

2022 2 月刊
总第 203 期

中国水能及电气化

- ◆《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊
- ◆《中文科技期刊数据库》收录期刊
- ◆《中国期刊全文数据库》收录期刊
- ◆万方数据-数字化期刊群收录期刊

主 管 中华人民共和国水利部

主 办 水利部水电局
中国水利工程协会
中国大坝工程学会
四川省地方电力局

主 编 安中仁

编辑部主任 牟 佳

责任编辑 侯博丹

编辑出版 《中国水能及电气化》杂志社有限公司

通信地址 北京市西城区南滨河路 27 号
贵都国际中心 B 座 1117 室

邮政编码 100055

联系电话 010-63460523 (编辑部)
010-63460253 (综合部)

传 真 010-63460253

网 址 <http://zgsw.cweun.org>

电子信箱 wateree6346@163.com

中国标准连续出版物号 ISSN 1673-8241
CN 11-5543/TK

广告经营许可证 京西市监广登字 20170040 号

出版日期 每月 15 日

印刷装订 北京博图彩色印刷有限公司

邮发代号 80-495

定 价 16.00 元



中国水利工程协会官方微信公众号
二维码, 欢迎扫描加关注, 随时检索
协会会刊论文发表情况。

目 录

本期特稿

- 1 2022 年水资源管理工作要点

建设管理

- 2 浅谈 GIS 信息技术在农村小型水利工程建管中应注意的问题
程会娟 张恒瑞 刘社教
- 6 海外风电项目 EPC 报价风险浅析
胡 萍 华志强
- 9 浅析“四不两直”方式在水利工程建设监督检查中的工作程序
李增明

施工技术

- 12 山区特长富水隧道防水治水施工技术
庄炳鑫
- 19 碾压混凝土坝体强渗漏灌浆处理关键技术
周尚玉 汤国辉

水电站技术

- 24 小水电微网控制器研发与应用
陈志峰 沈 娜 张紫凡
- 29 ENT-16H 高油压调浆装置在前进水电站中的应用
谢 勇

工程设计

- 33 北塔山风区 100MW 风电项目电气设计
甘天文
- 37 CNCCBIM OPENROADS 在辽干防洪提升堤防工程三维设计里的应用
胡荣欣

科学研究

- 41 碳化对沿海水闸工程的影响及长期服役性能研究
商志清 陆风华 周阜军
- 45 防腐阻锈和防腐涂料技术在甘肃省昌马大型灌区改造项目中的研究与应用
吴学广
- 50 花坝水库坝基开挖岩体质量超声波检测分析
宰维东 孟祥利 白 恺

经验交流

- 55 塔里木河荒漠化地区水化学特性及其对胡杨林生长的影响
王梦如
- 59 田头寨水库大坝坝基地质条件探查及其防渗处理
赵 静 郑培溪
- 65 五里坡土石坝薄防渗墙组合防渗技术应用
张 琪 侯超新 赵晓天

水利大讲堂

- 69 我国七大水系

Contents

Special Report

- 1 Key Points of Water Resources Management in 2022

Construction Management

- 2 Discussion on the Problems Needing Attention to in the Construction and Management of Rural Small Water Conservancy Projects by GIS Information Technology CHENG Huijuan, ZHANG Hengrui, LIU Shejiao
- 6 Analysis on EPC Quotation Risk of Overseas Wind Power Project HU Ping, HUA Zhiqiang
- 9 Brief Analysis on Working Procedures of “Four-Not Two-Straight” Mode in Supervision and Inspection of Water Conservancy Project Construction LI Zengming

Construction Technology

- 12 Waterproofing and Water Control Construction Technology of Super-long Rich Water Tunnel in Mountainous Areas ZHUANG Bingxin
- 19 Key Technology of Strong Seepage Grouting in RCC Dam ZHOU Shangyu, TANG Guohui

Hydropower Station Technology

- 24 Development and Application of a New Micro-grid Controller for Small Hydropower CHEN Zhifeng, SHEN Na, ZHANG Zifan
- 29 Application of ENT-16H High Oil Pressure Propeller Adjusting Device in Qianjin Hydropower Station XIE Yong

Engineering Design

- 33 Electrical Design of 100MW Wind Power Project in Beitashan Wind Generating Area GAN Tianwen
- 37 Application of CNCCBIM OPENROADS in Three-dimensional Design for Flood Control and Lifting Embankment Project of Liaoh River Trunk Stream HU Rongxin

Scientific Research

- 41 Research on Influence of Carbonization on Coastal Sluice Project and Long-term Service Performance thereof SHANG Zhiqing, LU Fenghua, ZHOU Fujun
- 45 Research and Application of Anticorrosive Rust-resistant and Anticorrosive Coating Technology in Gansu Changma Large Irrigation Area Reconstruction Project WU Xueguang
- 50 Ultrasonic Detection and Analysis of Rock Mass Quality during Excavation of Huaba Reservoir Dam Foundation ZAI Weidong, MENG Xiangli, BAI Kai

Experience Exchange

- 55 Hydrochemical Characteristics and Its Effect on the Growth of Populus Euphratica in Desertification Area of Tarim River WANG Mengru
- 59 Exploration of Geological Condition of Dam Foundation in Tiantouzhai Reservoir and Anti-seepage Treatment Thereof ZHAO Jing, ZHENG Peixi
- 65 Application of Combined Anti-seepage Technology of Thin Cutoff Wall of Wulipo Earth-rockfill Dam ZHANG Qi, HOU Chaoxin, ZHAO Xiaotian

Water Conservancy Lecture Hall

- 69 Seven Water Systems in China

编委会

名誉主任

胡四一

副主任

邢援越 陈大勇 贾金生

陈生水 刘恒 陈荣仲

袁江海

秘书长

夏海霞 廖文根

编委会成员(按姓氏笔画排列)

王凤翔 王东胜 王丽平

王福岭 卢平 邝明勇

冯顺新 吉生元 毕振令

回士光 刘启华 刘改元

刘肃 刘德有 许德志

孙道成 李铭芳 吴克昭

吴新黔 邱小庄 张从银

张忠孝 张桂龙 张翾

陈洪(女) 陈德亮 禹雪中

夏海霞 徐祥利 唐山松

黄文宝 阎有勇 隋欣

葛捍东 程夏蕾 傅云光

鲁锡海 廖文根 樊新中

潘晓光

本期特稿

2022 年水资源管理工作要点

2022 年水资源管理工作总的思路是,完整、准确、全面贯彻新发展理念,深入落实习近平总书记“十六字”治水思路和关于治水重要讲话指示批示精神,贯彻落实水利部党组关于推动新阶段水利高质量发展的安排部署,坚持问题导向、目标导向和底线思维,加快建立水资源刚性约束制度,推动以可用水量确定经济社会发展布局、结构和规模,推进河湖生态环境复苏与地下水超采治理,提高水资源集约安全利用能力和水平,促进生态文明建设和高质量发展。

一是健全初始水权分配制度。认真做好水资源刚性约束制度顶层设计。全面完成全国重点河湖名录明确的 477 条河湖基本生态流量保障目标确定工作,有序开展已建水利水电工程生态流量复核,加强生态流量日常监管。加快推进江河流域水量分配,新批复 10 条以上跨省江河水量分配方案,加快跨市县江河水量分配。加快确定地下水管控指标,作为各地区地下水开发利用的管理目标。推动明确各地区的可用水量,以此为基础推动明晰各地区的初始水权。

