

DOI: 10.11779/CJGE202207002

“十三五”国家重点研发计划项目

长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用

杨启贵¹, 张传健¹, 颜天佑², 刘琪², 李建贺²

(1. 长江设计集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 基于国家跨区域调水工程建设重大需求和相关学科国内外最新研究发展, 以滇中引水、引汉济渭、新疆大埋深隧洞等典型调水工程为依托, 针对“大埋深隧洞开挖围岩响应模式与灾变机制”、“大埋深隧洞围岩-支护体系协同承载机理与全寿命设计理论”、“地震等自然灾害下水建筑物的响应特征及灾变模式”等重大科学问题, 以及“大埋深隧洞灾害预测预报与防治成套技术”、“隧洞穿越活断层抗断技术”、“大跨度高架渡槽抗震技术”、“闸泵阀关键设备研发及智能控制技术”、“调水工程全寿命周期安全监控与调控技术”等关键技术, 开展了包括“大埋深隧洞岩体工程特性测试技术与综合评价方法”在内的 10 个方面的研究。提出了千米级深埋隧洞的地球物理探测及岩体特性测试技术与围岩特性评价方法, 形成了隧洞高压突涌水预测与防治成套技术, 开发了 15 MPa 超高压灌浆技术装备, 提出了隧洞穿越错动量达 0.5 m 活断层抗断结构, 研发了Ⅷ度强震区大型高架渡槽的抗震技术, 并研制完成了 220 m 扬程 40 MW 级泵组、DN2000 智能流量调节阀安全控制成套技术, 形成了长距离调水工程建设及安全运行成套技术装备。项目相关研究成果已在依托工程中示范应用, 为工程建设运行提供了坚实的技术支撑, 同时有助于推动长距离调水及相关工程领域的技术进步, 保障中国水资源宏观调控战略的有效实施, 具有显著的社会、经济和生态效益。

关键词: 长距离调水工程; 大埋深隧洞; 围岩-支护体系; 不良地质; 智能仿真; 高架渡槽; 闸泵阀系统; 运行保障

中图分类号: TV68

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)07-1188-23

作者简介: 杨启贵(1964—), 男, 正高级工程师, 全国工程勘测设计大师, 长江设计集团有限公司党委委员、副总经理, 水利部首批 5151 人才工程部级专家、国家百千万人才工程国家级人选、有突出贡献中青年专家, 全国抗震救灾模范, 全国创新争先奖获得者, 获水利部第三届“最美水利人”荣誉称号, 享受国务院政府特殊津贴, 兼任中国岩石力学与工程学会常务理事、湖北省灾害防御协会副会长等。先后承担了葛洲坝、隔河岩、三峡、水布垭、引大济湟等 40 余项大中型工程的设计工作, 目前负责滇中引水工程等西部高原地区复杂地质环境水工隧洞的设计研究工作, 在水工结构、岩土工程、病险工程治理设计等领域取得丰硕成果。负责或参与重大科研项目 30 余项, 获国家科技进步二等奖 2 项(分别排名第 1, 第 2), 省部级奖 20 余项, 授权专利 50 余项, 主编专著 9 部, 主(参)编标准 8 部, 发表论文 80 余篇, 主持完成了国家重点研发计划项目“长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用”。E-mail: yangqigui@cjwsjy.com.cn。



Integrated research and application of construction and safe operation of long-distance water transfer projects

YANG Qi-gui¹, ZHANG Chuan-jian¹, YAN Tian-you², LIU Qi², LI Jian-he²

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: According to the major needs of the national inter-basin water transfer projects in China and the worldwide research situations of related disciplines, the research program focuses on the integrated research and application of construction and safe operation of long-distance water transfer projects. Based on the typical water transfer projects such as the water diversion project in central Yunnan, the water diversion project from Hanjiang River to Weihe River and the tunnel project with large buried depth in Xinjiang. The researches on ten aspects including “Testing technology and comprehensive evaluation method for rock mass characteristics of tunnels with large

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0401800)

收稿日期: 2022-03-05

buried depth” are conducted, aiming at the significant scientific issues such as “response mode and disaster mechanism of excavation of surrounding rock of large buried tunnels”, “coordinated bearing mechanism and life-cycle design theory of surrounding rock-support system of large buried tunnels” and “response characteristics and disaster mode of water conveyance buildings under natural disasters such as earthquakes”, and the following key technologies: “complete set of disaster prediction and prevention technology of large buried tunnels”, “fracture resistance technology of tunnel lining crossing active faults”, “seismic mitigation technology of long-span high-rise aqueduct”, “development and intelligent control technology of key equipments of gates, pumps and valves”, and “life cycle safety monitoring and regulation technology of water transfer projects”. The geophysical detection, the testing technology of rock mass characteristic and the evaluation method for characteristics of surrounding rock of deep buried tunnels are put forward. A complete set of technology for the prediction and prevention of high-pressure water inrush in tunnels is formed. A 15 MPa ultra-high pressure grouting technical equipment is developed. The anti-fracture structure of the tunnel crossing an active fault with a displacement of 0.5 m is put forward. A large-scale high-pressure grouting structure in the VIII-degree strong earthquake area is developed. The seismic mitigation technology of aqueduct and the complete set of safety control technology of 220 m-lift and 40 MW-grade-power pump unit and DN2000 intelligent flow-control valve are developed and completed. The relevant research results are applied in some projects, and satisfactory benefits are achieved.

Key words: long-distance water transfer project; deep buried tunnel; surrounding rock-support system; unfavorable geology; intelligent simulation; high-rise aqueduct; sluice-pump-valve system; operation guarantee

0 引 言

建设长距离、跨流域调水工程是解决中国水资源分布与社会经济发展需求不匹配,提升国家重大战略水资源保障能力的重要措施。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》将“水资源优化配置与综合开发利用”列为重点领域及其优先主题,而“十三五”国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项2016年第一批项目申报指南也设立了“重大水利工程建设与安全运行”方向。

国家重点研发计划项目“长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用”(项目编号:2016YFC0401800)于2016年7月正式获批立项。该项目牵头承担单位为长江勘测规划设计研究有限责任公司,负责人为杨启贵正高级工程师,由来自科研机构、高校、设计、施工、装备制造、建设及运行管理等19家不同的专业化单位的高水平精干力量组成研究团队。项目围绕中国长距离调水工程面临的隧洞深埋超千米、单洞长度百千米级、隧洞穿活动断裂、VIII度地震区高架渡槽、220 m扬程40 MW级大流量高扬程泵组、DN2000智能流量调节阀等世界前沿难题开展科研攻关,在大埋深隧洞开挖围岩响应模式与灾变机制、大埋深隧洞围岩-支护体系协同承载机理与全寿命设计理论、地震等自然灾害下输水建筑物的响应特征及灾变模式等重大科学问题,以及大埋深隧洞灾害预测预报与防治成套技术、隧洞穿活断层抗断技术、大跨度高架渡槽抗震技术、闸泵阀关键设备研发及智能控制技术、调水工程全寿命周期安全监控与调控技术等关键技术问题方面取得了多项创新突破,有力地

推动了长距离调水及相关工程领域的技术进步,保障了中国水资源宏观调控战略的有效实施。本文就项目的研究背景、研究内容、主要创新成果,以及成果的应用情况等作简要介绍。

1 背景及国内外研究现状

国内外已建的调水工程主要以明渠方式输水,局部辅以隧洞,而以大埋深长隧洞为主要载体的调水工程较少。据不完全统计,目前已建的最长的输水隧洞是芬兰的Päijänne隧洞,单洞长120 km,最大埋深130 m;国外埋深最大的是非洲lesotho隧洞,单洞长45 km,最大埋深1200 m。中国在大型调水工程输水隧洞建设方面已取得了举世瞩目的成就,相继建成了引滦入津、引大入秦、引碧入连、引黄入晋、引洮供水等跨流域调水工程,未来10年将是中国长距离调水工程输水隧洞建设的高峰期。目前在建和拟建的长距离输水隧洞大多要穿越西部地质构造背景复杂的山岭地区,不仅面临自然环境恶劣、地震烈度高、地形地质条件复杂等不利因素,且输水隧洞单洞长、埋深大,在建工程最长单洞已达283 km,最大埋深2268 m,无论是工程建设难度还是隧洞运营风险都将大大增加,面临更为复杂的科学技术难题。

深埋长隧洞需穿越多个复杂地质单元,由于埋深大、地应力高,常规的地球物理勘探手段、岩体试验技术及围岩分类方法等均存在较大的局限性^[1]。近年来,国内在大埋深隧洞的勘察手段和试验技术方面已有一定的发展,如采用音频大地电磁测深法对深部异常地质体进行探测,高围压加卸载现场岩体试验设备

的研制等,但基于千米级深钻孔的岩体特性评价与地应力测试技术、基于TBM施工的深埋隧洞围岩分类方法等还有待于研究^[2-4]。

围岩大变形和岩爆是大埋深隧洞建设中时常遇到的施工地质灾害,目前还缺乏行之有效的预测方法与灾变防控技术^[5-6]。近年来微震监测技术的发展为岩爆预测提供了新的手段。采用先进的测试手段和数值模拟方法开展隧洞围岩大变形和岩爆孕灾机制研究,据此构建合理的预测预报方法,研发适应于围岩变形破坏模式的新型锚固支护技术是未来发展的趋势^[7-8]。

穿越活动断层的衬砌结构型式选择与抗断措施是隧洞设计中的难点问题,目前国内外对活动断裂的形变场和应力场演变特征及规律认识不清,亟待开展隧洞穿越活断层的应对措施和设计方法研究^[9-10]。高外水压力的确定及地下水作用下隧洞围岩-支护体系的长期安全控制是大埋深隧洞设计的又一难点,最新研究主要集中在外水压力折减系数的修正、岩体多场耦合分析理论等方面,针对复杂环境及荷载长期作用下隧洞围岩-支护结构体系协同承载机制和大埋深隧洞设计理论方面的研究还十分匮乏,构建大埋深隧洞围岩-支护体系的全寿命设计方法是隧洞建设的迫切需要^[11-12]。

高压突涌水等不良地质的超前预报及TBM穿越富水和复杂地层的灾害控制一直是困扰深埋长隧洞施工的技术难题,目前国内外隧道超前预报在含水构造的定量预报、中小构造识别定位等方面的研究尚处于初步阶段^[13]。研究不良地质体的准确定量探测方法及其诱发灾害的快速处治技术、实现TBM卡机的有效防控等是未来深埋长隧洞施工的发展方向;此外,大埋深长距离隧洞建设过程受多种复杂风险因素综合作用,开展多风险因素耦合作用下大埋深长距离隧洞施工智能仿真与信息集成技术研究也是未来的热点^[14]。

输水渡槽是长距离调水工程的重要结构型式之一,穿越深山峡谷的大型高架渡槽具有高墩大跨的特点,对结构抗震安全十分不利,这方面的理论成果和抗震措施还十分匮乏,针对强震作用下大跨度高架渡槽抗震安全问题的研究亟待开展^[15]。闸泵阀是长距离输水系统中重要的水力控制设备,研发高扬程大流量超大功率泵组、自适应智能阀门以及闸泵阀系统的安全控制技术是适应大型调水工程建设与运行需求的发展方向^[16-17]。

国内外在长距离调水工程的安全监控和应急处置等方面的研究尚处于起步阶段,复杂调水工程全寿命周期的监测技术及预警指标体系、工程风险评估与调控技术、工程长效安全运行应急处置技术,以及复杂输水渠隧系统的水力调控技术等均是长距离调水工程亟需解决的关键技术问题^[18-19]。

2 研究目标、内容及关键科学问题

2.1 研究目标及内容

项目针对长距离调水工程建设及安全运行的需求,以滇中引水、引汉济渭、新疆大埋深隧洞等典型调水工程为依托,重点研究大埋深隧洞围岩大变形和岩爆孕灾机理、不同断层活动模式下隧洞-衬砌结构变形破坏规律、应力-渗流耦合作用下围岩-支护体系协同承载机制,以及强震作用下大型高架渡槽的动力响应等关键科学问题,揭示复杂条件下输水隧洞和高架渡槽的响应模式与灾变机制,提出大埋深隧洞全寿命设计理论。研发适用于大埋深隧洞围岩特性的测试技术、灾害预测预报与防控技术、隧洞穿越活断层抗断技术、高架大型输水渡槽抗震技术、闸泵阀关键设备及智能控制、调水工程全寿命周期安全监控与调控等关键技术,形成大埋深长距离调水工程建设及安全运行成套技术装备,在典型工程中示范应用。

项目下设10个课题,课题名称及承担单位、负责人情况如表1所示。其中,课题1~6以输水隧洞相关关键技术为研究对象,课题7研究高地震烈度区高架大型输水渡槽的抗震安全问题,课题8研究长距离调水工程闸泵阀系统的关键设备及安全控制,课题9围绕长距离复杂调水工程长效安全运行保障方面的问题,课题10重点研究长距离输水工程运行调度方面的问题。

表1 课题设置

Table 1 Setting of tasks

序号	课题名称	承担单位	负责人
1	大埋深隧洞岩体工程特性测试技术与综合评价方法	水利部水利水电规划设计总院	王志强
2	大埋深隧洞围岩大变形及岩爆预测与防控技术	长江水利委员会长江科学院	丁秀丽
3	隧洞穿越活断层围岩-衬砌灾变机制与抗断技术	中国长江三峡集团公司	吴海斌
4	大埋深隧洞围岩-支护体系协同承载机理与全寿命设计理论及方法	长江勘测规划设计研究有限责任公司	杨启贵
5	高压水害等不良地质条件下深埋长隧洞施工灾害处治和成套技术研究	水利部水利水电规划设计总院	刘志明
6	大埋深长距离隧洞建设智能仿真与建设信息集成技术	天津大学	王晓玲
7	高烈度区高架大型输水渡槽抗震及减隔震关键技术研究	中国水利水电科学研究院	王海波
8	长距离调水工程闸泵阀系统关键设备与安全运行集成研究及应用	中国水利水电科学研究院	殷峻暹
9	长距离复杂调水工程长效安全运行保障技术与示范	南京水利科学研究所	何勇军
10	长距离输水渠隧系统水力特性及安全高效调控关键技术研究	长江勘测规划设计研究有限责任公司	黄会勇

