤十矿戊组中区变电所、运输下山应用，为围岩支护施工提供了技术支持。

5.建立了锚、注一体化支护技术规范。根据现场施工和技术整理，对锚注一体化应用条件、巷道类型、锚注材料技术标准、施工工艺、质量管理和检测等方面进行了技术量化规

范，强化锚注材料和关键工艺管理，为平煤矿区深部软岩巷道锚注一体化支护设计、施工、验收提供了科学依据。

2020年12月17日，由教育部科技查新工作站对项目成果进行了查新，查新结论：在国内外公开发表的文献中，未见有与本课题查新点综合研究内容相同的研究报道。

该技术成果于2021年4月29日通过了中国煤炭建设协会的技术评价，评价委员会认为：该项技术达到国际领先水平，具有良好的推广应用价值。

项目技术成果获授权发明专利11项，发表SCI检索论文2篇，EI检索论文4篇，中文核心论文13篇，专著1部。

技术方案科学合理，提高了巷道稳定性，降低了维护成本，改善了巷道作业环境，保障了矿井安全生产。成果成功应用于平煤矿区一矿、四矿、五矿、十矿等深部矿区，保障了巷道稳定性，降低了工程成本，构建了以“一个核心理念、两大围岩控制对策、三类构建方式、四个实施步骤、五项关键技术”为内涵的平顶山矿区深井巷道围岩控制理论与技术体系，有效解决了深井巷道“支护结构易失效、持续变形难控制”等卡脖子技术难题。

该技术成果为国内外类似条件的巷道提供了借鉴，下一步将继续在平顶山矿区及其他矿区推广应用，并结合现场实践效果逐步优化升级“一二三四五”技术体系。项目成果顺应我国能源发展战略和煤炭安全高效生产的重大需求，符合国家的政策要求，满足煤矿的技术需求，具有广阔的应用前景。

完成单位：中国平煤神马能源化工集团有限责任公司、中国矿业大学、山东安科矿山支护技术有限公司、平顶山天安煤业股份有限公司

完成人：张建国、王旭锋、王新义、韩泰然、杨战标、陈旭阳、裴刚、李健建、张炜、李春阳

城中采煤沉陷区人居环境与生态一体化重构

关键技术

以两淮为代表的高潜水位采煤沉陷区的形成严重影响了煤炭资源型城市的可持续发展，特别是城中采煤沉陷区水土资源撂荒、生态系统紊乱、人居环境恶化已成为制约城市建设的三大瓶颈，严重阻碍了城市经济社会发展和生态文明建设。因此，开展本项目研究，对解决城中采煤沉陷区人居环境与生态一体化重构问题，具有重要理论意义和工程应用价值。

本项目以淮北市绿金湖（中湖）矿山地质环境治理重大工程为背景，采用理论分析、技术研发、现场试验与工程实践相结合的研究方法，通过采矿学、城乡规划、生态环境学等学科交叉融合，系统开展了沉陷积水演化规律、人居环境与生态一体化规划、水土流失控制、生态重构与施工等关键技术研究，将沉陷区生态修复与引江济淮、生态走廊、绿金城市等重大民生工程相结合，形成了城中采煤沉陷区人居环境与生态一体化重构关键技术体系，有力促进了行业科技进步和地方经济社会发展。

项目主要科技创新如下：

1.揭示了高潜水位采煤沉陷区积水演化规律，构建了沉陷积水三维空间预测模型；基于水土资源空间等效置换原则，提出了高潜水位采煤沉陷区“采前设计-地形改造-分区治理”的采复一体化方案，建立了地表高程分区重构模型，为城中采煤沉陷区人居环境改善和生态重构奠定了理论基础。综合采用高分辨率遥感监测、现场实测和理论分析相结合的方法，分析了采动过程中沉陷积水时空演化特征和主控因素，揭示了积水演化动态发展规律；融合 Knothe 时间函数和沉陷区水量平衡模型，提出了采煤沉陷积水三维空间动态预测方法，实现了积水范围、深度、体积、沉陷区库容等关键信息的精准预测；基于水土资源空间等效置换和资源、生态效益最大化原则，提出了高潜水位采煤沉陷区“采前设计-地形改造-分区治理”采复一体化方案。

2.提出了城中采煤沉陷区人居环境与生态一体化规划理念，构建了城中采煤沉陷区人与环境协调发展的空间格局，创新了沉陷区建筑分区设计方法。以积水区为核心，融合城市景观、情景居住、文化创意、生态旅游，提出了城中采煤沉陷区人居环境改善与生态修复一体化规划理念，构建了新的城中采煤沉陷区空间格局，实现了人与环境的协调发展。针对城中未稳沉采煤沉陷区的特点，综合考虑采空区岩体活化、地表残余沉降、附加荷载以及饱和与

非饱和填土固结沉降等关键因素对沉陷区地基稳定性的影响，建立了采煤沉陷区地基稳定性评价模型，提出了城中未稳沉采煤沉陷区建筑分区设计方法。

3.构建了采煤沉陷区水资源调控模型，研发了边采边复施工、生土陡坡地水土流失控制与土壤改良、生态重构成套关键技术。构建了沉陷治理区水循环与水资源调控模型，实施了平原水库建设工程。基于平原湖泊水量补给与排泄平衡分析，建立了沉陷区分布式水循环MODCYCLE模型，模拟分析并预测了不同水位和不同降水保证率5种工况条件下的平衡水量；基于模糊优化理论，结合淮水北调工程规划，构建了沉陷区时序多目标系统模糊优化决策模型。研发了高潜水位采煤沉陷区边采边复施工成套关键技术，开发了环保疏浚退水及人工湿地尾水处理系统、底泥一体化机械深度干化系统、高填筑围埝多级装配式退水系统、模板悬吊支撑体系等施工关键技术。研发了开采沉陷斜坡地“植物群落+陡坡定植块”水土流失联合控制技术和“土壤-植物”协同基质改良技术。针对开采沉陷斜坡地及施工过程中微地形重塑形成的以生土为主的陡坡水土流失严重的问题，研发了以当地土壤、农作物秸秆和魔芋凝胶混合法植物定植块（捆）制备技术。根据高潜水位采煤沉陷区地表分区重构特点，研发了“平整地建筑-斜坡地水土保持-浅水区水生植被-深水区生态渔业”分区治理技术，水土资源利用率达100%。绿金湖工程实践表明：沉陷区内累计54.69%的土地改造为可利用平整地，31.55%的土地作为斜坡地进行乔灌草种植区，13.76%的积水区作为养殖区，有效提高了土地复垦效率，打造城市中央湿地公园。在沉陷区开展基础设施建设，降低了生态系统失衡对沉陷区环境的负面影响，实现了高潜水位采煤沉陷区全方位治理。

4.形成了政府主导、社会参与、市场运作、合作共赢的城中采煤沉陷区生态修复产业化路径，构建了生态修复与重大民生工程相结合的采煤沉陷区科学修复典型范式，创新了“超前规划-动态修复-长期运营”的沉陷区可持续发展模式。探索了社会资本引入采煤沉陷区治理的方式，形成了政府主导、社会参与、市场运作、合作共赢的城中采煤沉陷区生态修复产业化模式。采用PPP融资模式，充分发挥政-产-学-研-用合作优势，形成了政府和社会资本共享收益和共担风险的资本运作模式，累积完成项目融资22亿元，有效解决了采煤沉陷区治理资本投入，项目于2020年7月被自然资源部列为社会资本参与国土空间生态修复十大典型案例之一。创新了生态修复与重大民生工程相结合的采煤沉陷区修复范式。将沉陷区生态修复与引江济淮、生态走廊、绿金城市等重大民生工程相结合，项目形成可利用土地2.45万亩，水域1.16万亩。形成了“超前规划-动态修复-长期运营”于一体的城中采煤沉陷区可持续发展模式。针对沉陷区修复治理与后期利用脱节的重大难题，提出了采前预测规划、采中边采边复、治理后管控运营的采煤沉陷区可持续发展策略，形成了城中采煤沉陷区人居环境与生

态一体化治理模式，促进了煤炭资源城市人与自然和谐发展。

项目获授权发明专利 10 项，授权实用新型专利 5 项，软件著作权 6 项，获批省、部级工法 4 项，安徽省优秀专利奖 1 项。

项目提出的“水资源调控-水土环境修复--生态重构”三位一体的城中采煤沉陷区人居环境与生态一体化治理模式先进、可操作性强、实用性高，可为解决我国东部类似条件下采煤沉陷区的生态环境综合治理提供引领和示范，具有普遍推广价值。该项目成果在淮北市中湖采煤沉陷区开展了有效应用，实践证明，关键技术的应用，一方面提升了沉陷区景观环境质量，极大改善了采煤沉陷区的生态环境，增强了沉陷区生态系统服务功能，产生了长远的生态效益；另一方面，改变城市格局，增加了失地农民的社会就业机会，使失地农民利益得到保障。项目的实施和推广，改变了采煤沉陷区传统农业模式，缓解了矿区人地矛盾，促进了社会、经济与自然的协调发展。项目有利支持了中国碳谷、绿金淮北发展战略，打造以生态修复、资源保护、科学研究、文化创意、旅游休闲为一体的城市中央绿金公园，形成了六湖串珠独具特色的山水城市风貌，实现了人与自然生态宜居的和谐发展，是高潜水位采煤沉陷区改善生态环境、促进区域经济快速可持续发展的有效举措，解决了煤炭资源“金山银山”与生态环境“绿水青山”之间的矛盾。

完成单位：安徽省交通航务工程有限公司、安徽大学

完成人：李世龙、方申柱、张 琼、刘 辉、卫邦齐、史晓涛、刘朝发、张玉明、朱晓峻、孙庆业

高砾质土心墙堆石坝复杂坝料关键技术与工程应用

土石坝具有基础适应性强、坝料就地取材经济性好等突出优点，成为筑坝历史最为悠久、应用最为广泛的坝型。尤其是砾质土料在防渗和力学性能上具有优良特性，使得砾质土心墙堆石坝在高土石坝中极具竞争力。然而，天然砾质土料往往级配宽且离散性大、土性及含水率复杂；同时，坝壳堆石料受料源、地质及岩体条件所限，需大量利用工程开挖料。相比土料改性和堆石料筛选等复杂的人工措施，采用就地取材，直接上坝利用，能够实现高效、经济、环保的填筑方式，具有重要的意义。

本项目依托澜沧江苗尾高砾质土心墙堆石坝工程，针对含砾量低且不均匀、高细粒含量及高含水率的复杂砾质土防渗土料，软硬相间、粒形不良砂板岩混合堆石料就地取材、直接上坝填筑利用的关键技术问题，建设、设计、科研单位联合攻关，开展了系统研究，取得一系列创新性成果。建成了国内坝高最高的风化砾质土料无改性措施、砂板岩开挖混合堆石料无筛选，直接上坝填筑的砾质土心墙堆石坝。大坝运行以来稳定、渗流与变形控制指标良好。主要创新成果与先进性为：

1. 基于不均匀含砾量和高细粒含量土料压实度与力学性质研究，揭示了砾质土全料物理力学性质主要受细粒含量控制的特征规律，提出了“细料压实度为主，全料压实度复核”的高砾质土心墙土料碾压质量控制指标体系，延伸和拓展了规范 $P_5 \leq 30\%$ 的砾质土上坝控制标准，相比于“双控”或“单控”压实度标准更符合含砾量低且不均匀砾质土实际碾压施工特征，真实准确地反映碾压施工质量，提高了施工效率。

2. 研究了风化砾质土粗粒土击实试验不能准确反映全料的最优含水率的问题，揭示了风化砾质土击实试验由于风化砾破碎及含水率试验时取样重量偏少导致不能真实反映全料最优含水率的客观原因。提出了以细粒料最大干密度和最优含水率推求全料最优含水率的方法，完善和拓展了规范风化砾质土料击实试验最优含水率的评价与应用范围，准确合理的评价了苗尾风化砾质土全料实际最优含水率，实现了土料不需改性和调整含水率直接上坝填筑利用。

3. 论证了软化系数小、扁平针片状含量高、含软岩的开挖堆石料用于高坝坝体填筑的适应性，碾压后颗粒破碎不增加 0.075mm 以下细粒含量，透水性满足坝壳料要求，实现了薄层互层结构砂板岩开挖料直接上坝和充分利用。

4. 构建了可全面考虑堆石料密实度影响的状态量双屈服面模型，提出了非连续网格加密计算方法，研发了复杂坝料条件下土石坝高精度有限元数值模拟方法，计算成果与监测资料

接近。

2019年4月28日，由江苏省科技查新咨询中心对本项目进行了查新，查新结论如下：
本项目所述的研究成果在国内外已检索文献中未见述及

2019年10月14日，中国水利学会组织了以中国工程院院士马洪琪为组长，全国设计大师杨泽艳等著名专家组成的评价委员会，对本项目进行了科技成果评价，意见认为：本项目研究成果具有创新性，研发技术难度大，成果已成功应用，取得了显著的经济、社会和环境效益，在水利、水电工程等领域具有广阔的推广应用价值。

本项目获授权发明专利7项，软件著作权1项，发表论文28篇。

研究成果已成功应用于澜沧江苗尾水电站砾质土心墙堆石坝工程，直接经济效益约1.7亿元，并推广应用于澜沧江上游古水、如美水电站，四川省两岔河水库，新疆大石峡、阿尔塔什水利枢纽等复杂高土石坝工程，取得了显著的经济、社会和环境效益，进一步提升了我国高砾质土心墙堆石坝设计水平，在水利、水电工程等领域具有广阔的推广应用价值。

完成单位：华能澜沧江水电股份有限公司、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

完成人：吴关叶、艾永平、郑惠峰、黄泰仁、卢吉、李国英、曹学兴、刘瞳昌、孟永旭、鄢镜

丰满水电站重建工程碾压混凝土坝关键施工技术

为解决大型水电站重建面临的近坝坝基开挖以及碾压混凝土在严寒地区施工和越冬保温问题，我司以丰满大坝重建工程项目为依托，开展了《近距离重建丰满水电站碾压混凝土重力坝工程关键施工技术研究》科研活动，研究形成了严寒条件下大型水电站重建工程开挖爆破关键技术、严寒地区碾压混凝土温度控制及防裂关键技术以及碾压混凝土施工自行式液压高效切缝机等技术成果和碾压机具设备，提高工程施工质量的同时，还取得了巨大的经济效益，填补了国内在大型水利重建工程建设领域空白。此外，经国内相关单位查新和专业协会确认，依托课题研究的严寒条件下大型水电站重建工程开挖爆破关键技术达到了国际领先水平；严寒地区碾压混凝土温度控制及防裂关键技术技术达到了国内领先水平。

根据丰满大坝重建工程的水文气象条件、自然条件和枢纽布置特点，在总结目前城市近距控制爆破和碾压混凝土先进施工经验的基础上，重点对新坝坝基开挖爆破振动监测、严寒条件下冰冻岩土物理性质变化、新坝坝基开挖周边构筑物飞石防护技术以及严寒地区特有的混凝土越冬面保温材料、保温工艺开展研究，同时结合碾压混凝土施工工艺发展趋势还针对性在层间结合质量控制、施工期混凝土温控方面进行研究，从技术上切实保证丰满大坝重建工程质量。主要研究项目包括：严寒地区大型水电站近距离重建工程开挖爆破快速施工关键技术研究；碾压混凝土筑坝智能化、数字化集成管理系统研究和应用；严寒地区碾压混凝土温控及防裂关键技术研究；碾压混凝土施工工艺和机具一体化研究和应用。

目前，我国除西部高原地区外，已规划的大型水电工程基本已全面开工，随着我国流域开发的深入，新开工的大型水电站将逐渐减少。而建国初期建成的水电站已运行近六十年，因此，这些水电站今后都将面临加固或重建问题。丰满水电站是我国第一个进行全面治理（重建）的大型水电站，通过依托丰满重建工程开展技术研究，填补了我国在大型水电站改扩建工程关键施工技术的空白的同时，还积累了该领域的施工经验。通过本课题研究，共为项目创造 5717.98 万元的经济效益。本课题的研究成果在今后水电站重建方面具有广泛的应用前景。

本项目自 2014 年 7 月通过立项以来，依托课题项目研制的碾压混凝土施工自行式液压高效切缝机、严寒地区坝基飞石防护技术在黄登、奋斗、周宁抽蓄等其他在建碾压混凝土坝工程中得到推广应用。此外，在课题实施期间共获得省部级科技奖 2 项；电建集团科技奖 3 项；中电建协智慧工地管理成果 1 项；省部级工法 1 部；电建集团工法 5 部；专利授权 30 项；

QC 成果 8 项；省部级“五小”技术创新成果 3 项。

完成单位：中国水利水电第十六工程局有限公司、长江水利委员会长江科学院

完成人：陈祖荣、杨伟明、朱晓秦、黄财有、刘振宇、赖建文、林立、黎卫超、胡英国、李 达

400m 级全钢衬超长斜井施工关键技术

抽水蓄能电站引水系统普遍采用平洞+斜井布置方式，为降低投资并减小对环境的影响，其斜井设计长度更大，施工难度、安全风险也更大。长龙山抽水蓄电站引水下斜井总长度 415m，倾角 58°，断面尺寸 5.0×5.9m，采用全钢衬设计，斜井单级开挖长度居国内第一，世界第二。400m 级超长斜井施工具有导井施工难度大、扩挖支护、钢衬安装及混凝土回填施工难度极大、安全风险极高等特点，且无可借鉴的成功施工经验。

传统斜井开挖、钢衬安装及混凝土回填施工方法存在精度无法监控、机械化水平较低、作业环境恶劣、工效低、安全风险高等不足，不能适应“机械化换人、自动化减人”科技强安总体要求，也不能满足 400m 级超长引水斜井施工实际需要。为此，中国葛洲坝三峡建设工程有限公司以“创新技术方案、研发专用装备，并结合实践优化改进”为指导思想，开展了专项研究实践，最终实现了导井定向孔精准钻孔、扩挖支护安全高效、钢衬安装及混凝土安全快速施工，主要创新点如下：

1.400m 级超长斜井导井精准成型技术

首次采用“定向钻+综合测斜纠偏技术”实施长斜井导井钻孔，钻孔过程中采用 MWD 无线随钻测斜、可调磁偏角复测校核装置及多点测斜等综合测斜技术实时或间隔进行测斜纠偏，极大地提高了钻孔精度，钻孔偏差仅 0.95‰；采用“碗”型刀盘结构+槽型布齿滚刀+螺旋扩散滚刀布置，成功解决了超长超硬岩斜井导井反拉施工难题。



图 1 MWD 随钻测斜仪



图 2 反井钻刀盘及滚刀布置

2.超长斜井扩挖支护一体化施工技术

发明了斜井扩挖支护一体化装备，实现了钻孔、支护、扒渣一体化施工，上层平台为锚喷支护作业平台，中层平台为注浆机作业平台，下层平台上安装液压机械臂，可 359° 旋转，通过液压控制操作进行机械扒渣作业。提高了施工效率，降低了作业安全风险。

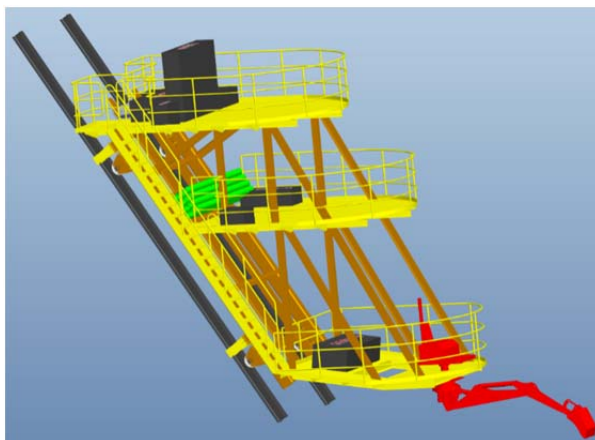


图3 斜井扩挖支护一体化装备

3.超长钢衬安装及混凝土施工关键技术

研究采用牵引车进行钢衬洞内水平运输，“双辊卷扬机+斜井专用运输台车”溜放钢衬；钢衬混凝土按 60m 长一次性浇筑，采用耐磨钢溜管加装自主研发的“大落差混凝土浇筑用缓冲器”输送混凝土，斜井上部 150m 以内浇筑一级配混凝土，下部浇筑自密实混凝土，保证了浇筑质量，提高了施工效率。

经湖北省科技信息研究院查新检索：在所检国内外文献范围内，未见有相同关报道。

该关键技术成果于 2021 年 3 月 11 日通过了中国能源建设集团“400m 级全钢衬超长斜井施工关键技术”科技成果鉴定会。专家组一致认为：该成果总体达到国际领先水平。

项目关键技术获实用新型专利 9 项，受理发明专利 1 项，总体技术水平达到了国际领先水平。

本技术在长龙山抽蓄电站 3 条引水下斜井施工中成功应用，定向钻孔偏斜达到 0.95%，远小于设计指标 5%，定向孔全角变化率可控制在 $2.5^{\circ}/30\text{m}$ 以内；扩挖支护月最高进尺达 108m，创世界纪录；钢衬安装及混凝土回填达到了 60m/18d，为业内最快，取得直接经济效益 1191.9 万元，避免增设施工支洞及征地，产生间接经济效益约 1350 万元。受到参建各方的一致好评，为工程首机发电奠定了坚实的基础，我国目前正在大力开展抽蓄电站建设，该项技术在类似长斜井工程中具有很高的推广价值。

完成单位：中国葛洲坝集团三峡建设工程有限公司

完成人：李友华、江谊园、齐界夷、刘治江、许 华、余小宝、张红兵、罗品方、张江波、王 俊

复杂条件引水隧洞长距离施工关键技术

本项目依托山西省中部引黄隧洞工程，针对复杂条件引水隧洞长距离施工中的近接构筑物、高压富水、盾构洞内接收与开挖面稳定性控制难度极大等关键技术难题，以中铁十二局集团有限公司科技计划等科研与工程项目为支撑，依托山西省中部引黄工程等国家重难点工程，采用多学科交叉、“产-学-研-用”模式，历经近十年科研攻关与工程实践，在理论、方法、技术、装备、工艺等方面取得了一系列突破，形成了复杂条件引水隧洞长距离施工关键技术体系，如图1所示。

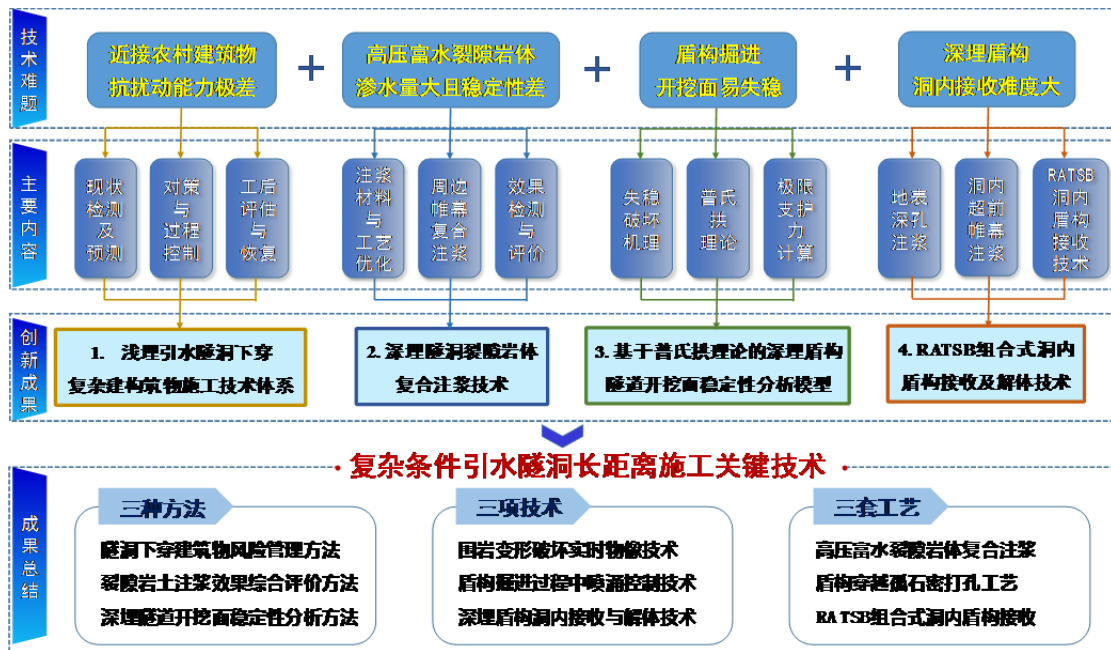


图1 项目成果技术体系

1. 主要技术创新

(1) 浅埋隧洞下穿复杂构筑物施工技术体系

针对本工程隧洞埋深浅，地层围岩条件差，而且地面建筑物密集，结构复杂多样，工程影响范围内主要建筑物为农村建筑物，隧道施工安全风险性极大的特点，创立了浅埋隧洞下穿复杂构筑物施工技术体系。

(2) 深埋隧洞裂隙岩体复合注浆技术

针对依托工程复杂地质条件下的工程特点，基于隧洞开挖扰动条件下岩石变形破坏特性的实时物像技术，制定了深埋隧洞裂隙岩体复合注浆技术体系，建立了复合注浆设计方法和效果评价体系，研发了隧洞周边帷幕注浆技术，实现了复杂地层的可靠加固与高效堵水。

(3) 富水砂卵石地层组合式盾构接收施工技术

为减少始发方案中的薄弱环节，降低盾构接收风险，采用地表刚性袖阀管注浆，洞内水平超前帷幕注浆：在地表注浆时，洞内进行水平超前帷幕注浆，加固改善塌陷区地层条件，从而达到改善地层状况且支护隧洞的目的；通过管井降水降低水压，确保盾构安全掘进至贯通面并顺利出洞；在接收端使用暗挖法为盾构机顺利接收及洞内解体提供安全的工作面；在盾构接收时起到密封止水增加抗力的作用，可有效防止盾构机破墙后突泥突水情况的发生；RATSB 组合式盾构洞内接收工法较之常规的洞门钢环接收方案，操作更简便，不仅填补了富水砂卵石混合土地层深埋盾构洞内解体工法的不足，且多种成熟工艺组合使用，降低了盾构接收风险，取得了良好的经济效益和社会效益。

(4) 深埋盾构隧道开挖面稳定性控制技术

针对盾构隧道在深埋砂土地层和富水黏土地层中的开挖面稳定性问题，结合普式拱理论提出了一种新的三维破坏模型。基于该模型，采用极限分析上限理论推导了深埋砂土地层中盾构隧道开挖面极限支护力的解析公式，与 FLAC3D 进行了不同变量下的全面对比，并将提出的破坏机制与离心机试验及现有经典方法进行对比了对比分析。将计算模型得到的破坏区域与离心试验和 FLAC3D 数值模拟得到的破坏区域范围进行对比，但整体吻合较好，尤其是当内摩擦角变化时与数值模拟得到的破坏范围较为一致。

2. 授权专利及论文情况

本项目研发过程中共申请专利 20 余项，其中已授权发明专利 10 项；编写工法 5 项；开发软件著作权 2 项；发表学术论文 9 篇；培养博士、硕士研究生 5 人。

3. 实施效果

本项目研究成果在山西中部引黄工程施工中得到了充分的应用，在安全、质量及进度方面取得了良好的效果，具有显著的经济效益和社会效益。有效地解决了施工中遇到的周边环境极其复杂（近距离下穿居民区、桥梁、高速公路和河流等）、地质条件差、高压裂隙水注浆封堵难度大，有轨运输施工组织不便，以及隧洞断面小、开挖支护作业效率低，下穿北川河盾构施工中先后遭遇受北川河影响的高压富水区、北川河主河道、大粒径、高强度孤石段不良地质等施工难题，为工程的快速施工及完成起到了保驾护航的作用。

4. 成果推广及应用前景

本项目研究成果经专家鉴定整体达到了国际领先水平，成功应用于山西省中部引黄工程总干 3#隧洞和西干线隧洞、徐州地铁、太原地铁等一批国家重难点工程，优化了隧道结构，保障了施工质量，加快了施工进度，确保了施工安全，产生了显著的经济效益。

研究成果提升了我国复杂条件下引水隧洞长距离施工的技术水平，将进一步完善引水隧洞施工的技术体系，提升我国复杂条件引水隧洞技术的施工水平，经济、社会、环保效益显著，具有广阔的应用前景。

完成单位：中铁十二局集团有限公司、中铁十二局集团第二工程有限公司、北京工业大学

完成人：王 林、徐铁强、李鹏飞、赵光武、张 彦、毋海军、谢永录、陈 乾、武鑫星、范立峰

一种核电站安全壳钢衬里模块化施工方法

“华龙一号”是我国自主研发的百万千瓦级三代压水堆核电技术，融合了“能动与非能动”的先进设计理念，主要技术指标和安全指标满足我国和国际最新安全要求，单台机组设计功率 100 万千瓦时，是我国打造“一带一路”核电工程技术“走出去”的推荐堆型，其安全性和经济性具有广泛的推广意义，在我国核电建设发展中具有广阔的发展前景。

“华龙一号”安全壳钢衬里作为反应堆厂房预应力钢筋混凝土安全壳的重要组成部分，与预应力混凝土结构共同组成核反应堆的第三道安全屏障，包括钢衬里底板、筒体及穹顶三大部分。钢衬里外观呈圆柱形，直径 46.8m，高 77.93m，由 6mm 厚特制 Q265HR 钢板、外侧加强型钢背肋、锚固钉焊接而成的密封容器结构，其中还包含 45 个环吊牛腿、194 个贯穿件、3 个大型闸门套筒、1054 个锚固件等附属构件，其制作、安装难度大且精度要求高。钢衬里属于核安全 2 级设备，质保等级 QA1 级，抗震类别 I 类，连接以焊接为主，设计要求采用的钢板弹性性能好，并具备较高的可焊性。安全壳钢衬里施工位于关键路线上，且与土建交叉施工，管理难度大，前期策划要求高、过程实施工作强度大，为此经过大量研究及技术攻关，我司提出了一种核电站安全壳钢衬里模块化施工方法，其创新性与先进性如下：

- 1.自主研发了筒体模块化工艺，包括：专用桁架吊索具系统、薄壁大直径超高偏心模块防变形工艺、模块贯穿件及锚固件精准定位工艺、薄壁大直径模块对接就位技术，缩短了施工工期。

- 2.改进了双曲率成型卷板设备，提高了薄壁半球结构穹顶预压成型质量和工效；

- 3.优化了穹顶拼装、吊装工艺，自主研发了底板及周边环板安装防变形工艺和环吊牛腿组拼焊接防变形工艺，提高了工效，保证了施工质量。

该关键技术成果在中国核工业集团有限公司组织的“华龙一号钢衬里施工关键技术研究与应用”项目成果鉴定会上，评价委员会一致认为：项目研究成果整体达到国际先进水平。

本项目取得授权发明专利 4 项，授权实用新型专利 3 项，省部级工法 1 项。

“华龙一号”钢衬里模块化施工关键技术为我国自主研发的三代压水堆核电建造关键的技术突破，借鉴行业先进的装配式技术理念，在核电领域首次采用模块化预制、拼装、吊装技术，解决了核电建安交叉施工，安全风险大，劳务用工缺口大的问题，形成多项专利、施工工法等知识产权成果。通过福清“华龙一号”首堆的应用，验证了“华龙一号”钢衬里模块化施工关键技术在核电建设施行业具有较高的创新性、先进性和实用性，2019 年又在成功

推广应用至漳州“华龙一号”1、2号机组，由此可见该成果对“华龙一号”新型压水堆核电技术的推广和应用具有指导意义，随着我国核电技术的发展，将在核电建设中具有广阔的应用前景。

完 成 人：周玉东(中国核工业二四建设有限公司)、曾庆威(中国核工业二四建设有限公司)、卓世旭(中国核工业二四建设有限公司)、汤志孟(中国核工业二四建设有限公司)、乔军辉(中国核工业二四建设有限公司)、温新中(中国核工业二四建设有限公司)

“三大一高”消突技术在立井井筒揭突出煤层 施工中的研究与应用

为防止发生煤与瓦斯突出事故，井巷工作面揭穿突出煤层前，必须严格执行两个“四位一体”综合防突措施，实施钻孔对煤体中的瓦斯进行抽放，消除煤层的突出危险性。同时精准预测煤层赋存形态，确定预抽煤体瓦斯量，准确控制揭煤爆破时的炮眼深度及炸药装填量，对揭煤安全施工都是至关重要的因素。

目前国内外对立井井筒揭穿突出煤层常规采取穿层钻孔预抽区域防突措施，一般选用 ZLJ-700 煤矿坑道钻机进行钻孔施工，但普遍存在抽采钻孔孔径小（一般为 $\phi 74\text{mm} \sim \phi 94\text{mm}$ ）导致煤层透气性较差、钻孔施工速度慢导致揭煤工期延长；抽采管路多采用 $\phi 108\text{mm}$ 、 $\phi 159\text{mm}$ 、 $\phi 219\text{mm}$ 的无缝钢管，抽采煤层赋存瓦斯速度较慢、时间较长，抽采效率较低，上述问题导致揭煤施工总工期较长、资源投入较多、安全保障程度较低。

本项目针对上述问题，根据立井井筒井下工作面作业空间受限情况，对钻孔机具进行调研并合理配备，达到最佳设计；为了提高煤层透气性、缩短抽采工期，在抽采钻孔孔径、抽采设备、扫孔方式等方面进行攻关；通过运用 BIM 技术指导揭煤设计、揭煤施工，精确将煤层赋存形态呈现出来，并为抽采效果检验、评价提供依据。

关键技术：

1.立井井筒工作面采用大直径抽采钻孔、大转矩液压钻机、大直径抽采主管路等技术措施提高抽采效率。

采用 $\Phi 73\text{mm}$ 三棱钻杆，施工 $\Phi 113\text{mm}$ 抽采钻孔；在井筒工作面布置两台大转矩履带式液压钻机（ZDY-3500LQ，转矩 3500N.m），实现双机分区快速移机、定位、钻进；立井井筒内悬吊大直径瓦斯抽采管路（DN300、 $\Phi 325 \times 4$ ），以降低管网沿程阻力；通过上述措施，提高瓦斯抽采效率。

2.扩孔增透、延孔沉渣与巡回扫孔等措施并举，实现高浓度抽采瓦斯。

采用掏穴钻头将部分钻孔煤层段扩孔至 $\Phi 260\text{mm}$ ，并优化造穴钻孔布孔间距，增大抽采区域煤层透气性；将所有抽采钻孔穿过煤层底板 5m（规程规定大于 0.5m），增加钻孔煤渣积存空间，保证钻孔储气空间；执行巡回扫孔制度，每两天对所有钻孔进行一次全面扫孔，下入铝塑管，通过压风将孔内沉渣、积水排出孔外，保证钻孔通畅；并采用自制的抽采瓦斯汇

流兼放水装置，提高汽水分离效果；多措施并举，实现高负压、高浓度抽采瓦斯。

3.应用 BIM 三维建模软件进行抽采钻孔设计、模拟揭煤区域形态、抽采达标预判和效果检验辅助设计。

运用 BIM 三维建模软件对煤层进行建模，三维设计抽采钻孔；收集总结钻孔实际施工参数，模拟修正设计模型，展现钻孔覆盖区域煤层实际厚度、顶底板实际钻孔通过位置，从而实现精准预测煤层形态，准确计算预抽区域瓦斯储量，分析钻孔薄弱区域，通过对单孔瓦斯抽采浓度变化数据统计，结合抽采钻孔模型，合理选定区域措施效果检验钻孔布置位置。

完成单位：中煤第一建设有限公司、中煤华晋集团晋城能源有限公司

完成人：贾振刚、胡国保、李良山、朱广辉、袁长财、崔哲

斜井井筒栈桥式全闭环整体液压模板台车 研制与应用

1. 项目概述

陕西省榆林市榆阳中能袁大滩矿业有限公司袁大滩煤矿副斜井井筒含水层采用冻结法施工，冻结段长度 681m（斜长 253m~934m），冻结段于 2017 年 4 月份掘进贯通，8 月 31 日投入运行。2017 年 11 月开始副斜井冻结段井壁接茬缝处出现渗水问题，经注浆封堵，冻结段拱部和直墙处不再渗水。2018 年 1 月 14 日以后，冻结段底板相继出现了 12 处毗水点，主要为底板纵、横向裂缝处。现场对底板多次注浆封堵，原渗水点消失后 1~3d 在其附近又出现新渗漏点。鉴于副斜井冻结段反复出现渗漏点的现状，考虑原设计井筒井壁支护强度低，尤其底板承压能力较弱，可能发育成裂缝出现涌水溃沙对矿井生产带来威胁，经研究重新对冻结段进行套壁，在套壁期间应保障副斜井井筒正常行人、行车。为满足施工要求，特设计研制了斜井施工栈桥式全闭环整体液压模板台车，实现了“马蹄形”断面井壁全断面一次性浇筑以及模板台车自行走，杜绝了纵向接茬缝，增强了防水性能，降低了劳动强度。