二是严格取用水监管。开展取用水管理专项整治行动“回头看”,加大违法取用水查处力度,规范取用水行为及管理秩序。会同有关部门制订规划水资源论证管理办法,推进规划水资源论证工作,从规划源头促进产业结构布局规模与水资源承载能力相协调。严格建设项目水资源论证和取水许可管理,推进《取水许可和水资源费征收管理条例》修订立法前期工作,推进建设项目水资源论证区域评估和取水许可告知承诺制。推进黄河、海河、西北内陆河等流域的水资源超载地区暂停新增取水许可。加强用水统计调查管理。

三是推进河湖生态环境复苏。落实复苏河湖生态环境指导意见及实施方案,开展母亲河复苏行动。推动“十四五”华北地区及其他重点区域地下水超采

综合治理行动实施,组织落实好河湖生态补水任务。完善地下水水位变化通报机制。推进新一轮地下水超采区划定。贯彻落实《地下水管理条例》,制定地下水开发利用管理办法,推进相关标准制修订和规程编制工作。完善地下水监管“一张图”。强化饮用水水源地监督管理,及时掌握水源地变化情况。组织抓好生态环境保护相关任务落实。

四是提高水资源管理精细化水平。加快取水口取水监测计量体系建设,切实提高取水量计量率和在线计量率,5 万亩以上的大中型灌区渠首取水口全部实现在线计量。强化电子证照信息在流域区域用水总量控制、取水许可审批管理等业务中的分析应用,通过信息化手段提升取水监管能力和水平。推进水资源管理调配应用系统建设,对可用水量指标、取水许可管理信息以及取水量、水位、流量等监测数据进行整合并实现信息共享,强化取水预报预警预演预案功能,提升水资源的数字化、网络化、智能化管理水平。

五是深化水资源管理改革。按照水资源刚性约束要求完善考核内容,优化考核指标,改进考核机制,注重发挥流域管理机构的作用,更大程度发挥考核的激励鞭策作用。制定出台推进水权改革的指导意见,推动明晰区域水权、取水权、灌溉用水户水权,推进建立健全统一的水权交易系统,推进区域水权、取水权、灌溉用水户水权等用水权交易。推动全面推开水资源税改革试点。开展水生态产品价值实现机制、水资源资产有偿使用制度、用水权回购收储和有偿取得、地下水储备制度等重要问题研究。

(来源:水利部网站,网址:http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202202/t20220208_1561520.html,日期 2022 年 2 月 8 日)

建设管理

浅谈 GIS 信息技术在农村小型水利工程
建管中应注意的问题

程会娟 张恒瑞 刘社教

(河南省陆浑水库管理局, 河南 洛阳 471003)

【摘要】 GIS (Geographic Information System, 地理信息系统) 是多科学交叉的产物, 经过几十年的发展已经日趋完善。农村水利工程信息系统是信息时代加强农村水利工程管理的新系统、新模式, 是 GIS 技术在农村小型水利工程管理中的具体实践。持续探索 GIS 信息技术在农村水利工程管理中的应用, 有利于高效整合农村水资源, 切实发挥小型水利工程的作用。农村小型水利工程和大型灌区存在天然联系, 如河南省陆浑灌区的“长藤结瓜”灌溉系统涉及到很多小型水库, 二者之间互补互济, 加强农村小型水利工程信息技术的建设管理, 有利于大型灌区功能效益的更好发挥。GIS 信息技术在农村水利工程中的示范应用, 具有导向引领作用, 文章以陆浑灌区为例, 指出信息化建设在管理中应注意的一些问题, 对现阶段各级各类水利工程的信息化建设也具有一定的参考和指导意义。

【关键词】 地理信息; 水利工程; 陆浑灌区; 应用; 信息共享

中图分类号: P208, TV93

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-002-04

Discussion on the Problems Needing Attention to in the Construction and
Management of Rural Small Water Conservancy Projects by GIS
Information Technology

CHENG Huijuan, ZHANG Hengrui, LIU Shejiao

(Henan Luhun Reservoir Administration, Luoyang 471003, China)

Abstract: GIS (Geographic Information System) is the product of multi-science intersection. It has become increasingly perfect after development for several decades. The information system of rural water conservancy project is a new system and model to strengthen the management of rural water conservancy project in the information age. It is the concrete practice of GIS technology in the management of rural small water conservancy project. Continuous exploration of the application of GIS information technology in the management of rural water conservancy projects is conducive to the efficient integration of rural water resources and effective play of small water conservancy projects. There is a natural connection between small rural water conservancy projects and large irrigation areas. For example, the “canals joining reservoirs” irrigation system in Luhun Irrigation area of Henan Province involves many small reservoirs. They are complementary and mutually beneficial.

The demonstration application of GIS information technology in rural water conservancy projects plays a guiding role. Luhun irrigation district is adopted as an example in the paper. Some problems that should be paid attention to in the management of information construction are proposed. It has certain reference and guiding significance for the information construction of various water conservancy projects at present.

Key words: geographic information; water conservancy project; Luhun Irrigation Area; application; information sharing

近年来,河南省极端天气频发,一些地方冬春连旱,乃至大旱,直接造成粮食减产、绝收,人畜饮水困难。为了应对旱灾,确保粮食稳产和农业增收,省政府往往在农村水利工程的基础上采取临时应急措施,启动抗旱机制,加大抗旱力度,有针对性地建设一大批抗旱应急灌溉工程抗旱减灾,力保地方经济发展。如何有效整合农村量大面广的水利资源,实现效益最大化,是建设现代化水利的应有之义。

1 农村水利工程管理现状

农村的水利设施一部分是过去由乡、村(组)集体投资建设的;一部分是通过银行贷款、国债基金等农业扶贫开发项目资金筹建的;还有一部分是随着现代经济发展和农村税费改革政策出台,农户个体、农业合作社建设的。长期以来水利工程重建设轻管理的现象普遍存在,在农村水利工程这一块表现得更加突出,失管和管理不到位的情况长期存在。

1.1 农村水利工程基本情况

农村小型水利工程主要包括水窖、沟渠、塘坝、桥梁、涵洞、小水库、机井、排灌站等。工程具有量大面广、规模小、技术含量少,成本低等特点,工程建设质量参差不齐,工程布局不规范,地区差异性较大,工程建成后运行成本和管理难度相对较大。

1.2 工程管理滞后

目前农村水利工程的管理模式尚未建立,受农村水利工程的区域性限制和地方行政的干预,工程管理严重滞后。农民参与管理和民主监督机制不健全,缺乏水事财务公开,缺乏专门的项目维修和管理基金,也很难从农民收入中筹集资金,造成工程设施老化失修,工程效益得不到有效发挥。

1.3 财政投入不足

农村各级财政资源有限,严重制约了对小型水利

工程的补贴。新农村建设以来,国家在政策层面给予倾向,在规划布局、工程建设、财政补贴等方面给予大力支持。由于河南省很多农村地区都位于欠发达地区,很难有更多的资金用于小微型水利工程建设。结果导致“最后一公里”性质的水利建设项目无法如期开工,建设项目难以按计划完成和验收,加大了继续争取工程项目资金的难度。同时,农村水利建设所需资金与政府财政投入存在较大差距,而受益农民又无力承担这一部分费用。

