

复杂工程岩体损伤特征精细化采集、识别与评价集成系统

完成单位：中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，河海大学
中国科学院武汉岩土力学研究所，武汉大学

主要完成人：单治钢、刘 宁、褚卫江、石 崇、张传庆、彭 鹏、陈平志、严 鹏、
朱珍德、高 阳

水利水电工程安全关系国计民生，而岩体是水工建筑物重要组成部分和承载结构，但由于开挖卸荷、爆破冲击等原因，工程岩体将不可避免遭受损伤，严重影响工程建设和运行安全。由于损伤难以直接辨识，对工程的潜在危害更加严重，如何准确采集和识别工程岩体损伤成为保证工程建设与运行安全的关键所在。

项目组紧密围绕国家重大工程建设需求，以地质环境和工程效应互馈作用损伤机制为基础，以采集损伤-识别损伤-评价损伤为主线，以精准探测、有效预警、保障安全为目标，在损伤机理、评价方法、检测技术等方面取得多项关键技术突破，形成了高精度、高效率、高性能、面向工程的损伤信息采集与识别的新方法、新技术和新装备。主要发明点如下：

1、发明了小尺度岩石损伤信息精细化采集与测试方法，实现了损伤岩石渐进劣化过程精细描述

钻孔取芯是评价岩体力学性能的最基础手段，但现场地质条件复杂，难免对岩芯造成损伤。本项目发明了保真取样成套技术：利用套钻取样避免高应力卸荷损伤、采用液氮冻结避免节理岩体解体，与常规取芯方法相比，峰值强度提高 40%，取芯成功率提高 70%；研发了以声发射、高速摄像、数字散斑、高精度 CT 等为主的细观损伤演化测试系统，见图 1，并自主研发了应力-渗透-温度-化学多场耦合试验设备，打破国外技术垄断，实现了微米级、 10^{-5} 秒级、多场耦合的损伤信息高精度采集。



图1 岩石细观力学试验系统

2、发明了多尺度岩体损伤特征数字化识别方法，实现了岩体损伤状态的高效识别

基于区域生长算法开发了具有自主知识产权的图像增强与分割程序，并成功提取了岩石损伤劣化过程中细观结构变化过程与特征参数，突破了细观损伤由图像化到数字化转换的技术瓶颈，置信度达 95%；研发了重叠填充法、随机种子扩充法、内部逐步填充法、球谐函数法等多种细观颗粒流模型生成方法，不但大幅减少了颗粒数目，提高了填充率，并且更加接近真实颗粒形态，与传统建模方法相比，计算精度提高 20%，计算效率提高 60%；发明了集岩体结构近景采集、裂隙网络生成、复杂岩体合成、岩体尺寸效应测试、高精度数值计算于一体的岩体损伤数字化分析方法，见图 2，经检测，重构误差小于 10%，计算精度提高 50%，实现了复杂岩体结构空间展布特征的真实再现和大尺度岩体工程的高精度数值计算。

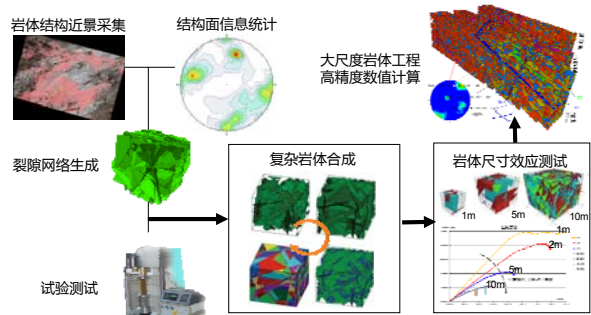


图2 岩体损伤数字化分析

经检测，重构误差小于 10%，计算精度提高 50%，实现了复杂岩体结构空间展布特征的真实再现和大尺度岩体工程的高精度数值计算。

3、发明了工程损伤岩体力学性能检测与评价方法，实现了损伤岩体真实力学性能的定量评价

发明了损伤实时监测技术，全过程捕捉岩体响应，并集成高分辨率超声波测试、密集准分布式光纤光栅等诊断信息，构建了损伤原位检测系统，将损伤检测精度提高了 20%~40%；首次发现了钻爆法开挖存在爆炸荷载和地应力高速卸载两个明显激励源，TBM 开挖仅存在地应力瞬态高速卸载的单一激励源，揭示了不同卸荷速率下损伤区形成机理及分区特征；构建了以宏观力学参数劣化度、扩容接近破坏度、全过程力学行为损伤度为主的损伤程度评价体系，见图 3，实现了损伤岩体真实力学性能的定量评价。