2. 冻结斜井砌壁施工技术现状

斜井井筒施工早期采用传统组合模板浇筑混凝土。2010 年以后，借鉴隧道施工经验，采用液压模板台车对两墙和拱部进行整体浇筑。斜井井筒“马蹄形”断面井壁浇筑，常规方法是一般先采用传统浇筑方式施工底拱和地坪，再采用液压模板台车浇筑两墙及拱部，这种技术薄弱点是底板和两墙接茬缝在井筒底脚，易造成井筒破坏井壁漏水问题，且机械化程度低，投入人力很多，工期和质量不能保证。2017 年我单位在袁大滩主斜井井筒治理中首次采用“仰拱”和“顶拱”分体式液压模板台车，分次对底板和顶板混凝土浇筑。这种技术将底板和两墙接茬缝位置提高，减小了井壁漏水现象，但仍存在施工速度较慢，机械化程度较低，掘砌施工无法平行作业，墙、拱部之间留有纵向接茬缝，封水性较差等问题。

3. 栈桥式全闭环液压模板台车砌壁施工技术及创新点

(1) 首次在斜井井筒“马蹄形”断面井壁施工中采用栈桥式全闭环整体液压模板台车砌壁施工技术，有效缩短砼浇筑工期，极大降低了施工成本，提高机械化作业水平。

(2) 实现了“马蹄形”断面的全断面一次性浇筑，相比较传统组合模板和分体式模板台车，杜绝了井壁纵向接茬缝，增强了防水性能；抛弃了分次组装、分次浇筑工序，提高了施

工效率；浇筑速度快，模板接缝少，提高了混凝土表面观感质量。

(3) 台车模板部分与栈桥部分相对独立，通过电机驱动-链条传动使两者相互运动，实现模板台车自行走，减少了设备资金投入，降低了工人劳动强度。

(4) 栈桥和台车相结合，使台车中部空间能够满足通车、行人要求，同时也考虑了掘进风筒、压风、供排水管路、线缆布置的畅通。除在移动就位和混凝土浇筑时影响掘进施工的通行外，其它情况下均能保证井筒施工通行的畅通，为掘砌平行作业提供了有利条件。

(5) 通过在井壁接茬缝处设置外贴式橡胶止水带、可复用注浆管，以及接茬注浆、事后复注，保证了井壁环形接茬缝的防水性能。

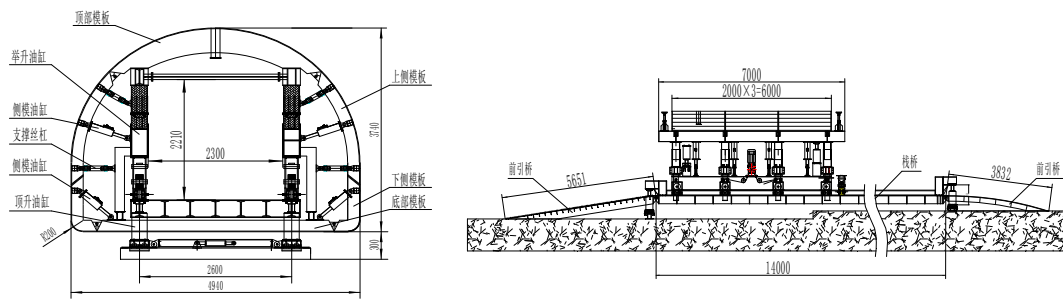


图 1 栈桥式全闭环整体液压模板台车平剖面图

4. 推广应用情况

该技术在陕西榆林袁大滩煤矿副斜井套壁施工中首次成功应用，也是我国首次在斜井井筒施工中应用。袁大滩煤矿副斜井冻结段 701m 套壁工程从 2019 年 2 月 25 日开工，至 8 月 13 日完工，用时 168 天，比合同工期（230 天）提前了 62 天，比袁大滩矿业有限公司要求工期（198 天）提前了 30 天。副斜井套壁工程提前竣工为实现袁大滩矿井 2019 年联合试运转的既定任务目标抢出了宝贵的时间，获得矿方及中能公司的贺信表彰和奖励。

目前该专利产品已具备大规模生产的条件，可广泛应用于类似煤矿、金属矿山、隧道等工程中，该技术现已推广应用至马城铁矿主斜坡道、里必主斜井等工程中，在国内冻结斜长最长（冻结长度 1109m）的马城铁矿主斜坡道工程施工中，组合形成了“五车五平行”的冻结斜井施工工艺，冻结斜井施工速度达到了 54m/月，较国内其他施工工艺施工速度 31m/月提升 74%以上，应用效果良好，取得了较好的反映及经验，为今后持续改进提供了依据。

5. 应用前景

本技术适合中长距离、大断面、混凝土支护型式的“马蹄形”断面斜井井筒。施工工艺先进，机械化程度高，改善作业条件，降低施工成本，混凝土质量优，防渗水效果好，有效缩短工期、可实现掘进与浇筑平行作业，提高生产安全系数，具有很好的推广应用前景。

6. 成果鉴定及获奖情况

该项目获得实用新型专利 1 项，受理发明专利 1 项，于 2020 年 4 月 22 日-26 日经中国煤炭建设协会组织专家鉴定，达到了国际先进水平，并于 2020 年获得河北省煤炭工业科学技术二等奖。

完成单位：中煤第一建设有限公司

完成人：臧培刚、刘晓亭、杜利锋、杜宏杰、魏朝飞、谢良仓

水电工程防渗帷幕运行可靠性综合评价研究

防渗帷幕是水库大坝防渗堵漏的关键组成元素，对水电水利工程来说，从前期的勘察设计，到施工验收，直至运行期的维护和安全定检与评价，水库的防渗都是重要的内容，防渗体系的功能和效果甚至决定着工程的成败。

至 2017 年，我国已建有各类水库 98795 座，总库容 9035 亿 m^3 ，居世界首位。全国一半以上水库建成于 20 世纪 50~70 年代，平均坝龄 40 年左右，较多大坝已进入中~老龄阶段，与之相伴的老化问题日趋突出。经过几十年的运行，防渗帷幕在长期高压渗水作用下，遭受持续性侵蚀而老化衰减，许多防渗工程达不到要求，造成渗漏增大，使水库大坝处于病险状态。另外，近年来陆续竣工、投产的项目，其防渗体系也存在一定的问题，使其不能发挥应有的工程效益，甚至存在安全问题。但目前并无相关的帷幕可靠性评价标准，缺乏评价和处理的依据。

从水库的环境地质理论体系和水库工程全生命周期演化研究来看，开展“水电工程防渗帷幕运行可靠性综合评价研究”既具有理论意义，也具有很好的工程实践意义。

项目组通过资料搜集、现场调查、勘察、试验、计算和综合分析等手段，对水电工程防渗帷幕运行可靠性综合评价进行了系统研究。总结了典型水电工程大坝防渗帷幕的运行特点，形成了防渗帷幕溶出性侵蚀理论，揭示了帷幕老化的机制与规律，创建了防渗帷幕运行可靠性评价理论和方法体系，取得了以下创新性成果：

1. 基于防渗帷幕“老化尺度效应”和“相对防渗效率”，提出了识别帷幕体系老化的三种基本模式和对应的识别指标；建立了基于渗漏水溶液组分溯源解析、细观结构改变的帷幕体系渗透-溶蚀过程数值模拟方法；采用渗流场和温度场耦合的数值模拟方法，有效识别防渗帷幕薄弱部位。

2. 开展了室内防渗帷幕溶出型侵蚀模型渗透试验，揭示了帷幕水泥结石早期渗透量减少的“自闭合”现象和渗透水质的演变过程；基于室内析出试验和典型工程的现场测试，对比追踪了防渗帷幕及其环境体系碳同位素循环过程，证实了溶出型侵蚀白色析出物主要来自于水泥结石溶解、输移和沉淀。

3. 考虑活度、络合物影响，改进了开放系统下碳酸盐岩区帷幕体系地下水平衡状态水质模型和计算方法；将“基于水文地球化学原理的渗透系数计算方法”应用于岩溶地区防渗帷幕可靠性评价；创立了多物理场归一化分析方法，应用于帷幕薄弱部位的探查。

4.从“帷幕环境和历史”、“帷幕运行现状”、“帷幕时效性”和“数据可靠性”四个方面分三层级选定 26 个指标建立防渗帷幕可靠性综合评价指标体系，建立防渗帷幕可靠性各单一指标等级划分及分级评分标准，并运用 AHP 构权法建立多指标综合评分分级图，创建了防渗帷幕运行可靠性评价理论和方法体系。

5.开发了防渗帷幕渗漏处理材料——KC 型抗冲膏浆，具有很好的抗冲性能，又可保持优良的扩散能力，基本不降低水泥结石的强度，结石具有很好的耐久性。即可封堵较小的漏水通道，也可以处理高压大流量涌水，具备较好的技术经济性能。

本项目部分创新点已申请专利保护，关键技术创新点委托科学技术部西南信息中心查新中心完成查新检索，未见有与本研究项目相同的报道，各创新点具备新颖性。

项目于 2019 年 6 月通过电建集团组织的验收，2019 年 9 月通过中国岩石力学与工程学会组织的评价鉴定，评价委员会一致认为该项目研究成果总体上达到国际先进水平，在帷幕老化因素、机制和规律研究方面达到国际领先水平。

本项目至今已申请帷幕运行现状的探查、测试和诊断、评价标准和帷幕灌浆材料等相关的发明专利 13 项，已授权的发明专利 6 项，授权发明专利对应的实用新型专利 3 项。

项目研究成果应用于全国多个水电站的渗漏勘察、防渗帷幕评价和帷幕补强处理。项目研究依托的窄巷口水电站其稳定和渗漏问题处理成功后，每年新增发电收益 1800 万元；项目研究应用于马马崖一级水电站蓄水过程中的防渗帷幕综合评价，查明了防渗帷幕的薄弱环节，经处理后，保证了枢纽建筑物的长期稳定，保证电站正常发电；项目研究对乌江东风和乌江渡等水电站防渗体系的综合评价研究促进了工程安全稳定运行，保障电站按计划正常发电。

通过本项目的研究，初步形成了一条水电水利工程防渗帷幕、渗控体系设计、施工、检查和处理的完整服务体系 and 产业链，可应用于待建项目的渗控方案布置及优化设计、防渗帷幕材料和帷幕施工工艺的改进、水电站/水库定检，防渗帷幕安全及有效性评价、对防渗帷幕进行补强加固处理、及水电站扩机项目渗控系统可靠性评价及处理等。本研究项目属于水电水利工程领域，但也可应用于市政、交通和矿山行业涉及防渗帷幕的相关工程领域，具有广泛的推广应用潜力和推广价值。

完成单位：中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司、河海大学、中国水电基础局有限公司

完成人：余波、郑克勋、朱代强、宋汉周、刘胜、苗志斌、饶承彪、李刚、刘祥刚、高传彬

煤化工（焦化）粗苯加氢装置成套施工技术

粗苯，是炼焦生产过程中，由来自焦炉的荒煤气经冷却和用各种吸收剂处理回收后得到的副产品，是紧俏的化工原料。而粗苯通过进一步加工精制后，可获得许多用途广泛、国民经济发展必须的产品，如纯苯、甲苯、二甲苯和重苯等多种宝贵的、高附加值产品，具有可观的经济效益。

煤化工粗苯加氢精制项目是国家鼓励发展项目，采用先进、环保型的粗苯加氢精制工艺，以提高粗苯加工工业发展的质量和效益。

苯加氢项目由制氢、加氢精制、预蒸馏、萃取蒸馏等主要装置组成，设备主要为高塔、槽罐、反应釜等，其中压力容器设备约 120 台；管道约 3 万米，多为 GC1 压力管道；装置设计压力 5.2Mpa，设计温度 500℃。由于苯加氢特定的功能和结构，苯加氢工程与普通冶金工程相比，在无类似工程施工经验的情况下，施工的难度更大。

煤化工粗苯加氢工程施工，目前尚无类似成熟的成套“苯加氢工程安装施工技术”可以直接借鉴！因此公司提出了规划和建立苯加氢知识产权战略的思路，对公司多年来积累的苯加氢施工技术进行收集、整理、总结、提升和包装，形成了《煤化工（焦化）粗苯加氢装置成套施工技术》。并最终在宝钢化工一期苯加氢工艺环保节能综合改造项目中成功应用，保证了工期、质量和安全，满足了施工需要。

苯加氢项目施工的主框架平台、设备、管道安装是工程的施工重点，常规施工顺序是：先安装主框架平台，再安装设备后配管等。但由于工程的特殊性，五冶集团上海有限公司采用煤化工（焦化）粗苯加氢装置成套施工技术精心组织，合理安排，改变传统施工方法，设备安装与框架安装充分协调，与框架安装配合交叉作业，保证安装工作顺利进行。粗苯加氢装置成套施工技术工艺技术先进，方案因地制宜，缩短了施工工期，降低了成本，保证了过程安全，达产快，投产后运行优良，充分证明该施工技术工艺成熟，合理可靠。其主要内容和关键发明点如下：

1. 主装置钢框架、平台与分段塔设备及平台上设备“搭积木式”立体交叉安装技术

关键发明点：创新了主框架分段安装，框架平台及平台上设备、塔设备交叉安装施工技术。

2. 塔、卧式罐、换热器、加热炉等设备安装技术

关键发明点：创新了高塔设备等整体吊装，一次性完成设备调整固定安装施工技术。

3. 大型储罐安装技术

关键发明点：创新了倒装技术，研发了自动焊接工艺及焊接装备。

4. 管道安装与焊接技术

关键发明点：创新了压力管道安装施工方法、耐热钢管道焊接方法技术，研制了材料快速检测工具，研制了液压坡口机和自行研制的管道组合式对口器、管道内保护装置等设备。

粗苯加氢装置成套施工技术，包括 15 件已授权专利，及可覆盖全施工过程的 29 份作业指导书和 5 册施工过程记录表，同时形成 1 项省部级工法、1 项行业部级工法，1 项中冶集团科技成果鉴定，达到国际先进水平；发表相关论文 1 篇。该技术形成的一套具有高技术含量的施工安装技术和工机具设备，为国内同类工程建设提供了技术支撑与保证，加快和提升该类生产线技术在我国转化、推广、应用的进程，促进了煤化工粗苯精制建设行业的科技水平的提升。

经济与社会效益如下：

经济效益：确保了粗苯加氢装置施工的顺利进行，各项目均达到设计要求，并达到绿色施工的目的，提高我公司在苯加氢工程施工竞争力。每个项目节约施工成本约 100 万元，为业主减少上亿元损失。与常规施工方法相比，采用“煤化工（焦化）粗苯加氢装置成套施工技术”，劳动生产率提高约 1.4 倍，可缩短工期 2 个月；减少作业人员 20 人，节约施工成本 98 万元。

社会效益：通过本技术的应用，工程质量符合设计规范要求、工期提前完成、提前达产 2 个月、产品质量合格，为业主提前创效 12500 万元。具有广泛的推广应用价值。

五冶集团上海有限公司通过《粗苯加氢装置成套施工技术》，形成一套具有高技术含量的施工安装技术和专用工机具设备，培养了一批安装同类设备的施工技术管理人员和施工操作人员，提高了公司的综合施工能力，增强了企业的核心竞争力。同时也使我公司粗苯加氢精制工程施工技术走在同类企业的前沿。

完 成 人：匡礼毅(五冶集团上海有限公司)、陈和平(五冶集团上海有限公司)、冯 娜(五冶集团上海有限公司)、廖兴银(五冶集团上海有限公司)、陈小东(五冶集团上海有限公司)



铁路桥梁篇

超大跨度双层公路悬索桥设计建造创新技术

本研究成果依托武汉杨泗港长江大桥--跨度 1700m 双层钢桁梁悬索桥，世界上跨度最大的双层公路悬索桥。大桥采用双向 12 车道设计，桥面总宽 34.3m。上层为城市快速路，双向 6 车道，设计速度 80km/h，两侧设人行观光道。下层为城市主干路，双向 6 车道，设计速度 80km/h，两侧设非机动车道和人行道。主缆跨径布置为 465+1700+465 米；主梁采用华伦式钢桁梁，桁高 10 米。主塔采用门式钢筋混凝土塔，基础采用圆端形沉井结构，锚碇采用直径 98 米圆形地下连续墙结构。全桥共两根主缆，每根主缆由 271 根索股组成，每根索股由 91 根直径为 6.2mm、抗拉强度 1960MPa 高强度钢丝组成；吊索采用钢芯钢丝绳。



一、主要关键技术和创新点

1.超大跨度双层悬索桥全焊钢桁梁新结构：首创了双层全焊板桁组合钢桁梁作为悬索桥加劲梁结构，采用全新设计构造、整体制造全焊连接，简化了大桥结构，与国外同类型桥梁相比，钢材用量节省了 10.2%。首创了多面承压抗拔组合传力主缆锚固系统，有效降低了锚体混凝土的应力集中程度，提高了锚固系统可靠性和耐久性。首创了曲线型主索鞍结构，保证了主缆索股准确定位和索鞍均匀受力，提高了悬索桥的整体性和安全度。

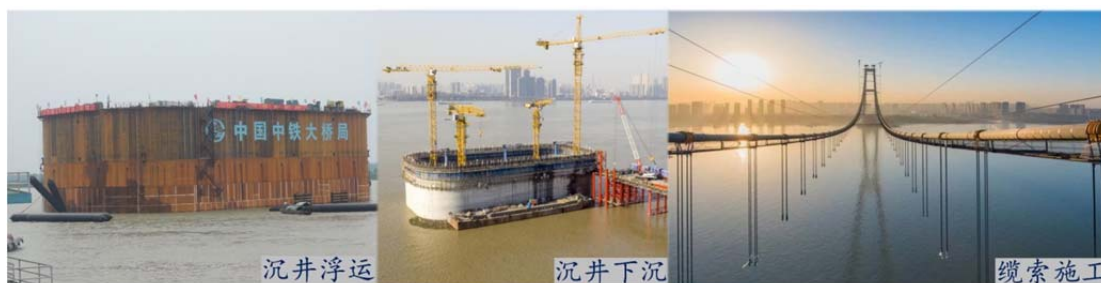
2.大直径超高强度主缆钢丝新材料：大桥主缆设计首次采用了大直径超高强度钢丝，单根直径 6.2mm、抗拉强度 1960MPa，是国际悬索桥主缆钢丝最高级别。同时设计指导生产厂家研发，首次实现超高强度悬索桥钢丝的全过程国内自主生产，推动了桥梁原材料的技术进步。



3.硬质黏土条件下超大型沉井基础新工艺：根据桥位基岩埋藏较深，坚硬黏土层较厚的具体情况，设计摒弃大型群桩基础而采用超大型沉井基础浅埋结构设计和穿粘土下沉新工艺。

通过混凝土沉井与钢沉井的新型连接构造、大型沉井气囊法主动转向下河、绞吸式潜水挖泥机取土、刃脚盲区水下爆破等创新设计和施工工法，首次实现了超大型沉井在硬塑黏土层中的安全、平稳、精准下沉，增加了结构安全度和悬索桥受力安全储备。

4.超大跨度悬索桥快速安装及线形控制新技术：研发了 1000 吨级 36m 长全焊接钢桁梁节段制造、运输及安装新技术，实现了加劲梁无支架高精度快速安装与合龙，创造了 36 天完成钢梁安装施工的世界纪录。首次采用了主基准索股加相对基准索股法和层间距定量控制法进行索股垂度调整，提高了主缆安装精度和效率，索股排列有序，受力均匀，创造了单日架设 12 根索股的记录。



5.基于非线性控制理论的精细化分析新方法：首创了散索鞍和锚跨线形联合确定方法，解决了强非线性条件下缆索系统收敛性问题，实现了主缆无应力索长精确下料和建造全过程的线形、索力控制；提出了自适应变参数黏滞阻尼控制技术，解决了大跨度桥梁在运营期间的动力响应问题，实现了大跨度桥梁多目标振动自适应协同控制。



二、科技成果评审及成果应用

2016 年 4 月 9 日，“直径 6.2mm-1960MPa 锌铝合金镀层钢丝成果”经评审在国内属于首创，达到国际领先水平；2018 年 12 月 14 日，“超厚硬塑黏土层大型沉井下沉施工技术”经评审，研究成果总体达到国际领先水平；2020 年 11 月 6 日，“超大跨度双层公路悬索桥设计新技术”、“超大跨径全焊双层钢桁梁悬索桥施工关键技术研究”两项成果经评审，均具有创新性，促进了我国大跨度悬索桥在新材料、新结构、新工艺、新设备等方面的技术进步，社会、经济和环保效益显著，整体技术达到了国际领先水平。

研究成果获得国家发明专利 11 项、实用新型专利 8 项、省部级工法 6 项，发表相关学术论文 30 余篇，节约成本约 2.75 亿元，获得 2020 年度中国铁路工程集团有限公司科学技术奖

特等奖、钢结构协会科学技术一等奖等多项国家和省部级荣誉，并获得了 2020 年度国际桥梁大会乔治·理查德森大奖。

研究成果已在杨泗港长江大桥工程中得到成功应用，取得了良好的经济和社会效益，项目关键创新技术已在瓯江北口大桥、五峰山长江大桥以及广东狮子洋大桥得到了推广应用。

完成单位：中铁大桥勘测设计院集团有限公司、中铁大桥局集团有限公司

完成人：徐恭义、毛伟琦、肖海珠、林兴武、张晓勇、李兴华、苑仁安、杨超锋、张成东、刘世锋、李恒、李陆平、霍学晋、郑大超、李少骏、申世靖、唐超、韩胜利、杜勋、黄峰

高速铁路 445m 跨径混凝土拱桥设计关键技术

为解决东西部发展不平衡，打好脱贫攻坚战，我国启动了新时代的“西部大开发”和“交通强国”战略，高铁网向西部山区快速推进。由于高铁线路曲线半径大，展线及绕避不良地质困难，要求高铁桥梁具备更大的跨越能力。混凝土拱桥因其具有跨越能力强、刚度大、温差变形小等优点，成为山区高铁大跨度桥梁的首选桥型。然而，随着高速铁路向艰险山区进一步纵深拓展，高铁特大跨度混凝土拱桥面临以下严峻挑战：（1）如何解决“特大跨度-高平顺性”的尖锐矛盾；（2）缺乏变形控制基准和设计方法；（3）亟需研发适应艰险山区环境的特大跨度混凝土拱桥成拱技术；（4）艰险山区恶劣的自然环境对高铁桥梁的运维提出了更高要求。面向国家重大战略需求，项目组历经多年科技攻关，创新了艰险山区高速铁路特大跨度混凝土拱桥的建造与运维关键技术，成功应用于以世界最大跨度混凝土拱桥——沪昆高铁北盘江特大桥为代表的多个国家级重大工程，推动了高铁混凝土拱桥跨径从 270m 到 445m 的巨大提升。主要技术创新包括：

1.构建了高铁特大跨度混凝土拱桥高平顺结构体系。首创了“T 构—连续梁”拱上全连续结构，解决了桥面短波不平顺难题，提升特大跨度拱桥的平顺度；顺应拱圈内力分布特征和刚度需求，提出了“鱼尾形”等高整体箱拱结构，降低了劲性骨架设计安装难度。

2.提出了高铁特大跨度混凝土拱桥的变形控制基准与设计方法。揭示了桥面横向挠度与梁端相对折角的映射关系，提出了拱桥整体横向变形的控制基准，以线路竖曲线半径要求为牵引，建立了桥面竖向变形控制基准，填补了特大跨度高铁拱桥变形控制基准的空白。考虑山区温湿环境作用，建立了劲性骨架混凝土拱圈的收缩徐变修正模型，探明了厚壁空心拱圈结构在不均匀温度作用下的细观应变和宏观变形分布规律，实现了特大跨度混凝土拱桥在自然环境中变形的精准控制。

3.创新发展了艰险山区特大跨度混凝土整体箱拱的成拱技术。提出了“拱脚先期成形+分环平衡浇筑”的两阶段成拱方法，在拱脚处先期形成全断面拱圈，降低了拱圈分环平衡浇筑段的有效跨度，实现了拱圈断面应力的削峰填谷。研发应用了铁路拱桥 C80 高强混凝土劲性骨架，提出了带初应力的钢管混凝土承载力计算方法。创新提出了钢管拱劲性骨架无风缆悬臂安装、节段模块化集成化吊装等工艺，适应了艰险山区的恶劣建造环境，实现了劲性骨架和拱圈外包混凝土的高精度工业化建造。

4.研发了艰险山区峡谷环境中的高铁桥梁运维保障系统。研发了桥面导风屏障，保障了

时速 350km 列车在峡谷紊乱大风环境下安全运行。研发了桥面竖向变形的实时智能监测、调节系统，为桥面长期高平顺性提供了保障。研发了特大跨度拱圈底面检查车系统，实现了艰险山区拱桥检查常态化。

项目授权国家发明专利 11 项，实用新型专利 7 项，省级工法 4 项，发表论文 35 篇，出版专著 1 部，为 1 部行业标准提供依据，解决了艰险山区高速铁路特大跨度混凝土拱桥建造与运维的关键技术难题，支撑了沪昆高铁北盘江特大桥等国家重大工程建设。项目成果创造了经济效益 10.91 亿元，荣获了中国中铁科学技术特等奖等科技荣誉。

经中国中铁股份公司的科技成果评价鉴定一致认为：“项目成果总体达到国际领先水平”。

主要科技创新成果国内外相关技术对比

主要创新成果		本项目	国内外同类技术	
创新点 1	1.1	“T 构-连续梁”拱上全连续结构	发明了拱上全连续结构，在北盘江特大桥中得到突出应用，拱上结构联长达 599.6m	无
	1.2	“鱼尾形”等高整体箱拱结构	首创了“鱼尾形”等高整体箱拱结构，北盘江特大桥拱脚区域 65m 范围内宽度从 18m 渐变为 28m	无
创新点 2	2.1	高速铁路特大跨度混凝土拱桥变形控制基准	首次提出了基于拱桥结构横向挠度和竖向曲率半径的变形控制基准，填补了无变形控制标准的空白	无
	2.2	劲性骨架混凝土拱圈在山区温湿度环境效应中的收缩徐变修正模型	提出了山区温湿环境下的混凝土收缩徐变修正模型，徐变变形预测离散性降低了 40%	离散性大，无法适应山区温湿度的环境特征
	2.3	不均匀温度作用下的拱圈宏观变形和细观应变分布规律	揭示了特大跨度劲性骨架混凝土拱圈温度场形成机理与分布规律，为桥面高平顺性控制提供了数据支撑，有效控制了拱圈混凝土的温致开裂	无
创新点 3	3.1	拱脚区域先期形成全断面拱圈的两阶段成拱方法	发明了兩阶段成拱方法，适用于特大跨度劲性骨架混凝土拱圈建造，建成了世界最大跨度混凝土拱桥-北盘江特大桥	无
	3.2	在艰险山区环境下的特大跨度混凝土拱桥工业化建造技术	提出了劲性骨架带底模吊装、非对称安装的成套施工工法，实现了基本单元现场工厂化组装、适应了艰险山区场地狭窄、交通不便的建造环境，节省了大临设施	已有的特大跨度混凝土拱圈施工方法在艰险山区建造环境有局限性
创新点 4	4.1	面向峡谷紊乱风场环境的桥面导风屏障	发明了挡风、导风一体化的导风屏障，已应用于沪昆高铁北盘江特大桥和云桂铁路南盘江特大桥，风速总折减率达 80%	无
	4.2	特大跨度混凝土拱桥拱上结构测力调高支座系统	发明了测力调高支座，可实现拱桥服役期内桥面高度再调整，已应用于沪昆高铁北盘江特大桥	无

完成单位：中铁二院工程集团有限责任公司、西南交通大学、中国铁道科学研究院集团有限公司

完成人：陈 列、谢海清、徐 勇、黄 毅、杨国静、韩国庆、胡京涛、何庭国、任伟、胡玉珠、赵人达、李小珍、高芒芒、陈让利、罗星文

超大吨位转体桥关键技术及应用

桥梁转体具有施工速度快、操作安全、能够较好的克服在高山峡谷、繁忙干线上架设构造物的困难，正得到了越来越多的推广应用，近几年来，在交通强国战略引领下，随着我国交通基础设施的大规模建设，桥梁转体需求朝着更大跨度、更大重量的方向发展。

项目团队围绕跨越铁路干线的 5 万吨级转体桥梁的建设，依托保定市乐凯大街南延工程跨保定南站主桥工程，深入开展了超大吨位转体桥关键技术的系统研究，在超大吨位转体转铰关键技术、单索面混凝土主梁选型与重量控制等方面有了重大突破，具备推广实用条件，具体创新点如下：

1.创新发展了平转铰的设计理论，首创了装配式球面平铰，解决了超大吨位转体桥的关键技术难题，取得了 5 万吨级转体工程的技术应用突破，并形成了配套的加工、检测、运输、安装工艺与验收标准。

装配式球面平铰技术，采用钢板为原材料，避免传统大吨位转铰采用铸钢工艺整体成型的内部缺陷，同时大大降低了转铰的重量，仅为铸钢工艺球铰重量的 60%左右，经济效益显著，节能环保。通过分块可拆装设计，控制转铰单块尺寸，增强了超大吨位转铰的制造、运输、安装灵活性。

2.系统研究了单索面混凝土斜拉桥主梁的受力规律，提出了带肋 W 形截面的主梁结构形式，增大了顶板跨越能力，实现了混凝土主梁的轻量化，显著提升了转体混凝土斜拉桥的经济性。

相较于传统截面，W 形截面更符合单索面斜拉桥桁式受力特征，通过内斜腹板承受拉力，取消了传统截面中的横隔板。每延米可节约混凝土 15%~30%，通过在两侧箱室顶板下设置横肋加劲，提高了顶板的横向跨越能力。

3.研发了大吨位转体桥梁定量称重工法和多点协同称重技术，解决了超大吨位转体桥梁称重技术难题。

称重工法的研发规范了转体桥梁的定量称重工艺。多点协同称重技术通过在梁端增设称重起顶点，利用其较大的力臂分散和减小起顶力，与墩底的起顶点联合协同称重，解决了超大吨位转体工程的称重难题。

4.提出了永临结合的跨中合龙段新技术，经工程实践显著降低了对营业线的影响，有效保证了合龙段施工过程安全。

永临结合的跨中合龙段新技术，采用简捷的钢板结构替代传统的合龙吊架，显著降低了合龙施工时桥下交通的安全风险。

2021年3月27日，中国交通运输协会于组织召开了“超大吨位转体桥关键技术与应用”科技成果评价会，包括院士、勘察设计大师在内专家组认为：研究成果创新发展了平转铰设计理论，首创了装配式球面平铰技术，取得5万吨级转体工程的技术突破；系统研究了单索面斜拉桥主梁受力规律，提出了带肋W形截面主梁形式；研发了定量称重工法与多点协同称重技术，提出了永临结合的跨中合龙段新技术，相关技术可用于6~10万吨级别的转体工程中，总体上达到国际领先水平。

本项目共获授权国家发明专利8项、实用新型专利11项，工法3项。

研究成果已应用于北京市西六环路丰沙铁路、保定市乐凯大街南延工程保定南站斜拉桥工程。西六环丰沙铁路斜拉桥为世界上首座墩顶转体法施工的单索面W形截面曲线斜拉桥，2009年9月建成通车至今，运营状况良好。保定市乐凯大街南延工程跨保定南站斜拉桥，采用(145+240+110)m子母塔单索面混凝土斜拉桥，桥面总宽39.7m。母塔及子塔均采用平面转体施工，跨中合龙，其中母塔转铰平面直径6.48m，转体重量46000t，转体长度263.6m。在转铰尺寸、转体长度、转体重量上均刷新了世界纪录。

超大吨位转体桥关键技术及应用针对超大吨位转体桥梁工程，在装配式转铰、转体称重和单索面斜拉桥混凝土主梁截面形式等方面取得了一系列的技术创新成果，取得了5万吨级转体工程的应用突破，解决了转体向更大吨位方向发展的关键技术问题，推动了转体桥梁建设的科技进步。随着我国交通基建的发展，更大转体吨位的桥梁必将会不断出现，本项目所形成的超大吨位转体桥关键技术将会继续在桥梁建设中发挥重要作用。

完成单位：中铁工程设计咨询集团有限公司、中建交通建设集团有限公司、中铁十八局集团第五工程有限公司、保定市市政工程有限公司、保定市城市设计院、北京城建亚泰建设集团有限公司

完成人：焦亚萌、王洪宇、刘文、费文彬、刘凯、李彦博、夏梦然、肖军伟、陈天艳、费恺、王建、张景辉、周解慧、李超、闫海涛

大节段钢桁梁整体制造、架设关键技术

大节段钢桁梁整体制造和架设是桥梁的建造技术向着大型化、整体化、工厂化方向发展所面临的重大技术挑战。本项目以“大节段钢桁梁整体制造、架设关键技术”为研究课题，在国家铁路集团、中国中铁股份有限公司、桥梁结构健康与安全国家重点实验室等多个科技项目联合资助下，由中铁大桥局集团有限公司、中铁山桥集团有限公司、中铁九桥工程有限公司共同研发。课题组在充分调研国内外钢桁梁建造技术的基础上，依托世界上首座跨度超千米的公铁两用斜拉桥—沪通长江大桥主航道桥上部结构建造，研发了大节段钢桁梁整体制造、架设及合龙技术，研制了 1800t 步履式架梁吊机以及大型钢桁梁智能化制造成套装备，开发了基于 BIM 的智能制造、架设技术，首次实现 Q500qE 高强度桥梁钢的工程应用，突破了三主桁两节间大节段钢桁梁高精度整体模块化匹配制造、大节段钢桁梁整体架设、高空多杆件对接、大悬臂精确合龙、大吨位架梁吊机研发等技术瓶颈。技术成果主要技术创新如下：

1.大节段钢桁梁整体制造关键技术。首次实现了 500MPa 级 TMCP 高强度桥梁钢全焊大节段工厂内整体制造。通过优化焊接工艺、研发专用焊接材料等，解决了制造中的焊接强韧化及变形控制技术难题；研发了折线型双整体节点弦杆复杂构件制作技术，解决了复杂构件生产过程中存在的焊接变形控制、制孔精度及几何尺寸精度控制等难题；首次完成 Q500qE 高强度桥梁钢两节间三主桁大节段整体钢桁梁整体制造，开发了大节段钢桁梁的模块化预拼装技术，实现高空多方位、多拼口的高精度拼装，大幅提升杆件和节段的制作匹配精度，减小了现场钢桁梁对接的难度。

2.大节段钢桁梁整体架设及合龙关键技术。研发了三主桁大节段钢桁梁整体节段对接技术。针对架设过程中，待架梁段和已架梁段的系统性多方向空间变位，通过详细的计算分析，采用了合理的杆件对接顺序，发明了大节段钢桁梁的对接装置和对接方法，通过对拉、对顶等工艺措施，顺利实现三主桁钢桁梁杆件的快速对接；每对称悬臂架设一对钢桁梁节段，同步完成多层斜拉索的挂设，大幅提升了大跨度斜拉桥上部结构施工的效率。

3.研制了 1800t 大吨位步履式架梁吊机。自主研发了世界上起重量最大的 1800t 步履式架梁吊机。开发了超大构件均衡吊装和大吨位高精度取力系统，架梁吊机三吊点呈“平面三角形”布置，实现了架梁吊机三吊点受力均衡及高精度同步提升。研发了架梁吊机前支点反力的高精度分配系统、新型监控管理系统等，实现了双悬臂架设工况下两台架梁吊机的同步提升；机架采用四桁片模块化设计，可分解为两台 900t 架梁吊机，提升了通用性；设计了自动

同步变幅、吊点横向微调、后锚固可翻转以避让锚箱与斜拉索等多种功能，自动化程度高，操作简便，大幅提升了架设效率。

4.研发了基于 BIM 的智能制造、架设技术。利用 BIM 技术，开发钢桁梁制造架设专业化应用管理平台，实现了基于 BIM 技术的设计、制造一体化、大型钢桁梁的厂内数字化预拼装等，并建立基于云平台的钢桁梁架设指挥中心，全面推动钢桁梁智能化建造。

2021 年 3 月 25 日，湖北省科技信息研究院查新检索中心，针对“大节段钢桁梁整体制造、架设关键技术”主要创新点进行查新，结果显示：除依托工程的科技成果外，其他所检索的国内外文献中未见与课题查新要点相同的报道。该技术通过中国中铁股份有限公司成果评价，专家组一致认定：项目研究成果整体达到国际领先水平。