1.4 农村基层水利技术人员综合素质有待提高

基层水利部门管理范围有限,技术层次低,直接面向农村农业,要承担设计、建设、管理和政府监督等多种职责,但他们一般又不具备相应的资质。基层单位工作条件相对落后,水利部门技术人员少,业务素质差,他们很少抽时间进一步学习,技术水平提升速度缓慢,缺乏深层次的技术管理经验,不能适应当前水利工程的规范化、信息化管理要求。

2 系统的设计原则

农村水利工程信息系统是一种特殊的地理信息系统,是地理信息技术在水利工程和水资源管理中的具体应用。它是一个数量庞大、功能繁多、处理复杂、集空间与管理于一体的系统。它的设计应遵循以下原则并兼顾一般与特殊关系。

2.1 科学性原则

系统平台要借鉴国内外地理信息系统前沿开发技术,结合水利部门的专业特点,按照软件工程的思想和方法,保证系统结构的科学性和合理性。

2.2 实用性原则

根据河南省农村水利管理现状,结合陆浑灌区内一些小型农村水利工程实际,确保信息来源的及时、

准确、完整，提高工程信息管理和使用质量，满足现阶段河南省农村水利科学化管理的需要，农村小型水利工程多无正规设计，或设计资料不健全，或标准不高。如一些小型渠道工程所用材料、尺寸、形状与原设计意图有较大出入，所有这些需根据变化了的情况及时更正，力保工程信息真实。

2.3 标准化原则

信息的规范化和标准化是一个信息系统成功的基本保证，系统的数据必须是规范、标准和完备的。陆浑灌区信息化建设已历时多年，在渠道水位和过流量数据采集、传输、使用和共享等方面已有一套比较成熟的办法，但在实际工作中还是遇到不少麻烦。一是常见的硬件故障，有自记水位的纸张缺失；电池电量不足；太阳能电池板工作中出故障等。这些问题需要在日常管理中加以解决。再一个突出问题是软件方面的，水利工程具有特殊性，比如退水闸退水流量的测算，闸门的型式很多，按其结构型式通常分为平面闸门、弧形闸门及叠梁闸门等，这三种主要型式的闸门在陆浑渠道上均有采用。由于退水闸设计上的不完善，施工的不规范，特别是各个退水闸之间的差异性，在退水量信息化建设上采用单一的水位和流量，计算模式就存在误区，往往造成信息化测流数据与退水闸实际过流不相符的情况。如陆浑灌区东二干渠暴雨河退水闸，在2019年的一次测流数据对比中，流量误差达到20%以上，而且误差率有随退水流量加大而增加的趋势。农村小型水利工程，例如渠道工程，个体之间也有不小差距，这也是农村小型工程信息化建设需注意的问题。

3 系统功能结构和体系架构

3.1 系统的功能结构

农村水利工程信息查询系统，是一个开放的资源共享和应用集成系统，可以为各级水利部门提供信息共享、快速查询等便捷服务。农村水利工程信息化是水利信息化的重要组成部分。它的建设旨在利用当前流行的地理信息技术，将农村水利工程中的电动马达井、沟渠、桥梁、涵洞、水闸、灌区电子地图等资料

信息化，并有效地组织和利用这些数据来满足项目管理的需要，规划日常办公和其他工作，使农村水资源管理更加有序和高效。

3.2 系统的体系架构

整个系统可分为四个层次：基础设施层、数据中心层、应用系统层和信息服务层。中国水利水电科学研究院曾在《今日中国》杂志上介绍的智慧水利的四个阶段依次为：最初的持续研究阶段；2000年以后，为传感器研究阶段；2010—2020年，为田间量测研究阶段；2020年以后，为量测—传感—控制—决策阶段。中国的智慧水利，现在正处在示范应用阶段。陆浑灌区从2009年开始，进行了长达10年续建配套建设，与此同时，信息化建设及时跟进，已取得了一定的成绩，积累了宝贵的经验，但在建后的管理中还存在不少问题。

GIS信息技术系统的4个层次环环相扣，是一整套完整体系。四个层次各有侧重，互为贯通，只有每一个层次每一个环节都建设好、管理好，整个信息系统的功能才能真正有效发挥。

基础设施层是系统构建和运行分析的基础，包括硬件和软件系统、网络、通信、接口系统等，这些是“农村水利工程信息系统”的基础。在陆浑灌区信息系统多年的建管探索中，我们发现基础设施层至关重要。再一个就是数据来源要可靠精准，经过应用系统层，我们才能得到真实有效的信息。

4 农村小型水利工程信息化建管中应注意的问题

农村小型水利工程信息管理系统的建设应以县、乡、镇为单位，信息服务层应设置到乡镇一级，条件许可的情况下可设置到村一级。系统功能应包括系统信息管理、抗旱应急工程信息管理、工程上图、地图、查询和统计等功能，现以陆浑灌区信息化建设为例谈一点具体建设中应注意的问题。

4.1 各种监测设备应集中布设

在陆浑灌区渠道上布设有自记水位计、流量计和

雨量计等设施。由于陆浑灌区渠道长 377km, 再加上沿陆浑水库大坝坝址以上环库 20km 布设了一部分观测设施, 而信息系统的管理中心主要设在陆浑水库管理局机关内, 每次设备巡检需要专人专车, 完全巡检一遍往往需要一周以上时间, 农村条件有限, 设施要尽可能优化布置, 减少巡检时间, 节省有限的人力物力。

4.2 管线保护问题

陆浑灌区沿渠建了不少监控设施, 这些设施多布设在沿渠段所附近, 并通过网线连接到段所相应的设备上, 这些管线过渠入段所, 基本上采用的是地理方式, 有的挖深达 1m 以上, 管线的保护应引起注意, 管线的材质应选优, 达到保护网线的目的, 因检修需要采用土体开挖的办法, 非常麻烦。

4.3 节制闸及退水闸对过流水位的影响

干渠上的节制闸在通水期经常启闭, 当节制闸关闭或部分开启时, 水位虽高, 但过流量很小, 也就是水位与流量呈现不和谐关系。当退水闸开启时, 渠内水位与过流量的关系, 会因退水闸开度不同而发生较大的变化, 水位与流量呈现非正比关系。再一个就是节制闸关闭状态, 节制闸关闭时, 有水位, 但没有过流量。

4.4 退水闸过流量的精准计算问题

陆浑灌区大渠上建有退水闸几十座, 而且因所处地理位置和工作条件差异, 退水闸的型式多种多样, 而且在实际工作中, 退水闸的工作状态是随机的, 闸

(上接第 23 页)

7 结 语

纳鲁巴奥水电站碾压混凝土坝强渗漏的灌浆处理效果表明: 应用 GIN 灌浆法, 采用水泥稳定浆液对碾压混凝土水平缝的堵漏是切实有效的。通过室内试验采用控制变量的方法对水泥稳定浆液进行配比设计, 通过现场试验和理论计算得出最大灌浆压力 p_{\max} 和 V_{\max} 的同时, 根据灌浆试验数据回归分析得出 GIN 灌浆强度值, 按照满足强度值的几种注浆结束标准实施