2.2 关键科学技术问题

根据国家跨流域调水工程重大需求、相关学科国际学术前沿以及国内外研究现状, 本项目紧密围绕长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用问题, 从问题的多学科交叉的视角, 凝练出需解决的 3 个重大科学问题和 5 个关键技术问题。

(1) 重大科学问题: ①大埋深隧洞开挖围岩响应模式与灾变机制; ②大埋深隧洞围岩-支护体系协同承载机理与全寿命设计理论; ③地震等自然灾害下输水建筑物的响应特征及灾变模式。

(2) 关键技术: ①大埋深隧洞灾害预测预报与防治成套技术; ②隧洞穿越活断层抗断技术; ③大跨度高架渡槽抗震技术; ④闸泵阀关键设备研发及智能控制技术; ⑤调水工程全寿命周期安全监控与调控技术。

3 主要创新成果

3.1 千米级深埋隧洞勘测技术

(1) 适用于千米级欠稳定钻孔的绳索取芯钻杆水压致裂地应力测试方法和设备

水压致裂法是目前深孔地应力测试的主要方法, 是学术界研究及工程应用中的重要测试方法。传统的采用绳索取芯钻进工艺的深孔水压致裂地应力测试技术, 存在水量需求大、欠稳定地层作业风险高、推拉力控制难、易产生高压软管孔内打结以及钻杆系统耐高压性能差等问题, 千米级欠稳定钻孔条件下综合实施难度较大。

如图 1 所示, 本项目改进传统技术, 采用绳索取芯钻杆内置式双回路高压软管水压致裂地应力测试方法^[20], 通过管路卡子和特制钻杆接头实现管路在钻杆内的固定。进行试验时, 首先将变接头、封隔器、连接油管等联接, 起吊后放进孔内并利用钻杆卡座放置在孔口; 随后将双管软管固定在下一根连接钻杆中从顶端固定, 依次连接双管软管和钻杆至放到指定孔深开展地应力测试。待试验完成后, 逆向进行前述工序即可回收试验设备。当钻孔水位过低且仍采用液体座封时, 封隔器的内外压力差过大会导致封隔器无法收缩, 进而导致钻杆无法提升等严重事故。对此, 研发了气体座封技术, 其采用瓶装高压氮气作为压力源, 压力源之后增设气体控制装置, 封隔器试验压力大于 7 MPa。

千米级欠稳定地层绳索取心钻杆地应力测试技术^[21]具有以下优点: ①采用双回路测试, 测量可靠性高; ②气体座封技术可适应孔内低水位条件测试; ③施作过程不改换钻杆, 对于欠稳定地层的地应力测试安全具有重要意义; ④节省了钻杆密封的试验时间和

调换钻杆的经费等。该技术通过滇中引水 10 余个钻孔的应用和改进, 已发展成为成熟实用技术。

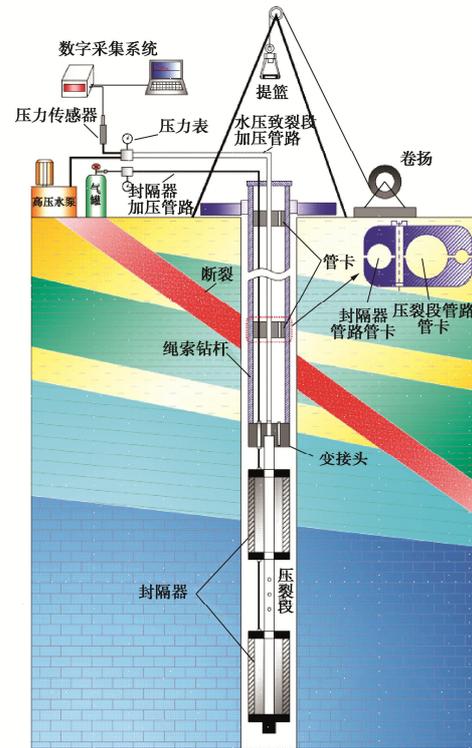


图 1 千米级欠稳定地层绳索取芯钻杆地应力测试技术示意图

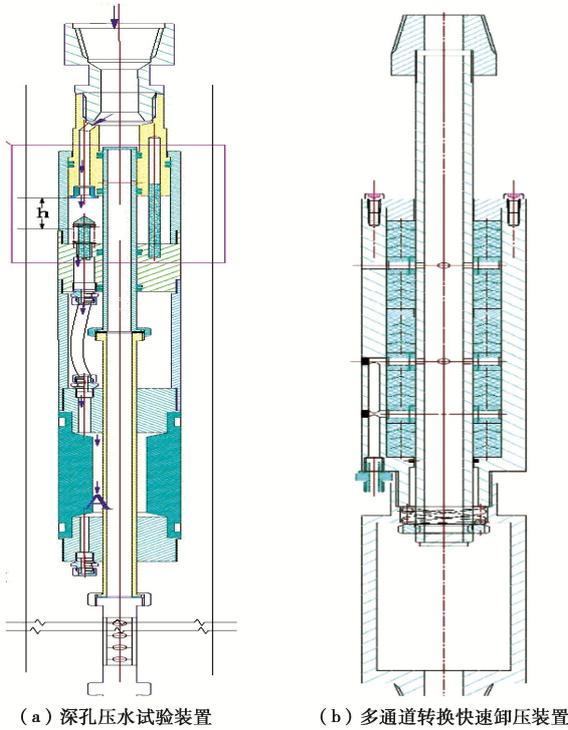
Fig. 1 Schematic diagram of in-situ stress testing technology of rope cored drill pipe in kilometer-class unstable formation

(2) 千米级深孔岩体水文地质参数原位测试技术及设备

钻孔压水试验是一种在钻孔内进行的岩体原位渗透试验, 主要任务是测定岩体的透水性, 为评价岩体的渗透特性提供基本资料。水压式栓塞较其他类型栓塞可靠、灵活, 但深孔压水试验需配备一套单独的高压充水泵、以及全孔深的高压供水管路, 压水试验过程很难一直保持密封状态, 且栓塞水压软胶管与钻杆极易发生缠绕现象, 下入和起出试验器时需进行捆扎固定和拆分, 操作繁琐和费时, 同时也存在试验结束后排水卸压难题, 极易造成胶囊卡孔事故, 甚至导致整孔报废。鉴于此, 研制了深孔压水试验装置^[22] (图 2 (a)) 和钻孔压水试验多通道转换快速卸压装置^[23] (图 2 (b)), 实现了千米级埋深钻孔岩体高压压水试验。

深孔压水试验装置包括变径接头、活塞组件、单向阀组件和栓塞胶囊体, 通过两条独立且可适时打开或封闭、适时转换的水流通道, 操作单向阀功能实现高压水充胀栓塞、充塞水道封闭、单向止流密封、快速可靠卸压; 钻孔压水试验多通道转换快速卸压装置主要包括芯管、芯管套、下芯管孔和上芯管孔以及胶

囊通道的排水孔和进出水孔，通过上下运动芯管，使芯管上芯管孔、下芯管孔与胶囊通道孔相互配合进行多通道转换，实现胶囊充水封隔试验段、试验压水和胶囊快速排水卸压。



(a) 深孔压水试验装置 (b) 多通道转换快速卸压装置

图2 新型深孔岩体水文地质参数原位测试设备

Fig. 2 New in-situ testing equipments for hydrogeological parameters of deep-hole rock mass

两种压水试验装置及相关技术通过独立且可适时打开或封闭、适时转换的水流通道，实现高压水充胀栓塞封隔试验段，试验结束后，能快速排水卸压，解决了深钻孔特别是千米级超深钻孔中地下水埋深大、内外水头高压差条件下止水胶囊卸压困难等高压压水试验技术难题，试验具有操作简单，劳动强度小，减少工序、节约上下钻时间、节约成本等优点，可选

择常规钻具或绳索钻具钻进工艺，适用不同钻孔口径，并可灵活采用单栓塞或双栓塞试验方案，实现了千米级深孔全孔单次多点灵活依次分段压水试验，快速准确获取深部岩体水文地质参数，在大理深隧洞水文地质参数测试技术方面取得了重大突破，已应用于引江补汉工程深孔压水试验，最大实测深度 1001.5 m。

研制了集钻孔电视、电子罗盘、压力传感器于一体的深孔振荡试验设备^[24]，如图 3 所示。该设备不仅能采集到振荡试验条件下钻孔中水位变化与时间的对应关系数据，而且能准确获得钻孔中裂隙发育情况，并自动计算裂隙产状、隙宽等裂隙几何特征。同时，该设备基于裂隙介质水动力学和振荡试验理论，能够快速完成现场测试、数据处理并计算得到裂隙岩体的渗透参数（裂隙渗透系数、当量渗透系数和渗透系数张量），已在滇中引水等多个工程现场开展应用。



图3 深孔振荡试验设备

Fig. 3 Deep-hole oscillation testing equipments

(3) 基于深钻孔数字钻进技术的岩体质量特征指标探测设备及方法

研发了基于深钻孔数字钻进技术的岩体质量特征指标探测设备(图 4)，设备包括高精度数字传感器、自动采集仪以及配套数据分析软件，可监测钻机钻进压力 F 、钻杆转速 N 、钻进扭矩 M 、钻进位移 S ，用

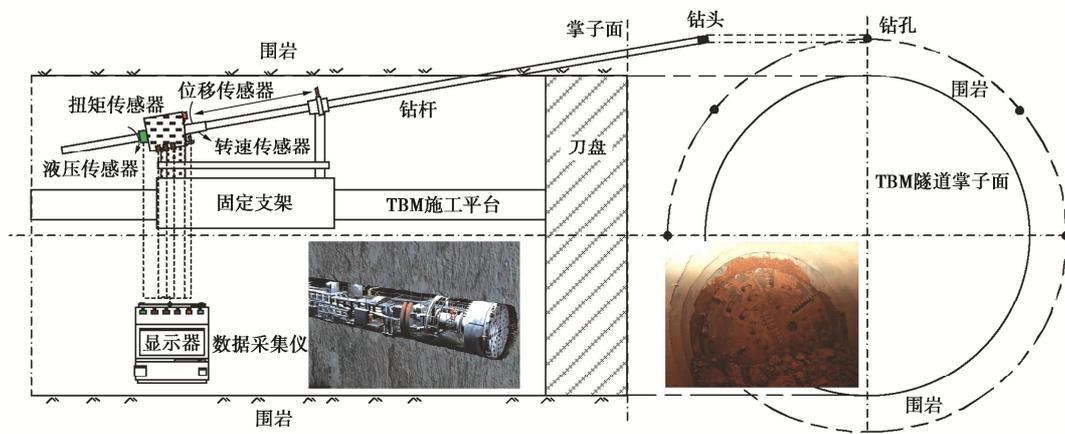


图4 基于深钻孔数字钻进技术的岩体质量探测

Fig. 4 Quality detection of rock mass based on deep-borehole digital drilling technology

于获取岩体质量特征指标。经过大量研究获取了钻头侵入复合岩体破岩响应特征, 建立了数字钻机破岩过程的数学模型, 抽象裂隙、软弱夹层和完整岩石等多种介质中钻进过程, 实现裂隙岩体数字钻进数据蕴藏的有效信息解译^[25]。在此基础上, 提出了基于深钻孔数字钻进技术特定指标, 包括钻进过程指数 (DPI)、钻进切深斜率 (K_{slope}) 和单位体积钻进耗能, 建立了定量评价岩体完整性、岩石单轴抗压强度与磨蚀性的新方法, 已在引松工程成功实践 (图 5)。



图 5 利用深钻孔数字钻进技术在引松工程现场测试

Fig. 5 Application of deep-borehole digital drilling technology in field tests

3.2 深埋隧洞不良地质灾害致灾机理与综合防治

(1) 基于赋存环境条件和地层条件的围岩大变形发生机制

工程实践表明, 围岩大变形发生条件复杂, 影响因素众多。为此, 基于对国内外典型大变形工程案例的分析, 总结了基于不同赋存环境和地层条件组合的 8 种围岩大变形发生机制并划分为 4 种类型围岩大变形, 分别为挤压型、膨胀型、松动型和复合型^[26], 详见表 2 和图 6。

表 2 不同地层条件的大变形发生机制

Table 2 Mechanism of large deformation under different foundation conditions

赋存环境条件	地层条件	大变形发生机制
高地应力及由此引发的强烈卸荷	物性软岩	软岩强度低, 在高地应力作用下发生持续塑性变形
	薄层状岩体	高应力卸荷扰动使与主应力矢量小角度相交的层面张开、层间岩体弯折破裂
地层富水, 或开挖卸荷引发地下水向临空面汇集, 或施工用水排泄不及时渗入围岩	薄层状岩体	层间充填物与地下水作用导致岩体强度持续降低, 诱发局部显著变形并垮塌
	遇水软化岩石	岩石遇水软化导致强度降低, 使得软化部位显著变形
	蚀变岩	蚀变岩强度低, 使得蚀变部位显著变形
弱胶结/无胶结岩体	遇水膨胀岩石	含亲水性矿物岩石遇水后体积膨胀, 导致显著变形
	弱胶结/无胶结岩体	胶结性能差, 开挖扰动诱发地层松动, 粉细砂遇水显著劣化加剧变形
断层破碎带	断层破碎带	岩体完整性差, 开挖卸荷进一步使围岩碎裂化, 导致围岩显著变形坍塌