该项技术的各项研究成果，已成功推广应用在世界上首座跨度超千米的公铁两用斜拉桥沪通长江大桥、商合杭铁路芜湖长江三桥等多个国家重点项目上部结构制造和施工中，共获得 12 项发明专利授权、10 项实用新型专利、1 项软件著作权、湖北省工法 4 项、铁路部级工法 4 项，产生了良好的社会和经济效益。该技术成果的研发和应用为今后类似工程，特别是大跨度桥梁上部结构建造提供较好的技术借鉴，为大跨度桥梁的发展打下了坚实的基础，引领大跨度钢桥的发展方向。

完成单位：中铁大桥局集团有限公司、中铁山桥集团有限公司、中铁九桥工程有限公司

完成人：张文斌、王建国、宁朝新、顾惠明、高波、李军堂、查道宏、宁湘、张贵忠、陈涛、曹东威、赵东波、夏朝鹏、刘洋、黄旭光

大跨度自锚式悬索桥先斜拉后悬索施工关键技术

重庆鹅公岩轨道专用桥是跨越长江的一座五跨连续双塔双索面自锚式悬索桥，位于既有鹅公岩长江公路大桥上游 70m 处，两桥梁部净距不到 45m。桥跨布置 50+210+600+210+50=1120m。主跨 600m 的自锚式悬索桥，为同类型桥梁的世界之最。

600m 的主跨从经济上来讲更适合建造斜拉桥，但是由于重庆主城区的城市建设现状，长江两岸高楼林立，轨道交通列车的线路设计无法采用从其它区域通过的方案，只能见缝插针设计线路，致使规划建设的鹅公岩轨道专用桥与既有鹅公岩公路大桥净距仅 45m，为了保持悬索桥风格，避免斜拉桥和悬索桥结构产生绳索混乱的视觉效果，确定了悬索桥的方案。从重庆轨道环线方案的整体经济性来讲，在既有鹅公岩公路大桥旁建造鹅公岩轨道专用桥，是较为经济的选择。此外，地方政府考虑两座悬索桥可形成一对姊妹桥，也给重庆城市添加一道亮丽的风景线。



鹅公岩轨道专用桥（右）与既有鹅公岩公路大桥（左）

已通车的鹅公岩公路大桥将仅有的锚固区占用，为了确保既有鹅公岩公路大桥的安全运行，不允许松动鹅公岩公路大桥地锚周边的岩体环境，决定鹅公岩轨道专用桥选用“自锚式悬索桥”结构。自锚式悬索桥的施工方法与地锚式悬索桥“先缆后梁”的顺序有所不同。

由于自锚式悬索桥的主缆锚固在主梁上，常规的施工顺序为“先梁后缆”。目前国内外自锚式悬索桥通常使用临时支墩法或支架法施工。比如长沙三汊矶湘江大桥、佛山平胜大桥、郑州桃花峪黄河大桥等，虽然采用的体系转换方法不同，但都是支架法或支墩法来先建好主梁，再进行体系转换成桥。由于鹅公岩轨道专用桥主跨为长江主航道，为确保长江正常通航，防止船只撞击桥梁支架，鹅公岩轨道专用桥不能在长江航道里搭建支架或顶推成梁，只能先

利用锚固钢塔斜拉成桥，再采用“先斜拉、后悬索”的体系转换施工方案，即先建成斜拉桥，再将斜拉桥转换成悬索桥。这种世界首创的建设方式带来的也是世界级的施工难题，施工无先例可参考。为此中国铁建大桥工程局集团有限公司联合其他单位科研开发，总结形成“大跨度自锚式悬索桥先斜拉后悬索施工关键技术”，主要技术内容如下：

1. 斜拉-悬索体系转换施工技术

针对超大跨度自锚式悬索桥跨越通航流域时不能采用常规支架法施工主跨钢箱梁的问题，首次提出“先斜拉，后悬索”的自锚式悬索桥总体施工方案。通过大量可行方案的全过程施工模拟进行方案比选，分析了不同斜拉桥成桥线形对体系转换过程及难度的影响，以及体系转换过程中吊索张拉方案，创新提出了大跨度无支架自锚式悬索桥体系转换成套工艺方法，充分利用过渡斜拉桥将主梁线形提高后再进行斜拉向悬索的体系转换，大幅度减少了体系转换施工工序和设备，降低了施工难度，提高了工效。

2. 斜拉-悬索耦合模型建立及数值模拟分析计算方法

首次提出了大跨度无支架自锚式悬索桥斜拉转悬索分析理论。采用无应力状态控制法将斜拉桥和自锚式悬索桥两种独立模型的全部缆索单元以无应力长度为基础，重新建模迭代计算，实现了斜拉、悬索两种缆吊系统耦合共存状态下的数值模拟。应用了与无应力状态控制法相通的降温法，进行吊索张拉及主索鞍顶推在数值模拟中的实现。

3. 斜拉扣挂法施工主跨钢箱加劲梁关键技术

采用斜拉扣挂法施工主跨钢箱加劲梁。在主塔顶部设置斜拉索锚固钢塔，结合悬索桥主梁布置斜拉索，组合成斜拉桥体系；边跨钢箱梁施工完成后，利用斜拉桥体系辅助安装加劲钢箱梁，形成过渡斜拉桥。通过建模计算分析，设计了一种双肢结构的锚固钢塔，底座与上横梁固结；钢塔双肢横向中心距与钢箱梁上斜拉索锚固点横向间距相同，使得相应斜拉索构成平行索面。

4. 边跨钢箱加劲梁高位顶推和砣锚固段滑移支架施工关键技术

通过分析施工环境和技术经济条件，边跨钢箱梁施工采用高位顶推技术。在主缆锚固段下设置滑动面，使支架系统与底模支撑系统之间可相对滑移，满足主缆锚固段位置不断变化的需要。

5. 大跨度主缆施工技术

猫道承重索采用三跨分离式，在梁面及塔顶设置锚固结构；门架支承索与扶手索采用三跨连续式，在梁面设置锚固结构，塔顶设置转向鞍座。提出的一种猫道承重索转向结构，降低了施工难度并极大的简化了猫道承重索的锚固装置结构，提高了猫道承重索的锚固安全度。

采用的大循环牵引系统，克服了高温、大雨、大风等恶劣天气及高空作业等困难。

项目获得 4 项发明专利、6 项实用新型专利，软件著作权登记 3 项；发表专著 1 部，学术论文 15 篇，取得省部级工法 2 项。研究成果经中国铁建股份有限公司组织专家评审，总体技术达国际领先水平，得到国内外同行专家的高度评价。该成果将自锚式悬索桥主跨的世界纪录跃至 600m，推动了自锚式悬索桥的技术进步。

完成单位：中国铁建大桥工程局集团有限公司、中铁建大桥工程局集团第一工程有限公司、武汉工程大学

完成人：宋伟俊、张海顺、王 森、李元松、彭志川、孙长志、裴 野、朱林达、李福友、吴小雨、常 洁、田 力、潘 玉、王 赛、孙成利

艰险山区大跨双层公铁钢箱系杆拱桥关键技术

成贵铁路宜宾金沙江公铁两用桥为跨度 336 米的世界最大跨度公铁两用钢箱系杆拱桥。桥址区位于宜宾市郊，处于金沙江下游通航河段，桥高 98 米。大桥采用公铁合建，四线高铁，行车速度每小时 250 公里，六车道快速路，行车速度每小时 60 公里，两侧设人行道。

为解决大桥公铁合建、两岸地形高差大、高速、重载、大跨、高墩、行车平顺性要求高等一系列技术难题，因地制宜的采用造型新颖、结构性能优、桥梁刚度好、行车条件平顺的双层拱桥方案。

主桥采用（116+120+336+120+116）米五连拱，主拱为钢箱系杆拱、边拱为混凝土简支系杆拱。主拱采用拱墩固结、拱梁分离的结构体系。

为解决双层钢箱拱桥技术难题，开展了国铁集团重点课题--《艰险困难山区公铁两用钢箱系杆拱桥关键技术研究》，重点研究了结构体系、抗风、抗震、车桥耦合、稳定性、拱墩固结段试验，成果已应用于该工程。

大桥主要的关键技术和创新成果：

1.多跨双层系杆拱桥新结构。为解决公铁合建、地形高差大带来的公路接线难和一孔跨越主航道的技术难题，采用高铁在上、公路在下的双层桥面钢箱拱桥新结构，两层桥面高差 32 米，在公铁两用桥中属世界第一。

2.边箱主梁、纵横梁正交异性整体钢桥面新结构。为解决铁路纵横梁体系的钢桥面因整体性差而造成的列车行车平顺性差的难题，设计首次采用边箱主梁、纵横梁正交异性整体钢桥面，整体性好、刚度大、行车平顺并有效降低钢梁自重、节省材料。

3.双层桥面吊杆及锚固新技术。设计采用钢箱刚性吊杆连接铁路桥面、高强钢丝柔性吊索连接公路桥面，国内首次采用将柔性吊索内穿刚性吊杆并独立锚固于拱肋，相互不干扰，且构造简单，施工方便。

4.拱梁间部分刚性连接新技术。首次采用水平连杆连接钢箱拱肋与铁路桥面新技术，有效约束主梁纵向位移，改善由活载、温度引起的短吊杆疲劳性能，同时能直接传递列车制动力、替代传统大吨位阻尼装置，提高桥梁整体刚度和方便施工。

5.超高性能混凝土组合桥面铺装新材料。设计采用正交异性板、底层超高性能混凝土和面层改性沥青的组合桥面铺装体系，有效降低了钢桥面的应力和疲劳开裂风险，大幅延长铺装使用寿命，减少维修工作量,节省投资。

大桥在设计、建造过程中坚持因地制宜和技术创新的理念。关键技术已获得 3 项发明、1 项实用新型专利，中国铁路工程总公司科学技术一等奖。关键技术成果被中国中铁股份有限公司评定为整体技术达到国际领先水平。

大跨双层公铁钢箱系杆拱桥关键技术应用于成贵铁路宜宾金沙江公铁两用桥，取得了显著的经济效益和社会效益。该技术成果的成功应用，实现了节约投资 1.02 亿元显著的经济效益。

成贵铁路宜宾金沙江公铁两用桥是一座具有国际领先水平的铁路拱桥，大桥的建设向世界展示了中国高速铁路拱桥建造的新技术，在我国公铁两用桥建设史上具有开创性意义。



成贵铁路宜宾金沙江公铁两用桥实景

完成单位：中铁大桥勘测设计院集团有限公司

完成人：梅新咏、苏 杨、王碧波、陈 宇、谢瑞杰、王 志、肖德存、郭子俊、袁毅、张先蓉、程江伟、汪金辉、屈爱平、刘 锐

大型桥梁结构智能健康监测云平台研究及应用

大型桥梁是国民经济的交通命脉，耗资巨大，一旦发生损毁事故，将严重危害人民生命财产安全。随着大型桥梁形式及功能的复杂化，桥梁结构运维难题日益突出，迫切需要智能化平台统一管理，然而，平台发展所依赖的核心技术，如高精度桥梁专用监测设备，桥梁结构健康监测核心指标挖掘，系统动态阈值更新等关键方面受限于西方发达国家技术封锁，使得大型桥梁智慧化管养进程缓慢，难以满足实际工程需要。本项目在中英联合国际合作计划-大型桥梁结构智能健康监测云平台的联合研发-iSHM 项目支持下，历史 6 年的产学研联合攻关，通过预警评估理论研究、监测传感设备研制、智能监测平台研发，并结合大量工程实践，取得了一系列原创性、引领性成果，解决了桥梁监测领域部分硬件成本高昂、海量数据管理难、结构预警可靠性低的关键性技术难题，极大地提升了大型桥梁运维管理的技术水平，为确保大型桥梁结构运营安全夯实了技术基础。主要创新点有：

1.研发了动态变形监测集成新技术及研制了低成本高性能北斗 3/加速度计融合位移传感器，攻克 GNSS/加速度计的时空统一性难题；基于北斗 3/加速度计时空同步技术，实现了绝对坐标与相对坐标的实时监测，提高了监测设备精度，降低了硬件成本，加速了北斗定位技术在桥梁监测领域的应用及桥梁专用监测设备的国产化。

2.建立以多波束、单波束为综合手段的桥墩局部冲刷原型观测方法，提升了桥墩冲刷预警精度和响应速度；建立了多参数（遮蔽影响系数、干扰影响系数、流速比例系数、水流斜交系数等）桥墩绕流阻力计算公式，作为桥墩冲刷的量化影响因子，提升了桥墩冲刷分析的精度，填补了桥梁监测领域无桥墩冲刷整体安全评价的空白。

3.建立了完备的桥梁结构特征指标库，从监测数据的时域、频域、时频域深度挖掘与结构力学特征有关的安全敏感性响应特征指标，集成了桥梁结构健康监测海量监测数据智能化清洗技术，提高数据分析效率及准确度，为大型桥梁结构安全预警评估奠定基础。

4.创建了两阶段“两线三区”预警体系，实现了系统的关联性预警，有效减小了桥梁预警信息的漏报及错报，首创了滑动窗口式动态阈值更新技术，结合实时荷载响应数据，建立结构动态评价模型，实时分析评估桥梁结构状况，实现实时阈值更新。

5.创建了多源数据异构存储并行计算的大型桥梁健康监测云平台，将大数据、云计算、深度学习等方法 and 理论应用于桥梁健康监测领域，突破了传统“一桥一系统”监测模式，实现片区化桥梁健康状态的统一运营维护和管理，解决了海量监测数据分析及存储无序的重大

技术难题，为桥梁结构安全预警及评估提供关键技术支撑。

该项目获得国家发明专利 5 项、实用新型专利 3 项、软件著作权 9 项，主参编技术标准 3 部，专著 1 部，发表期刊论文 11 篇。

2016 年 8 月 30 日，教育部科技查新工作站，2020 年 7 月 30、2021 年 3 月 8 日湖北省科技信息研究院查新检索中心，对“大型桥梁结构智能健康监测云平台研究及应用”进行了查新，查新结论：项目 5 项技术创新成果全部自研，未见国内外报道，

2021 年 11 月 7 日，中国中铁股份有限公司组织专家对“大型桥梁结构智能健康监测云平台研究及应用”评审，成果评定为：整体技术达到国际领先水平。

项目研究成果已应用于南京大胜关大桥、芜湖长江大桥、江阴长江大桥、柳州城市桥梁（一期 6 座），郑州黄河公铁两用大桥等国内 10 余座大型桥梁健康监测系统，建立了桥梁监测大数据中心及云服务平台，平台节约桥梁运维成本 20%左右，避免了安全事件发生带来的经济损失和交通运营损失，保障了桥梁结构安全，社会、经济效益显著。

平台实现了地震、大风、船撞等特殊事件下，桥梁运营状态事前可追溯、事中便控制、事后利恢复，有效消除信息壁垒，实现桥梁运维精细化管理，推动交通基础设施数字转型和智能升级，为今后国内外同类型平台研发提供了借鉴。

完成单位：中铁大桥勘测设计院集团有限公司、中铁桥隧技术有限公司

完成人：易伦雄、刘 华、吴来义、赵大成、闫志跃、王 俊、戴新军、刘 宁、杨 星、乔龙雷、李永强、邵雪军、谢义林、朱大栋、刘兴旺

超高超重拱形钢索塔提滑组合安装关键技术

一、背景、研究目的、意义

韩城市太史大街西延桥梁建设项目为跨径 108+128m 的独塔双索面钢拱钢梁斜拉桥，主跨跨越梁山路。其中，钢结构拱形塔塔高 117.5m，索塔重量约 2100t。

基于钢索塔自重大、高度高，若采用三角起扳法，转较根部的水平推力抵消难度大；而梁山路必须保持畅通，现场不具备设置导行路的条件，致使钢索塔无法实现单侧卧拼；若采用塔外提升，提升横梁的高度需超过塔顶高度，塔架越高安全风险越大。为解决本项目拱形钢索塔安装难题，同时降低安全质量风险及措施费用的需求，设法利用设计横梁作为锚固横梁，降低钢材的投入费用，变高处作业为地面作业，提高拼装、焊接质量，降低安全作业风险。通过竖向提升系统与水平牵引系统的配合完成钢索塔的 90° 竖转。

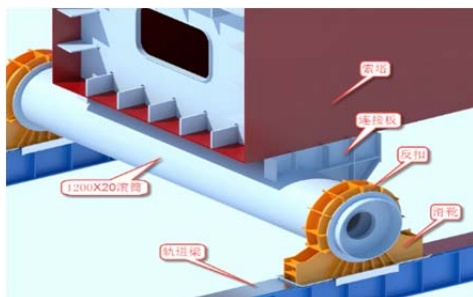
二、关键技术内容

自主研发并形成了拱形钢索塔内侧提滑组合的竖转安装成套技术，采用“卧式拼装，边提边转”的方式施工，解决了本项目拱形钢索塔安装难题。

1.研发了“结构主横梁节段移位作为提升锚梁”的拱形钢索塔竖转提升安装技术，对设计主横梁进行加强，提高其抗扭转能力，将结构主横梁中间节段移位至锚固横梁位置，提升完成之后将结构主横梁中间节段移位至设计位置安装，有效降低了临时结构的钢材用量。



2.设计研发了拱形钢索塔内侧设置 4 组提升塔架，降低提升装置的高度，通过合理设置提升吊点及分级同步置换液压钢绞线缆风绳，将竖向提升与水平滑移组合的提升方法，节约了拼装场地资源，保证了周边的交通需求。



3.自主研发了大吨位钢拱脚双滑靴装置，在滚轴与滑靴之间设置 MGE 滑板，较好地消除轨道不平造成的局部高压带来的危害，克服了单滑靴抗扭转能力差的缺陷，解决了拱形钢索塔 0~90° 转动与滑行的协调一致的技术难题。



4.研发了一种适用于超大吨位拱形钢索塔提升的塔架提升装置，解决了高大塔架的稳定性和提升装置的排列定位问题。

5.研发了一种适用于同步提升的水平牵引装置，确保了竖向提升位移与水平牵引位移同步，提高了竖转过程中拱脚的稳定性，解决了需要正向牵引与反向带紧切换的难题。



三、与同类技术对比创新点、优势

该成果技术在国内已施工完成的 6 座钢索塔的研究基础上进行创新、改进，形成了一套完整的拱形钢索塔提升安装技术，创下了国内钢索塔在同类施工方式下的重量和高度之最。经现场实施证明，提升锚梁实测应力与理论应力的偏差均在 5%以内，远小于设计及规范容许范围 10%。钢索塔垂直度及安装标高均满足设计和规范要求，整体安装精度较高。

相对于原位分块拼装法，该成果技术能有效的减少高处作业、降低安全措施费的投入，将高空焊接变为地面焊接、高空线型控制变为地面线型控制，可以有效的提高施工质量，同时规避了塔吊与异形结构之间的扶壁难题和曲线段钢结构合龙难题。

相对于三角起扳法，该成果技术无需设置固定转铰，减少了转铰水平推力需要抵消的措施投入，无需将索塔在单侧拼装，可根据索塔重心位置和提升点位置实现地面位置的灵活卧拼，降低场地限制和减少对既有道路的交通影响。

四、推广应用情况

该成果技术成功应用于陕西省韩城市太史大街西延桥梁建设项目景观大桥钢索塔提升安

装。经测算，利用部分主横梁作为提升锚梁节约钢材约 101t，节省费用约 122.34 万元。经过精心组织，相较于其他施工方式缩短工期约 3 个月。同时，降低了安全措施费用的投入，施工质量有较好的保证，综合效益显著。可推广应用到行业内重量较大、高度较高的拱形、门式、H 形等桥梁钢索塔的施工。

五、相关知识产权及荣誉

获发明专利授权 2 件、实用新型专利授权 3 件，获省级工法 1 项，对外发表论文 4 篇（其中核心期刊 3 篇），省部级获奖论文 3 篇。

关键技术通过国内外科技查新。经成果鉴定，项目总体技术达到国际先进水平，其中拱形钢索塔内侧设置提升塔架技术、结构主横梁节段移位作为提升锚梁技术达到国际领先水平。

该成果技术获中国核工业华兴建设有限公司科技进步一等奖，获江苏省土木建筑学会土木建筑科技奖二等奖，获中国施工企业管理协会首届工程建造微创新技术大赛一等奖。

完 成 人：刘成群(中国核工业华兴建设有限公司)、郭雪珍(中国核工业华兴建设有限公司)、卞北平(中国核工业华兴建设有限公司)、魏岗(中国核工业华兴建设有限公司)、龚振斌(中国核工业华兴建设有限公司)、陈清华(中国核工业华兴建设有限公司)、马海雄(中国核工业华兴建设有限公司)、朱燕(中国核工业华兴建设有限公司)、王东杰(中国核工业华兴建设有限公司)、程金霞(中国核工业华兴建设有限公司)

新型高塔单索面大吨位非对称钢混结合梁斜拉桥 设计与建造技术研究

采用转体法施工的新型高塔单索面大吨位非对称钢-混结合梁斜拉桥的结构形式，在国际上尚属首例。为提升我国桥梁设计及建造水平，中铁九局集团第二工程有限公司联合中国铁路设计集团有限公司及湖南大学，依托四平市东丰路上跨铁路立交桥，开展了大吨位独塔单索面混合梁转体斜拉桥成套技术研究，该项研究分别被列为中国中铁 2017 年度重点科研计划和 2017 年天津市交通运输科技发展计划项目，通过科研攻关，实现了桥梁建造领域中多项创新与突破。项目研究中提出了转体施工混合梁斜拉桥设计新理念，成功应用于国内首例悬臂长度最长、单索面主梁最宽的转体斜拉桥工程，大幅降低了工程全寿命周期成本；研发了钢-混凝土组合截面索塔和新型索塔锚固体系，降低了索力差对索塔的不利影响，改善了索塔的受力状态；研发出大吨位转体桥辅助称重方法与可回转的桥梁转体装置，提高了大吨位转体桥梁称重施工的精度与安全性；研发了基于 BIM+测量机器人的空间曲面钢-混结构索塔施工关键技术，提高了生产效率和施工精度；研发了实时监测系统，提高了施工效率和定位精度。该项科研成果经吉林省建筑业协会鉴定，整体技术达到国际先进水平。主要创新点如下：

创新点一：国内首次提出混合梁斜拉桥转体施工新理念，解决了跨铁路桥梁投资大，铁路拆迁范围大、转体难度大的技术难题。授权《一种桥梁施工方法》发明专利和《超大吨位非对称混合梁斜拉桥水平转体结构》实用新型专利。

创新点二：创新提出变截面椭圆形钢-混凝土组合截面索塔理念，与传统混凝土索塔相比，造型美观、受力合理、施工便利、经济性突出；研发并首次采用“一种新型组合塔和混凝土箱梁固结的施工方法”，可靠性及施工便利性更好。研发出“一种新型索-塔锚固体系”，并通过足尺模型试验得到了验证，解决了不对称斜拉桥实心混凝土索塔两侧索力差异较大时混凝土受拉问题，降低了工程造价。授权《一种带索鞍分段式斜拉桥拉索体系》实用型专利。

创新点三：研发出新型“大吨位转体球铰支座”，解决了传统球铰运输、安装困难的问题，并较好的缩短了工期；研发出“一种大吨位转体桥辅助称重方法”，解决了大吨位转体桥梁称重施工时，顶升设备顶升力不足无法称重、称重复杂误差大或顶升力过大对混凝土结构造成破坏等问题；研发出“可回转的桥梁转体装置”，解决了桥梁无法从施工位点转至工作位点的问题。授权《可回转的桥梁转体装置》实用新型专利。

创新点四：研发出基于 BIM+测量机器人的空间曲面钢-混结构索塔施工关键技术，授权《一种基于 BIM 的钢-混组合结构索塔 GT 型索鞍测量方法》、《基于测量机器人测量定位斜拉桥梁端索导管的施工方法》两项发明专利。针对钢桥塔横截面为椭圆形状，自塔底至塔顶椭圆长轴、短轴均逐渐变化，钢塔侧面外形近似双曲线，结构复杂，且施工精度要求高的问题，研发出《基于三维点云的双曲面钢桥塔 GT 型索鞍安装质检方法》、《一种双曲线变椭圆截面筒形结构建模及曲面展开方法》，开发出一套《基于 BIM 技术的转体斜拉桥空间曲面钢-混结构索塔施工工法》。将全彩扫描技术应用于索塔钢结构外壳施工质检，与设计 BIM 模型进行对比拟合，总结形成空间曲面钢-混结构索塔加工制造、安装定位成套施工技术。

创新点五：研发出基于 BIM+测量机器人的转体桥梁结构姿态实时监测施工技术。通过研发实时监测系统，实时掌控转体桥梁结构姿态，显著提高测试效率、减少技术人员劳动强度，保障桥梁转体的顺利精确定位，保证了桥梁转体安全，取得了《桥梁转体实时监控测量系统》软件著作权 2 项。

本项目取得授权发明专利 4 项，授权实用新型专利 6 项，省部级工法 7 项，软件著作权 6 项，发表国际论文 2 篇，中文核心期刊论文 7 篇，获吉林省发明专利奖优秀奖 1 项。

本技术已成功应用于四平市东丰路上跨铁路立交桥和四平市紫气大路跨铁路立交桥工程，共计节约成本 831.6 万元，创造经济效益 2151.6 万元，并形成了一整套关键技术。同时该技术成果还在黑龙江、吉林等地同类桥梁工程进行了推广应用，技术成果经济效益和社会效益显著，对类似工程具有很好的指导和借鉴意义。

完成单位：中铁九局集团第二工程有限公司、中国铁路设计集团有限公司、中国铁路沈阳局集团有限公司、中国铁路沈阳局集团有限公司吉林工程建设指挥部、湖南大学

完成人：孙文志、郝建英、田山坡、孙大会、王子文、刘涛、支燕武、杨宗林、张成建、邓露

青藏高原铁路大跨提篮式钢管混凝土拱桥拱肋 安装技术

一、立项背景

新建川藏铁路拉萨至林芝段藏木雅鲁藏布江双线特大桥为中承式提篮钢管混凝土拱桥，主桥全长 525.1 米，主跨 430 米，桥址海拔 3350m，属铁路钢管拱桥跨度世界第一。因桥位两岸山体陡峭，岩石破碎风化，场地极为狭小，为解决大桥钢管拱的预制、吊装难题，施工采用桥址上游 7.5km 建设预拼场，钢管拱节段在预拼场预组拼后通过下河吊机翻身装船，运输至桥位采用缆索吊机架装的方案。

该拱桥由 56 个钢管拱节段组拼，最大吊装节段重 250 吨，该技术重点需要解决以下问题：

①高原艰险山区陡峭地形缆索吊机及下河码头吊机设计；②高原地区氧气稀薄，且缺少大型起吊设备对构件材料运输、安装的难题；③高原水库区河流解决缺少运输船舶难题；④峡谷大风对构件吊装的影响；⑤高原大温差、强日照对钢管拱安装的影响。

二、主要技术创新

创新点一：缆索吊机设计

1.针对两岸位置受限条件下不对称缆索吊机设计：顺应山体地形，采用两岸边跨不对称、两岸塔架位置不对称（主索跨中与拱肋跨中不重合）、两岸塔架高度不对称、两岸塔架顶标高不等高的设计，有效解决山体地形地貌及不利地质条件的影响。

2.针对山体陡峭边坡条件下同一侧塔架采用高低腿设计：因山体地形受限，山体下方又紧临公路，故对结构设计进行优化，塔架结构采用左右幅不对称高度结构设计，有效减少了山体爆破开挖量，对高原脆弱生态破坏更小。

3.高原山区大体积石方爆破开挖技术：缆索吊机塔架、锚碇基础大，所在山体岩体破碎，为保证快开挖和边坡稳定，采用松动爆破和预裂爆破相结合技术，解决强风化、顺向多层卸荷带裂隙发育山区的开挖。



4.针对拱座和后锚场地狭小条件下的扣锚合一型塔架设计：扣塔和缆塔布置在一起，有效减小缆塔吊装时对扣塔产生的附加弯矩，具有场地使用面积小，大大减小钢结构用量，施工周期短等优点。

5.针对陡峭山体边坡条件下组合式锚碇的设计技术：因地制宜，采用高低桩基承台锚结合岩锚的组合式锚碇，具有结构新颖，减少成本等优点。

6.塔顶和后锚双横移技术：指缆索系统在塔顶和后锚均进行横移的方式，由于两岸边跨小，钢管拱为提篮拱，空间角度变化较大，采用缆索吊机节段架设时，需实时的移动索鞍和后锚卷扬机。该技术虽增加横移工作量，但能大大减小山体爆破开挖量，减少缆索使用量，使用性较广。

7.四吊钩自动称重平衡控制系统：在缆索吊机四个吊钩上加装自动称重控制系统，实时监控拱肋空间姿态调整时各吊钩受力，在受载逼近限值时系统会报警，且系统能自动进行吊钩调整达到新的平衡，又能对拱肋空间姿态进行微调，保证拱肋精确快速对位。

8.高原陡峭地形塔架节段预制快速拼装技术：采用塔架节段预制快速拼装、下铰分配梁分段拼装多次横移安装、整体滑移安装就位等技术，解决了高原陡峭困难地形条件下缆索吊机塔架快速拼装难题。

9.高原陡峭地形大体积锚碇泵送施工、设备安装技术：在高原上首次采用 32Mpa 的高压地泵和直径 125mm 高压泵管泵送垂直高度达 200m、水平 200m 的 15000 方高标号混凝土，泵送效果良好。

10.高原陡峭地形后锚碇大型设备滑移安装技术：采用散件吊装上山、组装成整体、滑移就位的大型设备安装方式有效解决了西藏高原山区大型吊装设备无法上山吊装的难题，保障了后锚碇大型设备的快速安装。

创新点二：下河码头吊机

1.研发了峡谷陡峭地形下大型钢构件起重设备下河吊机系统，采用不等高度不同结构形式钢管立柱支腿、双层桁架式主梁加前撑后锚等特殊设计，受力清晰明确，节省了施工成本，解决了大吨位异形钢管拱节段从卧式到立式翻身和装船的施工难题。

2.研发了先竖装后斜转、滑移式起吊支架分段提升等下河吊机安装成套技术，开创了高原地区利用小型机械安装大构件先例，节省了机械费用，解决了在峡谷陡峭地形下且无大型起重机械进场的前提下安装大吨位钢结构的施工难题。

创新点三：相关配套技术

1.两钩节段翻身技术：大吨位钢管拱节段在预拼场胎架上进行“2+1”卧式组拼成型，架

设时转运至下河码头吊机下方翻身，使钢管拱节段由卧式变为立式，通过下河码头吊机下河装船。该技术保证钢管拱节段在翻身中不受碰撞且晃动小，防止钢管拱节段在翻身过程中碰伤变形，增加了钢管拱节段翻身的安全系数。

2.限位胎架硬加固及横向缆风软加固技术：采用限位胎架硬加固及横向缆风软加固技术将大吨位异型拱肋固定在驳船上，有效的解决高原河谷地区拱肋运输难题。

3.驳船精确定位技术。在桥位上、下游各设一组浮箱漂浮体系作为拱肋节段运输驳船定位的锚固点，驳船就位时无需进行起锚、抛锚，无需考虑水流、光板岩面对抛锚的影响，操作简便安全、定位时间短。

三、应用及效益情况

该成果应用于藏木雅鲁藏布江双线特大桥，2016年9月开始施工，2018年9月顺利完成钢管拱架设合龙。依托该技术，大大减少了山体爆破开挖对高原山区环境植被的破坏，有效保证了施工进度，降低了施工成本，节约钢结构材料使用约400t，测算节省投入1200万元，经济、社会和环境效益显著。

四、知识产权

该课题已获得发明专利2项、实用新型专利4项，省级工法3项，子课题成果(创新点1)获得2018年度中国铁路工程总公司科技奖一等奖。

完成单位：中铁广州工程局集团有限公司、中铁广州工程局集团桥梁工程有限公司

完成人：周文、冯朝军、朱志钢、张立军、廖云沼、王远锋、张启桥、杨景新、张应红、孙军

宽幅钢箱及钢箱结合梁斜拉桥上部结构 关键技术及应用

本项技术以武汉青山长江公路大桥为依托进行研究。武汉青山长江公路大桥是武汉市四环线的控制性工程，其南汉主航道桥采用(350+938+350)m全漂浮体系斜拉桥，边跨采用钢箱结合梁、中跨采用钢箱梁的主梁结构形式，梁端设置了 $\pm 1050\text{mm}$ 的大位移伸缩装置。目前国内外已建成结合梁斜拉桥主梁通常采用钢纵横梁+混凝土面板或钢槽梁+混凝土面板的结构形式，其最大跨度在600m左右，桥面宽度均小于40m。国内外大跨度，尤其是近千米跨度的斜拉桥中采用钢箱-混凝土结合梁结构形式的情况并不多见，尚无成熟案例可供参考。此外，国内外对大跨宽幅斜拉桥约束体系，尤其是横向约束体系的研究还不充分。针对结合梁斜拉桥混凝土桥面板开裂问题，国内外通常采用施加预应力、减少预制混凝土板收缩并加强配筋、通过拉索调整混凝土的内力、适当放松中跨外索索力以增加正弯矩等对策，但对刚度较大的宽幅钢箱结合梁还缺乏系统研究。针对大桥大跨(主跨938m)、超宽(桥宽48m)等特点，对宽幅钢箱及钢箱结合梁斜拉桥上部结构关键技术进行了系统研究，重点开展了宽幅斜拉桥组合式约束体系、宽幅钢箱结合梁关键技术、大跨宽幅斜拉桥主梁施工关键技术以及大跨、重载桥梁交通安全防护技术4个方面的研究，形成了一套宽幅钢箱及钢箱结合梁斜拉桥上部结构关键技术并成功应用，其主要创新技术为：

1.研制了新型纵向液压阻尼和C型钢阻尼装置，配合弹簧减震支座、剪力卡隼、限位牛腿形成了纵横向组合约束体系。

研制了新型纵向液压阻尼和C型钢阻尼装置，配合弹簧减振支座、剪力卡隼、限位牛腿组成了纵横向组合式约束体系，能有效的对大跨、宽幅斜拉桥运营过程中的车辆、风荷载进行弹性限位，在极端风荷载、地震荷载下通过塑性变形耗能来保证主梁结构安全；该约束体系对紊流风减振率达20%，E2地震作用下墩底横向弯矩减震率达60%~80%。

2.首次在宽幅斜拉桥中采用无预应力筋钢箱结合梁结构形式；创新了支点强迫位移、横向反拉工艺，成功将结合梁桥面板纵向压应力预设到6MPa以上，解决了主梁墩顶负弯矩区桥面板纵向开裂和宽幅结合梁桥面板横向开裂的问题。

对于千米级公路斜拉桥，中跨采用钢箱梁，边跨采用钢箱结合梁发挥锚跨作用，能够充分发挥钢材抗拉、混凝土抗压性能好的优点，经济性能良好。主桥48m宽的钢箱结合梁抗扭能力强、整体性好、刚度大，研究了一种新型钢混结合梁混凝土板的内力调整方法，科学设置

体系转换工序，采用强迫位移法，通过多次支点起顶和回落，巧妙的将足够的压应力储备到钢箱结合梁的墩顶桥面板中，解决了常规预应力筋对宽幅钢箱结合梁桥面板施加效率低的难题。

针对桥梁运营过程中，宽幅结合梁墩顶横向桥面易发生受拉开裂的现象，研究了一种横向反拉的方法向墩顶桥面施加横向压应力储备，主梁外侧边腹板设置反拉吊耳，底面设置反拉装置，墩顶桥面板结合之前，将主梁横向反拉变形，桥面板结合完成之后，释放反拉力，主梁恢复部分变形将压应力储备到桥面横向。同时反拉钢绞线外包保温材料缓和温差影响。

3.研制了宽幅钢箱梁悬臂架设反压装置，解决了已架节段与待架节段横断面变形不一致难题；研发了双向顶推合龙技术并形成了工法，实现了大跨度漂浮体系斜拉桥的精确、快速合龙。

针对中跨宽幅钢梁悬臂架设，已架梁段和待架梁段间存在横向变形不一致问题，若采用常规的码板整平，钢梁环缝中存在很大的次内力，通过对宽幅钢箱梁中跨悬臂拼装时横桥向受力特性的分析，研发了宽幅钢箱梁悬臂拼装横桥向对位调整装置，可高效快捷的完成相邻节段钢梁的横向线性匹配，减少拼装马板数量约 60%，提升了钢梁环缝拼装质量。

结合全漂浮体系主梁的特点，将塔梁施工临时锁定系统更换为双向顶推系统，设置顶推平台，安装顶推设备。通过对钢梁顶推量、顶推力及合龙口敏感性分析，首次研究了一种斜拉桥双向顶推合龙的施工方法，该施工方法操作方便，合龙调整量大，可控性好，解决了常规合龙方法温度敏感性强、施工风险大等难题