门开度及闸前水位决定着下泄流量, 且退水渠上的水深与流量并非成线性关系。

4.5 洪水入库情况

洪水入库是一个动态过程, 从水库口库尾到大坝坝址的洪水有一个逐渐上涨的过程, 沿库设置的库水位监测设施所监测的数据不能完全准确反映库水的全部情况, 再一点就是洪水在演进过程中向两边扩散的问题, 这一过程随洪水的大小及库水位的高底而有差异。

4.6 工程设施的安全问题

渠道及水库上的一些水位监测设施所处位置偏远, 如东二干渠节制闸后的水位监测设施由太阳能板供电, 电线明设, 极易遭到人为和自然破坏。还有东一干渠入口测流桥上的自记水位计不锈钢大门, 曾遭到盗窃。因此信息化工程上的设施安全问题应引起足够重视。

5 结 语

本文分析了陆浑灌区信息化建设中存在的问题, 并提出了相应的解决办法。农村小型水利工程基础差, 受地域影响, 工程分散, 工程规模小, 工程数量多, 管理事项烦琐, 信息更新不及时, 管理相对落后, 这是农村信息化建设中应注意的问题。

陆浑灌区信息化建设的成功实践表明, 信息化建设是可行的, 管理是有效的, 可为 GIS 信息技术在农村小型水利管理中的应用提供有益的帮助和参考作用。▲

灌浆。此种灌浆方法可以在大体积混凝土结构裂缝处理和挡水建筑物渗漏处理中推广应用。▲

参考文献

- [1] 李俊刚. GIN 法灌浆技术试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2007(6): 547-550.
- [2] 饶香兰. 稳定水泥浆的研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [3] 汤国辉. 超细水泥稳定浆液在麦洛维大坝灌浆工程中的应用[J]. 中国水能及电气化, 2020(10): 45-48.
- [4] 水利部建设管理司. 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范: SL 62—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [5] 张景秀. 坝基防渗与灌浆技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

海外风电项目 EPC 报价风险浅析

胡 萍 华志强

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

【摘 要】 海外风电项目大多采用 EPC 总承包模式, 总承包商承担较多工程建设风险。文章探讨了海外风电项目 EPC 报价特点, 识别了影响 EPC 报价的风险因素, 并以越南风电项目为例, 论述了在 EPC 报价编制阶段风险因素的应对措施, 以确保报价准确、合理、竞争力更强, 以期总承包商获得预期收益。

【关键词】 海外风电项目; EPC 报价; 风险

中图分类号: TM614

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-006-03

Analysis on EPC Quotation Risk of Overseas Wind Power Project

HU Ping, HUA Zhiqiang

(Powerchina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: Most overseas wind power projects adopt EPC general contracting mode. The general contractors bear more engineering construction risks. The characteristics of EPC quotation of overseas wind power projects is discussed in the paper. The risk factors affecting EPC quotation are identified. Vietnam wind power project is adopted as an example to discuss the countermeasures of risk factors in the preparation stage of EPC quotation so as to ensure that the quotation is accurate, reasonable and competitive, and thereof the general contractor can obtain the expected benefits.

Key words: overseas wind power project; EPC quotation; risk

1 概 述

当前, 海外新能源市场发展潜力巨大, 中国企业承接海外风电项目数量大幅增加。海外风电项目大多采用 EPC 总承包模式, 合同为固定总价, 总承包商承担较多工程建设风险。对于项目前期的投标报价阶段, 需尽早考虑影响报价的各种风险因素, 并提出合理的应对措施, 这对项目后期顺利实施并获得预期收益有着重要意义, 本文探讨对象为陆上风电项目。

2 海外风电项目 EPC 报价特点

2.1 报价方法与国内项目差异大

一般国内风电项目 EPC 报价采用《陆上风电场工程设计概算编制规定及费用标准》(NB/T 31010—2019)^[1]及相应配套定额编制, 国外项目采用实物量法。目前, 海外风电项目 EPC 报价采用定额法与实物量法相结合的方式, 具体是工程建安费用参考国内定额, 结合实物量法对定额人材机消耗量、单价取费进行调整, 综合分析计算建安单价及工程直接费, 再加上工程其他费用汇总得到总报价。

2.2 设计深度及收集的报价信息有限

海外风电项目投标时间短，很难在短期内获得项目所在国及项目所在地全面的信息。由于设计深度往往不够，报价所需的工程量清单完整性、准确性得不到保证，施工组织设计方案合理性、可操作性差等都会影响报价的精度。

2.3 报价各费用占比相对固定

报价中设备费用（含海运物流费）约占 60% 左右，建筑安装费约占 15% 左右，其他费用约占 25% 左右，建筑安装工程大多由当地分包商完成，该部分费用占比低，但却是报价和实施阶段投资控制的关键点，若报价不合理或是对分包商管控不当，易造成 EPC 总承包商亏损。

3 海外风电项目 EPC 报价的风险因素识别

3.1 政治政策风险

政治风险是项目所在国政治人文环境对项目产生的不利影响，主要体现在政治局势是否稳定，是否有潜在的战争、恐怖主义、地缘政治冲突、社会动乱等，以及宗教信仰、价值观念、社会风俗、生活习惯等^[2]；政策法规风险主要是与项目有关的政策法规、相关规定的稳定性，项目所在国财政、劳工、税收、环境保护政策等对报价的影响。

3.2 自然风险

自然风险主要是项目所在地不利的气候条件、复杂的地形地质条件、恶劣的施工环境、自然灾害^[3]给项目实施带来的困难，引起的施工降效甚至不可避免的停工，增加的赶工措施费及管理成本。

3.3 经济风险

经济风险主要是项目执行过程由于中外部经济条件与报价阶段相比发生较大变化，造成的项目成本增加或无法达到预期利润的风险。主要包含汇率波动风险、物价上涨风险、利率变化风险^[4]。海外项目一般以当地货币或美元作为结算币种，尽管风电项目建设

周期不长，但仍存在外币与人民币间不利的汇率变动造成的项目损失风险。项目建设过程中由于业主支付延迟，总承包商存在资金垫付问题，为缓解资金压力，总承包商通常会向银行申请贷款，贷款利率上调会增加项目资金成本。

3.4 市场风险

市场风险是总承包商因市场条件的不利变动而遭受损失的风险。对于海外风电 EPC 项目，该风险主要体现在以下几个方面：①主要设备（如风机、塔筒、箱变、主变、开关柜等）价格存在周期性波动；②项目土建及安装施工大多由当地分包商完成，当地承包商的数量、能力、经营情况是潜在风险之一；③项目施工机械大多在当地租赁，当地机械设备市场，尤其大型吊装机械供应情况，是制约项目进度的关键因素，其供需不平衡易导致租赁费大幅上涨；④风电项目主要设备由国外进口，海运物流费用涨幅大是不可忽视的风险之一。

3.5 设计风险

设计风险^[5]主要是 EPC 报价阶段由于设计部门掌握的项目技术资料有限，导致设计方案存在缺陷而产生的风险。此外，海外项目通常采用国际标准作为技术标准，设计人员对国际标准不熟悉，会影响报价工程量清单的准确性，与项目实施阶段详细方案相比，工程量可能存在较大差异，易引起报价失误。