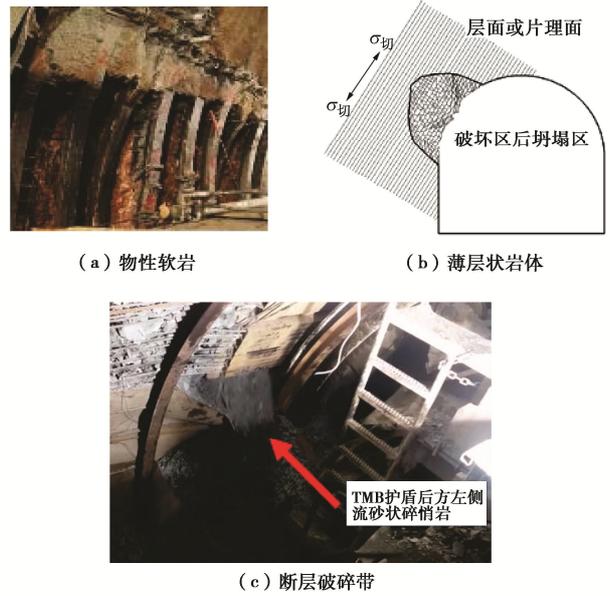


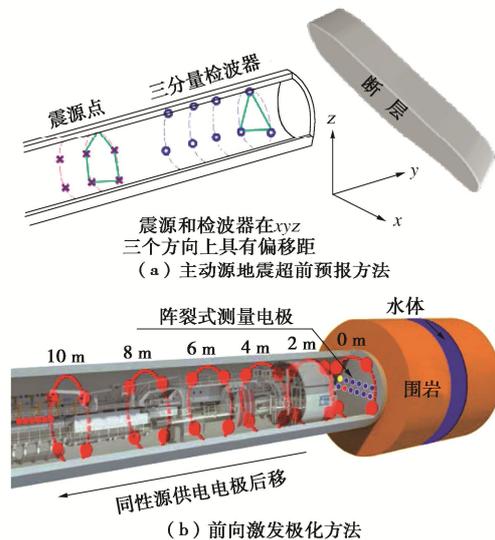
图 6 典型软岩大变形地层条件

Fig. 6 Formation conditions of typical soft rock with large deformation

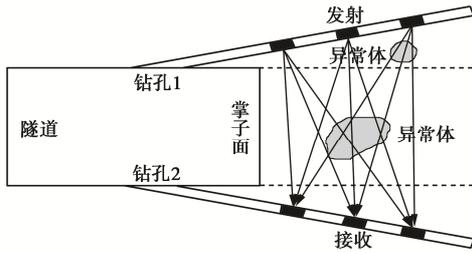
(2) 大埋深隧洞灾害预测预报与防治成套技术 a) 不良地质体

如图 7 所示, 针对大埋深隧洞施工过程中可能遭遇的断层破碎带、岩溶、导水通道等灾害源超前探测的难题, 项目研究发展和完善了大埋深隧洞不良地质超前定量探测方法。

对于隧洞主动源地震超前预报方法, 通过对波束向前定向、定位成像计算、TBM 搭载等方面的改进, 可实现掌子面前方 100 m 内断层破碎带等致灾构造定位与成像^[27-30]; 对于前向激发极化探水与阵列雷达方法, 重点开展 TBM 抗干扰方法、适应性更强的水量估算方法、亚米级钻孔激发极化方法以及对边界刻画能力更强的阵列式雷达方法研究, 实现了掌子面前方 30 m 内灾害水源定位; 对于跨孔雷达精细探测方法, 研究提出钻孔雷达逆时偏移成像与全波反演成像方法, 实现了孔间区域内溶洞、导水裂隙的准确成像。



(b) 前向激发极化方法



(c) 跨孔雷达精细探测方法

图7 大埋深隧洞不良地质超前定量探测方法

Fig. 7 Advance quantitative detection method for unfavorable geology in large buried tunnel

项目研究实现了TBM搭载地震-激电超前预报技术装备(图8),并提出了震-电信息约束联合反演方法,实现了震-电信息融合,提高了灾害源定位与成像准确性;开发了隧洞岩体地质大数据虚拟展示系统(图9),实现了岩体与不良地质的定量化和可视化表达。

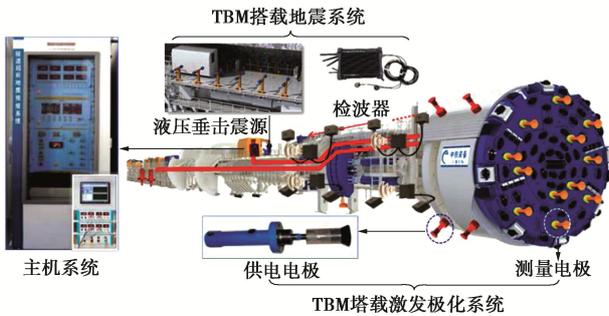


图8 TBM 搭载的联合超前探测系统

Fig. 8 Joint advance detection system carried by TBM



图9 隧洞岩体地质虚拟展示系统

Fig. 9 Virtual display system of rock mass geology of tunnel

b) 高压超前预注浆新设备及新工艺

深埋隧洞超前钻探或超前注浆钻孔过程中,若钻至高压富水层,高压水会沿着钻杆喷射而出,对施工设备及人员形成较大的威胁。预注浆施工要求及时封堵,一旦钻杆被顶出后将无法下设注浆管进行处理,故相应的封堵装置及成孔工艺十分重要,然而目前相关技术产品并不成熟。

项目团队针对高压水条件下的安全钻孔、加钻及退钻需求,研制形成了一种高承压水地层中安全钻进(图10)与孔口封闭止浆装置、15 MPa超高压灌浆泵(图11)以及配套的施工工艺(图12)。其中,防高压水钻孔孔口封闭装置通过前段孔口管内设置的膨胀密封塞与密封圈共同作用抵御高压水推力。改进研制了15 MPa超高压灌浆泵设备,现场测试试验结果表明“15 MPa压力条件下压力、流量可长时间保持平稳;灌浆泵可用于隧洞超前超高压预注浆”。研发的高压单孔劈裂循环注浆工艺,适用于可灌性差地层,具有“成拱稳定,劈裂止水”作用^[31]。



(a) 机械式

(b) 液压式

图10 防高压水钻孔孔口封闭装置

Fig. 10 Sealing devices for anti-high-pressure water drilling hole orifice

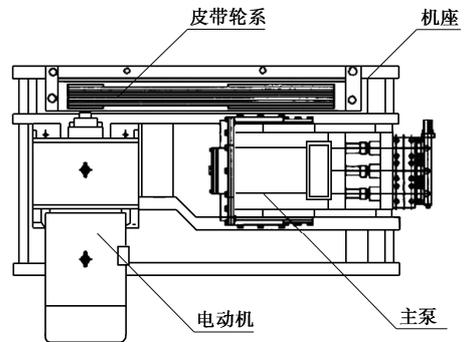


图11 15 MPa超高压灌浆泵结构图

Fig. 11 Structural drawing of 15 MPa ultra-high pressure grouting pump

c) 高压超前预注浆新材料、新技术

在超前预注浆应用中,现有的灌浆材料存在以下需解决的问题:①以水泥基灌浆材料为代表的经济型灌浆材料,对直径小于0.1~0.2 mm的孔隙、裂缝难以灌注,可灌性有待提高;②化学灌浆价格较贵且污染环境;③纯水泥浆易于析水、分层、沉淀;④水泥-水玻璃浆液固结体耐久性较差。本项目研发团队基于已有研究基础,进一步开发了快速封堵灌浆浆液与适宜于超前预灌浆的经济型浆液(图13),并对不同浆液特性进行了分析研究,提出了灌浆浆液选取参考

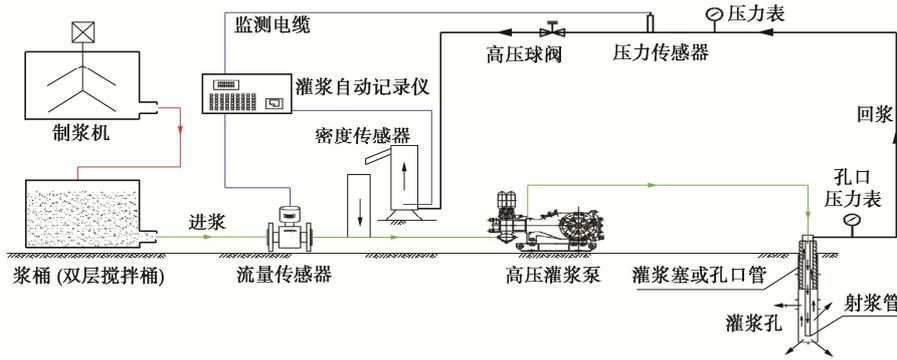


图 12 高压单孔劈裂循环注浆工艺

Fig. 12 High-pressure single-hole splitting circulation grouting technology

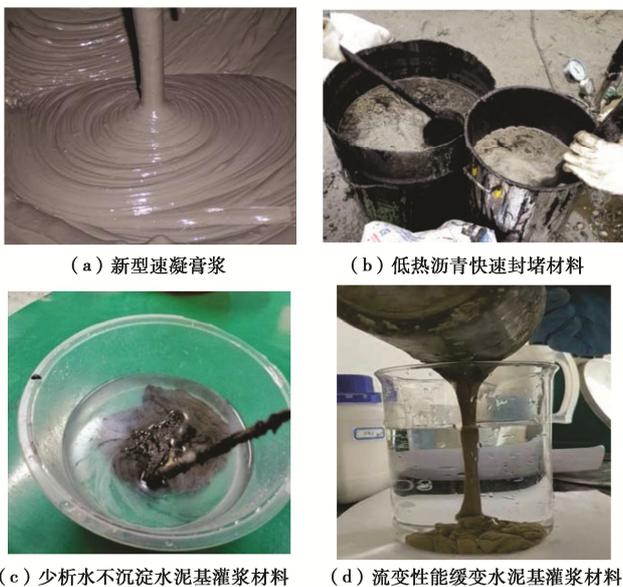


图 13 超前预注浆新材料

Fig. 13 Advanced pre-grouting new materials

方法^[32-34]。同时, 提出了隧洞预注浆动态设计理念和“限量排放、限时封堵”的双限设计思路及施工方案, 允许围岩出现一定程度的可控渗水, 待开挖洞段通过后, 再采用封堵措施进行灌浆处理。

(3) 断层活动下隧洞围岩 - 衬砌结构响应特征及分析方法

受选线限制, 长大输水隧洞往往接近或跨越地震活动断裂带, 受到严重的活断裂错动威胁。断层错动下围岩 - 衬砌结构响应特征将是隧洞抗错断研究中的重要基础。

围绕这一关键问题, 首先开展了断层位错不同力学表征模型的研究, 探讨了隧洞 - 围岩体系中不同错断位移模式的施加理论与方法^[35], 基于不均匀沉降两端固支梁挠曲线假定, 提出了一种 S 型错动位移模式。研究揭示了活动断裂不同错断位移模型对隧洞衬砌的变形、弯矩、轴力、剪力的影响机制。

研究结合试验与精细数值分析手段, 建立了隧洞围岩 - 衬砌结构响应分析方法。如图 14 所示, 基于三维

离散 - 连续耦合的跨断层隧洞错动破坏数值仿真方法, 分析了不同断层模式下围岩 - 衬砌体系响应规律^[36]。如图 15 所示, 研制了走滑断层作用下隧洞模型试验装置, 该装置中可基于粒子图像测速技术 (PIV) 技术研究错断位移分布特征、可实时观测隧洞衬砌内部破坏发展全过程。利用试验结果标定离散 - 连续耦合模型, 开展隧洞在活断层错断条件下响应与抗断技术的综合研究。开展了走滑错断下衬砌变形破坏规律的试验研究^[37], 剖析了断层带倾向、倾角、宽度、材料参数等因素对隧洞变形破坏特征的影响机理。研究表明: 浅埋深、破碎围岩中的隧洞更易发生侧向挤压破坏, 而深埋硬岩隧洞更易发生剪切破坏; 衬砌厚度、模量等设计参数较难改变隧洞的变形特征, 但可以较好地改善受力特征, 并限制错断过程中破坏范围。

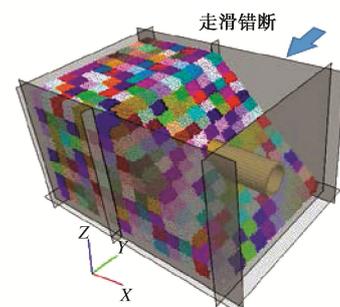


图 14 三维离散-连续耦合的跨断层隧洞错动破坏数值仿真方法

Fig. 14 Three-dimensional discrete continuous coupling numerical simulation method for staggered failure of tunnel crossing faults

(4) 隧洞穿越活断层抗断技术

在隧洞穿越活断层技术方面, 以滇中引水香炉山隧洞为背景工程, 通过小尺度物理模型试验 (图 16) 结合数值计算的方法, 对断层错动模拟过程中的隧洞上覆围岩破裂形态、衬砌破坏形态和裂纹发展、应变分布特征等关键响应特征开展分析, 深入地研究了走滑断层错动影响下跨活断层交接隧洞的破坏形式及破坏机制^[38]。

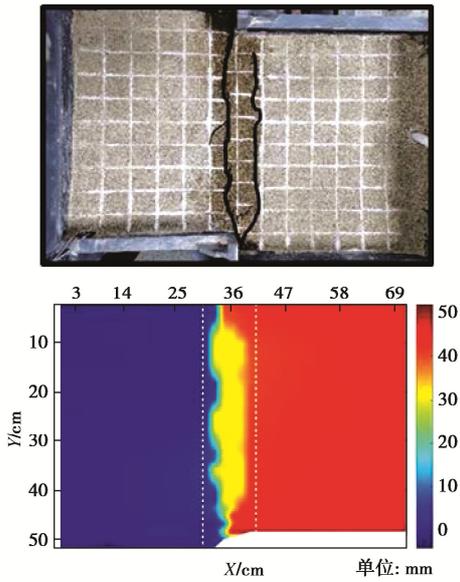


图 15 隧洞错断模型试验与断裂带位移分布 PIV 监测
Fig. 15 Model tests on tunnel faults and PIV monitoring of displacement distribution in fault zone