4.研发了 2100mm 大位移量伸缩缝处防撞护栏，提升了大跨度斜拉桥梁端安全防护性能。

提出强梁弱柱钢护栏交通安全防护理念，在保证车辆碰撞安全的前提下，实现栏杆快速修复，针对 2100mm 大跨径伸缩缝护栏进行深化研究，经仿真模拟和实车足尺碰撞试验验证，其安全防护等级达到了 SS 级，解决了大跨桥梁伸缩缝薄弱环节安全防护难题。

该技术获得发明专利 2 项，实用新型专利 4 项，省部级工法 4 项，项目研究成果被中国公路学会评价为总体“国际先进”水平，其中组合约束体系达到了“国际领先”水平。对该技术进行了科技查新，在所检国内外文献范围内，未见有相同的报道。

该项目推动了我国大跨度桥梁建造技术的发展，大幅提升了该类桥梁的结构耐久性及其我国在大跨度桥梁建设方面的竞争力。其相应成果在武汉青山长江公路大桥已成功应用，取得了良好的经济效益和社会效益，并具有广阔的推广应用前景。

完成单位：中铁大桥局集团有限公司、中铁大桥勘测设计院集团有限公司、武汉青山长江大桥建设有限公司

完成人：张燕飞、王寅峰、胡海波、张建强、付晓鹏、张晶、廖贵星、杨文明、徐力、赵全成

艰险山区铁路框架式新型抗滑支挡结构

工程技术研究

我国西部艰险山区地形地质复杂，滑坡、岩堆等不良地质体大量分布，地质灾害频发，严重威胁国家基础设施和人民群众生命财产安全。随着西部大开发、“一带一路”的深入推进，城乡基础设施、高等级道路与铁路建设数量多、规模大、标准高，加之复杂山区地形限制，特别是世纪性战略工程川藏铁路已开工建设，大量的大型、巨型不良地质体亟待加固防治。传统抗滑结构整体性较差、变形大、投资高，在特殊地层中可靠性较低，难以满足大抗力、小变形、低碳环保的工程加固要求。项目组经过多年产、学、研联合科技攻关和工程实践，采取“理论分析→数值模拟→模型试验→现场试验→工程应用”的技术路线，研发了一种框架式新型抗滑支挡结构，系统研究了该结构的受力机理、破坏模式、设计方法及施工技术，取得以下主要创新成果：

创新点一：提出了一种适用于大型、巨型不良地质体加固的框架式新型抗滑支挡结构，研发了具备长曝光观测功能的大型模拟试验系统，揭示了框架式新型抗滑支挡结构受力变形响应与破坏模式，结构成功应用后工程投资降低了 35% 以上。



后桩前缘坡体局部破坏

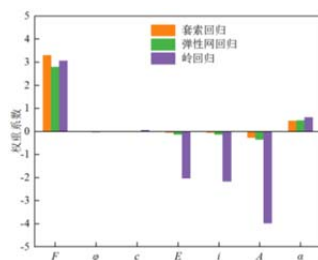


抗滑支挡结构破坏



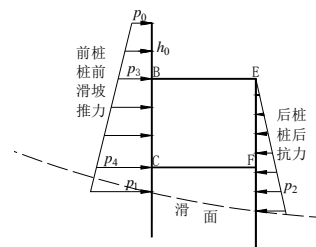
前桩后缘坡体开裂破坏

创新点二：建立了框架式新型抗滑支挡结构变形响应的机器学习模型，提出了基于拉丁超立方抽样的结构易损性评价技术，构建了框架式新型抗滑支挡结构分区分段式设计方法，开发了面向工程应用的设计软件，丰富了重型组合式支挡结构设计体系。



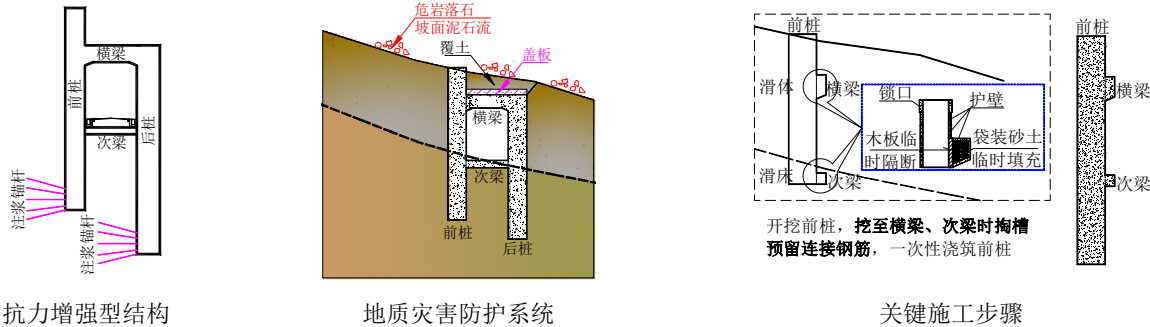
结构变形超越概率曲面

结构对输入参数的损伤响应



结构计算模型

创新点三：发明了桩基锚固段抗力增强型结构，研发了坡面泥石流及危岩落石等地质灾害防护系统，构建了框架式新型抗滑支挡结构成套施工技术，形成了“分序施工、掏槽预留、节点加强”等关键施工工法，施工工效提高了 15~25%。



上述成果已纳入《铁路路基支挡结构设计规范》、《川藏铁路滑坡防治技术指南》等标准规范，与国内外同类技术对比具有显著创新，技术经济指标达到同类技术先进水平，取得了大型、巨型不良地质体抗滑加固技术的重大突破。

技术指标	本项目技术水平	国内技术水平	国外技术水平	备注
抗滑结构刚度	通过横梁、次梁提高刚度	仅通过横梁提高刚度	仅通过横梁提高刚度	
框架结构抗力	桩基锚固段抗力增强技术	无	无	增强结构整体抗力
结构位移控制	$l_{max}/L=0.008\sim 0.016$	$l_{max}/L=0.056\sim 0.108$	$l_{max}/L=0.032\sim 0.102$	
模型试验效果	精密加载、长曝光观测	普通加载、常规摄影观测	普通加载、常规摄影观测	实现模型位移轨迹可视化
每延米混凝土用量	450~600 m ³	570~890 m ³	565~870 m ³	节约混凝土用量 27~48%
结构设计方法	提供结构变形响应机器学习模型	无	无	
结构施工工效	掏槽预留	植筋浇筑	植筋浇筑	工效提高 15~25%

l_{max} 为桩顶最大侧向位移， L 为桩长

项目获授权发明专利 3 项，实用新型专利 7 项，计算机软件著作权 2 项，省级工法 1 项，发表论文 10 余篇。项目成果成功应用于林织铁路和川藏铁路拉萨至林芝段，并在川藏铁路雅安至林芝段、大瑞铁路、沪昆高铁、云桂铁路、成渝高铁、兰渝铁路等重大工程推广应用，累计节省工程投资 2.32 多亿元，满足了低碳环保要求，推动了行业科技进步，促进了产、学、研结合，社会、经济与环境效益显著，应用前景十分广阔。



完成单位：中铁二院工程集团有限责任公司、西南交通大学、北京交通大学、成都信息工程大学

完成人：曾永红、陈伟志、郭在旭、胡会星、卢 炜、吴沛沛、姚裕春、李安洪、刘凯文、林东升、杜 猛、朱 曦、张志明、庄颖茜、秦谢宇

高精度激光移动扫描技术在铁路工程中的应用研究

一、立项背景

中国铁路营运里程已达 14.6 万公里，在铁路既有线改建勘测设计、铁路工程施工检测及铁路养护维修中需要进行既有线测量及施工现场高精度的场景测量。长期以来主要方法是利用钢尺、全站仪、水准仪等设备人工测量，效率低、精度差、安全保障投入大，研究非接触性测量技术势在必行。中铁二院依托贵阳市轨道交通 1 号线、巴基斯坦 ML1 线升级改造项目，牵头与武汉大学、武汉海达数云技术有限公司、武汉汉宁轨道交通技术有限公司等单位合作，于 2015 年 2 月启动高精度激光移动扫描技术在铁路工程中的应用研究的子课题“基于惯导三维激光扫描移动测量系统在铁路既有线测量中的应用研究”，以及“三维激光移动扫描平台”的研发工作，并于 2017 年 12 月完成。课题应用创新原理和方法，完成了各个子课题的研究，并研制出以人工推行、轨道车及电瓶车为载体的轨道移动测量平台，形成高精度三维激光移动扫描系统成套技术。

二、主要创新性成果

1. 提出顾及轨道运动约束的 GNSS/INS/DMI/IMU 高精度定位定姿方法及高精度高程转换技术获取高精度 Lidar 点云数据，发明了一种利用三维激光点云自动提取既有线轨顶高程方法。

2. 创建了动态环境下将线路控制网 CPII、轨道控制网 CPIII 引入 POS 测量系统的联合解算方法。实现铁路施工运营快速、自动、高精度定位定姿测量，满足弱 GNSS 信号甚至无 GNSS 情况下绝对测量精度的提高；提出对铁路左右轨道超高检测、桥梁、隧道及其他构筑物变形检测计算方法。

3. 研制了拥有自主知识产权的基于轨检小车、轨道车及电瓶车为载体为移动平台的三维激光扫描移动测量设备，实现快速测量，综合效率提高约 50%。

4. 研究实现了高精度三维激光移动扫描系统数据采集技术规程和数据处理工艺，形成一套高精度三维激光移动扫描系统成套技术的测量方案和作业流程。

三、技术指标

研究形成的移动三维激光扫描测量系统，基于既有线约束点精度改善技术，在 CPII 控制点约束下（CPII 点间距 400~600m）平面精度优于 2cm，高程精度优于 1cm；在 CPIII 控制点约束下（CPIII 点间距 50~150m）平面精度优于 1cm，高程精度优于 1cm，完全满足铁路

工程相关测量规范技术要求。

四、客观评价

2018年8月17日，通过四川省科学技术信息研究所对课题主要关键技术在国内外文獻资料中进行检索，其查新结论如下：

1.国内外未见具有如下特点的基于车载设备的铁路既有線三维激光扫描移动测量系统的公开文献报道，即：采用了里程编码器、DGPS/INS/DMI/IMU、激光扫描仪及全景相机，得到既有线的点云数据及360度全景影像。

2.国内外未见具有如下特点的基于车载设备的铁路既有線三维激光扫描移动测量系统的公开文献报道，即：利用点云数据提取铁路中心线坐标、轨面高程，实现左右轨道超高检测及桥梁偏心检测；提取隧道及其他构筑物的特征点实现变形监测。

3.国内外未见具有如下特点的基于车载设备的铁路既有線三维激光扫描移动测量系统的公开文献报道，即：利用360度全景影像进行既有线路基病害、道岔洁净度以及轨道沿线设施的调查。

4.国内外未见平面精度 $< 2\text{cm}$ ；其高程精度 $< 1\text{cm}$ 的基于车载设备的铁路既有線三维激光扫描移动测量系统的公开文献报道。

2018年9月26日，中国中铁股份有限公司组织由中铁一局、中铁四局、中铁六局、中铁八局、中铁设计、中铁六院、中铁科研院等单位的专家组进行评审。专家组在审阅了技术研究报告的基础上，经讨论，形成如下评审结论意见：项目研究成果整体达到国际先进水平。

五、经济社会效益

整体技术已成功应用于贵阳市轨道交通1号线、巴基斯坦ML1线升级改造、广大线、南广线、青藏铁路电气化工程等项目，保证了质量、安全和工期。近年来，应用本技术累计新增产值1.50亿元，新增利润0.30亿元，取得了良好的社会、经济效益。成果获授权发明专利7项、实用新型专利3项、软件著作权3项、发表论文9篇（其中SCI/EI收录5篇）。



铁路既有線移动扫描测量



隧道病害检测移动扫描测量

研究成果可推广应用于铁路及城市轨道交通工程，对于提高铁路工程建设及运营测量效率、成果质量及安全生产保证具有十分重要的意义。形成的高精度三维激光移动扫描测量系统成套技术，将显著提升我国铁路及城市轨道交通工程设计施工运营维护技术水平。同时拓展适用于机载、车载和背负式三维激光扫描铁路工程、城市轨道交通及公路交通工程，也适合于铁路 GIS 及资产管理、铁路应急调度与指挥等，在“交通强国战略”和“一带一路”倡议实施中具有极大的推广应用前景。

完成单位：中铁二院工程集团有限责任公司、武汉大学、武汉海达数云技术有限公司、武汉汉宁轨道交通技术有限公司

完成人：周玉辉、胡庆武、梅熙、杨锋、毛庆洲、林春峰、周世明、邓方正、杨晶、熊勇钢

高架站单双线箱梁架设施工方法

目前，高架站单线箱梁，一般布置于正线双线箱梁的两侧，其中单线箱梁孔数较少，传统方式是分别采用 500t 和 900t 架梁设备分别对单线箱梁和双线箱梁进行架设施工，但针对高架站特殊工况，若两套设备同时进行施工，则两套设备在空间上会相互影响，并且针对较少孔数单线箱梁，专门调拨一套架梁设备和配套人员，成本高。

在沪通铁路架梁工程项目的基础上，“高架站单双线箱梁架设施工技术”项目成果顺利研究成功，具备推广实用条件，先后在盐通铁路、济莱铁路架梁工程中的应用，创新性与先进性如下：

1.研制了基于 900 吨架桥机的多功能吊装吊具、单线箱梁辅助移梁装置、液压起落系统、单线箱梁辅助移梁装置吊装系统等，优化了 900 吨箱梁运架施工工艺，实现了一套设备完成高架站特殊工况下 500 吨和 900 吨单双线箱梁架设施工。

2.通过对现有架梁设备的改造及配套施工工艺的研究，解决了腹板间距、支承垫石支点距及内部空间小的新型混凝土箱梁架梁设备需要求问题，突破传统设备局限，实现同一设备完成多种非标梁施工。

3.研发了架桥机高位过提篮拱的施工工艺并配套研制了 O 型腿的临时替换支腿，解决了架桥机高位过提篮拱及过拱后首片箱梁架设的施工难题。

2020 年 06 月 18 日，由天津市科学技术信息研究所对“高架站单双线箱梁架设施工方法”进行了查新，查新结论：经检索，国内外未见与本查新项目研究内容相同的高架站单双线箱梁架设施工技术研究与应用文献报道。

该关键技术成果于 2017 年 09 月 29 日通过了中国中铁股份有限公司对“高架站单双线箱梁架设施工方法”评价会。评价委员会认为：项目研究成果整体达到国际先进水平。

本项目取得授权发明专利 1 项，授权实用新型专利 2 项，获得省级工法 1 项，省级五小成果 1 项，同时该技术获得国家专利奖 1 项。

该技术先后成功应用于沪通铁路、盐通铁路、济莱铁路，其充分利用自有设备，在节约新购设备费用的同时节约了多套设备引入进出场及人员配置等费用，大大降低工程成本，而且研制的新技术相比传统技术，有跨越式的突破，填补行业技术空白，其技术成果具备先进性和推广性，可以推动架梁行业的技术进步，并对今后行业复杂特殊工况架梁施工有一定的启迪作用和重要的参考价值，推广用量广阔。

工程应用图片：



完 成 人：王亮明(中铁三局集团线桥工程有限公司)、杨景东(中铁三局集团线桥工程有限公司)、朱敬通(中铁三局集团线桥工程有限公司)、张旭(中铁三局集团线桥工程有限公司)、王建国(中铁三局集团线桥工程有限公司)、王晋元(中铁三局集团线桥工程有限公司)

高铁隧道长距离穿越软塑性黄土地层施工技术研究

随着国家西部大开发战略的深入实施及“一带一路”建设的推动，西北地区经济走廊带公、铁路建设得到了飞速发展，西北黄土地区隧道建设已然进入发展新时期，隧道纵深规模向下发展，长度越来越长，风险越来越高。近年来国内学者大量开展了大断面黄土隧道的湿陷性黄土、高含水率黄土控制变形技术研究，推动了我国在黄土隧道工程设计、施工、管理、运营技术水平逐步达到国际领先水平。由于黄土结构与性状的独特性以及隧道经历的地质单元越来越复杂，带来的建设和运维管理难度也逐渐增加。尤其董志塬地区软塑性黄土规模大、含水率高、水敏性强，施工中存在着如围岩压力理论计算、支护结构受力与软塑黄土空间分布关系、变形塌方诱发机理、防排水系统使用寿命等关键技术难题，国内外尚无可遵循的系统性理论成果及施工技术经验。

依托新建银西高铁上阁村隧道，“高铁隧道长距离穿越软塑性黄土地层施工技术研究”科研项目成果鉴定、验收成功，具备推广应用条件，创新性与先进性如下：

1.分析了穿越软塑黄土层大断面隧道支护结构受力特性，并结合现场实测数据，揭示了软塑黄土空间分布对支护结构受力分布规律。

2.分析了黄土隧道的变形和受力特征，根据隧道的变形和受力随含水率的变化规律给出软塑黄土隧道自稳状态下的界限含水率，同时给出了软塑黄土隧道稳定性的控制措施并进行了评价。

3.首次将浆固碎石桩应用于处理黄土隧道基底软塑土，研发用于隧道内浆固碎石桩适应性装备，开展了基底袖阀管现场试验，并进行了测试与理论分析，经济技术对比分析，解决了软塑黄土隧道基底地基承载力弱的问题。

4.分析了围岩受含水率位移变形规律，通过对软塑性黄土段进行深孔地表注浆加固、洞内大锁脚加强支护方法和适应性开挖工法研究，总结了软塑性黄土隧道适应性施工技术。

2020年4月21日，由教育部科技查新工作站（L02）组织对“高铁隧道长距离穿越软塑性黄土地层施工技术研究”进行了查新，查新结论：上述检索到国内外公开文献中，除本查新委托对象及合作单位公开发表文献外，未检与本项目查新点相同给的公开文献报道。

该关键技术成果于2020年5月6日通过了中国铁建股份有限公司对“高铁隧道长距离穿越软塑性黄土地层施工技术研究”科技成果评审。评审委员会认为：该成果创新性强，社会效益显著，应用前景广阔，成果总体达到国际领先水平。

本项目取得授权发明专利 5 项，授权实用新型专利 3 项，在《隧道建设(中英文)》、《铁道工程学报》、《铁道标准设计》等期刊共发表论文 6 篇，获得企业级工法认定 2 篇。

本技术已成功应用于银西高铁上阁村隧道、驿马一号长距离穿越软塑黄土大断面隧道工程，成功攻克了含水地层支护措施稳定性差、对地表构筑物扰动大、施工安全风险高、开挖支护进度缓慢等问题，在应用期间未发生一起安全、质量事故，且缩短了整个工程工期，为银西高铁开通运营安全奠定了坚实基础。该关键技术突破了软塑黄土隧道支护结构设计参数、基底处理及适应性快速施工技术的技术瓶颈，将施工风险控制在一个比较低发的相对安全状态，解决了施工过程中各类技术难题。

该技术成果适用于黄土地层大断面隧道的修建，特别在长距离、大断落穿越软塑性黄土地层大断面高铁隧道修建方面具有里程碑式的借鉴参考价值，对完善我国复杂地质条件下高铁隧道建设技术、填补软塑黄土地层大断面隧道建设研究领域空白具有重要战略意义，具有很高的推广价值。随着国家“十三五”规划的纵深，西部大开发的不断深入及“一带一路”战略的实施，穿越黄土地区的隧道也越来越多，该项关键技术对类似工程施工及解决软塑黄土地层隧道围岩变形、基底加固、综合防排水施工技术难题具有一定的借鉴与指导意义，应用前景广阔。

完成单位：中铁二十二局集团第五工程有限公司、中铁二十二局集团有限公司、长安大学、重庆大学

完成人：白明禄、邓启华、叶 宇、范存斌、何义松、张 勇、来弘鹏、洪秋阳、孔纲强、刘鸿斌

隧道快捷建造与智能监测关键技术

本项目属于隧道及地下工程领域，随着我国“一带一路”、新一轮西部大开发等国家战略的逐步深入落实，各地区基础设施建设呈现出数量增多、规模增大的发展趋势。在隧道建设方面，隧道工程规模正朝着超长、超宽、超深的方向发展，如何实现复杂环境下隧道工程快速、安全建造，成为了隧道工程行业面临的关键难题。现有的隧道围岩失稳理论、施工技术与装备、监测技术缺乏针对超长、深埋、破碎、破碎等复杂条件下隧道的快捷建造与智能化监测，在施工过程中可能面临较大的安全隐患。因此，在国家自然科学基金、企业科技创新计划等项目支撑下，以渭武高速木寨岭隧道项目为工程背景，开展了《隧道快捷建造与智能化监测关键技术》项目的专项研究，取得了系列创新性成果，主要创新性及先进性如下：

1.结合隧道软弱围岩结构面位移软化“链式传递”的时间效应特征，揭示了软弱地层隧道围岩渐进失稳机理，为隧道快捷建造与智能监测提供了理论基础。主要实现了软弱岩石微观力学理论体系的突破；发展了接力破碎岩体隧道围岩稳定性分析方法，提出了裂隙岩体隧道围岩分级优化方法；构建了软弱岩体结构面位移软化理论，揭示了含控制性软弱岩体结构面隧道围岩渐进失稳机理。

2.研发了软弱围岩隧道开挖-支护、防排水、通风等快速施工成套技术，研制了适用于多场景的软弱地层隧道多功能、便捷化成套建造装备，解决了软弱地层隧道的安全快速施工难题，提升了隧道机械化施工水平。

3.研发了机器视觉表面变形监测与深部变形光纤监测联合的隧道施工监测技术体系，研制了相应的智能化监测传感设备，开发了隧道围岩变形实时共享与安全风险智慧管控平台。

2020年09月03日，委托教育部科技查新站(J01)对“隧道快捷建造与智能监测关键技术”进行了查新，查新结论：经检索，国内外文献检索范围内未见相同研究内容的文献报道。

该关键技术成果于2021年4月15日由河北省建筑业协会组织并主持，邀请7位相关专业领域专家组成评价委员会对“隧道快捷建造与智能监测关键技术”进行评价。评价委员会认为：项目研究成果整体达到了国际先进水平。

本项目获得授权发明专利3项，实用新型专利6项，软件著作权3项。

本项目研究成果全面应用于“渭武高速木寨岭隧道”建设项目，该隧道项目地质构造复杂、断裂活动强烈，路线穿越12条大断层破碎带以及炭质板岩地层，围岩十分破碎，并且该隧道洞身最大埋深约为629米，属极高地应力区。在此种复杂情况下进行隧道施工，容易导致

围岩变形大、坍塌等不良现象，施工风险高，技术难度大，是木寨岭隧道工程面临的重难点。

本项目研究成果成功解决了复杂地质环境下隧道的快速建造与智能化监测关键问题。项目提出的软弱地层隧道围岩渐进失稳机理，为隧道快捷建造与智能监测提供了理论基础；项目研发的软弱围岩隧道开挖-支护、防排水、通风等快速施工技术，有效提升了富水、破碎等复杂环境下隧道的施工速度与质量；项目研制的适用于多场景的软弱地层隧道多功能、便捷化建造装备，提升了隧道机械化施工水平，大量缩短了施工周期，提升隧道建造效率；项目研发的隧道施工智能化监测方法以及对应的智能化监测传感设备，为软弱地层隧道安全、快速、智慧建造提供了重要技术支持；项目研发的软弱地层隧道围岩变形实时共享与安全风险智慧管控平台，实现了软弱地层隧道建造过程中围岩变形的无人化实时监测，有效保障了软弱地层隧道安全、快捷建造。

该项目成果已经成功应用于多个复杂地质条件的隧道工程建设项目中，凭借本项目提出的软弱地层隧道围岩渐进失稳机理、隧道快捷建造技术及配套装备、隧道施工监测技术体系及隧道围岩变形实时共享与安全风险智慧管控平台等理论及技术，有效提升了软弱岩体隧道施工速率与质量，在一定程度上缓解了复杂环境下隧道工程建设的难题。另一方面，本项目的应用加快了如渭武高速、银西铁路、蒙华铁路等关键线路的开通运营进程，对促进我国经济建设具有至关重要的意义。

完成单位：中铁隧道集团二处有限公司、中铁隧道局集团有限公司、西南石油大学、西南交通大学

完成人：何乐平、唐绍武、李志军、孙祥惠、于家武、渠孟飞、龙文华、孟庆成、姜智国、赵文

空间异形扭转钢主塔反对称公路斜拉桥建造 关键技术

一、项目概况及主要技术内容

柳州白沙大桥上跨柳江设计结构新颖，造型美观，凸显柳州文化特点和柳江地理特征，创新性采用“柳州之门”世界最大规模空间扭转钢主塔反对称斜拉桥体系。工程全长 1920m，主桥为 2×200m 单塔双索面斜拉桥，钢主塔为空间异形扭转结构，该结构经查新为国际首例，塔高 108 米，塔轴线由椭圆曲线及圆曲线组成，采用超高门架与双向吊具及内支撑系统安装塔节段保证节段空中对位姿态的调整和整体线形；主桥钢箱梁采用双滑道柔性支墩多点连续顶推施工，顶推最大跨度为 65m，顶推支墩最大高度为 50m，顶推最大支座反力为 2800t；主塔桩基础为深水溶蚀地质大直径钻孔桩，承台需要嵌入岩层 2m，塔座为空间异形结构，钢混结合段结构复杂，精轧螺纹钢及 PBL 键等预埋件结构设计复杂；主桥为反对称结构，斜桥索安装过程钢箱梁及主塔承受不平衡水平力，索力调整及张拉顺序与结构体系转换息息相关。

二、项目参建单位

中铁上海工程局集团有限公司、柳州市城市投资建设发展有限公司、中铁一院集团南方工程咨询监理有限公司、中铁大桥勘测设计院集团有限公司。由中铁上海工程局集团有限公司牵头其他单位参与负责关键技术攻关。

三、主要科研任务

柳州市白沙大桥为空间扭转钢主塔反对称公路斜拉桥，其施工工艺复杂、难度大，有必要立项作专题研究。本工程研究的目标为形成空间扭转钢主塔反对称公路斜拉桥综合施工工法，并形成空间扭转钢主塔反对称公路斜拉桥综合施工技术研究报告。通过本工程的实施，以工程实践来映证施工技术措施的经济合理性，为今后同类工程的施工提供技术参考。

主要研究内容：

- 1.单塔双索面反对称斜拉桥结构设计关键技术
- 2.深水溶蚀地质塔座基础施工关键技术
- 3.钢箱梁顶推与主塔安装中工业自动化应用关键技术
- 4.空间扭转钢主塔制造与安装关键技术
- 5.反对称斜拉索合理成桥状态与施工控制关键技术

6. 超高支架状态监控系统设计与应用关键技术

四、关键技术及创新点

1. 空间异形扭转反对称斜拉桥结构设计关键技术

采用圆曲线和椭圆曲线构建主塔轴线，突显扭曲门形景观效果；交界墩设置剪力卡隼支座，抵消了不对称拉索的水平分力；异形预应力塔座基础创新采用插入式 PBL 键锚固技术，传力途径明确，保证了结构安全。

2. 空间扭转钢主塔制造与安装关键技术

钢塔制创新应用钢构件全自动定位测量技术，采用三维立体放样、塔轴线法向分段、板单元小角度折弯与压圆、火修仿形定位、节段无应力二次配切等加工方法，有效控制了空间扭转曲线钢主塔节段制造的精度。

钢主塔为空间扭转结构，安装过程中需要调节 X、Y、Z 三个轴向的对位精度，采用传统塔吊、浮吊等方法安装无法保证空中姿态的吊装满足设计规范要求，采用塔梁交错施工及塔梁固结方案，自主研发应用超高门架智能提升系统、钢管内支撑加预应力临时索辅助稳定系统，利用双向转动十字吊具全向翻转主塔节段等专利技术和空间曲线测量定位技术，实现了钢塔节段安装的精确、稳定、安全、高效。

3. 钢箱梁顶推与主塔安装中工业自动化应用关键技术

白沙大桥钢箱梁顶推和主塔吊装施工全过程采用千斤顶自动化智能同步控制技术，该技术核心设备采用计算机控制，可全自动完成同步升降、实现力和位移控制、操作闭锁、过程显示和故障报警等多种功能，是集机、电、液、传感器、计算机控制技术于一体的现代化先进施工设备，将多台千斤顶连接至泵站通过有线电缆将数据传送至主控台统一操作，实现多项同步协作自动化控制，保证了施工过程的安全稳定。主桥钢箱梁顶推施工工艺的精度与质量控制难度大，要解决过程中顶推精度不高，自动化程度低，工期难以保证，耗费人工，汛期无法进行施工等问题。

4. 反对称斜拉索合理成桥状态与施工控制关键技术

桥梁钢主塔与斜拉索均为反对称结构在施工过程中其塔、梁、索力相互影响，同时又受温度和众多施工随机因素影响，整个施工过程是个力学体系复杂的演变过程，因此本工法施工进度采用数据模拟法进行索力工况模拟，施工精度高。为确保斜拉桥在施工过程中结构状态（内力和变形）始终安全、合理、可控，且成桥后结构状态满足设计要求，必须在施工过程中对结构开展严密的施工控制。通过施工监控，在斜拉桥的施工过程中对结构体系计算所采用的参数（如温度、线形、索力、节段尺寸和质量等）进行识别、计算和修正，才能消除

或减少实际线形、内力、索力与设计目标值的偏差，最终确保成桥线形、索力和应力满足设计要求。

5. 深水溶蚀地质塔座基础施工关键技术

塔座基础施工研究采用深水定位爆破、大重量钢围堰下放、预应力 PBL 键锚固、BIM 等技术确保基础施工工效和质量，解决洪水期施工问题，项目自主设计了深水裸岩地段板凳结构钻孔平台，满足汛期施工要求，保证施工工期。

五、应用推广及效益情况

通过柳州白沙大桥工程施工实践证实，项目采用单塔双索面反对称斜拉桥结构设计关键技术、深水溶蚀地质塔座基础施工关键技术、钢箱梁顶推与主塔安装中工业自动化应用关键技术、空间扭转钢主塔制造与安装关键技术、反对称斜拉索合理成桥状态与施工控制关键技术、超高支架状态监控系统设计与应用关键技术，具有明显优势，施工效果好，速度快，且定位准确度高，较传统的施工技术减少了机械、材料，提高了安全性，缩短工期 5 个月，产生效益 1800 万。共形成 6 项关键技术总结报告，获得 9 项发明专利，16 项实用新型专利、7 项省部级工法。先后荣获中国铁路总公司科学技术奖一等奖等，赢得了监管部门和广大新闻媒体的广泛赞誉，取得了良好的社会效益。

完成单位：中铁上海工程局集团第五工程有限公司、中铁上海工程局集团有限公司

完成人：刘明友、翟 溯、郭 乐、彭 最、姜 杰、赵帅鹏、廖铭超、方明辉、唐 鹏、宦剑鹏

伶仃洋海域跨海大桥设计新技术

港珠澳大桥工程包括三项内容，一是海中桥隧工程；二是香港、珠海和澳门三地口岸；三是香港、珠海、澳门三地连接线。根据达成的共识，海中桥隧主体工程（粤港分界线至珠海和澳门口岸段）由粤港澳三地共同建设；海中桥隧工程香港段（起自香港石散石湾、止于粤港分界线）、三地口岸和连接线由三地各自建设。

DB02 标设计里程范围 K29+237~K35+890，主线设计总长度 6653m，桥址海域风大、浪高；高温高湿，海水盐度高，腐蚀条件恶劣；自然保护区种类多，生态环境敏感；防洪要求桥梁阻水率不得大于 5%，非通航孔桥承台需埋置在海床面以下；耐久性要求高，工程设计使用寿命为 120 年；按照“大型化、工厂化、标准化、装配化”跨海大桥建设理念，要求上部结构及墩台全预制安装施工。港珠澳大桥是迄今中国交通建设史上技术最复杂、环保要求最严、建设标准最高的工程。结合工程建设条件及总体要求，设计过程中存在大量关键技术难题，针对难题开展了多项关键自主创新，简述如下：

1. 连续组合梁设计新技术

本项目在负弯矩区桥面板研发了高抗裂致密匀质混凝土，以提高桥面板的抗拉强度；并采用支点顶升与回落施工工艺，使混凝土桥面板基本消除拉应力；同时在负弯矩区桥面板内设置少量纵向预应力，给桥面板一定预压应力储备；形成负弯矩区支点顶升与回落、纵向预应力设置和高抗裂致密匀质混凝土应用的集成新技术，有效增大了钢-混组合桥梁负弯矩区桥面板的压应力储备和桥面板的抗裂性能，确保了 120 年的设计寿命，突破了钢-混组合桥梁结构抗裂的技术瓶颈，解决了大跨径钢-混组合梁桥负弯矩区混凝土桥面板易开裂的技术难题。

2. 钢-混组合桥梁高腹板稳定性分析新方法

通过建立钢-混组合翼缘与高腹板的转角协调关系，构建了高腹板弹性转动约束系数 α 计算模型；据此，采用弹性薄板理论、里兹能量变分法、有限元模拟和模型试验，考虑高腹板边界的弹性转动约束作用，建立了弯、剪荷载下钢-混组合梁高腹板临界屈曲应力公式和屈曲方程，提出了考虑弹性转动约束边界的钢-混组合梁桥高腹板稳定性分析方法，采用此方法使高腹板临界屈曲应力提高 20-30%、厚度减小 10%左右，工程经济性明显。

3. 引桥整墩分幅结构新体系

浅水区非通航孔双幅桥采用一个桥墩，阻水率小，满足防洪要求；视觉通透性好，景观效果好；整幅桥墩提高了基础抵抗水平力能力，防船撞性能好；采用整幅桥墩减少了桥墩及

桩基的数量，现场作业量小、时间短，施工质量及工期有保证，并且极大程度减小了对白海豚的影响，实现了环保要求。

4. 埋床法全预制墩台新结构及关键技术

85m 组合梁引桥下部结构墩台首次采用整体预制安装工艺，承台与首节墩身一起预制(吊重 2650t)，墩身节段之间通过湿接头连接。钢管复合桩抗弯刚度同比钢筋混凝土桩增大约 40%，在相同荷载作用下，钢管复合桩横向变形减小 40%左右，大幅提高了桩基承载力，有效减少桩基数量，经济性良好，解决了墩身吊装时预埋钢筋相互干扰，定位困难的问题，并且避免了现场钢筋焊接量大、质量难控制的问题，连接可靠、施工速度快。

5. 120 年超长设计使用寿命结构耐久性新技术

采用基于可靠度理论的混凝土耐久性设计新技术，取得 120 年超长寿命结构耐久性设计新成果；在墩身浪溅区及水位变动区采用不锈钢钢筋，并制定相关技术要求，在耐久性新材料方面进行了探索，填补了国内不锈钢钢筋应用空白，为今后类似工程积累了宝贵经验。

2020 年 8 月 10 日，由湖北省科技信息研究院查新检索中心对“伶仃洋海域跨海大桥设计新技术”进行了查新，查新结论：经检索，国内外未见与本查新项目研究内容相同的技术研究与应用的文献报道。

该关键技术成果于 2020 年 7 月中铁大桥院通过对“伶仃洋海域跨海大桥设计新技术”评价会。评价委员会认为：项目研究成果总体达到国际领先水平。

本项目取得授权发明专利 3 项，论文多篇。

港珠澳大桥结构新颖、技术先进、功能完善、造型美观，是一座具有世界领先水平的桥梁，一系列新技术、新结构、新工艺的创新与应用有力地推动了桥梁行业的进步，对推动我国乃至世界桥梁技术的进步具有重大意义。连续组合梁负弯矩区抗裂新技术，钢-混组合桥梁高腹板稳定性分析新方法，埋床法全预制墩台、整墩分幅布置新结构，120 年超长设计使用寿命结构耐久性等新技术均在港珠澳大桥主体工程桥梁工程中得到了全面的应用。

大桥于 2012 年 6 月开工建设，2018 年 10 月建成通车，至今运营状况良好。项目的建成产生了良好的社会效益。

完成单位：中铁大桥勘测设计院集团有限公司

完成人：张强、别业山、唐斌、张金涛、王东晖、郑清刚、罗扣、付岚岚、阮怀圣、肖志海、金恩伟、刘锐

曲塔宽梁部分斜拉桥建造关键技术研究简介

部分斜拉桥由于它优越的结构性能、良好的经济指标，是主跨在 100m~300m 之间的优势桥型，近 10 年以来，部分斜拉桥有向大跨、超宽、多塔及造型新颖的发展趋势。《曲塔宽梁部分斜拉桥建造关键技术研究》是中铁十九局集团公司企业资助立项的科研项目。本课题主要研究对象是部分斜拉桥中具有曲线造形的钢-混组合塔和超宽 PC 箱梁的矮塔斜拉桥，分析该类部分斜拉桥的结构特征和技术难点，对其建造关键技术进行深入研究，解决施工难题，并推动部分斜拉桥（矮塔斜拉桥）结构体系、塔形的多样化发展及建造技术水平进步。