4 海外风电项目 EPC 报价风险应对措施

位于越南中南部德农省的风电项目，距离胡志明港口约 220km，距离越南岘港约 480km，项目总规划装机容量为 300MW，风电场（场区部分）共分三个标段。本标为场区三标段（装机 100MW）为 EPC 总承包工程，总包范围包括该标段的设计、供货及建造。设计部分包括合同签订后现场的补勘补测、施工详图设计、标准转换等。供货部分包括场区所有设备和材料的采购和运输。建造部分包括场区全部土建，

风电机组、箱变、35kV 集电线路等安装工程。鉴于越南当地实际市场情况，工程在岸部分的土建、电气工程及相关吊装工作由当地分包商完成。

4.1 政治社会风险应对措施

越南当前社会政治环境稳定，社会治安总体状况良好，受传统儒家思想影响，越南在很多传统文化、风俗习惯等方面与我国相似，政治社会风险较低。但项目施工采用当地工人比例较高，项目现场需加强人员安全培训教育等管理工作，编制报价时需在现场管理费中考虑相关费用。

4.2 政策法规风险应对措施

越南劳动力市场巨大，但风电行业熟练工人较少，本工程所需高级技工来自中国，其余为当地工人。按当地规定，中国籍工人需办理工作许可证，且工作日期超一个月，需缴纳社会保险，这些费用在确定中国籍工人单价时需考虑。雇佣当地工人需遵守越南《投资法》《越南的外资企业的劳动法》等有关规定，编制报价前，需详细了解当地工人最低工资标准、法定工作时间、节假日、加班工资、社保和养老金等，合理确定当地工人人工单价。关于税费，需深入了解与项目相关的税种、税率、计算基数、缴纳流程等，本工程涉及的税费有进口设备增值税、关税、承包商所得税、当地建筑业增值税，本工程为新能源项目，进口设备按免关税考虑，其他税费根据规定计算计入报价中。对于环境保护，需根据当地规定在报价中计列 HSE 费用。

4.3 自然风险应对措施

本工程所在地属热带季风气候，高温多雨，年平均气温 24℃ 左右，年平均降雨量为 1500 ~ 2000mm，雨旱两季分明。现场属于低山丘陵地貌，山顶地形宽缓，植被茂密，未发现有规模较大的滑坡、崩塌等不良地质作用，风电场场地整体稳定性好。该项目自然风险较低，报价时可不考虑此类风险应对措施费用。

4.4 经济风险应对措施

本工程报价币种要求采用越南盾，收集近三年人民币兑越南盾汇率变化情况，1 人民币等于 3250 ~ 3500 越南盾，由于项目建设周期短，汇率风险根据最终报价要求适时在风险费中考虑。工程所需水泥、钢材、木材、砂石料、油料等建筑材料需在当地采购，考虑物价上涨因素，以上材料价格在分析建安单价时可适当提高。该工程建设期间，总承包商存在垫资问题，报价中需计列垫资成本，可根据垫资金额、时间及银行同期利率进行测算。

4.5 市场风险应对措施

本工程风电机组采用经设计部门比选后确定的设备厂家，即某公司生产的 156-4.0/135 机型，报价时直接向厂家询价，其他设备根据业主要求品牌、各项参数经询价确定。对于风电机组主吊设备租赁费，根据项目施工工期及前方常驻机构市场调研，按租赁 3 台、租期一年、租赁费 300 万元/月计入报价中。由于项目主要设备均在中国采购，根据设计提供的设备清单及物流公司询价，确定本工程海运物流费（到越南头顿港）约 7300 万元。由当地分包商完成建筑安装工程部分，通过收集当地已完项目的造价资料，尽可能掌握当地分包市场价格水平，据此分析调整报价中的建安单价。

4.6 设计风险应对措施

编制报价前要确保设计方案技术可行、经济合理，设计部门尽可能提供完整准确的工程量清单。施工组织设计方案尽可能详细，如主要设备在越南的陆运方案，是否需要当地道路桥梁进行改造，大型施工设备进出场方案，现场施工供电供水方案，场内交通条件等。本工程土建费用中交通工程投资占比大，对报价影响较大，需重点关注，如风机叶片和塔筒在当地运输采用特种车辆，场区内部虽有多条现有乡村道路贯穿整个风电场，但道路路基宽 3m，不满足重大件运输要求，约 30km 需进行改扩（下转第 18 页）

浅析“四不两直”方式在水利工程建设 监督检查中的工作程序

李增明^{1,2}

- (1. 水利部建设管理与质量安全中心, 北京 100038;
2. 水利部水利督查工作领导小组办公室, 北京 100038)

【摘要】“四不两直”方式已逐渐成为水利工程建设监督检查的主要方式, 在水利工程建设管理中发挥了重要作用。文章从查前准备、现场检查、问题认定、问题整改、责任追究以及成果资料归档等环节入手, 对监督检查的相关程序进行了系统性梳理, 进一步明晰了检查的工作标准和程序, 供今后开展类似工作时参考。

【关键词】 四不两直; 水利工程; 监督检查

中图分类号: TV512

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-009-03

Brief Analysis on Working Procedures of “Four-Not Two-Straight” Mode in Supervision and Inspection of Water Conservancy Project Construction

LI Zengming^{1,2}

- (1. *Center of Construction Management & Quality & Safety Supervision, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;*
2. *Office of Water Conservancy Supervision Leading Group of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038*)

Abstract: “Four-Not Two-Straight” mode has gradually become the main way of supervision and inspection of water conservancy project construction. It has played an important role in construction management of water conservancy projects. The relevant procedures of supervision and inspection are systematically combed in the paper from the aspects of pre-inspection preparation, on-site inspection, problem identification, problem rectification, accountability, result archiving, etc. The working standards and procedures of inspection are further clarified, thereby providing reference for future similar work.

Key words: Four-Not Two-Straight; water conservancy project; supervision and inspection

水利工程建设中以“四不两直”方式实施的监督检查, 简化了工作手续, 通过暗访性突击检查, 可发现被检查单位最原始、最真实的管理状态及建设过程中的违规行为和工程缺陷, 逐渐成为水利工程监督

检查的主要方式。监督检查工作主要有“查、认、改、罚”四个工作环节, 主要工作流程为: 查前准备→现场检查→问题认定→问题整改→责任追究→成果资料归档等。受起步晚、制度新等方面诸多原因的影

响,这种检查方式距离规范化、专业化高质量开展监督检查工作还有不小差距,需要进一步规范工作程序。

1 查前准备

1.1 明确监督检查范围和事项

水利工程建设监督检查范围主要包括从事水利工程建设、勘察、设计、施工、监理、检测、安装等建设(包括新建、扩建、改建、加固等)活动的项目单位。监督检查事项主要包括工程施工质量、安全生产等方面的检查工作,共涵盖了土方工程、石方工程、地基及基础处理工程、防渗和排水工程、支护工程、砌体工程、混凝土和钢筋混凝土工程、金属结构工程、机电设备、安全监测工程、自动化系统工程、原材料和中间产品检测、安全生产、工程监理等专业内容。

1.2 出发前的准备工作

根据工作计划安排,确定检查项目、检查对象、检查内容和执行时间。根据不同的监督检查事项,适时到相关单位开展查前调研和咨询或上网查找相关工程信息,了解工程概况、标段划分、项目法人、勘察设计单位、监理单位、施工单位等工程建设信息,了解掌握工程类型和工程进度等,针对工程特点收集和熟悉有关合同规定、规程规范和相关资料。