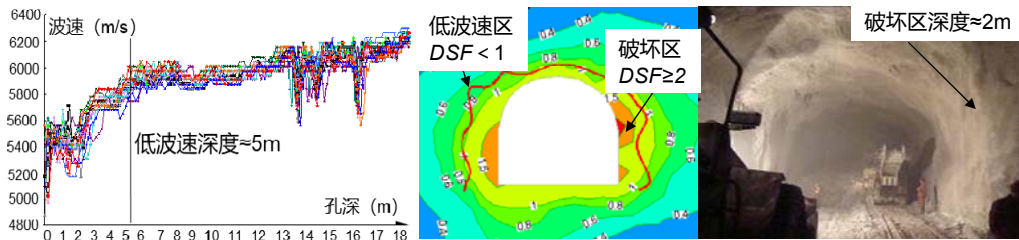


图3 扩容破坏接近度 DSF 现场应用

研究成果授权美国专利 1 项，中国发明专利 19 项，实用新型专利 24 项，软件著作权 8 项，SCI、EI 收录论文 45 篇，纳入 4 部行业规程，出版专著 5 部，实现了工程岩体损伤信息精细化采集-数字化识别-量化评价，成果经鉴定达到国际领先水平，并成功应用于白鹤滩水电站、锦屏二级水电站、杨房沟水电站等多个国家重大工程建设，确保了人员和工程安全，并推广应用于水利、矿山、交通等多个工程领域，取得了显著的经济社会效益，有力推动了我国岩土工程防灾减灾技术的进步。

长距离调水工程关键测量技术及数据管理平台

完成单位：长江空间信息技术工程有限公司（武汉）

长江勘测规划设计研究有限责任公司

主要完成人：杨爱明 严建国 马能武 郑 敏 姜本海 张 辛 周 翔 李双平
马 瑞 张 力 郭祚界 钟 良 甘 拯 吴 瑕 谢明霞

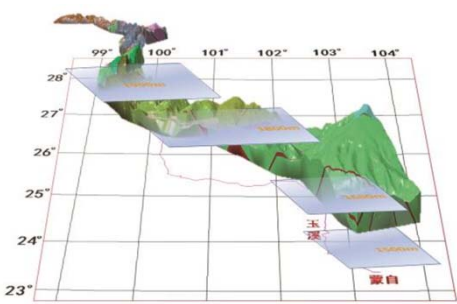
水资源短缺且时空分布不均是我国水资源开发利用面临的难题，兴建调水工程是破解这一难题的有效举措。长距离调水工程的空间跨度长、平面测量投影变形大、引水高程精度控制难；在穿越特殊岩土工程渠道，特别是膨胀土渠道时变形量大、常规监测设备超量程且易破损，膨胀土渠道结构条件限制下自动化监测困难。另外，长距离调水工程的测量工作点多面广，要实现海量数据的统一管理和“一张图”可视化运用，传统的管理方式难以胜任。本项目依托南水北调中线和滇中引水工程的建设与运行，建立了长距离调水工程高精度工程测量理论方法体系，研制了长距离调水工程膨胀土变形监测专用设备，开发了方舟三维地理信息软件平台，总体上形成了理论方法、仪器设备、系统软件三方面有机结合的一整套适用于长距离调水工程的技术发明成果。