本项目依托的崇左大桥工程，是广西壮族自治区统筹推进的城市独立特大桥项目。大桥全长 533 米，其中主桥采用（105+190+105）m 部分斜拉桥，塔墩梁固结体系，桥长 400 米，变截面 PC 箱梁宽 39 米，主塔墩采用钢混组合结构，曲 Y 形立面，弧形塔柱外倾，整体呈敞开状，造型十分新颖，建造技术要求极高。

针对崇左大桥具有“一新、二大、三高、四难”等技术特点，主桥综合建造技术非常复杂。针对崇左大桥综合建造技术特点，研究项目充分结合依托工程设计、施工、运营管理等各环节的工程实际，采用建模及理论分析、现场测试、工程分析、工程验证的研究路线进行研究。研究为该桥梁优化设计和施工工艺提供强有力的指导，也为同类桥梁设计理论与施工及运营管理的完善和发展提供可靠依据。在建设中项目科技创新攻关小组先后开展了“深水裸岩河床条件下大型群桩基础施工关键技术”、“双肢柔性 Y 型桥墩施工关键技术”、“钢混组合曲线塔施工关键技术”、“大吨位宽幅后支点菱形挂篮设计制造关键技术”和“超宽变截面 PC 箱梁大节段悬浇施工关键技术”等曲塔宽梁部分斜拉桥建造综合关键技术联合攻关，取得系统集成的创新性成果成功解决了崇左大桥建造技术难题，确保了工程质量和施工安全，社会、经济效益显著，成果推广应用前景广阔。该课题取得的主要成果如下：

1.研发了浅嵌岩钢管桩结构和新型“混凝土连续墙基础+钢管桩”组合围堰防护结构，形成了“深水裸岩河床条件下大型群桩基础”施工新技术。

2.通过计算分析钢筋混凝土双肢柔性 Y 型墩身特殊结构，开发了“双肢异步翻模”施工新技术；研发了异型主墩模具，确保了混凝土装饰块细薄超深水平分隔断缝的成型效果。

3.开发了曲线钢混组合索塔的钢混连接段安装和钢箱塔柱节段制造安装的新工艺，形成了“曲线钢混组合索塔”施工新技术。

4.通过对墩塔梁固结型宽幅钢筋混凝土箱梁 0 号块的受力分析，研发了“水平分层、竖

向预留后浇湿接缝”三次现浇的新工艺，形成了“墩塔梁固结型宽幅钢筋混凝土箱梁 0 号块现浇”防裂施工新技术。

5.研发了大吨位宽幅长节段后支点菱形挂篮和五主桁自动化同步行走系统，形成了“矮塔斜拉桥超宽变截面 PC 箱梁大节段悬浇”施工技术。

综上所述，该成果在崇左市崇左大桥等工程中得到成功应用，经济社会效益显著，研究成果总体达到国际先进水平，其中“大吨位宽幅长节段后支点菱形挂篮和五主桁自动化同步行走系统”技术达到国际领先水平。在技术开发中解决了曲塔宽梁部分斜拉桥建造技术难题并取得 5 项新技术，掌握核心技术并进行集成创新的程度：研究成果获发明专利 2 项（其中 1 项已获 PCT 国际利授权）、实用新型专利 8 项，省部级工法 4 项，发明专利 2 项，实用新型专利 8 项，获中国铁建总公司科技进步一等奖 1 项，在核心期刊发表论文 7 篇。本研究成果在崇左大桥建设中成功应用，且自主创新技术在总体技术中的比重达 95%以上，给企业创造经济效益共计 1084 万元。对缩短建设周期、提高质量和节省投资起到了很大作用，取得了重大的经济效益和社会效益，该工程已获广西“真武阁杯”（最高优质工程奖）。为我单位在广西壮族自治区树立了良好的企业形象，提高了品质铁建美誉度。本研究成果还进一步验证和完善了“曲塔宽梁部分斜拉桥”桥型设计相关理论，推动了本领域部分斜拉桥设计和建造技术的发展，为类似部分斜拉桥的建设提供了借鉴。

完成单位：中铁十九局集团有限公司、中铁十九局集团第七工程有限公司

完成人：屈振学、陈友健、曹树强、王 岩、黄凤姣、程世峰、杨维威、王 冠、李冰、左 卫

BIM 环境下企业级项目管理数据采集与共享 技术研究

建筑业是我国重要的国民经济生产支柱，但行业一直处于总体规模庞大但经济效益有待提高的艰难处境之中，面临着如何提升行业整体科技水平和企业综合竞争力的严峻挑战。分析背后原因，建筑企业自身管理水平还有待提升，其主要原因在于建筑工程项目的独特多样和生产方式的分散，以及信息管理和交换方法的落后。

《BIM 环境下企业级项目管理数据采集和共享技术研究》课题研究旨在利用信息化手段加强集团层面统筹和管控；通过创建企业标准 BIM 构件库、建立项目管理动态数据库、编制 BIM 项目全过程应用标准、建设企业级 BIM 项目管理平台，创新管理模式及手段，切实提升工程质量，加强信息技术与生产经营深度融合，取得最佳社会与经济效益。

本课题基于中铁上海工程局现状和实际需求，结合目前 BIM 及企业项目管理发展现状，形成了 BIM 环境下企业级项目管理数据采集与共享方法。首先通过文献、企业组织架构和既有管理模式调研，找出企业级项目管理数据采集与共享核心问题；其次开展企业标准及管理体研究，分析企业级管理信息采集与共享机制，并为管理平台框架建立提出理论基础，提供 BIM 数据基础、过程交付、应用指导的标准环境；接着，为保障 BIM 应用标准化，研究建立了企业构件库方建设方法，形成上海局经营全工程类型构件库；同时，在支撑标准和管理体系的理论研究的基础上，探索进行企业级 BIM 项目管理平台系统框架，研究解决企业级 BIM 平台多源信息采集、数据接口，BIM 轻量化引擎等关键问题，研发平台框架实现主要功能并预留开发接口。最后在多个示范工程成功应用，验证了研究成果的可行性和有效性。

主要研究内容如下：

1.研究企业级 BIM 项目管理标准体系，制定企业级 BIM 系列标准

研究建立满足企业现状、特色和管理理念的标准体系。从模型数据、平台应用、模型管理角度建立企业级 BIM 系列标准。实现施工单位从取得设计交付模型，建立施工过程模型，到完成竣工交付模型，按照 BIM 施工应用标准要求使 BIM 技术应用落实到施工管理全过程。

2.开展企业构件库建设体系研究，建设企业全工程类型构件库

针对企业经营工程类型范围，探索构件库建设体系，开发企业构件库系统 Web 端，为企业内部提供族构件开放共享的平台，在集团公司实现建模资源共享，提高模型质量和建模

工作效率，改变委外建模、重复建模现状，优化管理资源。

3.研究企业级 BIM 项目管理数据采集共享体系

调研企业与项目整体组织架构、管理模式和既有业务流，研究企业级 BIM 项目管理数据采集共享体系，制定 BIM 环境下企业和项目层级管理信息传递的数据流；对中铁股份公司现有部分业务系统进行充分调用，与既有业务系统形成功能互补和数据共享，减少当前项目上录入前人工统计和重复录入工作量；研究信息采集手段集成方法，采用现代化信息技术手段，辅助采集项目管理信息，促使管理信息对称，并为后期新技术接入预留框架。

4.搭建企业级 BIM 项目管理平台架构，研发企业级管理系统：

建设完成企业级项目管理平台 Web 端和 App 端。搭建企业级架构，集团部署支持企业所有项目应用，支持垂直管理和数据集中管理。通过集团公司、子公司和项目部各层级管理界面设计，用图形化，数据化方式展示管理关切信息，提高管理效率。研发搭建企业级平台架构，充分考虑平台扩展性，为新技术预留开发接口。

主要创新点如下：

- 1.建立了体系化的集团级施工企业 BIM 标准；
- 2.研究搭建了企业全工程类型标准构件库平台；
- 3.提出了集团级施工企业多层次纵向信息传递、项目横向协同的 BIM 数据体系；
- 4.研发了轻量化程度高、模型渲染快、数据源统一的集团级精细化穿透式 BIM 项目管理系统。

课题组通过示范工程对研究成果展开应用与验证，试点项目包括南沿江高铁、常益长高铁及福厦高铁等 8 个工程项目，试点应用项目的直接经济效益 6808 万元，并多次获得业主表扬和质量安全绿牌奖励。在所有试点项目中均进行推广和实施了企业级标准，过程中对标准体系进行了验证和完善；各项目根据工程特色和项目重难点，有针对性地开展企业构建库和企业级项目管理平台的模块应用，解决生产过程中的管理问题；试点项目涉及路基、隧道、桥梁、临建等多个工程专业，并取得良好的社会、经济效益，对企业内未来课题成果的广泛应用和推广具有很好的借鉴和指导意义。

完成单位：中铁上海工程局集团有限公司、同济大学

完成人：孙爱军、翟昌骏、谢雄耀、郑亚民、姚松柏、林威、朱文杰、杨再兴、骆海剑、周运志

强腐蚀低负温下混凝土性能劣化及对策的全寿命成套技术研究及应用

一、项目背景：

西部地区分布着大量盐渍土、盐湖以及高含盐量的地下水，同时长期处于寒冷干燥、正负温交替频繁的环境中。混凝土工程长期处于恶劣的强腐蚀低负温环境中，受到毛细孔中盐分的聚集、结晶作用，并在冻融破坏耦合作用下，致使很多构筑物大面积出现较为严重的腐蚀、表面剥落，钢筋锈蚀等病害（图 1），进而导致一些结构物在长期的服役过程中，因材质劣化造成过早失效，导致该环境下的结构物耐久性难以保证。因此对强腐蚀低负温下混凝土性能劣化及对策的全寿命成套技术的研究显得尤为重要。提高混凝土的耐久性，延长工程结构使用寿命，是最大的节能减排，是国家实施低碳经济和可持续发展战略的关键。

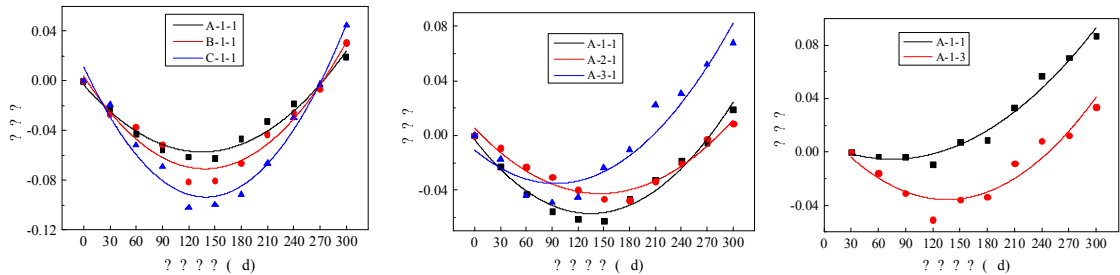


图 1 冻融、腐蚀环境下混凝土外观劣化

二、项目主要创新点及内容

1.调查干寒环境盐渍土地区气候环境、地质条件及既有混凝土结构病害，进行干寒环境盐渍土地区所含有害成分的种类和数量测定，通过化学、物理两方面的分析，研究有害成分对混凝土的破坏过程以及破坏机理；

2.通过研究不同因素下混凝土硫酸盐侵蚀性能劣化和离子传输扩散规律，分析盐渍土地区混凝土内部离子传输及性能劣化规律，提出硫酸根离子传输模型（图 2）；



(a)水胶比对混凝土损伤度的影响 (b)外掺料对混凝土损伤度的影响 (c)养护时间对混凝土损伤度的影响
图2 基于 Fick 第二扩散定律的水胶比、外掺料、养护时间与损伤度关系曲线

3.针对恒定负温 (-5°C) 环境下混凝土性能的劣化演变, 进行入模温度和引气剂对混凝土抗压强度、抗氯离子渗透性能及微观孔隙结构影响的研究, 分析基于等强度持续负温 (-5°C) 下混凝土性能劣化演变规律;

4.基于在硬化水泥浆体中孔相的连通性能是影响有害介质传输的重要因素这一理论, 进行颗粒形状对水泥基复合材料微结构及传输性能影响数值建模分析 (图3)。

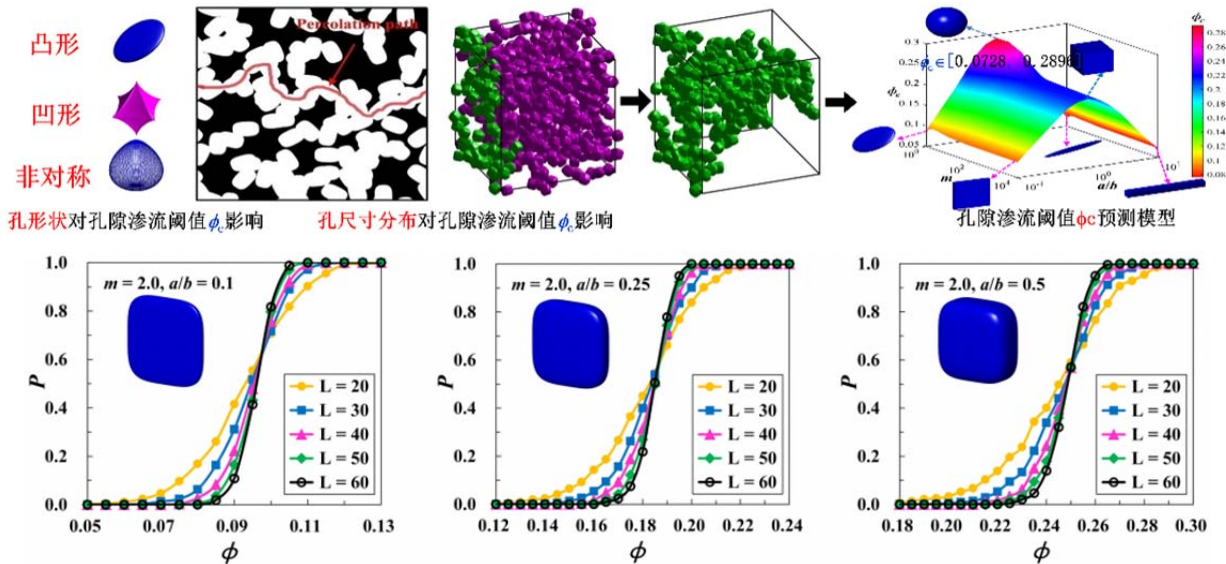


图3 $m=2.0$ 时不同的 a/b 渗透概率 $P(\phi, L)$ 与孔隙率 ϕ 关系

5.通过合理优化粗细骨料、外掺料的掺量与空间结构等研究, 得出了强腐蚀低负温环境下混凝土性能的发展规律及其在服役期间性能劣化机理, 提出了适合强腐蚀低负温地区混凝土结构物配合比的关键参数和具体指标;

6.针对强腐蚀低负温地区环境特点, 提出了混凝土结构新型养护技术。在养护措施对混凝土结构性能影响的研究基础上, 分析得出了最佳的养护制度, 进而提出经济适用、适合该地区混凝土养护的措施, 保证了混凝土结构服役期间功能要求的耐久性;

7.对比国内外混凝土结构物防腐蚀处治方式及效果, 开展新型外掺料提高混凝土结构致密性、优化外包/涂型防腐蚀材料的研究, 并结合实际提出了内部致密外部防护的防腐蚀技术体系。

三、项目成果及主要经济社会效益

1.项目知识产权成果

项目具有完全自主知识产权，获得计算机软件著作权 8 项，发明专利 2 项，实用新型专利 1 项。发表期刊论文 48 篇，其中 SCI 收录 30 篇，EI 收录 3 篇，出版专著 1 部，参编规范 1 部，省部级工法 1 项。

2.经济及社会效益

通过应用强腐蚀低负温下混凝土性能劣化及对策的全寿命成套技术，应用单位进行了混凝土配合比、养护措施及混凝土结构物防腐蚀的处治方式等方面的优化，从而保证了结构的使用寿命，达到节能减排，实施低碳经济和可持续发展战略的目的。研究成果成功应用于阿富准铁路、和若铁路及格库铁路，产生巨大的经济效益，共节约材料费 4453.8 万元。可解决干寒环境盐渍土地地区混凝土的技术难题，为该种地区工程项目顺利及高标准的实施提供技术支撑，为干寒环境盐渍土地地区建设的同类工程提供技术参考。为沿线人民出行提供了便利，提高了人民的生活水平和质量。

完成单位：中铁二十一局集团第一工程有限公司、兰州交通大学、东南大学、哈尔滨工业大学、中南大学

完成人：王立博、张戎令、陈惠苏、袁宪灿、肖会刚、盖涛、刘鹏、张志勇、孙凤鹏、任建伟

连续刚构拱桥主拱大节段异位拼装、纵移和提升 施工关键技术研究

钢管混凝土拱桥具有自重轻、强度大、抗变形能力强的优点，在我国铁路、公路和城市桥梁中发展迅速，不但数目逐渐增多，跨度也不断增大，成为较具竞争力的桥型。但大跨度钢管混凝土拱桥均存在矢量高、跨度大、自身重量重、工艺复杂等特点，对施工流程、工艺等要求严格。

由于郑万高铁汉江特大桥铺轨关工期限定，主桥钢管拱安装有效施工时间不足 2.5 个月，工期特别紧张。采用常规的“原位支架拼装法”或“原位竖向提升法”，无法满足工期要求，另外具有工期优势的“异位拼装+整体纵移法”又受到过梁限载和横向倾覆安全性的限制，无法用于本工程。

中交路桥华东工程有限公司和郑万 4 标项目部经过数种施工方案的分析、比较、筛选，最终选定了“异位拼装+纵移+提升”的施工方法。本施工方法在传统钢管拱纵移法的基础上，增加了提升塔调整机构，如期完成大跨径钢管拱的安装。

本施工方法是在传统钢管拱纵移法的基础上，增加了提升结构，与传统纵移法和常规原位拼装、提升施工方法相比，具有以下方面的优势和创新：

1.通过增加提升结构，提高了顶推施工的适用性，同时提高了钢管拱安装施工的安全性和工效，并形成了发明专利技术“一种大型钢管拱纵移及提升安装施工方法”（专利号：ZL201910309553.8）；



2.本施工方法提出了连续刚构拱桥主拱纵移提升施工线形计算分析方法和动态控制技术，保证了钢管拱与刚构桥成桥线形控制精度，研发形成 3 项实用新型专利技术“一种用于钢管系杆拱吊杆孔道测量的支撑定位装置”（专利号：ZL202020317224.6）、“一种哑铃型钢管拱合

龙段下弦杆安装吊具”（专利号：ZL202020317247.7）和“一种钢管拱临时减振装置”（ZL202020317221.2）；



3.研发了一种新型大吨位钢管拱纵移提升组合式台车，提高了拱肋纵移提升的安全性和稳定性，并形成了实用新型专利“一种大跨径钢管拱纵移及提升组合式台车”（专利号：ZL202020317206.8）。



4.采用本施工方法，全跨钢管拱安装施工工期合计为 75 天，较常规施工方法节省工期 45 天以上；

5.与常规原位拼装、提升施工方法相比，可节省成本约 106.8 万元。

本课题于 2020 年 7 月 11 日，经中国交通运输协会鉴定达到“国际先进”水平；取得 5 项授权专利，在核心期刊发表 5 篇科技论文。

本课题研究成果已在郑万 4 标汉江特大桥主桥成功实施。大桥自 2019 年 12 月 1 日建成通车以来，大桥一直保持良好的结构受力性能，混凝土表面平整光洁，线形顺适，桥面平顺，具有良好的景观效果。



实践证明，本施工方法适用于主拱安装受限条件多，工期紧张的相类似工程，推广应用至其他类似桥梁建设项目中，将会产生巨大的经济效益和社会效益。

完成单位：中交路桥建设有限公司、中交路桥华东工程有限公司

完成人：唐 剑、周彦文、汪泉庆、杨军宏、杨俊平、柳 林、刘 伟、权宝安、罗鹏、徐家金、龚鹏鑫、盛雅楠、高佳峰、拓 珂、张 晨

连续复合曲线高铁接触网精确测量计算及施工 关键技术研究和应用

银西高铁银吴段属于设计时速 250km/h 的有砟高速铁路，接触网正线采用弹性链型悬挂。施工范围内共计 223.691 条公里，25600 套整体吊弦，吊弦施工工程量较多。由于银吴客专属于银西铁路宁夏段先导段，需提前开通运营，故施工工期短、工程量大，站前土建施工及轨道工程与站后四电工程需同时完工，接触网调整无法根据轨道精调后的线路条件进行施工，尤其是在银吴段整个线路曲线条件复杂，平曲线与竖曲线连续复合段增多，小半径曲线量大大增加，对吊弦测量及计算带来更大的难度，因此需要打破现有技术和施工方法的壁垒，研究新的连续复合曲线的轨面未成型情况下接触悬挂参数采集、处理、计算、施工为一体的施工技术，通过分析变动轨面与接触悬挂的模型，计算得出相应的数学关系，首次研发连续曲线的变化与接触网参数的计算方法，解决了连续复合曲线段参数动态变化的关键问题，填补了该项技术的国内外空白。且总结出一套从接触悬挂安装、吊弦数据采集、吊弦数据处理、吊弦计算等全过程的一套有砟常动轨铁路接触网吊弦数据处理及计算的施工技术。

通过几项关键技术研究，在连续复合曲线下的高铁接触网施工质量得到了极大的提高，并且解决了轨道未成型给接触网调整带来的限制，确保了施工工期；施工管理能力、施工人员的素质也得到了进一步提升，取得了较好的经济效益和社会效益。

依托于银西高铁银吴段整个线路曲线条件复杂，平曲线与竖曲线连续复合段增多，小半径曲线量大大增加，对吊弦测量及计算、接触网施工、电力缆线等施工带来更大的难度，因此需要打破现有技术和施工方法的壁垒，研究新的连续复合曲线的轨面未成型情况下接触悬挂参数采集、处理、计算、施工为一体的施工技术，课题组对高速铁路连续复合曲线接触网精确测量计算及施工关键技术进行研究，经第三方专家评委评审为：技术成果达到了国际领先水平，共形成关键技术 5 项，发明专利 3 项，国家核心期刊发表论文 2 篇。成果具备推广实用条件，创新性与先进性如下：

- 1.首次研发连续曲线的变化与接触网参数的计算方法，解决了连续复合曲线段参数动态变化的关键问题，填补了该项技术的国内外空白。

- 2.自主设计了闭环测量曲线中一定距离内穿插测量已知 CPII 点桩的偏差控制技术。实现在动态变化的轨面条件下吊弦计算数据精确测量。

3.首次研发出一种在电气化铁路客运接触网支柱侧面限界的测定方法，解决了在无轨条件下实现连续高效测量的难题，属于国内外首创。

4.自主研发出适用于高速铁路连续曲线区段施工的电缆整理、收拢、防护的整套施工技术，技术创新性达到国际领先水平。

5.研究出小半径大超高区段接触网定位器非自然抬高问题研究及处理技术。

该成果已成功运用于银西高铁、哈佳客运专线接触网工程施工当中，该关键技术突破了技术瓶颈，解决了施工过程中各类技术难题。同时，成果并为目前国内大力推动的 350km/h 高速有砟铁路提供了有力的技术支持。与传统技术水平相比，能够节约大量的生产资源，推广后有利于铁路施工沿线的各项资源的合理利用及生态平衡，具有很高的推广价值。

完成单位：中国铁建电气化局集团有限公司、中铁建电气化局集团南方工程有限公司

完成人：喻守军、曹原、李松茂、刘维生、赵枝宗、彭全权、杨清太、杜磊、申朝震、侯莎莎

H 型钢柱智能车简介

在以往的电气化立杆施工作业中，采用的是半机械化模式，机械化程度不高。接触网立杆作业车将支柱用吊装锁具吊起进行安装，需要多名工人辅助作业，存在一定的危险性。并且，吊装锁具容易刮伤钢柱的镀锌层，对钢柱造成伤害。

由中铁电气化局集团研制的 H 型钢柱智能车，是一款专门用于电气化铁路接触网钢柱安装作业的机械装备。该装备结构新颖，控制简单，运行高效安全，改变了沿用几十年的技术落后、效率低下的施工方式，使施工技术得到了提升，使机械装备向着智能化、专业化迈出了一大步。

该装备在主体结构上采用桁架 T 型结构，增加了整机的稳定性。四个液压升降立柱由电液比例阀控制，能够同步升降。立柱升降油缸采用外挂式对称安装，使升降时受力均匀，液压油缸采用外挂式安装便于观察和检修。H 型钢柱智能车的平移由对称的两个双作用液压油缸组成，旋转部件由低速大扭矩液压马达驱动，旋转和移动平稳。各运动部件的运行精度得到了提高，为今后向智能化、自动化升级改造提供了技术支持。

在钢柱的固定抓取方式上进行了大胆的创新，采用电永磁铁吸取形式。电永磁铁是一种含稀土元素钕的钕铁硼磁铁。在充磁后会牢牢地将钢柱吸住，在不人为消磁的情况下，能够始终保持吸附状态。对电永磁铁的吸附能力进行了静态试验，在充磁吸附后断电的情况下，仍然能够牢牢地吸附 24 小时以上不脱落。电永磁铁技术的使用能够有效避免刮伤破坏钢柱的镀锌保护层。而且，还省去了吊装锁具的拆装等繁琐工序，减少了用工人数量，提高了施工作业效率。

采用无线遥控器控制各个动作，有效避开作业范围，使操作人员的视野更加开阔，提高了作业安全性。

在作业方式上，可以直接将钢柱安装作业一次完成。首先，由牵引作业车将 H 型钢柱智能车与支柱安装基础进行粗定位，其次，四个同步立柱升起至电永磁吸盘的吸附面对正 H 型支柱的表面，此时电永磁吸盘充磁，由吸盘将 H 型支柱从平板车吸起，再由桁架横梁旋转使支柱水平，通过“T”型竖臂旋转装置调整使支柱竖直，通过调整钢柱在顺线路和垂直线路方向上的位置，进行支柱底部法兰盘与基础螺栓位置间的粗定位，使法兰盘处于基础螺栓上方 20 公分处，再通过精准定位将支柱法兰平稳放进基础螺栓中，最后由安装工人用电动工具将螺栓拧紧，将钢柱固定牢靠，此时电磁铁充电消磁，完成 H 型支柱的安装作业。其中，最关

键的抓取装置所采用的电磁铁为电永磁铁，通电充磁后具有永磁性，断电状态下仍可保证磁性 24 小时内无衰减，只有再次充电退磁才可将钢柱松开。

H 型钢柱智能车能够抓取最大 5 吨、长度在 11 米以下的重物，目前，接触网钢支柱中最重的是重量为 1.8 吨的并联开关柱，因此，能够完成所有型号的 H 型钢柱的安装作业。还能够直接抓取放在路肩上的钢柱进行安装。

设备先后在京张高速铁路八达岭隧道西口和下花园车站进行了钢柱的安装作业，在智能京张高速铁路建设中发挥了作用。安全、高效的作业方式，得到了好评。中央电视台科教频道在“我爱发明”栏目中对 H 型钢柱智能车进行了专题报导，引起了广泛好评。

与传统方式相比更安全、更优质、更灵活、更高效、更经济。这种模式替代了传统吊车搭配吊装锁具的作业方式，尤其在既有铁路钢柱更换作业中，不再受上部已有接触网等障碍物对作业空间的限制，只需要很小的空间就能完成钢柱的安装和拆除作业，能够用于接触网的运行维护作业。因此，在电气化铁路建设和运营维护领域都有着广阔的应用前景。

完 成 人：任增堂(中铁电气化局集团有限公司石家庄机械装备分公司)、刘桐(中铁电气化局集团有限公司石家庄机械装备分公司)、苗俊波(中铁电气化局集团有限公司石家庄机械装备分公司)、陈桀(中铁电气化局集团有限公司石家庄机械装备分公司)、任强(中铁电气化局集团有限公司石家庄机械装备分公司)、白胜锁(中铁电气化局集团有限公司石家庄机械装备分公司)、李剑峰(中铁电气化局集团有限公司石家庄机械装备分公司)、张柏滔(中铁电气化局集团有限公司石家庄机械装备分公司)、崔达(中铁电气化局集团有限公司石家庄机械装备分公司)、周辰彦(中铁电气化局集团有限公司石家庄机械装备分公司)



基础设施篇

机械法联络通道建造成套技术研究与应用

近年来，地下隧道工程建设快速发展，在克服隧道施工遇到了各种地下、地上、地表、地中、地底的复杂环境时，造就了 TBM、盾构法、顶管法等各种机械化程度高的施工技术。地铁设计规范要求不大于 600m 设置一处联络通道，该工程建造环境与隧道一样复杂多变，同时建设数量庞大。目前国内常用的施工方法为钻爆法、矿山法和冰冻法，但是以上工法机械化程度低且工程耗时长，已经不能适应当前地铁的快速发展，为了研究一种在微加固土体的情况下应用于软弱地层中的小直径区间隧道的联络通道施工工艺，由宁波市轨道交通集团有限公司、中铁上海工程局集团有限公司、中铁工程装备集团有限公司、上海市隧道工程轨道交通设计研究院和宁波大学组成的课题组从盾构法、顶管法两种机械化建造方法开展研究，通过国内外技术调研、咨询、现场试验和监控量测相结合的方法，研究出一套“机械法联络通道建造成套技术”，该项技术成果在宁波地铁 3 号线得以成功实施。该项技术具备全面推广使用条件，它的创新性如下：

创新点一：研制了世界首台综合试验平台。针对衬砌结构变形、应力应变机理不明确，研制了全环境 1:1 足尺 7 环立式试验平台，能较为真实的模拟隧道在地下的受力工况，通过试验揭示了破除洞门时结构变形和衬砌结构内力指标，为拼装式联络通道结构体系设计提供理论基础。

创新点二：发明了拼装式联络通道结构。针对钢筋混凝土切削难、切削面不规则、破洞后结构不稳定、荷载受力复杂，研创了正线隧道钢混复合可切削特殊衬砌；研创了拼装式联络通道衬砌结构，盾构采用预制管片，顶管采用预制管节；针对联络通道与正线隧道长期在荷载作用下，接口受力变形复杂，受力机理不明，研创了联络通道洞门连接 T 接部位自适应防水结构；针对联络通道衬砌间装配力小，常规防水材料止水效果不佳，研发了特制规格的遇水膨胀橡胶防水材料；解决了正线隧道破洞后稳定性、T 型接头长期荷载转换、防水等问题。

创新点三：创新研发了一整套联络通道掘进机。研制了盾构/顶管一体化设计的隧道联络通道掘进机；针对管片高强度混凝土软土刀盘切削效率低，不适应凹凸弧形管片切削，研制了双曲面辐条式锥形复合刀盘；针对始发接收期间，正线隧道管片应力重分布，变形收敛不受控，研制了移动式预应力伺服内支撑及全要素实时监测数字化管控平台，解决了掘进机反力和主隧道结构安全两大技术难题；针对联络通道机械法施工前不预先加固、不暴露掌子面，研制了始发端半钢套筒、接收端全钢套筒方案；针对联络通道空间狭小、衬砌拼装困难，运

输拼装作业条件受限，研制了半自动主梁回转式拼装机。

创新点四：首次研究创建了机械法联络通道施工方法。针对洞门密封要求高，风险大，研发了洞门高强弹性壁后交叉注浆及微加固注浆方法；针对狭小空间作业，研究出盾构法联络通道拼装式负环管片整体拆除方法，负环管片一次性拆除，工效显著；针对既要满足掘进机快速施工，又要保证初期正线隧道结构安全，研发出盾构联络通道快速破除复合管片关键技术，大幅缩短工期，经济效果显著；针对联络通道线路中心线与正线斜交，有限空间下盾构始发姿态调整困难，研发了联络通道掘进机始发姿态可调基座，始发姿态与计划线一致，精准贯通；针对机械法数据采集、分析、整理、评价机制不完善，开发了机械法联络通道数字化管控平台。

目前，该项成果已在宁波、无锡、杭州、青岛、福州、南京等多个城市各类地层广泛应用，先后有近百家新闻媒体进行了报道，多达 30 余家地铁公司前来现场观摩考察，获得高度评价。机械法联络通道建造成套技术机械化程度高、指标更高、更先进，必将是联络通道施工又一首选技术，尤其是在工效上优势明显，常规联络通道仅需 1 个月完成。

本项目获得发明专利 15 项，实用新型专利 18 项，其中获得中国专利金奖 1 项，发表论文 40 余篇，软件著作权 7 项，专著 1 项，主编宁波市地方细则 1 项。

该项技术与国内外技术指标对比，机械法联络通道建造技术采用全机械化施工，不暴露掌子面，对周边环境影响小，文明施工程度高，节能环保效果显著，实现了重大技术跨越，促进施工技术的巨大进步，在地下空间联通、市政管廊支线、深水隧道等具有很高的推广价值。

完成单位：中铁上海工程局集团有限公司、宁波市轨道交通集团有限公司、中铁高新工业股份有限公司、宁波大学、上海市隧道工程轨道交通设计研究院、中铁工程装备集团有限公司

完成人：朱瑶宏、张付林、丁修恒、黄新、何邦亮、肖广良、沈张勇、叶蕾、黄毅、夏汉庸、李为强、刘新科、程桂芝、文毅然、郎志超、朱云浩、陶路路、程永龙、陈振雷、赵旭东

远洋吹填珊瑚砂岛礁机场建造关键技术研究与应用

马尔代夫维拉纳国际机场改扩建工程，由北京城建集团有限责任公司 EPC 总承包建设，项目飞行区总面积约为 235 万 m^2 ，其中新填海面积 75 万 m^2 ，建设内容主要包括：填海护岸工程、飞行区场道工程、助航灯光及导航工程、新建货运站工程、油库及机坪加油管线工程等。作为中马两国领导人见证签约的国家“一带一路”重点项目，将使马尔代夫拥有第一条可以起降 A380-800、B747-8 等大型民航运输机的 4F 级跑道，对马尔代夫这一旅游国家的经济发展具有重大的战略意义。



图1 马尔代夫维拉纳国际机场改扩建工程效果图

世界上虽已先后建成十多个海上机场，主要是近海陆地延伸半岛型和离岸型两种，填海造陆材料多为沙石泥土类，远洋珊瑚砂填海造陆建造机场鲜有工程技术报道，我国南海也未见公开工程技术报道。因此，马尔代夫维拉纳国际机场改扩建工程在填海、护岸、地基处理及变形控制等方面缺乏可供借鉴的工程实例，给项目实施带来很大难度。

远洋吹填珊瑚砂岛礁机场建造关键技术研究与应用依托于马尔代夫维拉纳国际机场改扩建工程，通过深入研究工程建设场地及周边的水文、地质环境，形成了开敞式无围堰珊瑚砂岛礁吹填技术、远洋岛礁地貌条件下新吹填陆域护岸工程技术、机场跑道吹填珊瑚砂地基处理及变形控制技术、机场跑道水泥稳定基层珊瑚砂砾应用技术等四项关键技术。主要成果及创新点如下：

- 1.系统地研究了吹填珊瑚砂的工程物理特性：揭示了珊瑚砂填料吹填运移特性；提出了考虑颗粒破碎影响的珊瑚砂侧向土压力表达式，建立了珊瑚砂的本构模型。

- 2.基于珊瑚砂的吹填运移特性及海洋环境水动力条件，提出了开敞式无围堰珊瑚砂吹填适用条件、吹填工艺和质量控制与环境保护措施。

3.揭示了岛礁海域动力泥沙环境条件，分析了岛礁稳定性特点，确定了陡坡岛礁地形上斜坡式护岸结构稳定条件；揭示了板桩结构与珊瑚砂地基的相互作用规律及钢板桩桩身弯矩和侧向土压力分布模式。

4.根据机场跑道地基受力特性和珊瑚砂的颗粒结构特点，创新采用了机场吹填珊瑚砂振动压实地基处理方法，确定了其施工参数和检测方法；首次提出了珊瑚砂蠕变沉降计算修正方法，形成机场吹填珊瑚砂地基变形控制技术。

5.研发了水泥稳定珊瑚砂砾、水泥稳定珊瑚砂碎石相关配合比及施工工艺，并首次大面积应用于机场跑道、联络道及机坪基层。

本项目在马尔代夫维拉纳国际机场改扩建工程成功应用，实现了远洋珊瑚砂吹填岛礁机场的高效建造，经过3年的沉降观测，新填海陆域沉降处于稳定状态，工后沉降均在2mm左右。2018年9月18日，新跑道完成马尔代夫历史上首次空客A380试飞，并获得业主、监理的一致好评。



图2 扩建机场跑道完成图

通过对关键技术查新检索，在所查国内外文献范围内，未见与本项目完全相同的报道。2021年3月10日，经以我国岛礁工程专家中科院武汉岩土所汪稔研究员为组长和多名机场跑道建造权威专家组成的专家组进行成果评价，总体达到“国际领先水平”。