2 现场检查

按照“四不两直”方式实施突击性现场检查,要做到“四到”,即对现场正在进行或已经完成的工程,腿要走到、眼睛要看到、手要摸到、工具仪器要用到。

2.1 制定检查路线

检查路线(以土方工程为例)一般为:土方填筑作业面(重点)→土方开挖作业面→土工试验室(重点)→料场(视情况而定)→施工项目部。

2.2 施工现场检查内容

土方填筑作业面检查时,主要检查项目为土料、

铺土、碾压施工、渠道边坡、层间结合面和压实指标是否符合设计要求。重点检查(不限于)以下内容:土料粒径是否符合设计要求,土料是否含有杂质或冻土块,铺土是否按照碾压试验确定的参数施工,土料碾压遍数是否合格,边角部位是否碾压到位,开挖至下一层,检查层间结合是否按要求处理,抽查现场干密度试验,检查取样时环刀位置是否在碾压层下1/3处,土方干密度是否采用双环刀平行测定,邻近建筑物回填碾压机械是否用小型机械或人工夯实,建筑物周边回填前钢筋头、对拉螺栓端部是否按规定处理,建筑物周边回填时是否按要求涂刷泥浆,泥浆配置是否满足要求。

土方开挖作业面检查时,主要检查项目地基处理、边坡、开挖宽度、高程、中心线位置等是否符合设计要求。重点检查(不限于)以下内容:不良地质土的处理、渠基处理是否符合设计要求,膨胀土渠基开挖后是否存在暴晒或泡水,施工开挖预留保护层厚度是否满足要求,边坡坡比是否符合设计要求,是否存在安全隐患。

土工试验室检查时,重点检查(不限于)以下内容:试验室、人员资质是否符合要求,土工试验仪器是否按期检定,环刀、铝盒是否校准,含水率试验是否准确、规范,土方干密度试验是否准确、规范,试验检测报告、原始记录是否符合规范要求。

2.3 内业检查内容

完成工程现场检查后,要进行内业资料检查。检查组进入项目部后,应主动索取相关资料(一般在质量管理部门或档案室)。土方工程内业检查内容为土料场复勘成果报告、机械设备报验、碾压试验方案和成果报告、开挖和填筑施工方案、作业指导书、填筑工序三检表、单元工程质量评定表、土方压实度试验检测报告和验收资料等。重点检查(不限于)以下内容:评定资料、试验资料是否在填写,是否同一人签字,是否有造假行为,料场是否按照招标文件或设计要求复勘,击实试验最大干密度和最优含水率取值是否准确合理,土方填筑专项施工方案是否报批,评定资料、试验资料是否准确、规范。

2.4 现场检查注意事项

2.4.1 问题记录

发现问题应及时记录。注意向施工单位核实施工部位、桩号、高程等位置信息。问题记录要简明、扼要。返回驻地后，及时补充整理对应的规范条款、问题定性、问题照片等。

2.4.2 取证

检查组应安排专人负责拍照取证工作。取证照片要按照“先要拍到，再拍好”的原则进行。拍摄时多用大远景、全景、特写拍摄，可以多拍摄一些视频。拍摄完成后可以用两张或几张照片组合在一起突出展示。照片右下角标注时间，推荐使用宋体 25 号，按照年、月、日、时、分、秒进行编辑。问题照片要有代表性，能突出显示问题所在部位、问题的现状，达到一目了然的效果。

2.4.3 工作纪律和保密要求

工作人员要严格遵守各项工作纪律，做到依法依规、客观公正、严谨精准、规范高效。现场检查时要严格遵守中央八项规定精神和廉洁工作纪律。工作期间要注意保密，不得向无关人员透露工作信息，不得提前向被检查单位透露有关问题定性和责任追究等信息。

3 问题认定

现场检查工作结束后，检查组应尽快完成现场检查报告初稿，并针对监督检查中发现的问题，初步与被查单位交换意见，目的是进一步确定督查过程中提出问题的客观性、认定问题的准确性。

3.1 问题交流无异议

问题交流过程中，充分听取被检查单位意见，如被检查单位确认无异议，填写《水利工程监督检查问题确认单》，由参建单位各方代表签字认可。

3.2 问题交流有异议

如被检查单位有异议，检查组应再次复核问题的客观性、问题定性的准确性。如问题无误，耐心向被

检查单位做好解释工作，签认《水利工程监督检查问题确认单》。如问题有误，检查组应对问题进行删除或修改。经检查组复核后，被检查单位如坚持对问题提出异议的，可在规定日期内提供相关材料向有关单位或部门进行申辩。

4 问题整改

现场监督检查结束后，检查组在填写检查记录的基础上，对发现问题进行汇总并提出整改建议，统计检查工作情况和问题情况，依据有关文件规定明确问题等级，分析问题原因，提出整改措施和责任追究建议，形成监督检查报告。重点要分析研判监督检查中发现的问题，印发整改文件，组织指导相关单位“举一反三”对问题进行限期整改，并对加强水利工程建设提出政策性建议。整改文件下发后，按照文件要求继续跟踪问题整改，确保整改实效，督促责任单位及时报送整改报告并进行复核。

5 责任追究以及成果资料归档

5.1 责任追究

对于监督检查发现的问题，检查组要根据发现问题的数量、性质、严重程度，依据有关管理办法提出责任追究建议。严格按照有关监督检查办法组织实施责任追究或责成有关单位实施责任追究。查处的违法行为线索移交相关纪检监察部门，按有关规定另行处理。

5.2 成果资料归档

根据责任追究通知内整改期限，检查组要定期督促责任单位整改。整改期限截止后，整改资料能够完整准确反映整改情况的，确已整改的问题，予以销号。若整改资料不能反映整改情况的，督促有关单位继续提供资料。整改资料不全的问题，不予销号。所有问题整改核实后，该项监督检查流程完成，资料予以归档。检查组要收集、整理、保存工作过程资料，确保工作成果的完整性、规范性和可追溯性。

以“四不两直”方式实施的水利（下转第 28 页）

施工技术

山区特长富水隧道防水治水施工技术

庄炳鑫

(中铁十八局集团第一工程有限公司, 河北 涿州 072750)

【摘要】 文章以瓦日铁路太行山隧道富水段施工作为研究对象,对涌水原因和存在的风险进行详细剖析,介绍了“预报先行、治水紧跟、管棚超前、注浆配合、控制进尺、微弱爆破、强化支护、快速封闭、加强测量”的特长富水隧道防水治水施工技术。通过配置横通道、截流排放与集水坑阶梯式排水并用、增加泄水孔、进行有效注浆、配置中部排水沟槽等一系列举措,有效降低了隧道涌水风险,解决了山区长大富水隧道施工难题,加快了施工进度,确保了施工运营安全。

【关键词】 特长隧道; 富水段; 超前地质预报; 排防引堵水

中图分类号: U25

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-012-07

Waterproofing and Water Control Construction Technology of Super-long Rich Water Tunnel in Mountainous Areas

ZHUANG Bingxin

(The First Engineering Co., Ltd., China Railway 18th Bureau Group, Zhuozhou 072750, China)

Abstract: The rich water section construction of Taihangshan Tunnel in Wari Railway is adopted as the research object in the paper. The cause of water gushing and the existing risks are analyzed in details. The super-long rich water tunnel waterproofing and water control construction technologies of “forecast first, water control subsequent, pipe shed in advance, grouting coordination, control footage, weak blasting, strengthened support, quick closure and strengthened measurement” are introduced. The tunnel water gushing risks are effectively reduced by a series of measures as follows: configuring cross passages, combination of intercepting discharge and stepped drainage of sump pit, increasing drainage holes, carrying out effective grouting, configuring central drainage trench, etc. The construction problems of super-long rich water tunnels in the mountainous areas are solved. The construction progress is accelerated, thereby ensuring the safety of construction operation.