1、建立了高精度的长距离调水工程测量理论方法体系

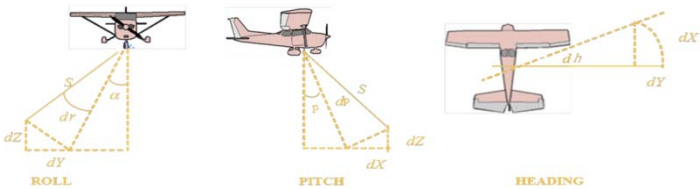
针对长距离调水工程测量控制系统的建立需求，创新性地提出了“窄分带投影方式”和“适应高程变化的投影补偿方法”，构建出高精度的干线控制网，将超长线路中的局部投影变形量减小了一个数量级；并基于高程归化模型，提出了多投影面变形控制方法，数倍地提高了投影补偿效率。总体上能为长距离调水工程建立精确的测量控制系统。

发明了 LiDAR 点云和高分辨率影像联合定位方法，利用机载 LiDAR 设备高速获取激光点云数据并提取其中的高程信息，再

使用高程信息对高分辨率影像的多片前方交会的平差结果进行高程约束，从而能快速获取像点的高精度空间坐标，大量减少长距离调水工程航空遥感外业控制和联测的工作量。



长距离调水工程控制网框架



LiDAR 点云和高分辨率影像联合定位方法

2、研制了长距离调水工程膨胀土变形监测的系列设备

发明了变位式分层沉降系统和水平双向变形监测系统,解决了大量程、自动化、变位式测量的膨胀土渠基分层监测和渠坡水平测线上各测点变形监测技术难题;创新研制了填筑土体测斜管安装保护装置、多种监测设施孔口通用保护装置等多项设备和施工工艺,解决长距离调水工程变形监测实施中的设备安装、保护等问题。

首次全面研究了膨胀土渠道施工措施及变形影响因素,提出了膨胀土渠道全链条安全监测技术体系,构建了“点、线、面”相结合的膨胀土渠道立体安全监测方案。

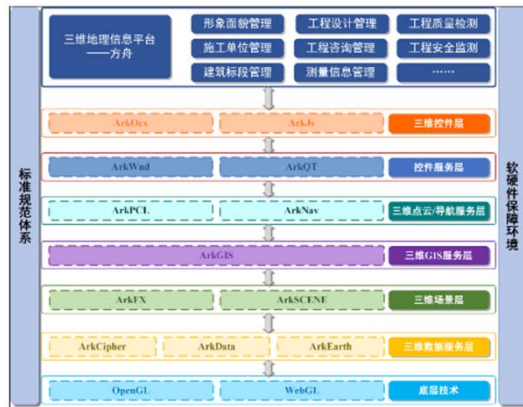


3、研发了长距离调水工程三维地理信息系统软件

自主研发了方舟（3D GIS-Ark）三维地理信息平台，形成了长距离调水工程测量服务系统，能实现工程的形象面貌管理、施工单位管理、建筑标段管理；并能对工程设计、咨询和测量信息进行集成管理，对工程的质量和安 全等多方面进行监测。

该平台研发了地形地貌的自动识别和可视化编辑方法，实现了渠道模型与地形地貌无缝结合，构建了地上地下、室内室外一体化的三维虚拟可视化场景；研发了支持海量空间数据的 3D 漫游碰撞检测算法，通过自适应调整虚拟碰撞检测球半径，满足了长线调水工程复杂三维场景中高效漫游碰撞检测的需求；研发了 3D GIS 与 BIM 数据集成和数据化简方法，实现了长距离调水工程建筑物隐蔽设施安全检测方法，解决了工程自动化安全检测难的问题。

项目成果达到国际领先水平，已成功应用于南水北调中线的建设运行、滇中引水的勘察设计施工；已推广应用于尼家拉瓜运河、小浪底工程、城市地铁等项目的建设，带来的直接和间接经济效益达约 11 亿元。该项目的研究实施对众多水利工程的施工、监测、管理等都有重要的意义，并能为其它领域长距离工程的测量工作提供理论借鉴和技术支撑。



方舟三维地理信息软件平台框架