图 16 铰接隧洞变形
Fig. 16 Deformations of articulated tunnel

对于铰接隧洞抗错断设计参数，详细研究了衬砌节段长度、衬砌厚度、隧洞直径、隧洞轴线与断层带夹角、隧洞断面形式，衬砌材料力学特性等因素对铰接设计隧洞抗断性能的影响^[39]。为寻求合理的铰接设计设防长度，在抗错断效果与造价经济性之间取得平衡，基于正交试验设计，系统讨论了铰接设防手段中各设计参数的效应，取得了最优铰接设计参数组合以及综合断层错断模式、衬砌-围岩接触参数取值、隧洞衬砌错断力学特性响应研究成果，提出了易于应用的衬砌铰接设计参数估算方法。

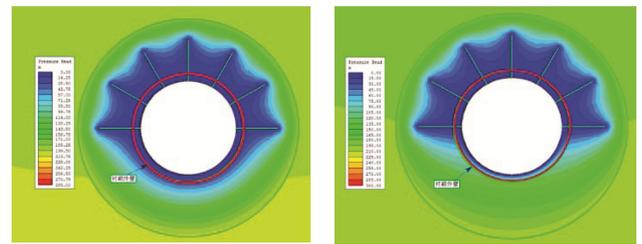
根据研究成果香炉山隧洞跨活动断层，所需抗错

断设防长度范围为 $(1.12 \sim 2.0)L$ ， L 为隧洞穿越活动断层（含影响带）宽度；最优铰接设计参数组合为“节段长度 6 m，柔性连接段宽度为 0.1 m，弹性模量为 0.5 GPa”。

3.3 隧洞围岩-支护体系协同承载机理与全寿命周期管理

(1) 基于现场监测的衬砌外水压力确定方法和复合衬砌新型减压技术

针对基于规范确定的外水压力折减系数范围变化较大且对排堵水措施考虑不周等因素，以及深埋长大输水隧洞传统排堵水处理后的偏压风险，基于渗流理论推导出了施工期隧洞开挖后围岩渗流场分布的解析解，提出了利用现场监测数据确定远场稳定水头及其半径的方法，为深埋长大隧洞外水压力确定提供了理论依据。在现有复合衬砌结构型式基础上，提出一种在围岩与衬砌中间部位增加汇水层的新型复合衬砌结构型式，可更好地实现“堵水减渗、排水降压、汇水平压”目的，为高外水隧洞渗控处理提供了新手段。如图 17 所示，复合衬砌有无汇水层结构对外水压力分布具有明显的影响。



(a) 衬砌外有汇水层 (b) 衬砌外无汇水层

图 17 汇水层对外水压力分布的影响

Fig. 17 Influence of catchment layer on distribution of external water pressure of lining structure

(2) 围岩-支护体系协同承载机制与安全控制

围岩-支护体系荷载分担比例一直以来是业界难点。《公路隧道设计细则》建议了围岩、初期支护和二次衬砌的荷载分担比例，但支护体系承载比例高，不适用于深埋高地应力隧洞。为此，通过理论分析、真三维地质力学模型试验（图 18）、数值模拟和现场监测研究了围岩-支护体系承载比例及其演化规律，基于安全系数和可靠度分别建立了隧洞围岩-支护体系协同承载的安全控制指标及控制标准，提出了大理深输水隧洞合理支护时机与支护强度的确定方法（图 19），解决了深埋隧洞荷载取值不合理、控制指标与标准欠缺等问题，为滇中引水、引江补汉等深埋隧洞结构设计提供了重要技术支撑。

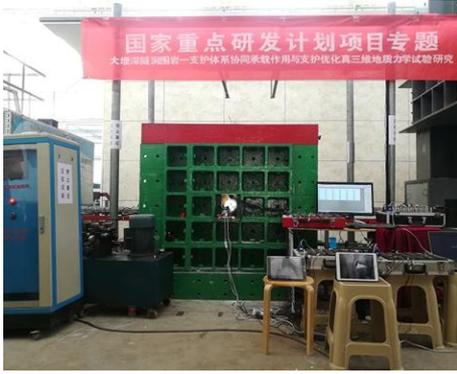


图 18 真三维地质力学试验

Fig. 18 True 3D geomechanical tests

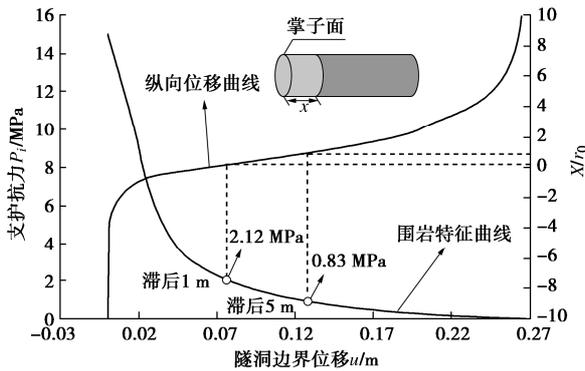


图 19 隧洞支护时机与所需支护强度

Fig. 19 Support time of tunnel and required support strength

(3) 基于时变可靠度的大埋深输水隧洞衬砌结构长期安全设计方法

大埋深输水隧洞工程存在围岩时效变形、衬砌结构老化等时间效应, 而传统的可靠度设计方法多以结构随机变量不随时间改变为前提, 无法将时间效应纳入可靠度评价的范畴。为此, 从衬砌强度衰减角度建立抗力随时间衰减的数学模型以及衬砌承载力极限状态的时变函数模型, 借助时变可靠度的有限元响应面法研究隧洞二次衬砌的可靠度 (β , P_f) 随时间变化的规律 (图 20), 并结合滇中引水工程香炉山隧洞实际, 提出了融合大埋深隧洞施工期支护参数动态设计、围岩-支护体系长期安全控制设计、运行期监测与维护的大埋深输水隧洞全生命周期设计方法^[40]。

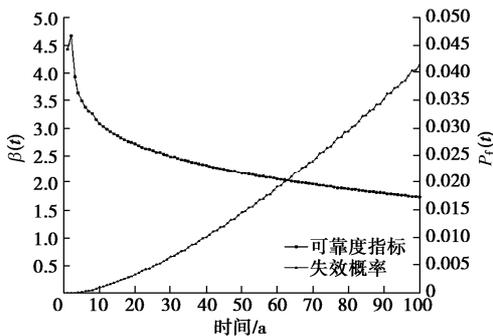


图 20 可靠度指标和失效概率随时间变化规律

Fig. 20 Variation law of reliability index and failure probability with time

(4) 调水工程全寿命周期安全监控与调控技术
 基于典型建筑物的破坏模式和系统动力学分析方法, 综合考虑复杂引调水工程的运行特性, 通过贝叶斯网络与系统动力学方法联合构建了集工程风险评估、险情诊断于一体的评价方法, 提出了长距离复杂引调水工程全寿命期内安全性态演变规律与灾变机理。如图 21 所示, 为该评价方法针对堤防工程所建立的风险反馈模型。依据典型破坏模式及影响因子评价体系两部分内容提出了复杂引调水工程风险分级标准, 建立了险情诊断综合评价方法^[41]。

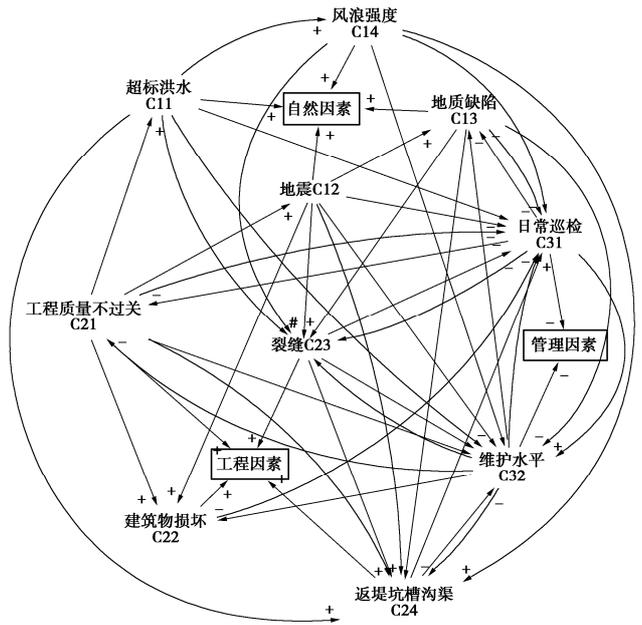


图 21 基于系统动力学的堤防工程风险反馈模型

Fig. 21 Risk feedback model for embankment engineering based on system dynamics

构建了长距离复杂引调水工程安全实时监测及预警智慧管理平台^[42], 针对自然灾害监测预警建立了变化环境下的应急机制和处置方法库, 以应急管理全过程为主线, 提出了涵盖调水工程各生命周期下的自然灾害应急管理评价指标。其通过数据库集成使得建筑物组成、历史险情信息及相关工程影响因子的关联性更加紧密, 将信息统一编码整合, 便于调用。优化工程安全信息, 通过分析传统巡检存在的不足, 构建了智能巡检系统。

3.4 隧洞建设智能仿真与“互联网+”信息集成分析

面向引调水工程安全监控实际需求, 融合安全监测理论与方法, 结合云计算与大数据技术构建了引调水工程智能监控系统, 可实现各类水工建筑物工程安全信息的高效管理、专业分析、安全监控与可靠预警, 其总体架构如图 22 所示。

(1) 多风险因素耦合作用下的大型深埋长距离隧洞施工过程智能仿真模型



图 22 长距离复杂调水工程安全实时监测及预警智慧管理平台系统总体架构

Fig. 22 Overall architecture of safety real-time monitoring and early warning intelligent management platform system for long-distance complex water transfer project

针对现有隧洞施工仿真研究未能全面考虑地质风险、设备风险、技术风险等多源风险耦合作用的不足，建立了地质风险分析的直觉模糊贝叶斯网络，研究了施工机械故障率预测的改进 M5P 方法^[43]，提出了技术风险分析的高斯混合模型及模型求解的 K 均值-EM-BIC 方法，并基于施工通风数值模拟实现了通风参数的优化取值，进而建立了多风险因素耦合作用下隧洞施工分层仿真模型（图 23）。进一步，推导了高斯混合分布的增量更新公式，提出了仿真模型参数自适应更新的增量高斯混合模型，弥补了传统参数更新方法需要假设分布类型，且分布类型在更新过程中保持不变的缺陷^[44]。

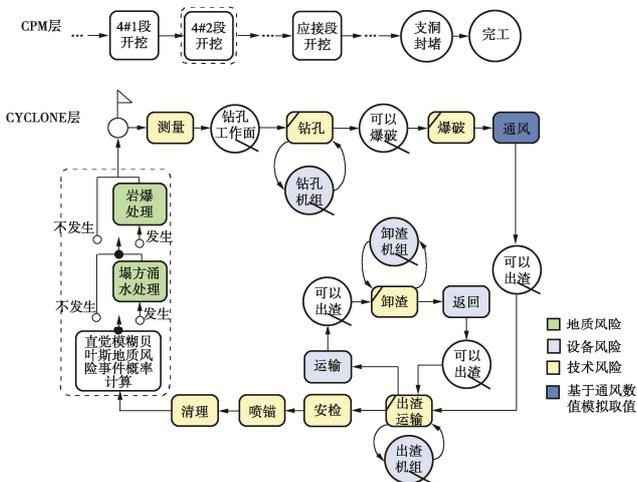


图 23 多风险耦合作用下的施工分层仿真模型

Fig. 23 Layered simulation model for construction under multi-risk coupling

(2) 考虑围岩传热的深埋引水隧洞 TBM 施工通风数值模拟方法

针对深埋引水隧洞 TBM 施工由于隧洞储热作用和围岩散热导致通风降温除尘困难的问题，提出了基于多边形离散裂隙网络模型的围岩等效导热系数分形分析方法，建立了综合考虑围岩内部热传导和隧洞壁面与风流的对流热交换的深埋引水隧洞 TBM 施工通风 Euler-Lagrange 两相流数学模型，进而探讨了隧洞与围岩热交换规律，分析了隧洞内风流场、温度场分布和粉尘迁移扩散特征^[45]。图 24 即为考虑围岩传热影响的深埋引水隧洞 TBM 施工通风数值模拟结果。

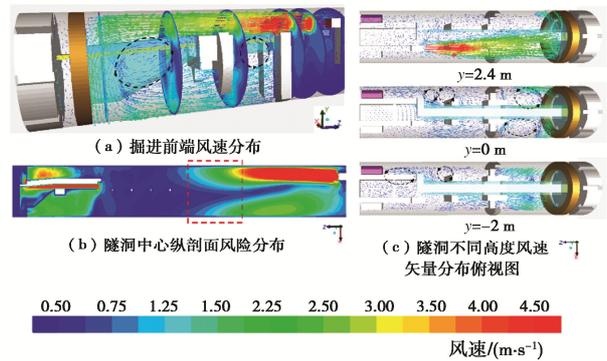


图 24 隧洞内部风速分布

Fig. 24 Distribution of wind speed in tunnel

(3) 大埋深长距离隧洞建设信息集成与可视化分析系统平台

依托引汉济渭工程，综合利用 3D GIS、网络技术、动态可视化技术，建立了大埋深长距离隧洞建设信息集成与可视化分析平台，实现了三维场景下工程地质、施工进度、施工通风、施工资源等多源异构信息关联集成与三维可视化分析，并进一步提出“互联网+”模式下的深埋长隧洞建设信息集成与系统分析模式。图 25 为该平台下隧洞施工进度信息集成与分析功能示意图。