本项目共申请专利31项，其中已授权发明专利3项、已授权实用新型专利20项，待授权发明专利8项。同时，形成了吹填、护岸、地基处理等3项北京市工法，于2019年4月3日通过专家评审，并获颁审定证书。在《岩土工程学报》、《水利水运工程学报》、《工程勘察》、《施工技术》、《水运工程》等核心期刊上发表高水平论文共计26篇。

本项目成功解决了远洋珊瑚岛礁机场建造关键技术难题，为马尔代夫维拉纳国际机场改

扩建工程建设提供技术支撑,取得了良好的社会效益。在经济效益方面,节约成本 1.83 亿元,节省工期 262 天。该成果已在马尔代夫玛地洼鲁机场建设中推广应用,在海上丝绸之路沿线类似地质条件下的机场工程建设具有广泛的应用前景。该成果的应用和推广为我公司中标香港机场、巴基斯坦瓜达尔机场、孟加拉国西莱特机场等机场项目奠定了坚实的基础。

完成单位:北京城建集团有限责任公司、水利部 交通运输部 国家能源局南京水利科学研究院、中航勘察设计研究院有限公司、中国航空规划设计研究总院有限公司

完成人:张晋勋、李道松、杜 峰、张 雷、王笃礼、徐 华、张凤林、李 兴、李建光、王程亮、关云飞、杨庆德、张绍栋、窦 硕、王广兴、杨 旭、曾成杰、陈文博、王五州、吴安黎

隧道掘进机高效破岩实验系统研制及应用

隧道掘进机法具有安全高效、机械化程度高等优点，是隧道（洞）修建的发展方向，但隧道掘进机装备及工法在极硬岩、软硬不均等地层条件下受到严重制约，直接影响工程进度及成本，高效破岩已成为掘进机施工亟待解决的难题。目前虽隧道掘进机制造已国产化，但对于刀盘刀具设计及施工参数控制多靠经验。究其原因是缺乏能够物理模拟真实破岩工况的实验系统，难以揭示掘进机刀具破岩规律，不合理的刀盘刀具布置和掘进参数控制导致隧道掘进机事故频发，轻则隧道掘进机装备损坏，重则机毁人亡、工程失败。因此，研制隧道掘进机高效破岩实验系统是破解上述难题的核心突破口。

本项目紧密围绕我国西部大开发、交通强国、水资源高效利用等战略需求，历经近十年联合攻关，针对隧道掘进机领域“基础实验平台缺失、破岩信息感知困难、高效破岩技术薄弱”等公认的行业难题，发明了刀具载荷直接监测与刀盘掘进精准控制方法，研制了掘进机高效破岩实验平台，开发了隧道掘进机高效掘进技术。主要创新成果如下：

1.发明了刀具破岩三向载荷直接监测与刀盘螺旋掘进精准控制技术，实现了掘进机刀盘驱动力的精准调控。

2.研制了回转式、足尺刀具、多刀协同的隧道掘进机破岩实验平台，突破了掘进机真实破岩工况难以物理模拟的技术瓶颈。

3.开发了基于多工况、多方式、多参数破岩实验的高效掘进技术，大幅度提升了掘进机破岩效率，攻克了掘进机在极硬岩地层“啃不动”的难题。

2020年11月5日，中国中铁股份有限公司组织对盾构及掘进技术国家重点实验室等单位共同完成的“隧道掘进机高效破岩实验系统研制及应用”成果进行了成果鉴定，鉴定委员会认为，该项目技术难度大，创新性强，具有自主知识产权，总体技术达到国际先进水平，在多刀协同工作情况下，刀具三向受力采集方面达到国际领先水平。

经中国矿业大学教育部科技查新工作站（GO4）对该项目进行国内外查新，认为在所查范围内检索到的国内外公开发表的文献中，除该委托查新课题组成员公开发表的文献以外，未见有与该项目研究内容相同的文献报道。

本项目获国家发明专利10项、实用新型专利1项，授权软件著作权5项，发表论文8篇。成果应用于汕头苏埃通道、深圳春风隧道、大瑞铁路高黎贡山隧道等多个重大工程建设，攻克了掘进机在极硬岩、软硬不均等复杂地层条件下“啃不动”的难题。

通过本项目的研究，开发的盾构刀具破岩试验机及实验方法，为行业内开展盾构刀具破岩研究提供了高效科研工具，重点解决了盾构刀盘刀具选型（刀盘类型、刀具种类、刀间距、刀高差等）设计和现场掘进参数（盾构推力、扭矩、推进速度、刀盘转速、刀具更换维护位置、成本、工期预测等）精准选择困难的问题，提升了我国盾构装备制造业综合实力及其在国际市场竞争力。

完成单位：中铁隧道局集团有限公司、盾构及掘进技术国家重点实验室、中南大学、中铁隧道股份有限公司、洛阳九久科技股份有限公司

完成人：韩伟锋、曾垂刚、周建军、杨君华、秦银平、王雅文、杨 妹、郭 璐、许华国、母清中、何蒙蒙、周振建、赵 旭、常李伟、李 伟

建筑固废资源化利用成套技术研究

一、立项背景

我国城市建设中产生的建筑固废约占城市垃圾总量的 30%~40%。2018 年城市建筑固废达 17.04 亿吨，且逐年增加。开展建筑固废资源化利用，是贯彻落实习近平总书记“绿水青山就是金山银山”生态文明理念的重要内容，是响应党中央“2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”战略决策的重要举措。但目前我国固废资源化利用率不足 10%，远低于发达国家 90%的水平。

本项目着眼于解决建筑固废资源化利用中的产业化难题，包括再生骨料高效生产及强化技术、再生骨料砂浆和混凝土应用技术、再生骨料路面基层应用技术、废旧沥青混合料冷(热)再生技术研究，并成功进行工程实践。

二、创新成果

1.研发了一种采用风、水、气、光电和图像等技术的固废综合分选技术和再生骨料物-化联合强化与活性改良方法。

开发的影像识别和气动分选装置，可在固废破碎过程中将杂质、砖与旧混凝土高效分离；采用双轴叶片洗石机、双层滚筒套筛和水洗循环净化装置对再生骨料进行高质清洁，有效降低了再生骨料表面的附着砂浆；通过化学强化试剂处理，降低了再生骨料吸水率和压碎指标。

2.揭示了砖混再生骨料对混凝土和砂浆性能的影响规律，拓展了砖混再生粗细骨料在混凝土和砂浆中的应用范围。

研究了砖混再生骨料对混凝土和砂浆性能的影响，建立了砖混再生粗骨料混凝土损伤本构关系。研究表明砖混再生细骨料可适用于设计强度等级为 M5 及以下的抹灰砂浆、砖混再生粗骨料可适用于设计强度等级为 C25 及以下普通混凝土和 C20 及以下的透水混凝土。

3.发明了乳化沥青厂拌冷再生混合料双级配控制方法，开发了再生水稳双层多步振动拌和设备及生产工艺；

基于黑石头假设和骨架嵌挤理论，提出了冷再生混合料和矿料的双级配设计方法，满足相关规范要求。开发了基于预拌理论与振动理论的双层多步振动拌和设备，有效解决了新、旧集料拌和均匀性差、混合料性能低的难题，提出了再生水稳混合料的生产工艺与参数。

4.开发了再生水稳胶凝材料和系列再生剂，突破了废旧沥青混合料厂拌热再生高掺量技术瓶颈。

利用建筑固废的潜在活性，辅以碱激发胶凝材料，研发了再生水稳胶凝材料。基于相容性和组分调节理论，开发了适用于不同石油沥青的系列再生剂；研发了高掺量厂拌热再生加热滚筒，解决了 RAP 加热二次老化与黏结的技术难题。

三、指标先进性和实施效果

1.碎砖和旧混凝土分离率大于 85%；再生骨料杂质含量低于 0.25%，远低于行业标准 1% 的要求。

2.冷再生沥青混合料劈裂强度最高达 1.2MPa，远高于规范劈裂强度 0.5MPa 要求。

3.冷再生沥青路面 2 天取出完整芯样后开放交通，优于规范 7 天取出完整芯样要求。

4.厂拌热再生 RAP 掺量 \geq 40%稳定量产，高于常规 30%掺量。

5.开发的再生水稳胶凝材料和增强剂，相同水泥掺量条件下，水稳强度提高 0.5-1.0MPa。

6.多个项目成功应用，经后评估检测，示范项目路面使用性能指标均评定为优。

四、知识产权和第三方评价

授权发明专利 5 项，实用新型专利 2 项，软件著作权 2 项，发表论文 6 篇，编制地方标准 5 项。

经湖南省建筑业协会组织的专家鉴定，成果达到国际先进水平。

五、产生效益和对行业进步的影响

研究成果在湖南潭邵高速、长益高速扩容工程、长沙市玉赤大道、中国铁建洋湖苑二期等十余个项目获得成功应用，其中玉赤大道获得湖南省建设工程芙蓉奖。

研究成果累计实现经济效益 15926 万元，节省造价 3357 万元，资源化利用建筑垃圾超过 50 万吨，节省填埋土地 90 余亩，减少有害气体排放约 5600 吨。

依托本研究成果，建成湖南省建筑固废资源化利用工程技术研究中心和建筑固废资源化利用湖南省工程研究中心两个省级科研平台，建设了四类建筑垃圾（拆除垃圾、工程垃圾、装修垃圾、道路沥青垃圾）协同处置综合示范基地，多次迎接各层级调研。

对建筑固废资源化利用产业发展具有重大推动作用。

完成单位：中铁城建集团有限公司、湖南云中再生科技股份有限公司、中南大学

完成人：张鑫全、申景涛、张晓峰、尹玉平、马昆林、夏青、胡明文、李进荣、吴超凡、沈科元、张继森、曾乐、阳魁、刘婉婉、邱远光

富水复杂地层盾构渣土改良及安全保障关键技术

盾构法是目前我国城市地铁建设的主流工法，施工过程面临复杂多变的地质条件，其中高黏性土和富水砂卵石等地层约占 80%以上，极易诱发结泥饼、喷涌和地表塌陷等工程事故。如华南某地铁盾构因刀盘结泥饼导致 6 栋楼房倒塌或损毁；佛山某地铁盾构因盾尾密封失效导致透水坍塌，11 人死亡。为此，迫切需要解决渣土改良差、密封控制难和渗漏影响大的三大业界公认技术难题。

本项目以国家自然科学基金、铁道部科技研发计划和山东省技术创新项目计划为牵引，依托济南、长春和南京等轨道交通建设，历经十余年隧道工程实践和技术探索，解决了盾构渣土适配性改良差、盾尾密封安全保障难和渗漏治理反复治反复漏的技术难题，打破了国际企业的技术与产品垄断。主要创新点如下：

1.攻克了盾构穿越高黏地层“去泥饼”和富水砂层“防喷涌”难题。发明了非离子聚合型泡沫剂和高分子抗黏剂及其合成工艺，建立了泡沫改良土多相结构细观分析方法，研发了渣土改良效果评价系统，提出了高黏地层刀盘泥饼防治技术；研发了液态高分子喷涌防止剂，提出了富水砂卵地层盾构喷涌防止技术和多管路协同定量化改良工艺；研发了延长盾构刀具寿命的耐磨抑尘剂，建立了富水复杂地层渣土适配性动态改良技术体系，确保了盾构在富水复杂地层的快速掘进。

2.突破了同步注浆“不同步”和盾尾密封“封不住”的技术壁垒。研发了同步注浆充填剂，优化了惰性充填浆液配比，实现了管片壁后低泌水惰性充填；研发了抗水压、温度适应性强的盾尾密封油脂，研制了盾尾密封油脂高速分散合成工艺及装备，克服了传统捏合技术的不足，实现了国产替代；研发了盾尾密封油脂参数实时监测系统，提出了富水复杂环境盾尾密封安全保障技术，建立了同步注浆流变模型，揭示了浆液特性对地表沉降影响规律。

3.解决了盾构管片“易上浮”和接缝“常渗漏”的传统难题。研发了混凝土裂缝丙烯酸修复材料及合成工艺，提出了管片壁后防水层再造技术；发展了有机高分子树脂与无机硅酸盐杂化融合技术，研发了阻燃低热硅酸钠堵水和加固系列材料及合成方法；研制了以气动双液注浆装置为核心的轻量化施工装备，形成了管片上浮和接缝渗漏治理的成套施工工艺，保障了盾构施工与运维安全。

项目成果在我国城市轨道交通建设领域成功应用，保障了济南、长春和南京地铁等工程的盾构安全快速掘进。由国家最高科技奖获得者钱七虎院士领衔的成果评价委员会认为：该

项目研究成果总体达到国际先进水平，渣土改良和渗漏治理技术达到国际领先水平。

本项目形成团体标准 2 项(征求意见稿),授权中国发明专利 26 项、实用新型和软著 10 项,出版专著 2 部、发表高水平文章 82 篇。项目成果打破了盾构渣土改良、盾尾密封和结构渗漏治理等系列功能材料的国际垄断,形成了富水复杂地层渣土改良及安全保障关键技术,为“一带一路”战略的实施提供了技术支撑和材料保障。

完成单位: 中铁十四局集团隧道工程有限公司、山东大学、济南大学、山东宏禹工程科技有限公司

完成人: 王春国、冯现大、周松、李树忱、迟胜超、王晋鲁、庄云霞、袁超、王旌、万泽恩、马传程、熊斌、王力辉、刘汉洲、赵世森

高海拔复杂地质特长公路隧道关键施工技术

随着我国西部大开发战略的持续推进，特别是“一带一路”“城镇化”等一系列国策的实施，基础设施建设迎来了纵深发展时代，高海拔隧道工程建设是不可回避，尤其是在西部地区。高海拔地区隧道施工存在低含氧量、低气压、低气温的环境风险，严重威胁人员生命健康安全、降低施工机械效率、增加 CO 等有害气体排放、影响隧道结构混凝土施工质量。通过对国内外高海拔、高寒地区隧道建设调研，高海拔隧道高寒、缺氧、机械及人工工作效率低等施工现象都没有很好的解决办法和一套适用高海拔、高寒隧道施工的成熟施工技术及管理经验。

高海拔复杂地质特长公路隧道关键施工技术依托世界第一高海拔特长公路隧道——雀儿山隧道（隧道全长 7083m，施工海拔 4300m）施工面临的世界性技术难题，中铁一局联合科研、设计、施工等单位开展科研攻关，为建设安全、节能、环保的雀儿山隧道提供技术支持，同时为高海拔地区高速公路建设与运营提供借鉴和参考。

主要技术要点如下：

1.通过对隧道施工通风设备配套选型及关键参数确定研究及对隧道施工通风方式及其有效性研究，形成高海拔特长公路隧道综合施工通风体系，完善了高原隧道海拔高度修正系数，将现有计算标准仅满足 2400m 以下提高到 5000m，填补了相关技术空白。

2.通过对隧道施工制氧设备配套选型及供氧关键参数确定研究及对隧道施工制氧供氧方式及其有效性研究，形成雀儿山隧道施工综合制氧供氧体系，保证施工人员人身安全性，提高施工效率；建立了基于肺泡氧分压理论和劳动强度分级的高海拔隧道施工供氧标准。

3.结合高海拔低氧低压条件下隧道施工设备效率会降低的情况，通过合理选型配置成套施工设备。创新性应用了一种高海拔隧道施工内燃机尾气净化方法，降低了 30%的 CO 排放量，提高设备施工工效。

4.通过防冻研究，提高施工期间的保温防冻和结构物抗冻性能，施工中结合工程所处环境特点，从施工防冻和实体抗冻方面采取措施，提出了高海拔隧道施工保温防冻技术体系；基于温度变化的海拔高度，总结建立川西高原公路隧道海拔高度分级标准和分级处治措施，提高工程抗冻能力。

5.对小断面隧道施工通风、供氧方式的研究、运输方式的选择论证及人员、机械配置的研究，着重提高小断面隧道施工效率，加快隧道施工进度。

6.隧道洞口附近地热温泉，出水温度在 63℃~72℃，有较大热能可以利用。通过对水质资源进行调查研究，用于隧道施工用水，生产人员生活采暖，路面防冻等。

7.针对隧道特殊施工环境及施工重难点，开展项目管理研究，包含人员配置与职责分工，施工材料的购置与检验管理，机械设备配置与合理化工序安排，脆弱生态保护与施工后恢复等。

该关键施工技术获得国家发明专利 7 项、实用新型专利 22 项、省部级工法 4 项。形成高海拔特长公路隧道施工通风、制氧供氧、机械设备改良和保温防冻等 4 项关键技术的 6 个创新成果，具有较高的推广价值。2017 年 10 月 16 日通过中国中铁股份公司科技成果鉴定，鉴定认为成果具有创新性，经济、社会和环境效益显著，总体达到国际领先水平。

高海拔复杂地质特长公路隧道关键施工技术确保了雀儿山隧道的顺利施工，隧道建成后使得“冬过雀儿山，如过鬼门关”成为历史，为藏区打开了一道希望门，建成了一条致富路、幸福路。工程建设受到社会各界的广泛关注和持续报道，经济社会效益和节能减排效果显著。创新成果汇编《高海拔公路隧道建设关键技术与创新—雀儿山隧道》出版发行，加速了科研成果的推广应用，主要创新成果被纳入《川西高原公路隧道设计与施工技术指南》，填补了相关技术空白。已广泛应用于川西高原隧道的设计和施工，效果显著，对川藏铁路建设具有重要的参考价值。

完成单位：中铁一局集团有限公司、四川省公路规划勘察设计研究院有限公司、中铁西南科学研究院有限公司、四川高速公路建设开发集团有限公司、中铁一局集团第四工程有限公司、中国建筑第五工程局有限公司

完成人：姚志军、王刘勋、李文纲、郑金龙、吴 剑、许金华、谭芝文、张亚鹏、裴伟伟、苟 涛、孙鑫涛、章志高、蔚艳庆、张 博、江章保

复杂山区铁路隧道高位穿越巨型溶洞综合处置与安全控制关键技术

中国 1/3 国土面积受岩溶影响，西南地区石灰岩分布最广，厚度最大，近年来仅西南地区就揭露大（巨）型溶洞数十个，极大困扰工程建设。黔张常铁路穿越西南广袤岩溶区，岩溶强烈发育，溶洞广泛分布。

黔张常铁路高山隧道为 I 级风险隧道，先后揭露 38 个溶洞。2016 年 8 月揭露 DIK53+678 巨型溶洞，溶洞体量超过 200 万 m^3 ，仅厅堂状廊道约 60 万 m^3 ，处置工程量巨大；隧道正洞跨越溶洞直线长 71m，影响长 145m，隧道轨面以下溶洞深 36~57m，底部塌落体厚度 50~65m，拱顶净空最大约 2m，局部侵限；溶洞侧壁及顶板危石遍布，溶洞先后发生落石近 200 次，施工安全风险极高。针对以上工程难点，开展了综合处置与安全控制研究，取得以下成果：

1. 提出了巨型溶洞稳定性分级评价标准与多种安全防护技术

溶洞揭露后，通过无人机探测、三维激光扫描、色谱分析、爆破振动测试等溶洞勘查与稳定性监控，基于危岩体分布、围岩移动速率、围岩振动波速和裂缝发展速率，建立了围岩稳定性分级评价标准，评价表明溶洞稳定性极差，落石随时发生。提出了 4 种安全防护技术，在模拟大块落石风险后，优选锚网索喷全面防护技术，借助回填施工平台分阶完成防护，早期施工采用移动式防护棚架点对点防护。

2. 优选了巨型溶洞“洞砗回填+上部注浆”处置技术并提出多种控沉技术

根据巨型溶洞特征，制定了线路调整、回填和桥跨 3 类 12 种处置技术；线路绕避废弃工程量大且不能绝对避开二次岩溶，桥跨方案桩基处理难度大、桥梁和桩基抗落石性能差、处置成本高且工期长。回填方案较为合理，工艺简单，填料反压溶洞，利用回填平台可对溶洞进行安全防护。通过理论分析、数值模拟和经济技术对比，最终优选“洞砗回填+上部注浆”处置技术。为降低工后沉降，提出了上部注浆减沉、碾压回填、结构减隔震、堆载预压、明洞预留净空等 8 种沉降控制技术，取得了良好控沉效果。

3. 基于多维沉降监控与模拟试验揭示了超厚回填体静动载下沉降机理并提出双指数沉降预测模型

针对超厚回填体，建立了表层沉降、回填体和底部堆积体分层沉降等多维综合沉降监控系统，揭示了底部堆积体和超厚回填体在结构自重下的沉降发展规律。开展了超厚回填体 1:5

缩尺模型试验，揭示了高速列车长期动载条件下超厚回填体沉降规律，验证了路基板 and 注浆层隔减震作用。针对超厚回填体沉降，在比较多种沉降模型并考虑注浆加固作用的基础上，提出了巨型溶洞超厚回填体双指数沉降预测模型。

通过研究，巨型溶洞处置成本节约 9600 余万元，实现洞砟废料利用和环保，作为国内外首个穿越百米溶洞隧道工程，被中央电视台等数十家媒体争相报道，通车后重庆至长沙从 10 小时行程缩短至 3 小时。项目授权发明专利 8 项，授权软件著作权 2 项，省级工法 1 项。高山隧道巨型溶洞顺利处置，为解决西南山区复杂巨型岩溶指明了方向，提高了我国山区铁路建设水平。

完成单位：中铁十四局集团有限公司、中铁十四局集团建筑工程有限公司、山东建筑大学、山东建大工程鉴定加固研究院

完成人：冯国森、王 军、李占先、代显奇、刘同江、孙亚飞、袁培国、李 明、孙哲、于明洋、王孝波、王伟伟、王献伟、朱桂利、孙伟亮

明挖综合管廊快速施工关键技术及其装备

随着我国城镇化快速发展，城市规模不断扩大，地下管网破坏经常发生，中铁四局集中内部创新团队联合同济大学、上海市政工程设计研究总院、安徽建筑大学等高校院所，开展明挖综合管廊快速施工关键技术及其装备研究，研制新型施工装备，提出施工关键技术，实现快速安全施工，推动行业技术水平不断发展。

课题组依托多项综合管廊工程开展 U 型盾构装备及设计施工关键技术、叠合装配式综合管廊设计施工关键技术及其装备、现浇综合管廊装备及施工关键技术研发，创新性和先进性如下：

1.研发了一种应用于明挖浅埋预制装配综合管廊施工的 U 型敞口盾构机，实现了基坑开挖、结构拼装、回填一体化高效作业；形成了 U 型盾构始发、推进、垫层、拼装、张拉、回填、空推等成套施工关键技术。

2.创新了一种将管廊结构拆分成多个叠合板构件的装配式管廊结构形式，发明了该新型管廊构件节点纵、横、竖向钢筋连接方式，揭示了其节点抗震受力特性，提出了相应的设计方法，形成了《预制拼装综合管廊结构设计规程》。

3.研发了叠合板环形生产线、智能生产管理系统（iPCMES），实现了预制构件高效工厂化生产及其全过程精细控制；研制了叠合板管廊安装支撑体系和倒角铝模工装；创新了叠合板吊装、安装、混凝土浇筑、防水等施工关键技术，并形成了《城市综合管廊施工技术标准》（行业标准），以及《海口市叠合板预制拼装综合管廊施工技术导则（试行）》。

4.研制了蜂巢钢整体移动式支架模板、滑移式模板台车、链式组合台车等工装设备；研发了与上述工装设备对应的施工工艺及关键技术，创造了单舱大断面 21 米长度的大节段现浇施工周期仅为 5 天的新记录。

本项成果获得专利 36 件，其中发明 4 件，实用新型 32 件，申请 13 项发明专利（其中 10 项进入实审）；省部级工法 9 项，科技论文 13 篇，参编发布标准 2 项。

2021 年 5 月 8 日，由湖北省科技信息研究院查新检索中心组织对“明挖综合管廊快速施工关键技术及其装备”进行了查新，查新结论：综合分析表明，所检国内外文献中，未见与委托课题的查新要点相同的文献报道。

2020 年 11 月 6 日中国中铁股份有限公司组织专家对该成果进行了评审，专家组同意通过评审，并认为其技术成果达到国际领先水平。

该成果在海口、南宁、南京、福州、公主岭等综合管廊工程成功应用，实现经济效益约1.27亿元。采用明挖综合管廊快速施工关键技术及其装备，不仅提高机械化、工业化施工水平；提升施工安全和工作效率；节约施工成本，还提高了综合管廊设计理念，加快企业科技进步。该技术经济、社会、环境效益显著，应用前景广阔。

完成单位：中铁四局集团有限公司、中铁四局集团建筑工程有限公司、中铁四局集团第四工程有限公司、中铁四局集团第一工程有限公司、中铁四局集团路桥工程有限公司、安徽省数智建造研究院有限公司

完成人：伍 军、陈 平、安刚建、邓稀肥、周玉生、杨玉龙、胡柱奎、于 健、陈小文、董燕囡、姚东方、潘 飞、徐 锋、许 堃、何志祥

复杂地层双护盾 TBM 设计、研制与施工 成套技术研究

地铁隧道建造已成为缓解城市交通压力，破解市域土地资源紧张，激发城市发展活力的重要举措，探索和发展合适的隧道机械化施工装备、工艺和工法是我国城市地下工程拓展发展的重要方向。项目以我国华南地区首次双护盾 TBM 的设计及应用为背景开展研究。通过装备自主研发设计、针对性解决典型工程问题，攻克了双护盾 TBM 在城市地铁施工面临的长距离、深竖井、极硬岩、断层破碎带及高效施工等技术难题，研究成果为双护盾 TBM 在深圳地区的成功应用起到保驾护航作用，提升了我国城市地铁隧道的建设水平，助力了粤港澳大湾区的建设。主要技术创新如下：

1.通过硬岩高强刀盘设计、刀间距优化破岩实验、滚刀结构优化解决了极硬岩地层中 TBM 掘不动难题；提出了一种双护盾 TBM 闭环反馈控制防不同步卡缸新方法，解决了管片因受力不均造成的局部损坏和错台问题。

2.建立了双护盾 TBM 穿越断层破碎带纵径向影响范围及加固处理模型；研发了双护盾刀盘增压脱困液压控制系统；解决了双护盾 TBM 穿越断层破碎带卡机和被卡脱困问题，保证了双护盾 TBM 顺利通过断层破碎带。

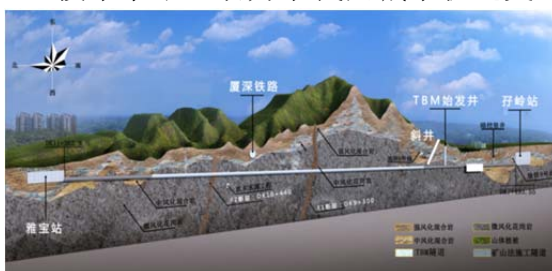
3.分析了硬岩地层中滚刀磨损规律、建立了滚刀磨损更换新标准；提出了管片拼装成型质量控制准则，创新了一种适用于城市地铁双护盾 TBM 双线小间距隧道斜井出渣施工技术；发明了一种双护盾 TBM 连接桥多功能行走装置，保障了 TBM 在长距离、大埋深、深竖井条件下的高效施工。

2019 年 2 月 22 日，教育部科技查新工作站（G04）对本项目进行了查新，在所查范围内检索到的国内外公开发表的中外文文献中，未见有与该委托查新课题“复杂地层双护盾 TBM 设计、研制与施工成套技术研究”查新点综合研究内容完全相同的文献报道。

2019 年 10 月 24 日，中国中铁股份有限公司组织专家对中铁南方投资集团有限公司、中铁隧道局集团有限公司等单位完成的“复杂地层双护盾 TBM 设计、研制与施工成套技术研究”成果签定，鉴定委员会听取了完成单位的汇报，审阅了相关资料，经质询和讨论，认为项目提出了系统的适应于城市地铁的双护盾 TBM 解决方案，成功解决了双护盾 TBM 在极硬岩、断层破碎带、小转弯半径、狭小空间物料高效运输等难题，保障了隧道施工的质量和施

工效率，经济和社会效益显著。鉴定委员会认为，该项目技术难度大，创新性强，具有自主知识产权，总体技术达到国际领先水平。

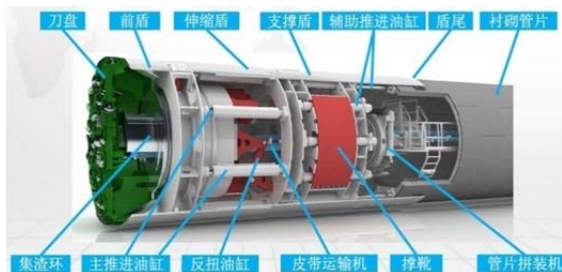
本项目获发明专利 5 项、实用新型专利 2 项、省级工法 3 项，发表论文 9 篇。项目成果已在深圳地铁 6 号线、10 号线等多个双护盾 TBM 区间得到应用，解决了双护盾 TBM 在城市地铁施工面临的长距离、深竖井、极硬岩、断层破碎带及高效施工等技术难题，保障了施工效率，项目成果得到了中铁五局、中铁隧道局等应用单位的一致好评。中铁南方投资集团有限公司依托项目研究成果积极推广，以技术交流的形式参加了深圳地铁项目技术交流会，西安、杭州等隧道及地下工程学会组织的学术交流会，分享了技术经验，随着项目成果的不断推广应用，提升了国产双护盾 TBM 装备的性能和市场竞争能力，推动了城市地铁隧道建造的新技术，提升了我国隧道施工技术水平，助力了我国城市轨道交通发展。



深圳地铁 10 号线孖岭站—雅宝区间地质剖面



双护盾 TBM



完成单位：中铁南方投资集团有限公司、盾构及掘进技术国家重点实验室、中铁隧道局集团有限公司

完成人：刘继强、李宏波、刘恒、陈登伟、汲广坤、郭双喜、翟乾智、周学彬、高星、肖友银、卢高明、杨剑、刘利锋、杨志刚、廖杰

全断面掘进机刀具智能诊断系统

全断面掘进机施工具有安全、高效等诸多优点，是未来交通、水利、矿山等基础建设领域施工的首选工法，刀具作为全断面掘进机的钢牙利齿，掘进中磨损状态多样且消耗严重，刀具更换不及时会导致刀盘被困，刀盘刀具磨损严重等工程事故，故刀具需定期进行检修工作，传统人工刀具检测因开挖仓易坍塌，检修过程存在极大的安全隐患。目前无人化刀具智能诊断系统已逐渐成为工程单位的巨大需求，因此，亟需在刀具智能检测工序进行攻关突破。

受切削条件多样性和切削过程环境复杂性的影响，多种刀具检测方法很难应用于实际生产，刀具智能诊断系统研制过程中存在“检测难、传输难、诊断难”三大行业难题。因此，亟需自主创新研制稳定、可靠、准确的刀具智能诊断系统。

本项目历经六余年产学研用联合攻关，在复杂工况下“刀具工作状态参数的检测”“开挖仓内数据无线通讯”“多参数融合刀具状态智能诊断”等关键技术领域取得了重大突破，解决了三大行业难题，实现了刀具智能诊断系统的产业化生产应用。主要创新成果如下：

1.攻克了狭小空间强冲击、高水压、大磨损环境下多参数精准检测技术难题。在高压、富水、碴石、泥浆环境下，刀具多参量检测存在空间受限、多参量协同等难题，同时需满足大量程、高可靠、抗冲击、耐磨损的技术要求。通过传感器结构防护与密封材料的研究，以及电涡流效应、磁场敏感元件、可变电阻等多传感器的技术创新，开发了嵌入式及非接触式的刀具磨损、温度、转速、载荷等参数检测装置，实现了强冲击、高水压、大磨损环境下的刀具关键参数的在线精准检测，攻克了刀具状态参数在线“检测难”的问题。

2.实现了开挖仓内强衰减环境下检测数据的稳定传输。针对无线传输信号在钢结构封闭复杂空间内易屏蔽、在碴石及泥浆介质下衰减快、在大功率多源电磁环境下强干扰等难题，通过对刀具检测狭小空间内自适应跳频通讯技术的研究，开发适应不同介质和复杂工况条件下的无线通讯系统。突破复杂介质信号穿透难、传输策略选择难、干扰噪声处理难等难题，实现了各类刀盘环境下检测数据的稳定传输，解决了检测数据“传输难”的问题。

3.开发了刀具状态多参数融合智能诊断及掌子面地质感知技术。针对刀具状态呈现多维度、大数据量的特点，建立了刀具状态综合分析诊断模型，开发了基于多特征参量融合技术的刀具在线监测及故障诊断系统，刀具状态平均识别率达 92.72%；采用刀具状态空间耦合分析方法，开发了掌子面地质的实时感知系统，实现对掌子面地质状态的反演推断，为优化掘进参数提供辅助决策依据，解决了刀具状态和掌子面地质“诊断难”的问题。

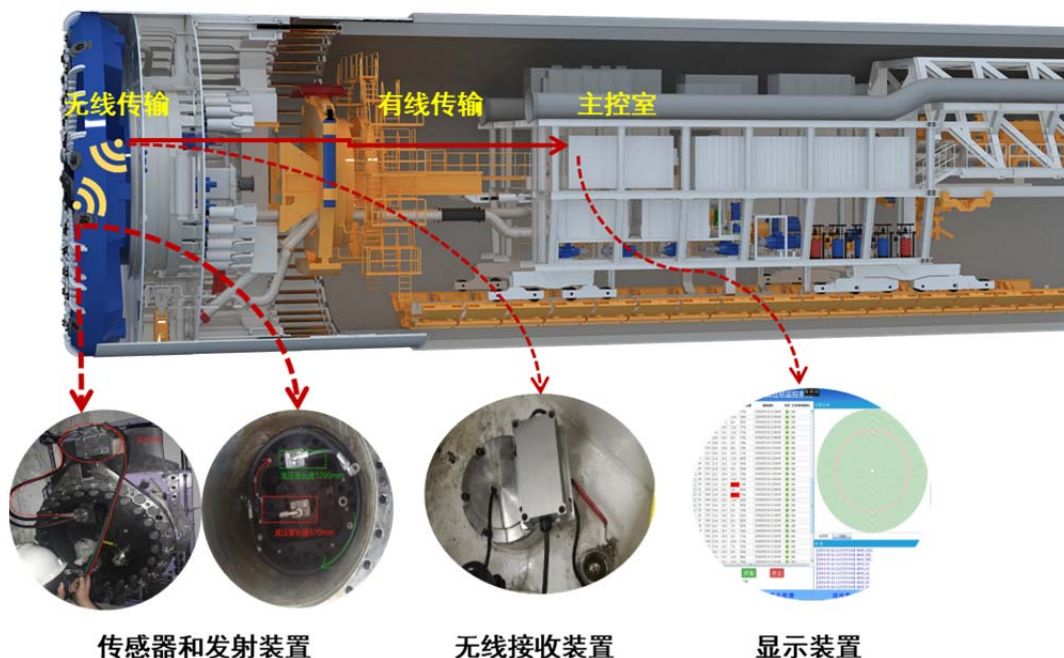
2021年3月19日，由郑州大学科技情报处组织对“全断面掘进机刀具智能诊断系统”进行查新，查新结论：在所列检索范围内检索到国内外公开发表的中外文文献中，未见其他与该查新项目以上技术特点相符的文献报道。

该关键技术成果于2019年10月通过了中国中铁股份有限公司对“全断面掘进机刀具智能诊断系统”的成果评审，鉴定为：“产品集成技术达到国际领先水平”。

该项目获得授权发明专利7项，实用新型专利15项，软件著作权4项，发表学术论文6篇。获得中国铁路工程集团有限公司科学技术一等奖。

项目技术成果成功应用于汕头跨海隧道、深圳春风隧道、海外波兰隧道等国内外重大工程，实现实时监测刀具磨损量、转速、温度，和智能诊断刀具状态及掌子面地质感知的功能。项目实施后，多次准确判断了刀具磨损状态，已成为施工人员换刀的直接依据，提高了施工效率，节省了施工成本，经济效益显著。

项目成果科技创新突出，解决了全断面掘进机施工最易发生重大安全事故的人工带压检修刀具难题，提升了全断面掘进机施工的整体智能化水平，为全断面掘进机更好、更快施工提供了安全保障，实现了全断面掘进机刀具智能诊断系统从“跟随”到“引领”的跃变。



完成单位：中铁工程装备集团有限公司

完成人：孙志洪、魏晓龙、孙伟、林福龙、孟祥波、周树亮、路亚斌、黄震、郭俊可、王宁、张鹏、李莉、胡鹏、姜宗恒、张发亮

斯里兰卡汉班托塔海港发展项目二期工程

设计与施工关键技术研究

一、研究背景

斯里兰卡汉班托塔海港发展项目二期工程位于斯里兰卡最南端的汉班托塔港，建设内容包括 2 个 10 万吨级集装箱干线泊位、2 个 10 万吨级多用途泊位、2 个 1 万吨级集装箱支线泊位、1 个 10 万吨级油泊位、1 个公共服务码头、4.8 公里长的进港道路、1 个 42.6 公顷的人工岛及两条拦沙堤。