Key words: super-long tunnel; rich water section; advanced geological prediction; water drainage, prevention, diversion and blocking

山岭特长富水隧道在建筑施工领域是公认的施工难题。富水隧道在进行隧道开挖支护过程中,经常出现大涌水现象,隧道甚至出现水帘洞,如果不能很

好处理涌水,极易导致隧道发生石块掉落甚至塌方,严重影响项目工程整体安全 and 质量。

1 工程概况

瓦日铁路太行山隧道横跨河南、山西两省，左右线全长 36.233km，太行山隧道出口地处河南林县姚村，右线隧道的出口里程是 DyK596 + 973.07，左线出口里程是 DK597 + 001，隧道进口位于山西省平顺县石城镇，隧道右线出口里程是 DyK578 + 864，隧道左线出口里程是：DK578 + 876。隧道最小埋深和最大埋深分别为 12.10m 和 915.09m。隧道 DyK590 + 704 (DK590 + 739) ~ DyK590 + 309 (DK590 + 334) 里程段全长约 184.9m，通过暗挖法施工从露水河浅埋地段下穿而过。该段地质条件较差，为 V 级围岩，由于瓦日铁路太行山隧道上部及周边为含水量很大的溶洞和暗河，隧洞内断层和裂隙十分密集，与溶洞和暗河等含水层相连，易产生高压突（涌）水风险，给施工造成很大困难。

2 工程突发涌水情况

从隧道进洞伊始，一号、二号、三号斜井施工区域，下穿露水河段施工区域陆续出现不同程度的涌水。其中一号斜井 2010 年 5 月 9 日动工，6 月 7 日斜井左拱脚突发大涌水，最大涌水量近 375m³/h。2010 年 11 月到 2011 年 1 月正洞相继出现五次极大涌水，涌水峰值达 1500m³/h。自 2010 年 6 月发生涌水开始，一直到 2013 年 11 月，一号、二号、三号斜井施工区域，下穿露水河段施工区域等隧道区间累计抽排水量近 10000 万 m³，涌水量非常巨大，远远超过原设计范围。

3 富水隧道施工难点

a. 如果隧道排水不畅，会降低工作面的稳定性：通过钻爆法施工的隧道比较容易出现坍塌。隧道进行钻爆法施工时，是以确保工作面的稳定性为前提条件的。通常富水隧道大多为软弱围岩，围岩中存在裂缝，一旦发生大量涌水，就会严重影响工作面的稳固，导致工作面出现坍塌。

b. 如果涌水范围比较大，会极大降低隧道支护安全性。涌水会影响支护混凝土和围岩之间的附着性；涌水也导致锚杆的锚固材料长时间受水浸泡而丧失锚固性能，极大降低支护效果。

c. 如果隧道基础水量过大，会导致基底不牢固。隧道施工时，机械设备行驶时会对隧道基底反复碾压，导致基础产生大量泥泞，影响机械施工效率和质量安全。而基底不牢固也会严重影响支护效果和隧道安全性、稳定性。

d. 如果泄水不当，导致地下水位严重下降，这不仅会造成隧道地层沉降，还会影响周边地层发生沉降。如果处理不当，会造成周边地表构筑物倾斜。

4 隧道施工方案设计

为了解决涌水对太行山隧道施工和营运安全的影响，按照“预报先行、治水紧跟、管棚超前、注浆配合、控制进尺、微弱爆破、强化支护、快速封闭、加强测量”和“以排优先、防引堵相结合”的方法和原则，对涌水段进行科学治理，根据涌水位置和涌水量大小采取不同防水治水方案^[2]。

除准确进行超前地质预报外，还要做好防水排水，采取三台阶七步隧道开挖法，施工时必须遵循“先行预报、紧跟治水、超前管棚、微弱爆破、强化支护、控制进尺、配合注浆、快速封闭、加强测量”的准则，隧道每循环开挖进尺控制在 100cm 范围以内，避免在隧道开挖的时候发生隧道表面渗漏水、掉石块等现象。在进行掘进时，台阶设计长度控制在 300 ~ 500cm 范围，通过能破碎岩石的风镐进行开挖，或者通过弱爆破^[3]开挖。台阶法施工工序见图 1。

5 隧道防水治水施工技术

5.1 超前地质预报

太行山隧道施工时的不确定因素很多，针对地质结构十分复杂的富水地段，特别是露水河浅埋地段下穿段，通过采取 TSP、红外探水和地质雷达等一系列超前地质预报举措，预判溶腔含水情况。

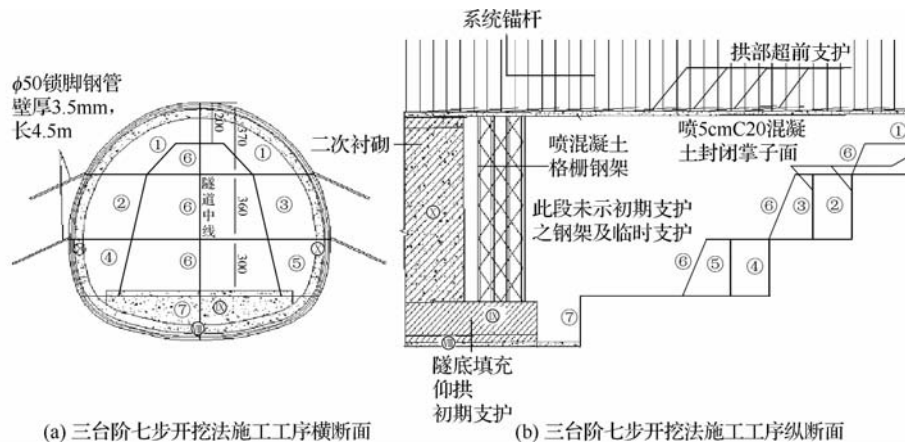


图1 台阶法施工示意图 (单位: cm)

5.2 洞外处理措施

位于隧道下部的露水河与隧道上部的距离非常近,而且隧道周围岩内部的水系十分发达。太行山隧道顶部和露水河底部间的岩层一般是岩石层,如果不能妥善地对地表渗透问题进行加固处理,将会严重影响项目工程整体质量。对河底和隧道顶部之间的岩体进行深孔注浆固结,加固深度大约2.5~6m。具体的深孔注浆次序为:布置钻孔→将花管在土层进行钻孔→实时沉降观测→开展深孔注浆→进行钻孔封堵^[4]。