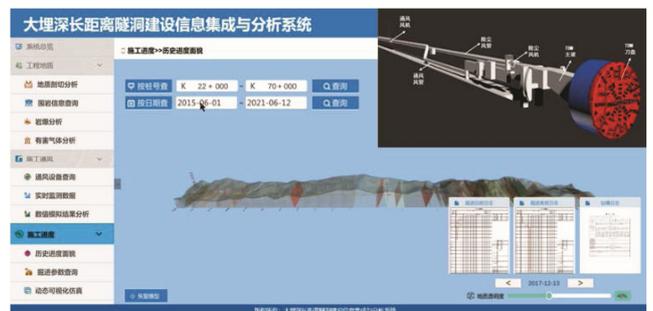


图 25 隧洞施工进度信息集成与分析功能示意图

Fig. 25 Schematic diagram of tunnel construction progress information integration and analysis function

3.5 大型高架渡槽抗震及减隔震技术

(1) U 形渡槽结构 - 水体动力相互作用机理

西南高地震烈度区高架大型渡槽面临抗震安全问题。项目团队通过振动台动力模型试验(图 26)及基于流固耦合数值模拟分析,研究了 U 形渡槽结构-水体动力相互作用。定量确定了 U 形渡槽内流体冲击作用与对流作用,验证了渡槽-水体相互作用等效模型的有效性及应用于渡槽抗震动力分析的可行性,提高了渡槽结构动力响应数值模拟分析的效率^[46-48]。

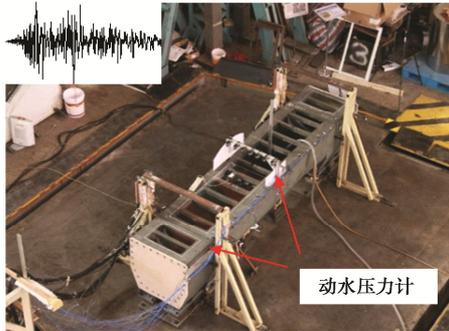


图 26 渡槽模型振动台流固相互作用动力试验

Fig. 26 Dynamic tests on fluid-solid interaction on shaking table of aqueduct model

(2) 大型渡槽结构非线性动力响应特征

基于非线性波动分析建立了考虑渡槽、槽墩、桩基础和水体相互作用的有限元模型,采用基于云计算平台研发的渡槽结构大规模并行计算专用软件,开展了滇中引水工程积福村整体渡槽结构非线性动力响应分析。计算结果如图 27 所示,有效地揭示了强地震作用下渡槽结构的非线性动力响应特征和抗震薄弱部位。

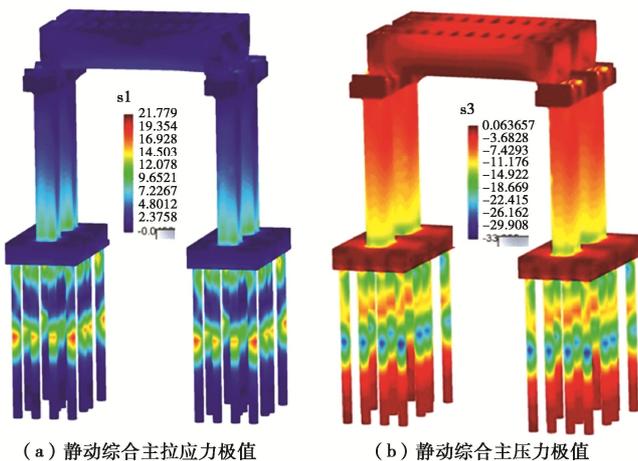


图 27 渡槽结构的非线性地震响应计算结果

Fig. 27 Calculation results of nonlinear seismic response of aqueduct structure

(3) 大型渡槽结构减隔震措施

如图 28 所示,通过设置槽墩塑性铰,可利用其墩底截面作为潜在的塑性铰区域,合理确定截面与配

筋,使地震作用下槽墩的损伤局限于预定的墩底区域,且变形可控、不发生脆性破坏。



图 28 墩槽塑性铰力学性能试验

Fig. 28 Tests on mechanical properties of plastic hinge of pier slot

研发了一种震后能够完全复位、减隔震效果好的斜面导向式减隔震自复位支座^[49](图 29),其通过自身的摩擦摆耗散地震能量并降低结构地震响应,并采用振动台对比试验验证了其对于渡槽的良好减隔震效果和自复位功能,为提高遭遇强地震后渡槽快速检修恢复输水功能奠定了基础。



图 29 斜面导向式减隔震自复位支座

Fig. 29 Self-resetting support of inclined plane-guided vibration reduction and isolation

3.6 闸泵阀系统关键设备及智能监测控制

(1) 高扬程大流量水泵关键技术

国内在水泵行业起步较晚,尤其在大型水泵方面整体技术水平相对落后,220 m 扬程段功率 40 MW 级离心泵技术在国内尚属空白。项目团队针对高扬程大流量离心式水泵的设计,开发了水泵参数化仿真平台,平台结构如图 30 所示,建立了叶轮建模、网格划分和流场计算的自动优化体系。如图 31 所示,针对高扬程大功率水泵的小流量驼峰问题,提出了进口二次流抑制技术,改善了小流量驼峰以及运行不稳定问题。通过流速控制、叶轮和导叶优化设计以及材料选择,可显著减轻过流部件泥沙磨损的程度。针对高扬程大流量离心泵对真机结构的高要求,提出了超大功率立式、单级、单吸离心式泵的结构方案,以及高性能密封、过流部件抗磨损技术。

为检验水泵的性能指标,研发了一套针对 220 m 扬程功率 40 MW 级水泵的水力模型装置,如图 32 所示,测试得到的水泵模型关键性能指标具有国际先进

性,主要包括:模型最优效率 90.57%;运行范围内不发生空化, $\sigma_p / \sigma_i > 1.1$, $\sigma_p / \sigma_c > 1.5$,无叶区压力脉动相对值 $\Delta H / H < 7\%$ 。研究成果填补了国内 220 m 扬程功率 40 MW 级离心泵的技术空白。

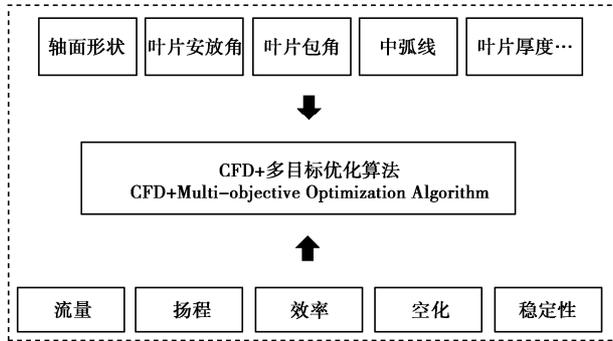


图 30 优化平台结构图

Fig. 30 Structural diagram of optimization platform

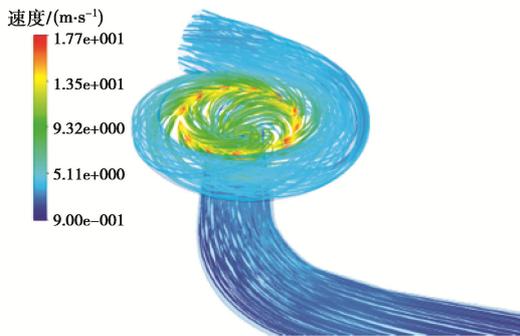


图 31 全流道流线

Fig. 31 Full channel streamline



图 32 A1573 水泵模型试验装置

Fig. 32 Model test devices for A1573 pump

(2) 高压差超大口径流量调节阀关键技术

如图 33 所示,针对高压差(最高压差达 96 m)、宽流量调节范围(流量 2.0~15.5 m³/s)以及强瞬变条件下工作的活塞式流量调节阀,提出了变流阻系数及收敛扩张型喷孔的抗空化和振动的智能阀设计技术,其内部流线如图 34 所示,实现了在任一压差下都有宽广的流量工作范围,解决了复杂工况下大口径调流阀

面临的阀门空化、振动、噪声、流量调控困难等问题。

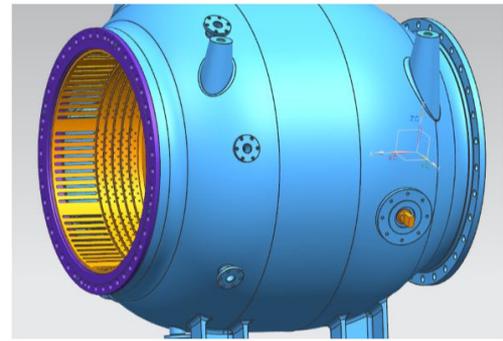


图 33 流量调节阀模型

Fig. 33 Model for flow regulating valve

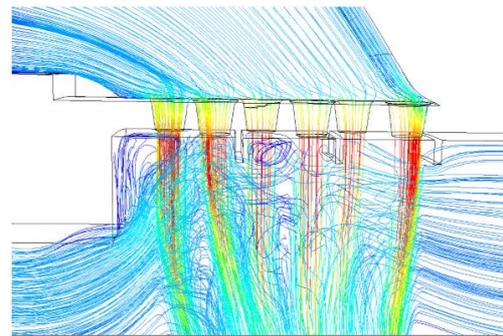


图 34 内部流线图

Fig. 34 Diagram of internal streamline

如图 35 所示,根据研究成果研制的 DN2000 智能流量调节阀,其最大压差为 96 m,流量调节范围为 2.0~15.5 m³/s,抗空化性能、流量和压力调节特性等关键性能达到世界先进水平,是当时世界压差最大、流量最大、调节幅度最大的管路末端调流调压阀,并为世界最大口径(DN2400)调流调压阀的研制奠定了基础。

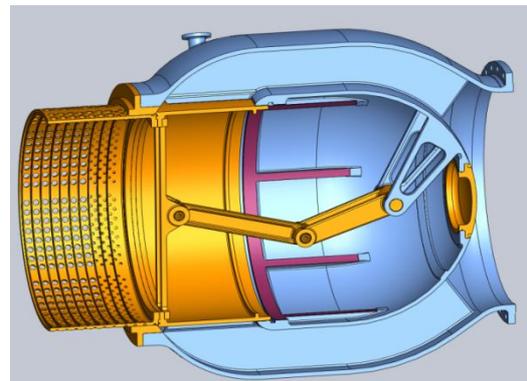


图 35 DN2000 流量调节阀三维模型图

Fig. 35 Three-dimensional model for DN2000 flow regulating valve

(3) 引汉济渭一闸泵阀系统设备在线安全监控系统

为保证水泵机组长期稳定、安全运行,建立了水泵机组运行状态在线监测及远程故障诊断系统。该系

统基于 SOA 架构的模块化设计, 分为数据采集、状态监测 (图 36) 和远程故障智能诊断 3 个子模块, 能够结合专家知识图谱, 对水泵机组的关键部件的故障原因进行概率定位, 并提供相应的解决方案, 保证机组安全稳定运行。

在阀门控制方面, 研发了基于物联网的多传感器数据融合和在线监测技术, 形成了阀门的健康诊断技术和协同自适应调节及安全控制系统 (图 37), 解决了供水工程瞬态压力监测频率不足、多参数监测等问题。

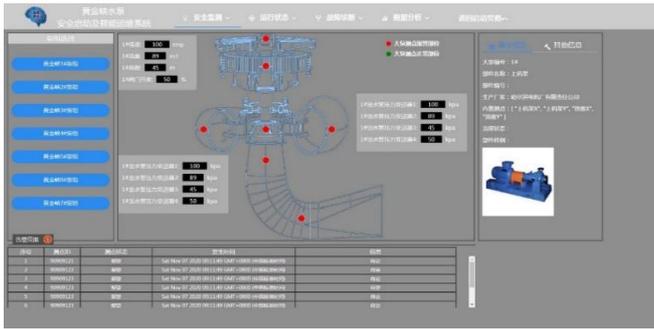


图 36 水泵机组数据采集与状态监测

Fig. 36 Data acquisition and condition monitoring of water pump unit



图 37 阀门安全管理系统

Fig. 37 Valve safety management system

3.7 渠隧系统水力特性及安全高效调控技术

(1) 阶跃流量变化下长距离输水渠隧系统蓄量动态控制技术

滇中引水工程渠首采用泵站提水, 流量为单泵设计流量的整数倍, 处于阶跃入流状态; 渠段调蓄能力较差, 无在线调蓄水库, 可能存在干线出入流不平衡问题。

如图 38 所示, 项目团队研究提出了渠段自身蓄量动态调控技术, 构建了多渠段耦合的蓄量动态控制模型; 提出了基于实测数据的数据优化—参数动态辨识—控制器在线整定的技术方法, 建立了控制参数在线辨识的自动控制模型, 可实现输水渠系入流与出流

不平衡条件下的安全平稳调控。

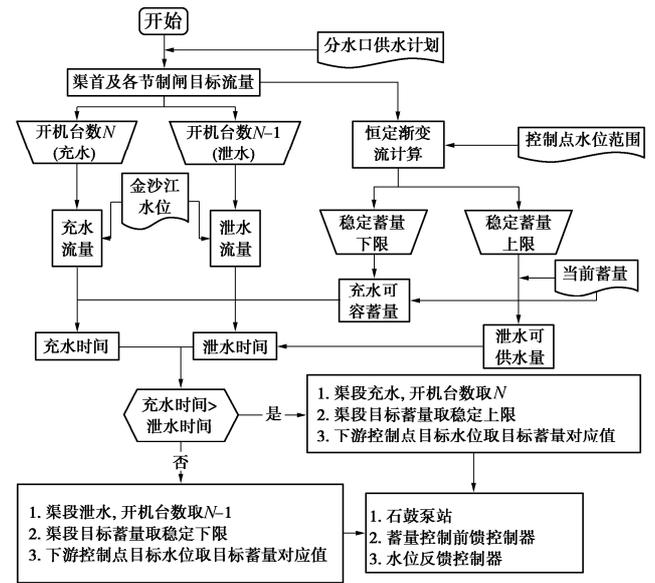


图 38 蓄量动态控制的执行和实现流程

Fig. 38 Implementation and realization process of storage dynamic control

(2) 应急事故调度闸门操作减灾及有压输水隧洞水锤防护体系关键技术

针对渠隧系统可能存在明满流交替等不利流态以及有压隧洞具有高摩阻、易发生线路充填的水力特征问题, 项目研究建立了渠隧系统闸门群流量耦合的应急调度模型 (图 39), 提出以减灾为导向的闸门群联合调控规则。同时, 构建了长距离有压输水工程水锤联合防护技术体系: ①大流量、小落差的输水系统, 采用双空气罐+下游关阀联合防护技术; ②地形落差较大的输水系统, 采用空气罐+超压泄压阀联合防护技术; ③管道走势前陡后缓的输水系统, 采用空气罐+出口溢流池联合防护技术。