项目采用潟湖“干地施工建港”理念，采取理论分析、数值模拟、物理模型、现场试验等手段，对本项目的人工岛及其拦砂堤的平面布局形态、分级式宽肩台防波堤结构设计、新型重力码头结构设计、规格块石爆破开采和运输、围堰止水防护施工、斜坡堤施工和检测技术等开展研究，形成了相关的设计与施工关键技术。

二、关键技术和创新成果

1.研究出季节性显著反向强沿岸输砂环境下的人工岛及其拦沙堤布局方法。揭示了季节性东北与西北季风期显著反向强沿岸输沙岸滩演变规律，研究了人工岛岸线设计与水动力的相关性，提出了相适应的人工岛及其拦沙堤布局形态，有效降低防波堤口门区航道回淤、提高人工岛湾内水体交换能力，确保工程建成后的水动力环境和岸滩冲淤演变相适应。

2.研发了一种适应深水中长周期大波浪的新型分级式宽肩台防波堤（护岸）结构型式。在充分研究设计断面关键参数与破坏形态的相关关系后，通过物理模型试验研究了不同关键参数的影响程度，系统的提出了宽肩台防波堤结构的破坏形态、块石级配等级、肩台高程、宽度、坡度、前趾设置等断面关键参数的确定方法，形成了一整套宽肩台防波堤（护岸）结构设计方法，填补了国内类似结构设计的空白，一举走在了国际相关建设领域的前列。

3.首次研发了一种新型箱肋式重力码头结构。该新型结构由沉箱前仓格与扶壁后肋板结构组合而成，前仓格结构作为一个整体共同承担很大的水平及竖向荷载，后肋板作为前仓格与底板的连接结构，充分发挥其抗拉性能。该结构既有常规沉箱结构整体性好的特点，又充分利用了扶壁结构的受力特点，可充分发挥各构件的受力性能，大幅度的减小了码头结构工程量。该新兴码头结构型式，在国内外处于国际领先地位。

4.研发了一种优化的径向空气间隙不耦合法和轴向空气间隙不耦合法。经过现场爆破效果检验，优化后的轴向空气间隙不耦合法爆破得到的 5 吨以上大规格块石开采率最高达 18~19%。

5.研发了一种膏状灌浆止水帷幕技术方法。对于地层级配差、结构松散，架空现象严重、孔隙率超过 30%的围堰区域，采用膏状浆液可控性灌浆，可以有效的确保中间排灌浆施工达到灌浆效果，形成止水帷幕。

6.创新性地研究出南亚季风季节外海块石斜坡堤的施工关键技术。研究南亚季风季节的水文气象条件，研究出在施工过程中波浪、水流以及顶部机械设备的扰动下斜坡堤也能够保证稳定的方法。

三、指标先进性和实施效果

在斯里兰卡汉班托塔港发展项目二期工程中成功应用了本项目的设计和施工关键技术研究成果，利用已有潟湖，通过采用封闭式围堰防渗结构，形成封闭的干地施工环境，将港池内大量的水上开挖（炸礁）变为陆上实施，码头沉箱结构实现了就地浇筑，成功实现了干地施工建设深水港口项目的创新建港理念，并首次提出并成功应用一种新型箱肋式重力码头结构，以及台阶式沉箱码头结构，在外海创新性的采用了新型的宽肩台护岸结构型式，大幅度降低了总体造价。

四、知识产权和第三方评价

本研究课题获得实用新型专利 2 项，发明专利 1 项，SCI 一区 Top3 论文 1 篇，中文核心期刊论文 8 篇，研究成果在技术进步和创新方面取得的成绩，经水运建设行业协会综合评定达到国际领先水平。依托项目获得了国家优质工程奖、中国水运建设行业协会科技进步奖一等奖、广东省优秀工程勘察设计一等奖、全国建设工程优秀项目管理成果、中国交建优质工程奖和优秀设计奖。

五、效益分析和对行业进步影响

本课题研究成果创新性采用的新型（分级式）宽肩台外海人工岛护岸结构，节省工程费用高达约 2600 万美元；通过利用潟湖“干地施工建港”，创新性采用的新型箱肋式及台阶式重力码头结构，大幅减少了混凝土及钢筋用量，节省工程费用高达约 900 万美元；创新性地研究出一种优化的径向和轴向空气间隙不耦合爆破法，节省了约 1000 万美元计的误工和爆破成本。总体经济效益极为显著。

本项目研究在技术进步和技术创新方面取得的成绩，展现了具有国际领先水平的中国建

港技术，对推动及引领国际行业技术进步和发展，发挥了积极的重要作用。

完成单位：中国港湾工程有限责任公司、中交第四航务工程勘察设计院有限公司、中交第四航务工程局有限公司、中交四航局第二工程有限公司

完成人：麦宇雄、张晓强、曹剑林、王 烽、谷文强、张联玖、黄远明、赵瑞东、郑好、文 涛、刘召辉、王振红、徐 杰、徐润刚、邓 凌

中深层地热地埋管管群供热系统成套技术 研究与应用

我国地热能供热行业大力开展低环境影响、高效率开发技术攻关，以中深层地热地埋管供热技术为代表的分布式、无干扰、零排放、能效高、无衰减地热清洁供热技术得到大力发展和广泛关注，推动我国中深层地热地埋管清洁供热技术取得长足发展，并达到国际领先水平。为进一步解决中深层地热单管供热能力不足，提升中深层地热地埋管供热技术经济性，随着土地集约化利用的推进，发展中深层地热地埋管管群供热是最行之有效的途径，成为今后中深层地热地埋管供热发展的必由之路。

中深层地热地埋管管群供热系统成套技术，是采用管群方式，通过钻机向地下 2000-3000 米深处地层钻取多个换热孔，在钻孔中安装密闭金属套管换热器，不抽取地下水，通过换热器内部介质的循环流动，将地下热能导出，并通过地面热泵机组及输配系统向建筑物供热。具有取热不取水、热能储量大、可循环再生、环保零排放、系统效能高、供热持续稳定等优势。该技术依托西安交通大学科技创新港科创基地超大型群体项目，由供热建设运营单位、总承包单位、技术指导单位、安装施工单位联合研发。

西安交通大学科技创新港科创基地项目设计采用中深层地热地埋管供热技术，由于建筑群体量超大，供热面积 159.44 万平方米，受制于规划布局的限制，采用管群供热技术的管群布置等问题，国内外尚无此类项目实施经验可循，给管群供热技术的实施带来前所未有的挑战。必须从热源设计，关键技术装置及智慧管控，末端严密性方面形成中深层地热地埋管管群供热成套技术。

在中深层地热地埋管单管供热技术研究的基础上，依托西安交通大学科技创新港科创基地供热工程，开展了“中深层地热地埋管管群供热系统成套技术研究与应用项目”，取得了大量具有自主知识产权的成果并实现高效、稳定供热，并已开展大规模推广，创新关键技术及先进性如下：

1. 基于多场物理模拟软件 OpenGeoSys，首次考虑了管间水力交互特性及热交互作用，在国际上首次建立了基于双连续介质有限元方法的中深层地埋管换热器管群系统热流耦合三维换热模型，并成功通过验证。同时，对中深层地埋管管群系统管间距及管群布置方式进行了优化，首次论证了单排及多排管群 15m 间距的合理性，为管群供热系统提供了设计依据和设

计方法。

2.研发形成一种集成高效的中深层地热地埋管供热热泵机组，相较传统热泵机组每平方米每月电耗降低 $2\text{kW}\cdot\text{h}$ ，空间利用率提升 30%。研发形成一种新型地埋管内管换热结构，使套管换热器单位延米换热量从 150W 提升至 180W ，该型结构填补了行业空白。研发形成一种中深层地热地埋管井口装置，提升了循环介质回流效率，可将调试工期缩短 30%。通过研发地埋管数据分析系统、站房智能监控系统，能耗分析平台，开发出供热站房智慧管控系统。

3.发明了通风空调系统金属风管严密性关键技术及漏风检测方法。研发风管转角实弯缝工艺及薄钢板法兰“q”型补偿密封技术。首创金属风管转角实弯合缝新工艺，真正实现风管本体结构密封；首创金属矩形风管薄钢板法兰补偿密封新技术，提高薄钢板法兰连接的严密性；创新采用红外成像、风速测定和标尺定位的系统严密性测试和泄漏部位确定方法。从加工装备、产品结构、检测方法，给出了严密性解决方案，并形成了配套的施工工法，实测漏风量相比规范允许漏风量降低 30%，实测最大漏风量仅 11.9%。

该技术成果已在西安交通大学科技创新港科创基地成功应用，总供暖负荷 75.69MW ，采用 91 个地埋管，建设 6 座分布式能源站，供暖效果良好。并在西咸新区 227 平方公里建设用地陆续推广应用，还成功输出至北京市、河南省郑东新区等地，累计推广面积超过 2000 万 m^2 。该成套技术突破了管群供热系统热源设计、关键技术装置及智慧管控、末端系统严密性等技术瓶颈，解决了管群供热系统实施中的各类技术难题。

以推广的 2000 万平方米建筑为例，一个采暖季（四个月）相比燃煤锅炉供热，可代替标准煤约 32 万吨，节约供暖成本 2.6 亿元，减少 CO_2 排放量约 86 万吨，减少 SO_2 排放量约 2720 吨，减少氮氧排放物约 4990 吨，减少粉尘排放量约 3070 吨，节能减排效益显著。

该成果整套技术已获授权发明专利 4 项、实用新型专利 14 项；依托技术成果制定国标 1 部、省标 1 部、区域技术导则 1 部、协会标准 1 部；省部级工法 2 项；发表论文 5 篇。

2021 年 3 月 18 日，由陕西省科学技术情报研究院对“中深层地热地埋管管群供热系统成套技术研究与应用”进行了查新，查新结论：经检索，国内外未见与本查新项目研究内容相同的中深层地热地埋管管群供热系统成套技术研究与应用文献报道。

“中深层地热地埋管管群供热系统成套技术研究与应用”技术成果，经陕西省建筑业协会组织专家评价，一致认为，该成果整体达到国际领先水平。

该成果取得多项创新性技术并得到全面应用，极大提高了管群供热能效，为今后国内外超大型群体建筑中深层地热地埋管管群供热提供了有利借鉴，对于推动北方地区地热能清洁取暖，传统能源转型升级，节约资源、改善大气环境、治污减霾，实现碳达峰及碳中和，具

有重要的推广应用价值。

完成单位：陕西西咸新区沣西新城能源发展有限公司、陕西建工集团股份有限公司、西安交通大学、陕西建工安装集团有限公司、陕西建工第十一建设集团有限公司

完成人：刘洪涛、王泮浩、解振涛、解崇晖、胡 马、刘 腾、蔡皖龙、鲁耀基、杨涛、魏 超、胡盼盼、张超兴、冯 璐、云 鹏、解 昕

高瓦斯特长地铁山岭隧道建造关键技术

“高瓦斯特长地铁山岭隧道建造关键技术”科技项目依托成都轨道交通 18 号线龙泉山油气田高瓦斯特长地铁山岭隧道工程。

龙泉山隧道为国内最长的油气田区高瓦斯特长地铁山岭隧道工程，隧道穿越复杂地质构造，地质预报难度大，精度低；瓦斯隧道要求不间断通风，通风难度大，运行费用高；瓦斯隧道有害气体检测种类多，监测数据大；高瓦斯隧道施工作业安全风险高；高瓦斯隧道防爆设备改装、验收没有标准规范流程；针对工程难点，进行了科研攻关，主要在以下几个方面展开了研究

1. 油气田区高瓦斯特长隧道地质灾害精准预测技术

该地质灾害精准预测技术研究，主要分为三个阶段：

第一阶段对隧址区孕灾机制进行研究，通过区域地质历史、区域构造与地层演化分析和区域地质与构造大区域卫星图片解译，确立地体建造与构造模式，将隧道全线进行高、中、低瓦斯风险分区。

第二阶段对重点靶区采用无人机 Lidar 技术构建高分辨率影像构造模型，对高风险区域进行微地貌识别，对大型构造带瓦斯通道采用 EH4 进行深部构造探测，形成构造解译图，得出区域地质风险初步结论。在隧道开挖过程中，采用地震波与电磁波法探测，进而细化建造与构造模型，建构风险分级分区图，明确各分区灾害性质与探测重点，对灾害源进行米级识别与评价。

第三阶段通过钻探与洞内地质分析，在已有物探成果的基础上，精查灾害体，实现地质预报的精准预测。

2. 特长高瓦斯隧道智能通风技术

采用 FLUENT 软件对高瓦斯隧道内最小通风风量和风速进行数值模拟计算，选定匹配的轴流通风设备和通风风筒直径，以满足油气田区瓦斯隧道通风要求。

开发了一套智能通风控制系统，该系统结合瓦斯监控系统，通过采集隧道内传感器的数据，并对数据进行智能分析，将分析数值结果用于控制风机运行频率，达到智能控制的目的，降低风机能耗，从而最大限度的节省通风费用。

3. 油气田区高瓦斯隧道智慧平台应用技术

油气田区高瓦斯特长隧道施工风险点多、面广，安全管控难度大，安全风险高，制定

了一种安全分级管理模式，针对不同的瓦斯风险等级采取相应的安全管理措施，节约安全管理投入。

通过分区域设置瓦电闭锁装置，人员实时定位等系统进行实时监控，实现安全管理自动化，解决了安全管理难度大的难题。

4. 高瓦斯地铁隧道施工技术

对集中涌出点，进行瓦斯流量检测，根据瓦斯流量数值与主风机稀释瓦斯的能力的对比结果，制定了一种瓦斯分级控制措施体系，保证隧道施工安全；

研发了一种可升降式开挖台架；

研发了一种倒叉式拱脚结构形式；

研发了一种瓦斯隧道周边光面爆破装药结构；

研发了一种对夹式钢端模；

研发了一种负压注浆施工工艺。

5. 机械设备防爆改装技术

龙泉山高瓦斯隧道在施工过程中，采用了一种新型主动防爆改装系统。研究过程中，形成了一套完备的瓦斯隧道设备防爆改装及验收流程。

通过研究攻关，该课题取得了以下创新成果：

(1) 研究采用无人机 Lidar 构造微地貌影像识别和超前预报技术，揭示了龙泉山地质构造演化规律及瓦斯赋存与运移机制，提出了层次递进精准预报方法，建立了隧道瓦斯分区分级控制体系，为隧道安全施工提供了依据。

(2) 开发了高瓦斯隧道智能通风控制软件和系统，建立了风机运行分级管控体系，实现了高瓦斯隧道安全高效施工。

(3) 研究采用了高瓦斯隧道施工设备成套防爆技术，研发了爆破装药结构、衬砌端模、负压带模注浆等装置和技术，控制了瓦斯风险，提高了隧道结构封闭效果。

依托该项目获得“一种隧道用施工除尘车”发明专利 1 项，申报“一种结合无人机三维激光扫描与洞内探测的油气田区隧道施工瓦斯检测方法”发明专利 1 项，获得“一种隧道混凝土衬砌两级较翻转自锁组合钢端模”等实用新型专利授权 12 项，获得软件著作权 1 项，获得省部级工法 3 项，发表专业学术论文 30 篇，出版了《地铁高瓦斯隧道施工指南》专著一部。

推广应用情况：研究成果应用于成都轨道交通 18 号线龙泉山油气田区高瓦斯特长隧道，保证了隧道施工安全，提升了施工进度，较合同工期提前 45 天完工，节约了施工成本 1048.55

万元。工程的顺利完成为今后油气田区瓦斯隧道施工积累了宝贵的经验，施工过程中施工方案和施工方法行之有效，确保了成都轨道交通 18 号线的顺利贯通，取得了较好的经济技术效应和社会效益，具有广阔的应用前景和推广价值。

完成单位：中电建铁路建设投资集团有限公司、中国水利水电第七工程局有限公司、成都轨道交通集团有限公司、北方工业大学、中铁二院工程集团有限责任公司、中国水利水电第五工程局有限公司、中电建成都建设投资有限公司

完成人：孟庆明、沈卫平、高峰、叶至盛、张海波、张智、罗世刚、姚海波、石卓矗、杜国刚、索晓华、孙志强、陈涛、徐文平、李信

新型深层水泥搅拌船（DCM）研制

在我国深层水泥搅拌处理方法用于海洋地基基础施工还属空白，国内相关工程及技术被国外垄断，如日本和韩国，在围海造陆，海岸工程等领域已经有所应用。国外深层水泥搅拌船通常采用改造船舶的型式，将独立的深层搅拌处理机、水泥搅拌站安装在船体上，行程了一套“组装式”的海洋地基处理作业船。但是国外船舶存在如下问题：

- 1.处理机、搅拌站与船舶使用两套独立的动力和控制系统，功率消耗大，占用空间多，处理机及搅拌站操作人员工作环境差，噪音与振动大。
- 2.船舶定位依靠简单锚绞车定位，定位精度依赖人工操作，定位准确性完全依赖操作人员意识，定位精度不高、定位时间长效率低下。
- 3.成桩精度不高，没有对处理机垂直度初始状态及动态控制系统，仅依靠船舶初始浮态控制成桩垂直度。
- 4.深层搅拌处理过程未行程标准化作业，完全依靠人员操作进行打桩深度、提升喷浆搅拌、水泥掺入量、沉钻复搅、重复提升复搅等相关作业流程。

为填补国内此类工程施工船舶空缺并解决以上缺陷，中交疏浚（集团）股份有限公司组织相关技术力量，共同开发研制新型深层水泥搅拌船（DCM），采用船舶、施工设备为一体的系统设计理念，对船舶设计、施工设备性能进行综合考虑，从而达到节约能源、节省空间、改善操作环境的目的，并且实现软基处理施工的高效率、高质量、自动化环保施工。主要创新成果有：

- 1.首次开发了满足海上DCM工法高精度快速全自动施工用深层搅拌成套技术。研发了硬质黏土地层软基加固用深层水泥搅拌船用重型处理机，开发了成桩施工工艺，结束了国内没有海上DCM工法的局面，打破了国外技术垄断。
- 2.基于 DGPS 船舶精确定位系统，研发了双重型处理机深层水泥搅拌船的 6(4)锚自动定位系统，6(4)台绞车的拉力可根据有义波高、暗流、风速风向情况，进行均衡调节，保证定位点位置的精确性，通过船舶三台 GPS 与桩基的相对位置，配合绞车以精确定位桩基位置。在实船施工全过程实现了双处理机的位置精度始终控制在 $\pm 0.1\text{m}$ 以内。
- 3.首创了智能化施工管理系统，解决了对施工数据、自动调倾、水泥浆注入、锚泊定位等系统的集中管控难题，实现了全自动定位及智能化施工功能。施工管理系统是DCM船最核心的技术之一，称为整船的“心脏”，它连接着其它控制系统，为其提供集中化统一管理。智能化全自动施工管理系统总体功能主要包括施工工艺参数设置、处理机搅拌翼自动控制、

抱桩器自动控制、施工流程自动控制、平面定位与显示、施工报表预警等功能。通过采用施工数据计算机自动对比分析功能，实现全自动施工，有效避免了因人为计算施工参数有误造成的施工质量不达标的情况；同时，该系统开发了双处理机单机单动/双机联动手自一体化施工系统，在任何一个设备出现故障时可实现独立的手自一体无缝切换，而不影响其他设备运行，工况适应力强。智能化施工管理系统具有PID流量可调功能及故障热备份功能，水泥输送泵吸入口遇到水泥颗粒，流量不足时，系统会自动调节泵转速，维持设定流量，当仍然不能满足施工要求时，系统会显示数据异常，进行报警，保证设备安全并提高了施工质量和效率。在施工过程中管理系统还可根据现场实际情况，自适应调整施工参数、精准控制，满足对水泥搅拌次数、水泥注入量的要求，实现施工管理的智能化。因此，本项目针对此现象首次创新研制了重型双处理机智能化全自动施工管理系统，实现了全自动化施工、成桩质量实时控制、安全预警等。

4. 创建了重型双处理机施工过程中成桩垂直度控制技术，构建了高精度快响应调倾系统理论体系和工艺方法，针对施工过程中成桩垂直度始终要保持1/100的要求，首次开发了以抱桩器辅助的高精度、快速响应自动调倾系统，自动调倾系统涉及到船舶自身状态即横倾、纵倾调整，同时配合处理机双轴水平传感器及抱桩器精确调整处理机倾斜角度，通过两个系统的联合控制，使处理机无论处于何种状态，DCM船均能保持在施工允许的浮态内；实现双处理机实时调平，使得即使在风速16m/s，义波0.6m高，流速2kont的情况下，成桩垂直精度自动保持在0.1°以内。

5. 针对深层搅拌船的施工特点和技术标准，编制了船舶安全操作规程和施工操作手册，并完善了针对本船的深层水泥搅拌施工工艺。为同类型船舶的规范操作和科学施工提供了参考。

该项目共获得知识产权16项，其中授权发明专利4项，授权实用新型专利11项，软件著作权1项。经中国水运建设行业协会组织的专家鉴定会认定，该成果总体上达到国际先进水平。

项目成果整体应用在香港机场第三跑道海底软基加固工程建设中，自2016年12月成功应用以来，累计完成深层搅拌桩7384根，施工效率高、施工质量优，实现了国内海上DCM工法及海洋工程深层水泥搅拌船舶零的突破。

完成单位：中交疏浚（集团）股份有限公司、中交海洋建设开发有限公司、中交天和机械设备制造有限公司、中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司、中交（天津）生态环保设计研究院有限公司、中交天津航道局有限公司、中交上海航道局有限公司、中交广州航道局有限公司

完成人：周静波、康学增、霍桂勇、季雪兵、刘凤松，邢德年、蒋嘉伟、张连昊、杨广健、缪袁泉、罗刚、张晴波、成彦龙、陈伟民、刘凯锋

复杂海况长距离组合梁桥快速施工技术

中铁大桥局承建的港珠澳大桥桥梁工程 CB05 合同段包括：浅水区非通航孔桥、九洲航道桥、珠澳口岸连接桥、收费站暗桥及互通立交等。其中浅水区非通航孔桥全长 5440m，桥跨布置为 11 联双幅 85m 钢混组合连续梁结构，共计 64 孔，5 孔或 6 孔为一联。桥梁下部结构采用钢管复合桩+预制墩台，全桥 62 个墩。预制桥墩采用“小天鹅”号起重船运输和安装。上部结构为开口钢箱+混凝土桥面板的组合梁，采用“天一号”3000 吨运架一体船运输和架设，先简支后连续。九洲航道桥为双塔单索面钢混组合梁斜拉桥，全长 693m 桥跨布置为 (85+127.5+268+127.5+85) m，塔、梁、墩固结体系，主塔采用钢混结构，“风帆”造型。该桥设计使用寿命 120 年，建设标准高，桥位地处珠江口九洲列岛伶仃洋区，地质条件复杂，建设施工受海洋风、浪、涌、潮、雨等恶劣环境影响巨大，施工难度大。依托本项目，我部秉承“大型化、工厂化、标准化、装配化”+“快速化”建设理念，对复杂海况长距离组合梁桥快速施工技术进行了系统研究，其成果均用于指导实际施工生产，成效显著，该技术主要科技创新有：

1.海上复合桩基础钢管插打采用三次精确定位技术。

解决了施工海域风大浪急、暗涌不断等复杂海况条件下，常规打桩船施工无法满足复合钢管桩精确定位的难题，同时施工效率得到了保障。

2.大型承台+底节墩身整体快速预制技术。

(1) 承台+底节墩身钢筋通过先模块化绑扎，再组拼的技术，降低了大型钢筋骨架绑扎施工作业的难度，提高了施工功效；

(2) 大刚度自动开合模板系统研究和应用，确保了承台墩身整体一次性浇筑的线形质量，降低了大型模板系统的安、拆难度。

3.流塑性淤泥海床埋置式承台+底节墩身安装技术。

(1) 采用围堰结构，实现了承台预留孔与桩基湿接头的干环境施工，确保了施工质量，也减少了淤泥质基坑的开挖工程量；

(2) 双壁围堰采用分块可拆式结构，实现了结构的周转使用，降低了海上施工投入；

(3) 流塑性淤泥海床抛砂水密实硬化处理，确保了套箱围堰在软弱地基上的封底质量，使得套箱围堰的应用成为可能；

(4) 预制构件安装采用二次体系转换技术，充分利用了复合桩基础对于结构的支承作用，

实现了海上大型预制构件高精度安装。

4. 85m 组合梁整孔制造组合整联安装技术。

(1) 钢槽形梁实现整孔组拼无码自动化焊接制造和整体喷涂；

(2) 混凝土桥面板采取横向整幅预制，通过专业化配套模板系统以及水洗凿毛技术的应用，实现了快速预制施工；

(3) 钢梁、桥面板无应力组合施工，以及组合梁安装配套三向调节装置、支座安装复位技术、梁端配切与线形控制技术、梁端配切后落梁加预应力张拉简支变连续技术、长寿命混凝土及增韧混凝土技术的应用，很好的保障了组合梁制造及安装线形质量。

5. 主墩多功能大型钢吊箱围堰安装及封底施工关键技术。

通过永临结合的结构型式钢围堰，防撞围堰与模板一体化橡胶止水技术，既节省了材料，又满足了施工要求。

6. 在航空限高条件下钢主塔整体提升竖转施工关键技术。

九洲航道桥钢塔上塔柱首次采用了整体提升滑移施工，解决了航空限高条件下常规方法吊装难的问题。

7. 斜拉桥超长超宽大节段钢混组合梁安装施工关键技术。

九洲航道桥组合梁安装采用大节段支架法施工，减少了桥面吊机，缩短了工期。通过墩顶布置的三向调整系统实现梁体纵横移及精确对位。

8. 在航空限高条件下的斜拉索安装技术。

九洲航道桥采用在塔顶安装挂索吊架，在梁面安装卷扬机系统进行斜拉索安装，解决了航空限高条件下斜拉索安装问题。

该桥梁施工中采用了一系列创新技术为复杂海况长距离组合梁桥快速施工发展积累了宝贵经验，推动了海上桥梁建造技术的新发展。

该技术成果 2016 年 12 月经中国中铁股份有限公司评审认为技术成果达到国际领先水平，2019 年 7 月经湖北省技术交易所评审认为该项目科技成果总体达到国际先进水平，科技成果成熟度为 9 级。项目先后获得 21 项专利，发布 1 项标准，获得软件著作权 1 项，发表论文 70 余篇，先后获得 2019 年度中国铁路工程总公司科学技术奖一等奖，2020 年度中国公路建设行业协会科学技术奖一等奖，2020 年度全国优秀测绘工程金奖。

该项技术已成功推广应用于福平铁路平潭海峡公铁大桥、成贵铁路宜宾金沙江公铁大桥、深圳中山通道、珠海金海公铁大桥等项目，节约投资约 5000 多万元。

港珠澳大桥于 2009 年 12 月 15 日开工建设。CB05 标于 2012 年 6 月 28 日进场施工，2015

年2月首先实现了全标段贯通。港珠澳大桥于2018年2月6日完成主体工程交工验收；2018年10月23日，中国国家主席、总书记习近平出席了在广东珠海公路口岸举行的港珠澳大桥开通仪式，并宣布大桥正式开通；次日，港珠澳大桥公路及各口岸正式通车运营。

中共中央总书记、国家主席习近平在港珠澳大桥开通仪式上讲到：“港珠澳大桥是国家工程、国之重器，其建设创下多项世界之最，非常了不起，体现了一个国家逢山开路、遇水架桥的奋斗精神，体现了我国综合国力、自主创新能力，体现了勇创世界一流的民族志气。这是一座圆梦桥、同心桥、自信桥、复兴桥。大桥建成通车，进一步坚定了我们对中国特色的社会主义的道路自信、理论自信、制度自信、文化自信，充分说明社会主义是干出来的，新时代也是干出来的！”

完成单位：中铁大桥局集团有限公司

完成人：康平、幸思佳、潘军、陈山亭、谭国顺、陶建山、余巧宁、段志勇、张爱民、常世民

恶劣海况复杂地质条件桥梁施工关键技术

由于桥梁在海上施工，施工海域地质条件复杂、海况恶劣、强风等自然因素难以预见，促使施工过程中各种新型施工材料、施工设备、施工工艺不断涌现，同时提高了我国跨海桥梁的施工技术水平。由于我国大部分跨海桥梁存在的施工恶劣条件较为单一，较少项目恶劣条件集中，所以针对恶劣条件相对集中的跨海桥梁施工的相关经验较为欠缺。而且大部分跨海桥梁施工采用大型机械设备来克服恶劣的施工条件，施工成本比较高，工效较慢。

本成果依托长平高速 CPA3 项目松下跨海特大桥，该桥位于我国东南沿海平潭岛附近，该区域是与百慕大、好望角齐名的世界三大风口海域，被称为“建桥禁区”。全年大于 8 级大风 107 天，7~9 月多台风，10 月至次年元月沿海多大风。季风期波浪浪高平均 2.5m 以上，台风期间浪高达到 6-8m 高。海床起伏大、高强度孤石密集，三分之一区域海床无覆盖层，基岩直接裸露，且岩面倾角大，基岩抗压强度高达 120MPa。对此，通过研究，形成一整套恶劣海况复杂地质条件桥梁施工关键技术，有效地解决了在强风、水深、浪高、裸岩、潮大等恶劣环境下的桥梁施工难题，并大大节省了施工成本，提高施工效率，保障作业安全。本技术创新性与先进性如下：

1.首次提出采用分块企口拼装底板作为吊箱底板，可全部回收周转使用，且刚度大能抵抗波浪冲击作用，安全可靠，节约了大量施工成本。

2.创新性采用鱼腹式桁架梁+壁板上嵌入封底的双向牛腿组合承重，来承受系梁浇筑重量，可实现系梁不封底施工，也无需在系梁底补打钢护筒。通过系梁壁板增加水平外桁架梁，解决了水平钢吊箱稳定性问题。

3.提出裸岩区域钢管桩栈桥“先桥面后锚桩”施工技术，解决了恶劣海况多流向海域裸岩区钢管桩栈桥施工难题，保证了结构的稳定性和安全性。高强花岗岩裸斜岩地层 $\phi 2.2\text{—}2.5\text{m}$ 变径桩通过采用冲击钻辅助旋挖钻机成孔技术，提高了施工工效。

4.创新设置抗风平衡梁，提高强风条件下移动模架整体抗倾覆能力，保证强风条件下施工安全。

该成果在中国公路学会专家评审后，认为总体上达到国际先进水平，并已获授权5项实用新型专利，受理2项发明专利，形成了4项部级工法，国家核心期刊发表学术论文3篇。

该项目成果已在福州长平高速 CPA3项目、海南铺前大桥、广连 A5标一分部项目施工中推广应用，共计节约直接成本4472万元。成果成功运用，解决了在强风、水深、浪高、裸岩、

潮大等恶劣环境下的桥梁施工难题，实现了裸岩栈桥和桩基的快速施工，钢吊箱底板的回收周转，保证了强风条件下移动模架安全过孔，有效提高了恶劣海况海上桥梁的施工效率，保证了工程质量，节能增效，经济效益显著，并为以后同类型恶劣海况桥梁施工提供理论上的支撑和实践中的参考依据。该成果的多项首创关键技术适用性强，特别钢吊箱“可回收底板技术”适用于普通江河中或波浪大复杂海况下，带系梁哑铃型或4根桩矩形高桩承台围堰施工，水中承台数量多情况下，效果更佳显著。

完成单位：中交一公局厦门工程有限公司

完成人：卢磊、费志高、孟源、黄亮、林联奇、赖炳增、崔志农、赖霭鲁、向子鑫、王 锟

数字化城市轨道交通工程建造管理系统研发及应用

一、项目概述

本项目以工程数字化建设管理、建筑信息模型（BIM）和技术状态管理等国内外先进的管理理论为主要依据，以设计施工一体化管理系统及相关应用成果为基础，以 BIM 为核心技术，集成 GIS、IoT（物联网）、移动互联等信息化技术，针对我国轨道交通设计与施工一体化管理过程中的技术和特点，综合国内外先进的工程管理理论和数字化技术进行轨道交通工程数字化全过程协同建设管理系统的研发和应用研究。平台以工程建设期的管理流程为主线，以 BIM 模型为信息载体，实现设计、投资、质量、安全、进度等管理要素全关联。

研究以工程信息的高度集成共享为目标，为建设方、施工、监理、设计、第三方咨询等参建单位提供基于 BIM 技术的资源共享、高效协作的专业解决方案。研究实现了多专业 BIM 模型与二维施工图、工作文档、工程资料的构件级关联，并与质量、安全、进度、成本、环境等项目管理要素有机结合，同时高度贴合我国工程建设项目组织架构和管理机制。通过 BIM 与建设管理业务的高度集成，利用 BIM+GIS 技术，以三维可视化的方式，集成了监测数据、地质模型、掘进数据、盾构机参数、场平布置模型、管线综合模型、视频监控等车站级关键信息，以及进度、质量、支付、安全等线网级宏观信息，辅助管理人员工作决策。研究实现 web 端和移动端（iPad、手机）跨平台信息共享同步应用。研究实现功能包括 BIM 模型浏览、资料管理、设计管理、安全管理、进度管理、质量管理以及流程管理等功能，力争实现数字化建设管理。

二、项目创新

1.提出了轨道交通工程数据中心管理、BIM+GIS 多源数据融合、基于 BIM 编码信息的多要素管理融合、BIM+IoT 实时数据可视化分析等 10 项关键技术，解决了 BIM 数据存储结构复杂、多源异构数据整合难、BIM 模型与管理脱节、数据可视化与时效性差等问题，创新了轨道交通工程数字化技术体系，创新项目管理手段，全面提升了轨道交通工程建设水平。

2.以 BIM 为核心，集成 GIS、IoT、移动互联、云平台、VR 等信息化技术，自主建立了轨道交通工程数字化建设管理平台，以 BIM 模型数据结合管控流程为特色，创新开发了设计管理、进度管理、质量管理、安全管理、成本管理等全要素管理模块，融合开发了移动 APP、安全监测、盾构监控、大屏决策等系统，解决了云平台架构下的跨企业数据共享、要素数据可视化、地下工程感知、实时数据动态分析、跨终端应用等需求问题，实现建设工程“集团、公司、项目”三级管理和建设全过程精细化管控。

3.结合依托工程和多个应用项目，系统性建立了轨道交通工程 BIM 技术标准体系、应用体系和管理体系，形成了成熟的轨道交通工程建设管理数字化解决方案，规范了 BIM 实施标准化的统一技术标准；明确了全阶段、全参与方、全专业 BIM 的价值应用；形成了顶层规划、分步实施的 BIM 管理共识。提高了项目管理数字化和新技术应用水平，实现项目提质增效、企业数据资产沉淀，为轨道交通行业数字化转型发展打下坚实基础。

三、项目评价

城市轨道交通工程数字化建设管理关键技术研究及应用以工程数字化建设管理、建筑信息模型（BIM）和技术状态管理等国内外先进的管理理论为主要依据，以设计施工一体化管理系统及相关应用成果为基础，以 BIM 为核心技术，集成 GIS、IOT（物联网）、移动互联等信息化技术，针对我国轨道交通设计与施工一体化管理过程中的技术和特点，综合国内外先进的工程管理理论和数字化技术进行轨道交通工程数字化全过程协同建设管理系统的研发和应用研究。研究申请了 7 项发明专利、10 项软件著作权、3 项电建工法和 20 篇专业论文。

本研究成果，基于 BIM 技术，可对轨道交通建设全过程进行数字化的管理，提高施工管理的效率，加快工程建设进度，减少施工成本。研究有效解决了“BIM 与管理两张皮”的问题，实现工程信息统一储存、高效同步共享，打造“一站式”工程信息管理门户，并在成都、绍兴、杭州等城市轨道交通建设中成功应用，经济和社会效益显著，并获得业主、监理单位一致好评，推广应用前景广阔。

实践证明，该研究成果实用性强，创新性强，技术先进，项目成果为类似工程提供了良好的技术支持，为行业相关规范规程的修订、完善提供了技术和工程实践依据，产生了显著的经济、社会和环境效益，对于轨道交通行业数字化发展具有重大意义，具有广阔的应用前景和推广价值。

本项目研究促进了城市轨道交通工程数字化建设管理关键技术的进步，项目研究成果总体达到了国际先进水平，其中 BIM+GIS 多源数据融合、多模块集成应用达到国际领先水平。项目获得“首届工程建设行业 BIM 大赛（交通工程类）一等奖”、“第四届中国电力数字工程（EIM）大赛非电力组第一名”、“2020 年浙江省勘察设计行业优秀勘察设计 BIM 应用专项一等奖”、“全球基础设施光辉大奖”4 项奖励。

完成单位：中电建铁路建设投资集团有限公司、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、成都轨道交通集团有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司、中电建成都建设投资有限公司、中电建南方建设投资有限公司、中电建武汉建设管理有限公司

完成人：蒋宗全、臧延伟、时亚昕、靳利安、房师涛、蒋海峰、周旭、田海波、张宏伟、刘伯鹏、虞琼华、郑利龙、姜永涛、曾派永、彭伟

城市地下综合管廊设计关键技术及全生命周期 管理系统应用

随着我国城市地上建设快速发展的同时，地下工程建设中反复开挖的“马路拉链”、市政道路两侧的“空中蜘蛛网”、管线泄漏爆炸、路面塌陷等“地下事件”频发，严重影响了城市的可持续发展进程。综合管廊可有效提高城市综合承载能力和实现城市基础设施功能的集聚，推进城镇化发展，加快创造和谐城市生态环境。

目前，综合管廊建设在规划设计与多项规划相协调、管廊本体节点和地下工程节点优化、防水及抗震、消防与通风技术等诸多方面仍面临一系列难题，研究解决此类难题，为实现建成一批具有国际先进水平的综合管廊目标提供技术支撑；另一方面，面对城市综合管廊这一百年大计工程的逐步落地，如何把地理信息系统（GIS）、物联网与大数据等新技术、新方法、新理念融合应用到综合管廊全生命周期管理中，实现智能高效和数字化管理，也是当前城市综合管廊建设过程中的重大难题。因此，开展城市地下综合管廊设计关键技术及基于BIM+GIS的全生命周期管理研究意义重大。

项目研究坚持理论结合工程实践的原则，依托西安市、汉中市和白河综合管廊等十余项工程项目，围绕综合管廊建设过程中的规划及总体设计技术、消防系统、通风系统、监控与报警系统、主体结构分析、防水系统、施工方法、管廊数据库及数据标准的建立、信息协同设计平台的建立、施工全过程综合管理平台的建立、运维智慧管理平台的搭建等12个方面开展了系统研究，主要创新成果为：

1.创新性提出了国内外唯一的全新多功能综合管廊立体组合结构型式，解决了因滨河山区地形条件复杂和布置空间苛刻而工程无法实施的难题；

2.首次提出了圆形盾构法综合管廊综合节点设计方案，解决了综合管廊在老旧城区的适用性；

3.首次提出综合管廊电力舱防火分区由200m扩大至300m，综合舱和燃气舱防火分区由200m扩大至为400m的延长防火分区技术方案；首次提出了跨防火分区按400m长度设置通风系统的技术方案；

4.基于“以排为主”的防水理念，国内外首次提出了一种预制拼装管中管新型综合管廊结构型式，解决了综合管廊主体结构与外包防水体系的设计使用年限不匹配问题；

5.基于“BIM+GIS 多系统一张图”理念，开发了综合管廊全生命周期管理信息系统，实现了协同设计、施工过程管理和智慧运维监控，提高了管廊整体设计运营管理水平。

项目已获国家发明专利 1 项，实用新型专利 7 项，软件著作权 3 项，主编地方标准 3 项，发表论文 10 篇（EI 3 篇，北大中文核心 3 篇），研究成果直接指导了西安市东北部 330kV 架空线路落地工程、延安市城区管廊、汉中管廊、云南管廊等多个项目，技术应用效果显著；课题研究成果为综合管廊工程的设计和施工提供了技术理论支撑，项目技术产生的经济效益达 5.88 亿元，社会效益和经济效益显著，推广应用前景广阔。

完成单位：中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司、西安交通大学

完成人：丁 燕、高徐军、雷永智、宋 丽、杨党锋、马建勋、任有锋、贾彦武、张萌、吕佼佼

干热大温差盐碱地区试车场超大斜面高速环道 综合施工技术

上汽大众新疆试车场是我国第一个在干热、大温差强盐渍土地区修建的超大斜面的试车场，新疆试车场高速环道长度 13km，其中曲线地段长度为 9.9km，环道长度和试车场规模均属于世界之最。高速环道的横断面形式由折线式组合线型组成，其最大横坡为 21%。高速环道采用横坡为 21%的超大斜面在世界上还是首次。在特殊气候强盐渍土地区建设超大斜面的汽车试验场，在我国甚至世界范围的试车场建设中尚无先例，其复杂的施工工艺和技术，我国在此领域尚属空白。

公司针对该地区的自然环境、汽车试验场交通特点，组建研发团队，进行关键技术研究。

1. 主要技术内容:

(1) 强盐渍土地区超大斜面路基施工技术；(2) 干热、大温差气候条件的沥青混合料性能研究；(3) 超大斜面路面施工技术。

2. 主要技术成果:

针对时速 200km/h、21%超长斜曲面的世界最大试车场（吐鲁番）工程，研究了干热大温差盐碱地区试车场超大斜面高速环道综合施工技术，形成了相应的成套技术：

(1) 研发了超大斜曲面路基智能成型技术，实现了复杂斜曲面高精度施工控制。(2) 研发了智能化超大斜曲面级配碎石及沥青混凝土摊铺成套技术，研发了施工同步性控制系统、摊铺机行走控制装置，解决了大坡度、斜曲面施工技术难题，实现了超大斜曲面机械化智能摊铺。(3) 首创了激光 3D 扫描斜面平整度检测技术，解决了平整度检测以点代面的局限性，形成了超大斜面平整度的智能检测技术。

3. 授权专利情况:

获得“一种环道斜面铺设沥青的施工方法”和“一种试车场环道斜面的接缝施工方法”等 4 项发明、5 项实用新型专利及 1 项软件著作权登记。

4. 工法、标准规范情况:

取得“干热、大温差地区超大斜面试车场沥青路面施工工法”公路工程工法。

5. 技术经济指标及推广应用情况:

针对时速 200km/h、21%超长斜曲面的世界最大试车场工程，本课题通过研究形成了干热

大温差盐碱地区试车场超大斜面高速环道综合施工技术，填补了我国在超大斜面沥青摊铺成型和盐碱土地地基处理及沥青混合料性能优化领域的技术空白，打破了国外的技术垄断。

该技术成果处于国际领先水平，研究成果在上汽大众汽车有限公司新疆（吐鲁番）试验中心和一汽-大众汽车试验场工程中成功应用，取得了良好的经济效益和社会效益，为今后类似工程施工提供了成功的范例，具有广阔的推广前景。

完成单位：中铁四局集团有限公司、中铁四局集团第一工程有限公司、长安大学

完成人：张杰胜、徐书国、马彬友、李春、蔡伟、何贤军、郭宏坤、李鹏、程多金、王时根、沈志强、周浩、李长亮、魏灯魏、孙凯

复杂受限空间市政工程快速更新建造成套技术

1. 成果简介

针对老旧城区更新建造中的交通堵塞、施工空间狭窄、地下构筑物众多、既有构筑物间距小等难题，从老旧城区市政工程的快速更新施工技术、项目数字化建造管控和建造设备研制等方面入手历经 5 年的研究与实践，形成了“复杂受限空间市政工程快速更新建造成套技术”。研发了城市受限空间快速建造施工技术；研制了城市受限空间快速建造与智能建造设备。项目技术获得发明专利 19 件、软件著作权 4 件、省级工法 11 项，发表学术论文 11 篇，参编地方标准 1 项，整体技术达到国际先进水平。

主要完成单位：中国五冶集团有限公司

主要完成人：杨根明、罗利、罗建勋、喻绵俊、郭瑞、袁弘毅、张立云、李岩松、倪伟、高文君

2. 成果价值

(1) 科学价值

开发了受限空间盖梁施工自平衡悬挂支架技术，突破了因场地受限无法地面搭设支架支撑模板的技术难题；提出了市政桥梁装配式托架施工技术，解决了预埋盒与墩柱主筋冲突的难题；研发了受限空间管廊排水处理技术，研制了绿色环保综合处理装置，解决了管廊内引水、排水和环保问题；开发了受限空间管线快速安装技术，突破了受限空间内安装工程质量差和效率低的局限。

(2) 技术价值

发明了 34 套可辅助城市受限空间快速建造的设备及方法，23 套可信息化施工的装置及软件，形成了含桥梁、道路、管线的设计、生产、施工一体的集成化装备技术。发明了盖梁施工自平衡悬挂支架技术，解决了因场地受限制无法地面搭设支架支撑模板的难题；发明了薄壁高墩工字钢承架和垂直度检测装置，解决了控制点距离远、铅锤定位难、工作平台小、大型放样设备展开难等问题；53 件专利已在国内 24 个项目中成功应用，提升了劳动生产效率。

(3) 经济价值

中国五冶集团有限公司牵头完成了技术成果“复杂受限空间市政工程快速更新建造成套技术”，作为成果转化单位，于 2012 年至 2017 年期间，将成果成功应用于 24 个项目，实现创收 210 亿元，创利 10.5 亿元，实现技术创效 1.84 亿元，经济效益显著。

(4) 社会价值

“复杂受限空间市政工程快速更新建造成套技术”实质性推动了我国城市改造更新建造技术进步与水平提升，符合住建部发布的《2011-2015 年建筑业信息化发展纲要》的要求。工程实施一次性验收合格率达到 100%、优良率达到 95%、工期保证率（超前率）100%。通过该成套技术的成功实施，取得了良好的社会效益。

(5) 文化价值

以信息化带动工业化，以工业化促进信息化，是顺应未来发展的一大趋势。“复杂受限空间市政工程快速更新建造成套技术”以信息化智能技术解决了施工项目在城市市区与车辆、行人、道路、建筑和管线之间的矛盾，保证了现场文明施工。

3. 知识产权和技术标准

(1) 专利，获得专利 53 项，其中部分专利如下：

专利号	具体名称	专利权人	发明人
ZL 201310153145.0	钢桁架悬挑支架及其实现方法	中国五冶集团有限公司	杨根明、黄建平、文兴勇、袁炼、王晓睿、罗利、刘小川
ZL 201510199412.7	免焊式多级水平调节支撑装置及其安装调节方法	中国五冶集团有限公司	杨根明
ZL 201520254080.3	确保水平支撑的可拆式三角支撑架	中国五冶集团有限公司	罗利、张红
ZL 201610162966.4	一种用于清除成孔灌注桩孔底沉渣的装置及清除方法	中国五冶集团有限公司	喻绵俊 罗利 倪伟 罗建勋 陈明实
ZL 201710116281.0	一种沉井气囊法下水的结构及基于该结构的下水方法	中国五冶集团有限公司	罗建勋、杨根明、罗利
ZL 201310154751.4	一种防撞墙施工的活动平台	中国五冶集团有限公司	文兴勇、刘小川、罗利、袁炼、王晓睿、林圣坤
ZL 201410189939.7	一种顶管施工方法	中国五冶集团有限公司	刘小川、罗利、黄建平、袁炼、范宏、王晓睿

(2) 软件著作权

登记号	软件名称	著作权人
2020SR0297612	城市预制装配式道路构件智能排版分析与控制系统 V1.0	罗利、杨根明、罗建勋
2020SR0052702	FRP 受弯加固 RC 梁承载力求解器 V1.0	郭瑞、蔡联亨
2020SR0307068	城市地下管道顶管施工在线监测系统	罗利、杨根明

(3) 技术标准

标准类别	标准号	标准名称
四川省工程建设地方标准	DBJ51T077-2017	四川省城市综合管廊工程技术规范

4. 产业化应用

为减少城市更新改造过程中施工对城市功能的影响，对复杂受限空间市政工程快速更新建造成套技术进行研究。形成的技术成果有效解决了施工对城市功能的影响，构建了一套完

整的复杂受限空间下市政工程更新改造技术体系，减小了施工对城市居民生活的影响。

技术成果自 2012 年至 2017 年，已在成都市“两快两环两射”成温路改造工程、内江邱家嘴立交桥、省道 204 线渠县过境段渠江大桥及引道工程等国内数十个市政工程中得到了成功应用，实现创收 210 亿元、创利 10.5 亿元，技术创效 1.84 亿元。

完成单位：中国五冶集团有限公司、西南交通大学

完成人：杨根明、罗利、罗建勋、喻绵俊、郭瑞、袁弘毅、张立云、李岩松、倪伟、高文君

地铁工程在城区特定敏感建（构）筑物环境下 风险控制及关键修建技术

近年来，随着我国城市地铁建设的大力发展，地铁在修建的过程中势必穿越复杂的地下环境，并对地面重要建筑物的安全具有重要的影响，导致地铁施工事故频频发生。郑州地铁4号线07标段项目具有工程规模大、接口多、施工环境复杂，以及车站、区间施工工法多等特点，主要存在盾构长距离下穿如意湖底强透水层、小角度近距离斜穿顶管群隧道、小半径斜切工作井排桩、近距离多次侧穿桥桩、小净距曲线段施工和近距离侧穿浅基础建筑物等问题，4号线会展中心站零距离下穿1号线既有车站结构安全性问题，以及管幕暗挖和矩形顶管下穿污水管线等问题，工程施工风险及施工难度极大。

在参考现有的工程案例的情况下，以本项目工程为背景，开展了《地铁工程在城区特定敏感建(构)筑物环境下风险控制及关键修建技术》专项研究，通过前期调研、理论分析、室内试验、现场测试、验证分析等方法，优化了设计、施工方案与参数，创新了工艺工法及装备，以安全、保质、快速、经济的完成了项目各项工作。主要创新成果如下：

1.提出了基于受力一致继承关系的既有结构极限状态两阶段渐进搜索技术理论及分析模型，并在此基础上形成了“双控型”施工变形控制标准。

2.创新了新建车站零距离暗挖下穿既有车站托举法施工理念及技术。形成了以新旧车站结构连接技术、暗挖段封闭箱体内降水、加固技术、暗挖段开挖与结构施工技术、暗挖段施工监测等综合技术。

3.形成了城区接近敏感结构区段盾构施工控变防沉控制综合技术。包括土压平衡盾构穿越湖底富水砂层、淤泥质黏土地层盾构侧穿建筑物、近距离斜穿交通类顶管隧道群、盾构小半径斜切排桩和盾构隧道小净距掘进等敏感环境下施工技术。

4.形成了一套复杂环境下换乘地铁车站综合施工方法及控制技术。提出了大尺寸截面直线、竖向曲线矩形顶管工程控制技术，实现了对顶进力的精确估算；首创了下穿既有污水管线的矩形管幕暗挖施工技术系统；提出了复杂环境下车站多工法合理衔接及过渡综合施工技术。

2021年1月14日，委托河北省科学技术情报研究院科技查新工作站对课题进行了国内外文献查新。查新结论：在已检索的国内外公开文献中，未见与本查新委托对象相同报道。

2021年3月31日，委托湖北省科技信息研究院查新检索中心对课题进行了国内外文献

查新。查新结论：在所检国内外文献范围内，未见有相同的报道。

该关键技术成果于 2021 年 4 月 15 日通过了河北省建筑业协会对“地铁工程在城区特定敏感建(构)筑物环境下风险控制及关键修建技术”评价会。评价委员会认为：项目研究成果整体达到国际先进水平。

截至目前项目获发明专利 3 项、实用新型专利 10 项、核心期刊论文 5 篇、省部级工法 10 项、国家级 QC 成果 1 项、省部级 QC 成果 3 项，同时获得河北省建筑业科技进步奖一等奖。

本项目技术成果加快了郑州地铁 4 号线的建设，能够有效降低项目综合使用成本，提升现场施工形象，丰富了复杂条件地铁修建技术，促进了轨道交通建设行业的发展，针对复杂环境地铁施工具有良好的推广与应用前景。

完成单位：中铁隧道集团二处有限公司、中铁隧道局集团有限公司、石家庄铁道大学

完成人：黄章君、杨建礼、王 坤、杨 娟、韩现民、何进江、谭建兵、董武斌、冯飞、范东升

盾构管片钢筋笼自动化制造及应用

1. 项目背景

近年来，随着“一带一路”建设的快速发展，盾构/TBM 广泛应用于国内外隧道工程建设中，其钢筋混凝土管片数量需求也随之快速增长。据文献调研发现，在国内外均没有钢筋笼自动加工设备。虽然国内部分预制工厂实现了管片混凝土浇筑工作的设备自动作业，其效率、质量和安全生产都得到了保证。但是，管片钢筋笼加工作为钢筋混凝土管片生产环节中一个重要工序，还是以人工操作简单机具手工加工为主。特别是在钢筋折弯、剪切、机械化平面网、立体网自动焊接等方面，其整体自动化和智能化加工设备及加工工艺在国内外均为空白。

现有管片钢筋加工方式需投入大量人力，且生产效率低下、焊接质量差；同时，钢筋加工车间内频繁的吊运动作安全风险大。在这种情况下急需研发一套能提高劳动生产率、保证焊接质量、降低安全生产风险的管片钢筋笼立体自动加工设备，并形成有效的自动化作业生产线，提高钢筋笼的焊接质量，降低成本十分必要。

2. 应用领域及技术原理

应用领域：本项目适用于隧道及地下工程领域。

技术原理：盾构管片钢筋笼自动加工设备主要由棒材钢筋剪切模块、单片网成型模块、物料存储模块和立体网焊接成型模块等四大模块组成。首先，由棒材钢筋剪切模块完成钢筋材料吊运、剪切、存储及加工作业，通过钢筋吊运和输送机构将剪切后的成品钢筋自动输送至平面网成型模块；其次，由平面网成型模块伺服定位装置、横筋自动落料装置和电阻焊焊接装置完成横筋精确定位，实现横筋与主筋的快速、高效自动焊接，再通过平面网片平移机构、弯弧机构和主筋焊接机构等自动完成平面网片平移和主筋弯曲及焊接，焊接完成后由物流存储模块的吊运机构将其吊运至立体仓库后进行自动分类存储；最后，由智能控制系统根据钢筋笼设计参数依次将不同规格的平面网片从立体仓库中取出，吊运至立体网焊接成型模块的码料小车，并完成钢筋笼箍筋的安装，安装完成后码料小车自动运行至立体网焊接机构，通过气缸夹具实现平面网与箍筋的定位和夹紧，再通过电阻焊对单片网主筋和外箍筋进行焊接成型，形成盾构管片钢筋笼。

3. 主要技术创新成果

(1) 研制并应用了盾构管片钢筋笼单片平面网自动焊接成型设备。完成了单片平面网由

单根钢筋至平面网一次自动组合成型跨越式飞跃，实现了平面网内弧和外弧钢筋定尺牵引输送与弯弧、横筋落料与焊接、主筋端头弯曲与焊接、挤压焊接与托起等全过程机械化、自动化、智能化；创新研发的弯弧装置、网片定型机构、端头焊接装置和内外弧形拼接调整模具等可对大直径钢筋提前进行弧度矫正和应力释放，有效解决了大直径差钢筋焊接的关键技术难题。

(2) 国际上首次研制了钢筋笼立体加工自动焊接设备。构建了盾构管片钢筋笼由单根钢筋-平面网-物流仓储-立体网自动成型加工技术体系，实现了钢筋笼加工全过程自动化、工厂化、标准化作业，提高了盾构管片钢筋笼的加工效率和质量，解决了人工焊接质量差、工效低、安全隐患大等技术难题。

(3) 开发了一套盾构管片钢筋笼原材料及半成品物流储运系统。创新研发了钢筋棒材与平面网片自动分类与存储、智能取运与组合安装系统，解决了钢筋棒材、单片平面网等存储占地面积大、运输和存储困难等难题。

(4) 项目成果获授权发明专利 10 项、实用新型 7 项，发表科技论文 3 篇。

4. 主要经济技术指标

在长株潭城际铁路综合 1 标盾构项目施工中，设备生产效率约为人工加工效率的 2.46 倍，每环综合生产费用约为人工加工成本的 84%；在以色列特拉维夫轻轨红线 TBM 西段工程施工中，管片钢筋笼自动加工设备的生产效率约为人工的 5~7 倍；同时，在杭州建工建材有限公司得到推广应用，其生产效率提高了 5 倍以上；共计产生经济效益达 4940 万元。

5. 国内外同类技术比较

国内外钢筋加工行业实现了如钢筋网片、钢筋折弯和剪切等功能部分自动化，而盾构管片钢筋笼因其加工工艺复杂，自动加工难度极大，仍以人工加工方式为主，该项目成果实现了盾构管片钢筋笼加工全过程机械化、自动化、智能化，提高了盾构管片钢筋笼的加工质量，降低了成本，确保了施工安全等技术问题。具有显著的经济、社会和环境效益。

该项目成果首创了盾构管片钢筋笼自动加工设备，首次实现了盾构管片钢筋笼从单根钢筋到钢筋笼组合一次自动成型加工，设备能满足安全、可靠、适用、经济等指标，产品具有原创性、先进性。经教育部科技查新工作站国内外技术查新，未见与该查新项目查新点技术相符的文献报道，该成果填补了国内外技术空白，对于盾构管片钢筋笼加工行业的变革具有极大的推动作用。

综上所述，本项目研究成果具有独创性、技术引领性、安全可靠、操作自动化、生产效率高，具有广泛的推广的实用价值，社会、环境和经济效益显著。2021 年 1 月 28 日经中

国机械工程学会会议鉴定，该成果创新性强，达到国际先进水平。

6. 推广应用及效益情况

盾构管片钢筋笼自动加工设备的成功研发与应用，填补了国内外技术空白。该项目成果成功应用于长株潭城际铁路，推广应用于以色列特拉维夫轻轨红线 TBM 项目、杭州建工建材有限公司，取得了显著的经济、社会和环境效益。

完成单位：中铁隧道勘察设计研究院有限公司、中铁隧道局集团有限公司、中铁隧道集团二处有限公司、建科机械（天津）股份有限公司

完成人：卓越、邹翀、刘招伟、刘永胜、鲁斌、王百泉、陈振东、张新、王纯亮、冯欢欢、金仲祥、谢韬、焦露琳、赵小龙、熊阳阳

空间三维异形桥墩 BIM 建模应用技术研究

BIM 建模技术在建筑行业的运用越来越普及，但在桥梁建设施工中目前运用相对较少，在空间三维异形桥梁模板、钢筋加工及安装施工中的应用更是接近于空白。

目前，国内常规的模板、钢筋加工工艺已经非常成熟。但随着社会的发展，在关注桥梁安全、质量的同时，造型美观越来越被人们所重视。因此造型独特桥梁的陆续出现是一个必然的趋势，而利用 CAD 等二维线条软件配合加工出来的模板由于块段划分相对繁琐，拼缝较多，需现场花费大量的人工、时间对模板进行二次处理，同时受拼缝影响混凝土外观很难达到预期效果；异形钢筋加工、安装则需要完全通过人工去不断的摆靠调整，耗时耗力，且钢筋加工的形状、安装的质量以及钢筋保护层控制很难达到设计的要求。

1. 依托工程概况

星港街过街天桥工程景观由美国 SWA 公司设计，结构初步由美国 LERA 公司设计，是国内首例采用混凝土浇筑的空间曲面异形刚构人行天桥，桥墩共计 26 个，其中 15 个为空间曲面异形形式，形状近似马蹄莲造型，空间曲面异形桥墩共分为三个渐变部分：第 1 部分为圆形截面形式；第 2 部分为圆形向上进行渐变过度为椭圆形状；第 3 部分为桥墩截面按椭圆截面向上渐变，与梁底衔接，桥墩模板采用 8mm 厚钢板作为面板，墩柱主筋为 $\Phi 40$ 钢筋，受墩柱造型影响，模板、钢筋存在空间曲面形式，模板、钢筋加工、安装难度极大。



过街天桥效果图（南桥、北桥）

2. 主要科技内容

本项目取得授权发明专利 2 项：一种基于 BIM 建模技术空间三维异形桥墩模板施工方法；一种基于 BIM 建模技术空间三维异形桥墩钢筋施工方法。

（1）采用 BIM 建模技术进行空间三维异型曲面模板设计

本工程三维空间异形双曲面模板采用面板带肋集体建模，1:1 钢模板实体仿真，模板在模型中从基本对称美观方向及减少拼缝（保证曲面平顺度）方向着手分块，根据具体的曲面曲

率及曲面预拱度进行分块细化控制曲面偏差，面板分块与定型肋等距，以此尽可能的减少曲面分块数目，还可以以此控制模板拼缝的对称美观性及加工过程中拼缝的可调性，曲面板之间的接缝质量也可以大大优化，由曲面板内外双层定型肋及小分块曲面板双对角线的长度控可以实际操控曲面板的变化曲率，这很大程度上保证了曲面板的弯曲质量。

(2) 采用 BIM 建模技术配合空间三维曲面钢筋加工

改变了传统针对异型钢筋需采用胎架进行加工的方式，通过对墩柱进行建模，基于墩柱曲面和保护层厚度进行钢筋建模，在通过钢筋模板的参数提取工作，有效的与数控弯曲设计进行结合，大大降低了异型曲面钢筋加工的难度，从而节约了人工和设备的投入，节约工期，降低成本，单根钢筋严格按照图纸位置进行建模编号，钢筋的安装精度得到大幅提升，同时因建模过程中的保护层控制措施，大幅提升了钢筋保护层合格率。

3. 社会经济效益方面

(1) 模板加工：通过 BIM 建模分析指导模板块段划分、优化模板加工加工参数，提高钢板原材利用率、提升加工效率，使模板加工成本由 13800 元/t 下降至 8500 元/t，全桥合计异形钢模板 950t，共计节约成本 503.5 万元；

(2) 钢筋加工：采用 BIM 技术直接对钢筋进行建模并提取每根钢筋的曲线要素、长度等数据，墩身 40mm 钢筋加工单价由 950 元/t 下降至 550 元/t，节约胎架加工费 7.5 万元，全桥墩身钢筋约 350t，共计节约成本 $75000+400*350=21.5$ 万元。

(3) 项目地处苏州金鸡湖、苏州中心等核心区域，社会影响性和政治敏感性极高，成套技术的应用为工程顺畅进行提供了有力保障，很大程度上缓解了工程各方的压力；本项目 BIM 相关技术成功应用，响应了交通运输部办公厅发布的《关于推进公路水运工程 BIM 技术应用的指导意见》文件精神，推动了当时 BIM 技术在公路水运施工项目中的应用。

4. 促进行业科技进步及应用推广情况

星港街过街天桥项目采用本技术成果完成了国内首例现浇混凝土空间三维异形人行天桥的模板、钢筋加工施工。整个施工过程中，采用 BIM 建模工艺，攻克了该空间三维异形模板、钢筋加工的技术难题。通过三维扫描技术的检测，模板、钢筋加工质量完全符合设计要求，且由于对工艺进行优化，大大降低了施工难度，节约了成本投入，切实做到了节能减排。星港街过街天桥项目的成功应用表明该技术将广泛用于未来的桥梁模板、钢筋加工施工领域。

完 成 人：秦 佳(中交一公局第二工程有限公司)、尉洪利(中交一公局第二工程有限公司)、洪 矿(中交一公局第二工程有限公司)

2019 年工程建设十项新技术名单

(排名不分先后)

序号	项目名称	完成单位	主要完成人
1	混凝土数字化控制施工技术	中国水利水电第七工程局有限公司	吴 军、田正宏、王建伟、何 勇、李东新、正 超、唐子龙、吕国芳、彭志海、娄彩红、马元山、毛舒娅、邓 洪、芦 浩、李 昂
2	300m 级特高拱坝安全控制关键技术及工程应用	中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司	王仁坤、祁宁春、洪文浩、李德玉、杨 强、周 钟、赵文光、杨建宏、张 冲、邵敬东
3	相控阵超声检测关键技术与应用	中国能源建设集团安徽电力建设第一工程有限公司	孙 磊、余新海、朱 琪、樊传琦、方 超、郝冬生
4	敞开式 TBM 安全高效施工关键技术研究及应用	中国水利水电第三工程局有限公司	许金林、王鹏禹、黄继敏、杜立杰、左立富、韩小亮、李东锋、王 永、杨元红、李光前、吴根生、郭 坤、陈忠伟、郑继光、李世民、焦吉坤、毕 晨、李伟伟、高 雄、孔海峡
5	桩顶支撑步履式平台沉桩技术	中交武汉港湾工程设计研究院有限公司	张 鸿、王建平、薛志武、汪文霞、郭 强、翟世鸿、张治明、谢道平、梁胜光、冯先导、刘益平、文定旭、李 阳、阮明华、吴 睿、薛 帆、谢 坤、杨天亮、王民军、邱 未
6	三塔四跨结合梁悬索桥建造关键技术	中铁大桥局集团有限公司	冯广胜、罗瑞华、沈 涛、郑大超、李陆平、黄 峰、赵发亮、陈海林、郑 康、梅 娟、李一石、刘润泽、周小毛、江 涛、张 耿、赵小静、李智勇、李 响、习建安、汪丹兵
7	千米级超高层建造整体钢平台模架及输送泵装备研发与示范	上海建工集团股份有限公司	龚 剑、黄玉林、朱毅敏、黄跃申、徐 磊、扶新立、潘 曦、王小安、房霆宸、代晴华、谢 强、杨新华、秦鹏飞、吴联定、徐 俊、戴献军、董建曦、中青峰、马 静、武大伟
8	钢结构激光三维扫描测量与智能化数字预拼装成套技术	浙江精工钢结构集团有限公司	王强强、刘中华、邢遵胜、王留成、赵 切、骆鹏飞、高 良、贾尚瑞、蔡柳鹤、张建平、王 垒、张宏达、彭 栋、吕国超、孟玲霄
9	杭州国际博览中心关键施工技术研究与应用	中国建筑第八工程局有限公司	张晓勇、危 鼎、陈新喜、毛登文、李 赞、郭志鑫、林 波、吴光辉、王红成、刘洪光、王 碗、吴 江、杨媛鹏、左树刚、王剑锋
10	紧邻地铁深大基坑施工技术	中国建筑第八工程局有限公司	王文元、郭伟光、朱 健、侯海芳、范垚垚、聂金阁、赵培龙、沈 鹏、莫兴虎、杜高帅、周 超、艾迪飞

2020 年工程建设十项新技术名单

(排名不分先后)

序号	项目名称	完成单位	主要完成人
1	新管幕法超浅埋隧道下穿特级火车站施工关键技术研究与应用	中铁十四局集团有限公司、中铁十四局集团第二工程有限公司、山东科技大学	韩仲慧、郭勇、李腾、仲文强、韩立帅、袁洋、刘成龙、刘帅
2	重庆西站综合施工技术 & 实体结构性能检测与研究	中铁十二局集团有限公司、中铁十二局集团建筑安装工程有限公司、中国铁路成都局集团有限公司客站建设指挥部、同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司、太原理工大学	蔡英康、王中军、张茂林、刘传平、贾玮、范伟、李锐、王美静、盖宏、李铁英、王瑞刚、张昆、胡石权、郑河舟、张建康、许京鹏、刘剑锋、陈聪俊、李鑫、张超
3	主跨 457m 世界最大有推力钢箱拱桥建造关键技术研究与应用	中铁上海工程局集团有限公司、中铁上海工程局集团第五工程有限公司	唐俊、黄新、陆珍君、何鹏、张超、吴宇、韦干、曾东斌、何奇钦、邓海洪、林小军、庞伟、肖延军、赵孟贺、邓龙清
4	“分片掘进式装配”地下综合管廊建造技术	中交第二航务工程局有限公司	翟世鸿、杨秀礼、孟奎、蒋道东、杨睿、许超
5	超深混凝土防渗墙(地下连续墙)建造技术	中国水电基础局有限公司、中国水利水电科学研究院、水利部水利水电规划设计总院、天津大学	宗敦峰、刘建发、肖恩尚、王玉杰、孔祥生、韩伟、刘志明、张社荣、石峰、赵明华
6	国产化高位收水冷却塔研发与应用	中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司、常州金坛塑料厂、神华国华九江发电有限责任公司	吴浪洲、姜晓荣、曾华、彭德刚、马爱萍、王文义、廖内平、唐勇、李罗忠、袁多亮、张雄、杨卓颖、俞斌、刘建伟、赵斌
7	巨型水轮发电机组安装工程精密测量智能系统开发与应用	葛洲坝测绘地理信息技术有限公司、中国葛洲坝集团机电建设有限公司、中国葛洲坝集团股份有限公司	郭光文、吴光富、江小兵、刘宇鉴、程志华、令强华、卫书满、晏春波、唐亿阶、罗琛、邱章云、陈兆斌、张士勇、曹国华、曹廷根、姚应盖
8	大型热轧板带工程绿色高效建造新技术	中国二十冶集团有限公司	秦夏强、魏尚起、宋赛中、许海岩、谢非、代景艳、齐麟、刘光明、史卫东、孙剑、刘民业、陈雷、金辽东、张振宇、王恩来
9	智能化超高层建筑结构施工装备集成平台系统	中建三局集团有限公司	张琨、王辉、王开强、陈波、李迪、崔健、刘晓升、王建春、刘志茂、刘威、李霞、伍勇军
10	软土深大基坑微变形控制技术	上海建工集团股份有限公司、上海建工装备工程有限公司、上海城建市政工程(集团)有限公司、上海航鼎电子科技有限公司	顾国明、黄玉林、吴联定、徐伟忠、贺翀、唐健清、杨德生、俞荣仁、王威、荣建、马静、杨峰、朱胜利、朱亮、张喆、倪冬燕

2021 年工程建设十项新技术名单

(排名不分先后)

序号	成果名称	完成单位	主要完成人
1	自航式沉管运输安装一体船及施工成套技术的研发与应用	中交第一航务工程局有限公司、中交一航局第二工程有限公司、中交天津港湾工程研究院有限公司、深中通道管理中心、中交一航局第三工程有限公司	李一勇、潘伟、张乃受、宿发强、宋神友、李增军、王强、岳远征、宁进进、王洪涛、由广君、陈伟乐、刘德进、刘亚平、冯海暴、苏长玺、寇晓强、周延利、韩涛、黄涛
2	稠油开发采出液高效处理及资源化利用技术	中国石油工程建设有限公司、中国石油新疆油田分公司	黄强、蒋旭、夏新宇、单朝辉、张书华、胡筱波、卜魁勇、于庆、贺吉涛、张侃毅、周京都、李倩、于海洋、刁建华、马兵、杨立辉、贾庆鹏、高青、武文静、顾凯
3	建筑垃圾模块化处置工艺及设备研发	北京建工资源循环利用投资有限公司	王淼、李烁、王琦敏、张磊、于家琳、赵国锋、陈向阳、崔福龙、袁振航、周俊、姚家胤、刘文才、李岩凌、平庆海、张颖、石玉春、刘伟、许瑞卿、曹建、许宝亮
4	一种循环施工升降机系统及实施方法	中建三局集团有限公司	张琨、王辉、孙金桥、李迪、叶贞、周勇
5	艰险山区高速铁路特大跨度混凝土拱桥关键技术及应用	中铁二院工程集团有限责任公司、中铁广州工程局集团有限公司、中国铁路经济规划研究院有限公司、西南交通大学、中国铁道科学研究院集团有限公司、沪昆铁路客运专线贵州有限公司	陈列、吴克非、徐勇、谢海清、柯松林、陈克坚、胡京涛、马庭林、李豪、张红旭、赵人达、黄嘉亿、何庭国、杜锐、廖云沼、高芒芒、李小珍、黄毅、陈让利、任伟
6	天然气处理新工艺及设备关键技术	中国石油工程建设有限公司西南分公司	郭成华、雒定明、汤晓勇、于庆、刘文广、张玉明、赵海龙、张迅、施辉明、唐昕、古剑飞、马先、刘俊、冯琦、马艳林、高兴、王菲、曹建强、李刚、向海云
7	超高层建筑轻量化模块化智能施工平台创新技术	华西工程科技(深圳)股份有限公司、四川华西集团有限公司、中国建筑第八工程局有限公司、中国华西企业有限公司、四川省第六建筑有限公司	刘东、唐际宇、陈跃熙、王华平、薛庆、林忠和、丁云波、唐阁威、赵立春、罗苓隆、赵崇贤、龙绍章、胡宁、李栋、雷富匀、徐帅、徐永亮、黎规梅、崔苗、江宇霄
8	复杂地层中两千米级长距离顶管施工技术	上海市基础工程集团有限公司	李耀良、陈永飞、张海锋、罗云峰、刘桂荣、赵敏杰、徐英武、施雨、李吉勇、黄泽涛、邹峰、盛夏一、刘冠梁、路三平、熊菲、陈文、王理想、张哲彬、蔡素素、顾欢

序号	成果名称	完成单位	主要完成人
9	振动碾无人驾驶机群作业关键技术	中国水利水电第五工程局有限公司	吴高见、孙林智、袁幸朝、熊亮、梁涛、韩兴、陈曦
10	高速铁路 CRTSIII型先张轨道板自动化预制技术研究	中铁三局集团有限公司、中铁三局集团桥隧工程有限公司	张俊兵、王红凯、屈韬、王海员、苏雅拉图、张传顺、于善毅、侯彦明、谷波涛、郭发民、薛泽民、张国斌、杨玉华、梁卿恺、王群