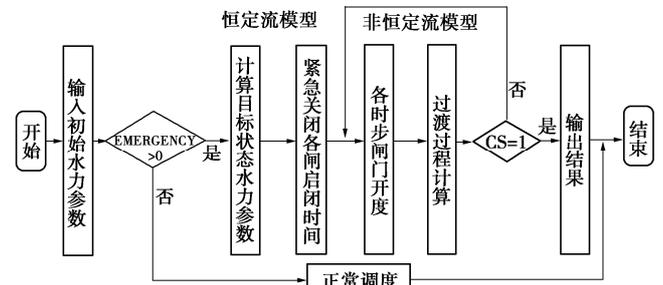


图 39 应急调度主程序流程图

Fig. 39 Flow chart of main program of emergency dispatching

(3) 长距离输水渠隧水力响应及运行控制仿真平台

平台构建了调度一张图, 提供调水工程线路、受水区分布、建筑物设计参数等基本信息查询功能。

通过集成输水渠隧系统水动力学模型、蓄量动态

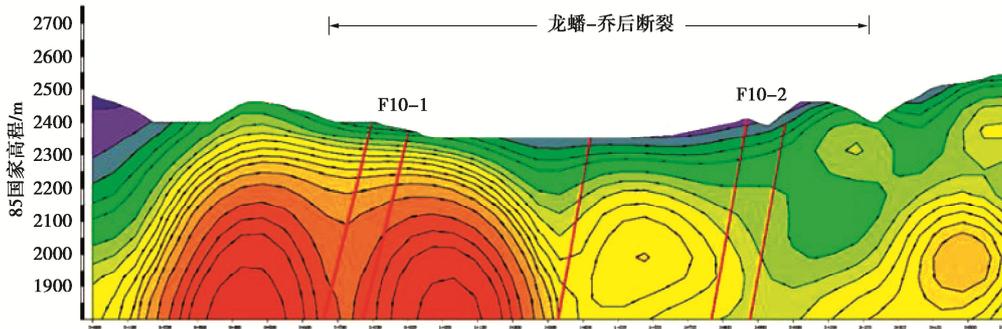


图 45 香炉山隧洞活动断层高频大地电磁剖面

Fig. 45 High-frequency magnetotelluric profile of active fault in Xianglushan tunnel

应用可控源音频大地电磁法的活动断裂调查技术, 结合地质构造调查对相关活断层电阻率分布进行综合地质解译 (图 45), 确定了断层、岩性界面等地质要素。

(4)隧洞穿越活断层围岩 - 衬砌灾变机制及抗断技术

针对活动断层错断变形模式、隧洞穿越活断裂破坏机制、铰接设计下隧洞变形破坏形式、铰接设计设防长度的确定、铰接设计影响因素敏感性分析、铰接设计柔性连接材料等方面开展研究, 为香炉山隧洞活断层的工程应对措施和抗错断技术提供了重要参考数据与技术指导。图 46 为模拟得到的隧洞活动断裂错动位移云图。

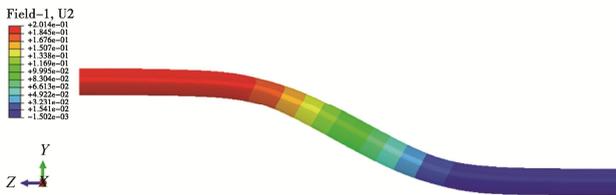


图 46 活动断裂错动位移云图

Fig. 46 Staggered displacement nephogram of active fault

(5)高烈度区高架大型输水渡槽抗震及减隔震关键技术

大型高架渡槽动力非线性整体分析的数值模型及基于云平台大规模并行计算专用分析软件应用于滇中引水工程积福村渡槽地震响应分析及抗震安全分析评价 (图 47), 为滇中引水工程大型高架渡槽抗震设计提供了重要科学依据。

(6)工程安全监测自动化系统

如图 48 所示, 针对滇中引水工程深埋、穿越活断层等特点, 开展了工程安全监测自动化系统专门研究, 给出了系统设计架构, 用于指导工程安全监测系统构建。

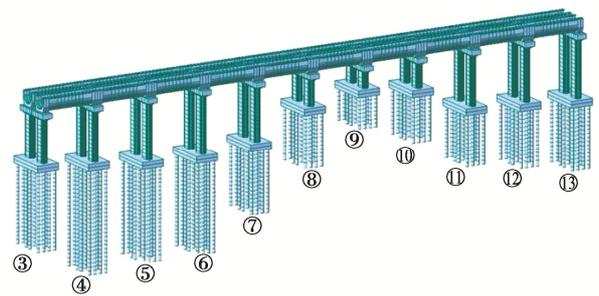


图 47 积福村渡槽三维有限元模型

Fig. 47 Three-dimensional finite element model for Jifu village aqueduct

4.2 引汉济渭工程成果应用

(1) 超长深埋隧洞岩爆预测预报与防治技术

如图 49 所示, 针对引汉济渭工程秦岭超长深埋隧洞岭南段的岩爆洞段, 研究成果为不同烈度的岩爆预测预报提供了合适方法和依据, 为岩爆防治提供了可靠的应对策略、优化的支护参数, 以及可行的施工方法。

(2) 大埋深长距离隧洞施工过程智能仿真

如图 50 所示, 采用建立的多风险耦合作用下隧洞施工智能仿真模型对引汉济渭秦岭隧洞岭南段第二掘进段进行自适应仿真。以 2019 年 6 月底作为初始仿真时间, 每个季度更新仿真模型, 共进行 6 次更新。结果表明, 在考虑地质、设备、技术等多源风险影响下, 秦岭隧洞岭南段第二掘进段于 2022 年底全部完工 (含衬砌、封堵和其它收尾工作) 的概率为 86.88%。

(3)大埋深长距离隧洞建设信息集成与分析系统应用

依托研发大埋深长距离工程建设信息集成与分析系统 (图 51), 项目研究实现了对引汉济渭工程地质信息、施工进度、施工通风以及施工资源配置等信息的综合集成与可视化分析, 为现场施工过程多源信息管理与分析提供了有力的平台和技术支持。

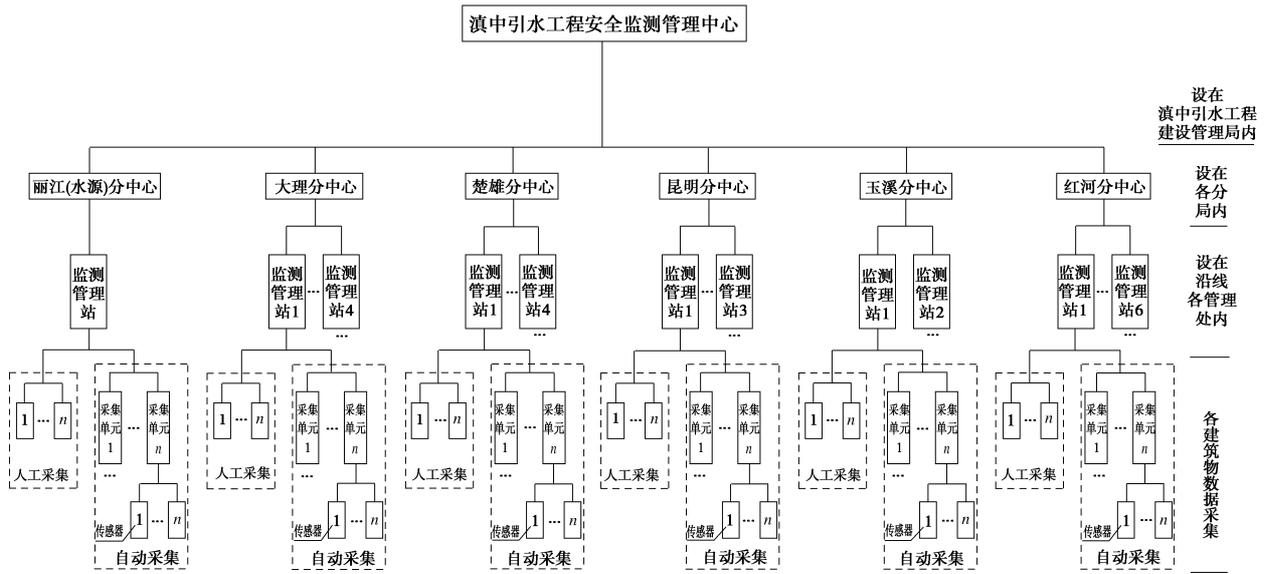


图 48 自动化监测系统架构

Fig. 48 Architecture of automatic monitoring system



图 49 岩爆加强支护

Fig. 49 Reinforced support for rock burst

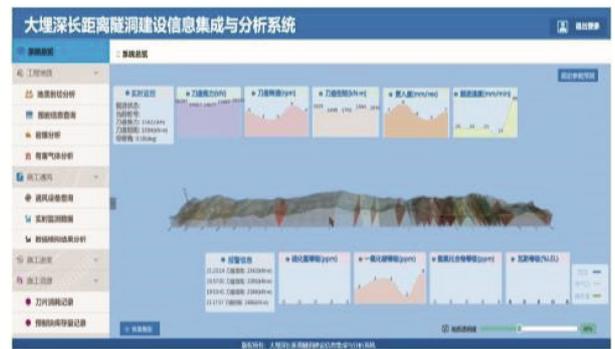


图 51 系统主界面

Fig. 51 Main interface of system

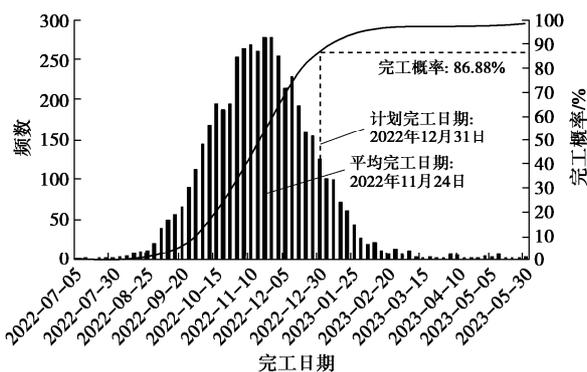


图 50 第二掘进段仿真工期分布和完工概率曲线图

Fig. 50 Distribution of simulated duration and curves of completion probability of second tunneling section

(4) 高压差超大口径流量调节阀

如图 52 所示,根据研究成果研制的 DN2000 智能流量调节阀是当时世界压差最大、流量最大、调节幅度最大的管路末端调流调压阀,已成功应用于陕西省引汉济渭工程三河口水利枢纽的供水系统中。



图 52 三河口水利枢纽 DN2000 流量调节阀

Fig. 52 Application of Sanhekou water control project

4.3 新疆大埋深隧洞工程成果应用

(1) 深埋隧洞断层部位工程赋存环境与作用研究 依托新疆大埋深隧洞工程开展的跨断层带岩体矿

物成分 (图 53)、跨断层带结构面与岩体力学特性、隧洞衬砌材料动态力学特性等, 研究成果为隧洞过断裂带适应性设计提供了重要参考。

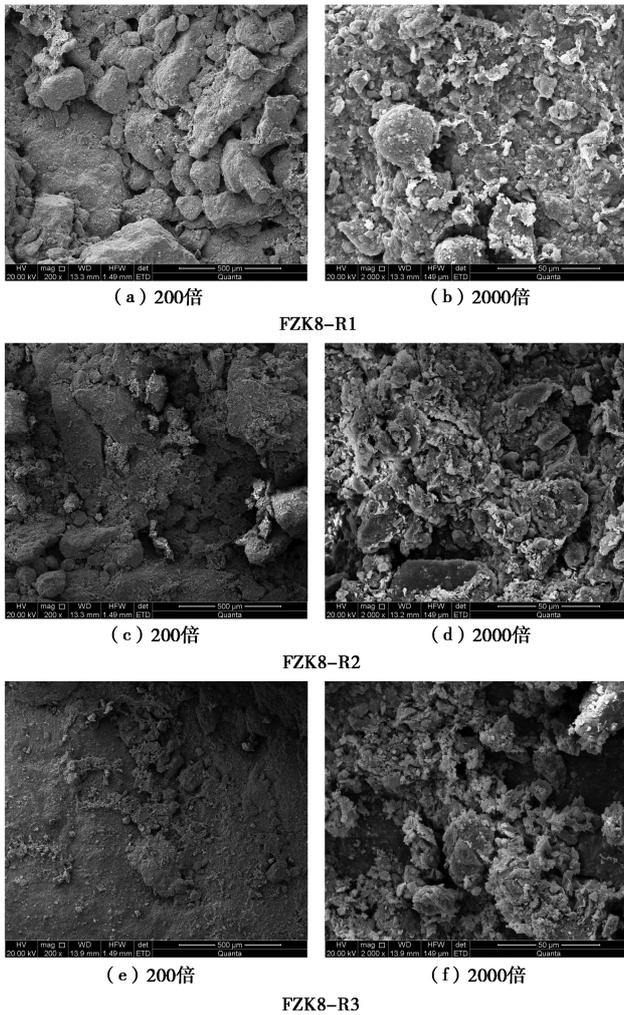


图 53 断层泥样本微观结构扫描

Fig. 53 Microstructural scanning of fault gouge samples

专门研制的岩体 - 混凝土接触面循环剪切仪 (图 54), 解决了断裂带错断过程中岩体 - 隧洞混凝土衬砌之间的岩 - 混凝土接触面多次循环条件下接触参数取值问题^[51]。

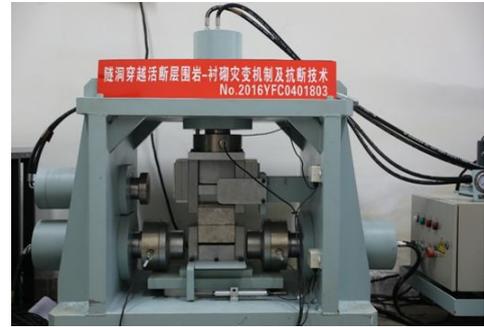


图 54 岩体 - 混凝土接触面循环剪切仪

Fig. 54 Rock-mass concrete contact surface cyclic shear apparatus

(2) 深埋长隧洞软岩洞段围岩变形稳定与防治
依托新疆大埋深隧洞工程开展了围岩动态反馈分析与设计优化, 针对第三系软岩, 提出了膨胀 - 挤压复合型围岩大变形控制关键技术并成功应用 (图 55), 有效保障了施工安全, 优化了支护设计, 效益显著^[52]。

(3) 高压涌水超前灌浆

新疆大埋深隧洞工程线路内穿越众多富水的断层和破碎带, 围岩岩性复杂, 区域内存在承压水, 其中最大的承压水压力超过 4 MPa。

针对高压涌水“灌不住”问题, 采用高压下水下不分散缓变型水泥基灌浆材料封堵较大破碎通道及填充部分溶腔, 形成有效的封闭体系。采用高压水地层安全钻进孔口封闭改进装置+模袋止浆装置, 解决了高压水封闭及孔口止浆问题, 快速封堵前后的隧洞掌子面围岩出水情况如图 56 所示, 注浆堵水效果显著。

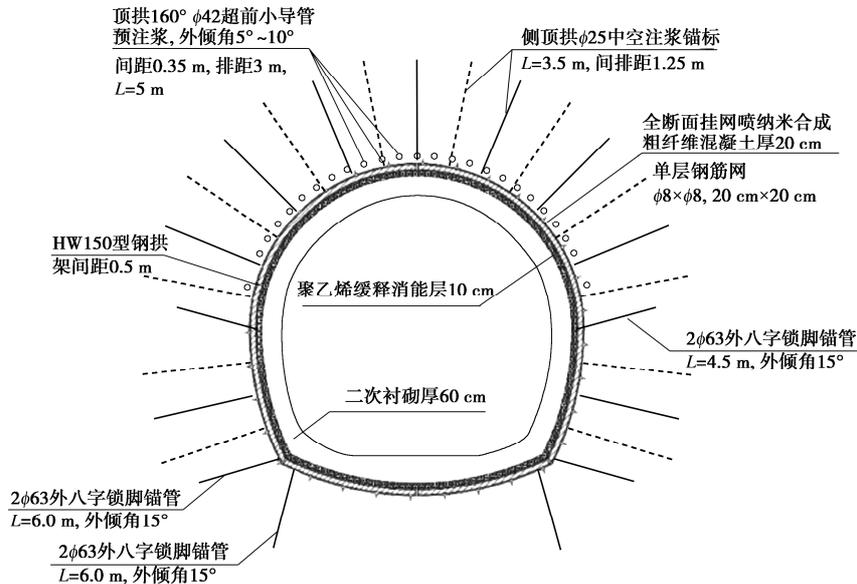


图 55 HW150 型钢拱架+缓释消能层复合支护结构

Fig. 55 Composite support structure of HW150 steel arch + slow release energy dissipation layer



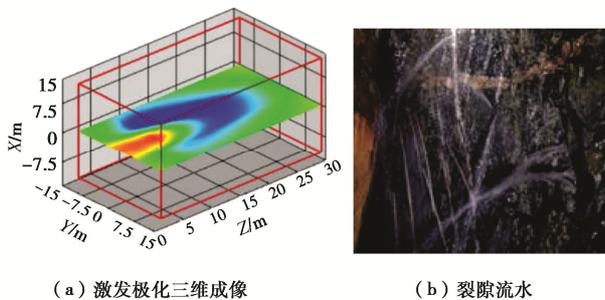
图 56 快速封堵前后的掌子面围岩出水情况

Fig. 56 Water outflow of surrounding rock of tunnel face before and after rapid plugging

4.4 其它工程典型成果应用

(1) 兰州水源地引水工程

兰州水源地引水工程 T9+199—T9+299 里程采用地震波-激发极化联合超前地质预报技术,对前方不良地质体进行综合探测预报。综合探测中激发极化结果(图 57)显示掌子面前方 30 m 范围内存在大范围低阻区,可能出现大面积渗水或线状流水;地震波结果(图 58)显示隧洞前方出现大量正负反射,推断可能发生掉块与塌腔。开挖揭露 T9+199—T9+202 围岩较破碎,节理发育,风化蚀变严重,局部坍塌并伴有线状滴水;T9+238—T9+241 围岩完整性差,节理裂隙发育,裂隙流水。预报结论与开挖揭露情况较为吻合,为施工应对提供了有效指导。



(a) 激发极化三维成像 (b) 裂隙流水

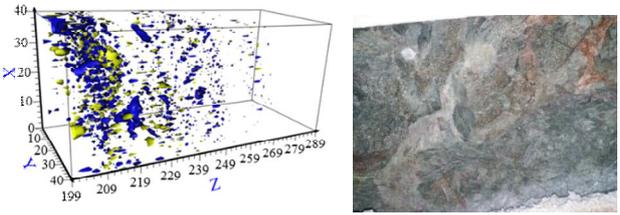
图 57 T9+199 激发极化探测与开挖揭露情况

Fig. 57 Polarization detection and excavation exposure at the mileage of T9+199

(2) 牛栏江—滇池补水工程

工程线路总长 115 km, 其中隧洞 10 条, 长度

104.52 km。针对运行期引调水工程实际,通过部署项目研发的智慧管理平台(图 59),实现了数据汇集、融合分析、评估诊断、监测预警的一体化决策支持,切实保障了复杂引调水工程的运行安全。



(a) 地震波三维成像 (b) 节理风化蚀变

图 58 T9+199 地震波超前探测与开挖揭露情况

Fig. 58 Seismic wave detection and excavation exposure at the mileage of T9+199

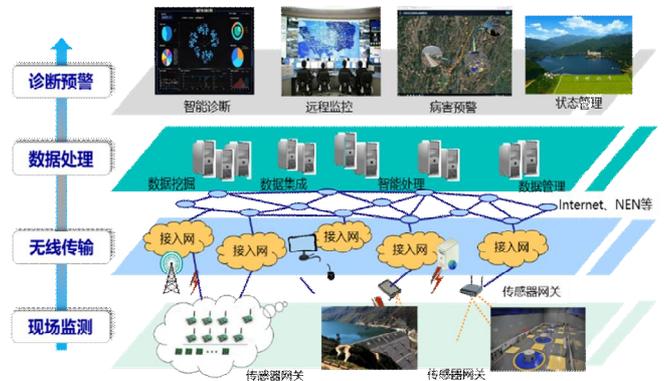


图 59 牛栏江—滇池补水智慧管理系统构架

Fig. 59 Framework of Niulanjiang-Dianchi water replenishment intelligent management system

5 结 语

“十三五”国家重点研发计划项目“长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用”围绕我国跨区域调水工程全寿命周期建设与运行重大需求开展科研攻关,取得了一系列创新性研究成果,并在依托工程中开展了示范应用,有力地推动了相关工程领域的技术进步,主要体现在以下 3 个方面。

(1) 促进了长距离调水相关学科的理论发展。项目团队针对不良地质深埋隧洞建设挑战与高烈度区高架渡槽建设难题,通过大量案例统计、理论分析、数值模拟、现场与室内试验等多种研究手段,揭示了高地应力条件下隧洞围岩致灾机理;提出了断层活动下隧洞围岩-衬砌结构响应特征及分析方法;揭示了围岩-支护体系协同作用机制,提出了围岩-支护体系的荷载分担比例理论;揭示了大型渡槽结构-水体动力相互作用机理及非线性动力响应特征。相关研究成果有力地促进了岩石力学、结构力学、材料力学、水力学等学科在长距离调水工程领域的具体结合与应

用。

(2) 形成了跨流域调水工程建设及运行的关键技术群。项目针对当前制约长距离调水工程进一步发展和应用的大埋深隧洞、高架渡槽、闸泵阀系统、安全运行与调控等领域的关键技术难点开展了重点科研攻关。研发形成了以千米级欠稳定钻孔绳索取芯钻具水压致裂地应力测试方法和设备为代表的深埋隧洞勘探技术;提出了高地应力隧洞围岩大变形控制成套技术;建立了大埋深隧洞灾害预测预报与防治成套方法;提出了高外水压力深埋隧洞复合衬砌新型减压技术;开发了调水工程安全实时监测及预警智慧管理平台以及隧洞建设智能仿真与信息集成系统;攻克了高扬程大流量水泵及高压差超大口径流量调节阀设计制造关键技术;提出了渠隧系统安全高效调控技术。进而形成了适用于长距离复杂地质条件下的调水工程建设及运行关键技术群,可为中国水资源宏观调控战略的有效实施提供重要技术支撑。

(3) 推动了相关关键技术的实践应用与标准化。项目执行期间产出的隧洞超前地质预报研究成果已纳入《水电水利地下工程地质超前预报技术规程:DL/T 5783—2019》、《隧道全断面岩石掘进机施工超前地质预报技术规程:T/CGS 001—2019》,隧洞安全监测技术成果已纳入《地质灾害地下变形监测技术规程:T/CAGHP 046—2018》、《水工隧洞安全监测技术规范:SL 764—2018》。上述研究成果的标准化工作,对今后进一步的技术实践、推广应用与发展具有重要意义。

本项目相关研究已在国内刊物上发表论文共 257 篇,其中 SCI 检索 44 篇, EI 检索 54 篇;出版专著 17 部;授权发明专利 86 项,授权实用新型专利 36 项;获得软件著作权 38 项;编制行业标准、规范 11 部;编制工法 4 项;培养硕士/博士研究生 104 名。项目下“复杂水工岩体地应力测试关键技术与实践”获得中国岩石力学与工程学会科技进步一等奖,“水工隧洞绳索钻杆双回路水压致裂法地应力测试技术”等 3 项技术被列入《水利先进实用技术重点推广指导目录》。相关研究成果在滇中引水、引汉济渭、新疆大埋深隧洞等长距离调水工程中取得良好应用效果,为工程建设的顺利推进和运行期安全保障提供了有效的技术支撑,同时还可推广到其他复杂地质条件下的水利、交通等重大工程建设,应用前景广阔。

参考文献:

[1] 叶 英. 隧道施工超前地质预报[M]. 北京:人民交通出版社, 2011. (YE Ying. Tunnel construction ahead geological prediction[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))

- [2] 李建平, 王庆学, 张晓慧. 深孔地应力测试在铁路隧道工程勘察中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(9): 47 - 51. (LI Jian-ping, WANG Qing-xue, ZHANG Xiao-hui. Application of deep borehole crustal stress testing on railway tunnel engineering prospecting[J]. Coal Geology of China, 2013, 25(9): 47 - 51. (in Chinese))
- [3] 申建平. 测井技术对隧道深孔试验的指导作用研究[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(3): 58 - 61. (SHEN Jian-ping. Research on effect of logging technology on guiding tunnel deep bore testing[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(3): 58 - 61. (in Chinese))
- [4] 殷黎明, 杨春和, 罗超文, 等. 高压压水试验在深钻孔中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1692 - 1694. (YIN Li-ming, YANG Chun-he, LUO Chao-wen, et al. Application of high water-pressure test to deep borehole[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1692 - 1694. (in Chinese))
- [5] 李生杰, 谢永利, 吴丹泽, 等. 穿越煤系地层隧道围岩大变形机制及处治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3501 - 3508. (LI Sheng-jie, XIE Yong-li, WU Dan-ze, et al. Research on mechanism of large deformation and countermeasures of surrounding rocks of tunnel through coal strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3501 - 3508. (in Chinese))
- [6] 李国良, 刘志春, 朱永全. 兰渝铁路高地应力软岩隧道挤压大变形规律及分级标准研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 62 - 68. (LI Guo-liang, LIU Zhi-chun, ZHU Yong-quan. On the large squeezing deformation law and classification criteria for the Lanzhou-Chongqing railway tunnels in soft and high geostress rocks[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(1): 62 - 68. (in Chinese))
- [7] 吴世勇, 周济芳, 陈炳瑞, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞 TBM 开挖方案对岩爆风险影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 728 - 734. (WU Shi-yong, ZHOU Ji-fang, CHEN Bing-ru, et al. Effect of excavation schemes of TBM on risk of rock burst of long tunnels at Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 728 - 734. (in Chinese))
- [8] 何满潮, 李 晨, 宫伟力, 等. NPR 锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1513 - 1529. (HE Man-chao, LI Chen, GONG Wei-li, et al. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1513 - 1529. (in Chinese))

- [9] 孙凤伯, 赵伯明, 许丁予, 等. 活动断裂工程危害、破裂参数评价与工程应用[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 1): 137-141. (SUN Feng-bo, ZHAO Bo-ming, XU Ding-yu, et al. The engineering critically analysis of active faults, the evaluation methods of fracture parameters and engineering application[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 137 - 141. (in Chinese))
- [10] 刘学增, 谷雪影, 代志萍, 等. 活断层错动位移下衬砌断面型式对隧道结构的影响[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 71 - 77. (LIU Xue-zeng, GU Xue-ying, DAI Zhi-ping, et al. Influence of lining section type on a tunnel structure under active fault movement[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 71 - 77. (in Chinese))
- [11] 张顶立. 隧道围岩稳定性及其支护作用分析[J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(4): 9 - 18. (ZHANG Ding-li. Analysis of surrounding rock stability and support action in tunnels[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(4): 9 - 18. (in Chinese))
- [12] 孙毅, 张顶立. 隧道复杂支护结构体系的协同作用原理[J]. 工程力学, 2016, 33(12): 52 - 62. (SUN Yi, ZHANG Ding-li. Synergy principle of complex supporting structural systems in tunnels[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(12): 52 - 62. (in Chinese))
- [13] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090 - 1113. (LI Shu-cai, LIU Bin, SUN Huai-feng, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1090 - 1113. (in Chinese))
- [14] 谭忠盛, 王秀英, 万飞, 等. 关角隧道突涌水防治技术体系研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2): 1 - 7. (TAN Zhong-sheng, WANG Xiu-ying, WAN Fei, et al. Research on prevention and control technology system of sudden water inflow of Guanjiiao tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 1 - 7. (in Chinese))
- [15] 朱旭鹏. 大型渡槽抗震性能试验研究及分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2013. (ZHU Xu-peng. Test research and analysis on seismic behavior of large-scale aqueduct[D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese))
- [16] 杨晓蕾, 邱象玉, 杨进新. 长距离输水管道启泵水锤模拟及试验验证[J]. 水利规划与设计, 2016(3): 116 - 118. (YANG Xiao-lei, QIU Xiang-yu, YANG Jin-xin. Simulation and experimental verification of actuating pump water hammer in long distance water transmission pipeline[J]. Water Resources Planning and Design, 2016(3): 116 - 118. (in Chinese))
- [17] 徐放, 李志鹏, 邹顺利, 等. 高扬程泵站停泵水锤防护措施的比较与分析[J]. 给水排水, 2017, 53(12): 106 - 110. (XU Fang, LI Zhi-peng, ZOU Shun-li, et al. Comparison and analysis of protective measures against pump-failure water hammer in high lift pumping station[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(12): 106 - 110. (in Chinese))
- [18] 李强. 长距离输水系统明满流及水力控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. (LI Qiang. Study on Free-Surface-Pressurized Flow and Hydraulic Control in the Long-Distance Water Diversion System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [19] 王桂平, 刘国彬. 水工隧洞运营期风险管理应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 820 - 824, 828. (WANG Gui-ping, LIU Guo-bin. Application and research on risk administration of hydraulic engineering tunnel in the operation period[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 820 - 824, 828. (in Chinese))
- [20] 邬爱清, 韩晓玉, 尹健民, 等. 一种新型绳索取芯钻杆内置式双管水压致裂地应力测试方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1126 - 1133. (WU Ai-qing, HAN Xiao-yu, YIN Jian-min, et al. A new hydraulic fracturing method for rock stress measurement based on double pressure tubes internally installed in the wire-line core drilling pipes and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1126 - 1133. (in Chinese))
- [21] 尹健民, 邬爱清, 李会中, 等. 绳索取芯钻杆双回路水压致裂法地应力测试装置及测试方法: CN103900751B[P]. 2016-02-24. (YIN Jian-min, WU Ai-qing, LI Hui-zhong, et al. In-Situ Stress Test Device and Test Method of Double Loop Hydraulic Fracturing Method for Wireline Coring Drill Pipe: CN103900751B[P]. 2016-02-24. (in Chinese))
- [22] 黄华, 李汉桥, 谢实宇, 等. 一种深孔压水试验装置: CN109162695A[P]. 2019-01-08. (HUANG Hua, LI Han-qiao, XIE Shi-yu, et al. A Water Pump-in Test Device in the Deep Hole: CN209308673U[P]. 2016-02-24. (in Chinese))
- [23] 周云, 石华国, 王家祥, 等. 一种钻孔压水试验多通道转换快速卸压装置: CN209115072U[P]. 2019-07-16. (ZHOU Yun, SHI Guo-hua, WANG Jia-xiang, et al. A Fast Pressure Relief Device with the Multi-Channel Switching for Borehole Water Pressure Test: CN209115072U[P]. 2019-07-16. (in Chinese))

- [24] 戴云峰, 周志芳, 赵燕容. 确定倾斜填充裂隙水文地质参数的测试装置及其测试方法: CN106869909A[P]. (DAI Yun-feng, ZHOU Zhi-fang, ZHAO Yan-rong. A Testing Device and Method for Determining Hydrogeological Parameters of Inclined Filling Fractures: CN106869909B[P]. 2019-12-10. (in Chinese))
- [25] 曹瑞琅, 王玉杰, 赵宇飞, 等. 基于钻进过程指数定量评价岩体完整性原位试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(4): 679 - 687. (CAO Rui-lang, WANG Yu-jie, ZHAO Yu-fei, et al. In-situ tests on quantitative evaluation of rock mass integrity based on drilling process index[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(4): 679 - 687. (in Chinese))
- [26] 丁秀丽, 张雨霆, 黄书岭. 隧洞围岩大变形机制、挤压大变形预测及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 录用待刊. (DING Xiu-li, ZHANG Yu-ting, HUANG Shu-ling, et al. Mechanism of large deformation of surrounding rock masses of tunnels, prediction method of squeezing large deformation and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, in press. (in Chinese))
- [27] NIE L C, ZHOU W, XU X J, et al. TBM-mounted seismic ahead-prospecting for fast detecting anomalous geology ahead of tunnel face[J]. IEEE Access, 2020, **9**: 359 - 369.
- [28] LIU B, CHEN L, LI S C, et al. Three-dimensional seismic ahead-prospecting method and application in TBM tunneling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, **143**(12): 04017090.
- [29] LIU B, CHEN L, LI S C, et al. A new 3D observation system designed for a seismic ahead prospecting method in tunneling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, **77**(4): 1547 - 1565.
- [30] LI S C, REN Y X, LIU L B, et al. Reverse time migration of seismic forward-prospecting data in tunnels based on beamforming methods[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, **52**(9): 3261 - 3278.
- [31] 邢占清, 李金霖, 符平, 等. 可灌性差、较难自稳地层隧洞开挖前快速灌浆成拱加固方法: CN111441775B[P]. 2019-07-16. (XING Zhan-qing, LI Jin-lin, FU Ping, et al. Rapid Grouting and Arch Forming Reinforcement Method Before Tunnel Excavation in Poor Groutability and Difficult Self-Stable Strata: CN111441775B[P]. 2019-07-16. (in Chinese))
- [32] 王丽娟, 李凯, 张金接, 等. 膏浆平面裂隙动水注浆扩散模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 2): 3404 - 3411. (WANG Li-juan, LI Kai, ZHANG Jin-jie, et al. Paste slurry planar fracture dynamic water grouting diffusion model research[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S2): 3404 - 3411. (in Chinese))
- [33] FU P, HUANG L W, XING Z Q. Development and experimental research of a low-thermal asphalt material for grouting leakage blocking[J]. High Temperature Materials and Processes, 2020, **39**(1): 433 - 446.
- [34] HUANG L W, XING Z Q, FU P. Test and analysis of grouting in the water-tight reconstruction project of a power station in Linhai City[J]. Journal of Coastal Research, 2020, **108**(sp1): 301 - 307.
- [35] 周光新, 崔臻, 盛谦, 等. 活动断裂错动位移模式对隧洞变形与内力的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, **41**(6): 1323 - 1330, 1349. (ZHOU Guang-xin, CUI Zhen, SHENG Qian, et al. Study on the deformation and internal force of the tunnel under the displacement pattern of the active fault zone[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, **41**(6): 1323 - 1330, 1349. (in Chinese))
- [36] 马亚丽娜, 崔臻, 盛谦, 等. 正断层错动对围岩-衬砌体系响应影响的离散-连续耦合模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(11): 2088 - 2097. (MA Ya-li-na, CUI Zhen, SHENG Qian, et al. Influences of normal fault dislocation on response of surrounding rock and lining system based on discrete-continuous coupling simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(11): 2088 - 2097. (in Chinese))
- [37] CUI Z, SHENG Q, ZHANG G M, et al. Response and mechanism of a tunnel subjected to combined fault rupture deformation and subsequent seismic excitation[J]. Transportation Geotechnics, 2022, **34**: 100749.
- [38] 周光新, 盛谦, 崔臻, 等. 走滑断层错动影响下跨活断层铰接隧洞破坏机制模型试验[J]. 岩土力学, 2022, **43**(1): 37 - 50. (ZHOU Guang-xin, SHENG Qian, CUI Zhen, et al. Model test of failure mechanism of tunnel with flexible joint crossing active fault under strike-slip fault dislocation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(1): 37 - 50. (in Chinese))
- [39] 周光新, 盛谦, 张传健, 等. 穿越走滑断层铰接隧洞抗错断设计参数作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(5): 941 - 953. (ZHOU Guang-xin, SHENG Qian, ZHANG Chuan-jian, et al. Study on the mechanism of design parameters of a tunnel with flexible joint crossing strike-slip faults[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2022, **41**(5): 941 - 953. (in Chinese))
- [40] 张肃, 丁秀丽, 黄书岭. 基于均匀设计 - 响应面 - 有限元法的软岩隧洞围岩与衬砌结构协同承载可靠性分析[J]. 长江科学院院报, 2021, **38**(6): 79 - 85. (ZHANG Su, DING Xiu-li, HUANG Shu-ling. Reliability analysis of collaborative bearing capacity of surrounding rock and lining structure in soft rock tunnel based on uniform design, response surface, and finite element method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, **38**(6): 79 - 85. (in Chinese))
- [41] 王芳, 何勇军, 李宏恩. 基于系统动力学的引调水工程风险分析: 以倒虹吸工程为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, **18**(3): 184 - 191. (WANG Fang, HE Yong-jun, LI Hong-en. Risk analysis of the water diversion project based on system dynamics: a case study of inverted siphon project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, **18**(3): 184 - 191. (in Chinese))
- [42] 牛广利, 李端有, 李天阳, 等. 基于云平台的大坝安全监测数据管理及分析系统研发与应用[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(6): 161 - 165. (NIU Guang-li, LI Duan-you, LI Tian-yang, et al. Management and analysis system for dam safety monitoring data based on cloud platform: development and application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(6): 161 - 165. (in Chinese))
- [43] 钟登华, 林瀚文, 吴斌平, 等. 基于MSP-SVR故障预测的地下洞室施工仿真[J]. 水力发电学报, 2019, **38**(4): 199 - 212. (ZHONG Deng-hua, LIN Han-wen, WU Bin-ping, et al. Simulations of underground cavern construction based on MSP-SVR failure prediction[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, **38**(4): 199 - 212. (in Chinese))
- [44] 余佳. 考虑风险影响的复杂长距离引水隧洞施工仿真与优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2019. (YU Jia. Research on Construction Simulation and Optimization of Complex Long Distance Diversion Tunnel Considering the Impacts of Risks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese))
- [45] 王晓玲, 禹旺, 刘长欣, 等. 考虑围岩传热的深埋引水隧洞TBM施工通风模拟[J]. 水力发电学报, 2019, **38**(10): 1 - 13. (WANG Xiao-ling, YU Wang, LIU Chang-xin, et al. TBM construction ventilation simulation for deep buried headrace tunnels considering heat transfer in surrounding rock[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, **38**(10): 1 - 13. (in Chinese))
- [46] WANG H B, LI C L, ZHAO L J. Experimental study on dynamic interaction between large U-shape aqueduct and water[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, **26**(3): 1203 - 1213.
- [47] 王海波, 李春雷, 张昆航. U形渡槽内水体液面晃动对流作用试验研究[J]. 水利学报, 2020, **51**(12): 1453 - 1461. (WANG Hai-bo, LI Chun-lei, ZHANG Kun-hang. Experimental study on the convective mass of sloshing liquid in a U-shaped aqueduct[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **51**(12): 1453 - 1461. (in Chinese))
- [48] 王海波, 李春雷, 朱璨, 等. 大型薄壁输水渡槽流固耦合振动台试验研究[J]. 水利学报, 2020, **51**(6): 653 - 663. (WANG Hai-bo, LI Chun-lei, ZHU Can, et al. Experimental study of dynamic interaction between large thin wall aqueduct and water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **51**(6): 653 - 663. (in Chinese))
- [49] 徐瑞祥, 李炯, 尤岭, 等. 斜面导向式减隔震自复位支座: CN207110109U[P]. 2018-03-16. (XU Rui-xiang, LI Jiong, YOU Ling, et al. Inclined Plane Guided Vibration Reduction and Isolation Self Resetting Bearing: CN207110109U[P]. 2018-03-16. (in Chinese))
- [50] 刘琪, 张传健, 颜天佑, 等. 敞开式TBM穿越断层破碎带时岩-机作用分析: 以滇中引水工程香炉山隧洞为例[J]. 人民长江, 2021, **52**(10): 165 - 175. (LIU Qi, ZHANG Chuan-jian, YAN Tian-you, et al. Analysis on interaction between rock and opened TBM during excavation in fault fracture zone: case of Xianglushan Tunnel in Central Yunnan Water Diversion Project[J]. Yangtze River, 2021, **52**(10): 165 - 175. (in Chinese))
- [51] 张茂础, 崔臻, 盛谦, 等. 一种岩体结构面简易循环剪切仪: CN210571795U[P]. 2020-05-19. (ZHANG Mao-chu, CUI Zheng, SHENG Qian, et al. A Simple Cyclic Shear Apparatus for Rock Structural Plane: CN210571795U[P]. 2020-05-19. (in Chinese))
- [52] 池建军, 刘登学, 丁秀丽, 等. 第三系泥岩隧洞围岩大变形成因及应对措施研究[J/OL]. 长江科学院院报: 1-11.[2022-05-25]. <http://kns.cnki.net/detail/42.1171.TV.22020429.1836.029.html>. (CHI Jian-jun, LIU Deng-xue, DING Xiu-li, et al. Study on causes and countermeasures of large deformation in a tunnel with tertiary mudstone[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute: 1-11.[2022-05-25]. <http://kns.cnki.net/detail/42.1171.TV.22020429.1836.029.html>. (in Chinese))