5.3 洞内处理措施

在确保安全施工的前提下,要依据涌水具体位置和涌水量大小研究隧道内防水治水排水的方式方法。如果涌水为股状水,借助排水管首先引流到隧道边墙脚,接着将涌水引到中间排水沟槽。针对隧道局部产生的裂隙涌水,引流到中间排水沟槽排出,同时做好支护。针对拱部线状的涌水,通过挡排水的方法,从隧道两侧首先引排至墙脚,然后引流到中间排水沟槽排出,避免洞内出现如大雨倾盆现象,切实优化隧道的施工环境。针对隧道里的积水,借鉴类似工程实践经验,采取帷幕注浆或深孔注浆进行固结;为避免施工中突发涌水安全事故,增设集水井和排水沟,通过归槽集水抽排的方式,能够很好地改善隧道施工环境^[5]。

5.3.1 增设横通道

为提高施工效率,借助三臂凿岩台车辅助隧道开

挖。因为二次衬砌台车净空比较低,影响体积较大的三臂台车的自由行走,为确保三臂台车能在掌子面进行施工作业和出渣车的自由运输,在隧道里每间隔125m增加一个宽度为7m的横通道,将横通道和隧道边线成40°交角进行设置,方便三臂台车在二次衬砌台车和掌子面之间的存放和施工。横通道设置见图2。

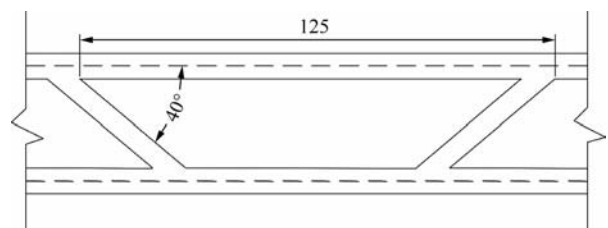


图2 隧道之间横通道设置示意图 (单位: m)

通过加强隧道里机械设备的调度,避免隧道施工出现“肠梗阻”式堵塞。

5.3.2 仰拱设计和排水方案

a. 仰拱设计。按照铁路施工规范,仰拱和掌子面的间距必须小于40m,为了“早闭合、防塌方”,借助仰拱栈桥施工^[6](见图3)实现开挖和浇注混凝土同步作业,确保运输物资、运渣的装载车等施工车辆的顺利通行。

b. 富水段仰拱排水。为最大限度减少涌水对隧道施工的不良影响,具体实施方案如下:对横通道进行截流排放。当涌水量不大,而且属于顺坡排水方式

时，为确保仰拱顺利施工，通过截流排放方式排水（见图4）。

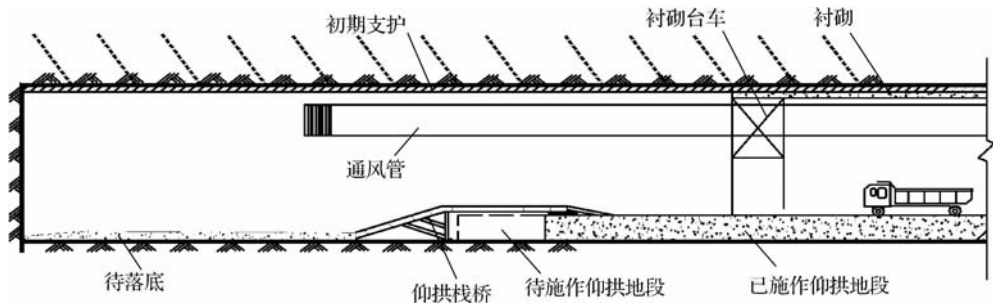


图3 仰拱栈桥立面示意图

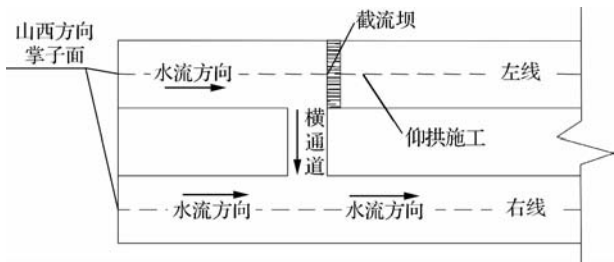


图4 隧道涌水量不大情况下排水示意图

集水坑阶梯式与横通道截流方式同时运用，进行双排水。对涌水进行妥善处置，确保仰拱施工时，周围环境没有积水现象（见图5）。如果水量变大，配备抽水泵，顺着坡道通过排水管把水引至下游排到隧道外部（见图6）。

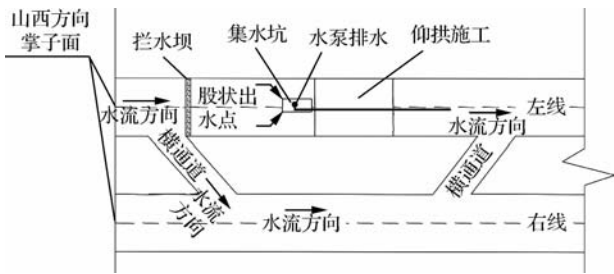


图5 隧道拦水坝后方出现股状涌水点时采取的排水方式

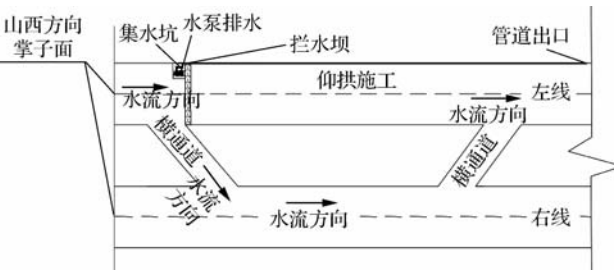


图6 隧道出现较大涌水量时采取的排水方式

5.3.3 衬砌防排水施工方案设计

在二次衬砌拱墙背面布置厚度为1.5mm的防水板，为了将二衬混凝土的抗渗透能力和防水效果全面提升，将二衬混凝土厚度设定为50cm，浇筑C20混凝土，提高抗渗透能力。当混凝土达到设计强度要求以后，立即开始注浆充填。

5.3.4 富水段防排水与矮边墙施工

1号斜井完成开挖后，针对拱部线状水的治水举措：首先进行第一层防水板铺设，然后将拱部的线状水从隧道两边引流到墙脚位置，然后引流到洞外，避免洞内出现“大雨倾盆”现象；洞内通过归槽排水，极大地提高洞内通行能力；紧接着进行第二层防水板铺设，实现隧道治水目标。

在隧道涌水量大的区域，完成开挖以后，第一步将环向盲管及首道防水板铺设到隧道拱顶以下6m左右位置，再把水引流到位于边墙的排水沟槽中，再排到洞外，确保在无水的状态下开展矮边墙施作；当完成矮边墙施工任务以后，将拱部和矮边墙预埋的环向盲管连接好，紧接着进行土工布和防水板的铺设。

5.3.5 注浆堵水技术

注浆堵水技术应用在铁路富水隧道施工领域中可以加强围岩稳定性。为了有效降低隧道施作时排水压力，同时将涌水有效截堵到集水井并顺利排出洞外，针对涌水量大小和实际情况采取不同的注浆方式。在瓦日铁路太行山隧道富水区域治水过程中，通过对全断面帷幕注浆和周边注浆两种不同方式进行试验性比选，研究更好的注浆方式。

a. 全断面帷幕注浆。由于隧道右线长约 120m、左线长约 138m 的区间围岩存在较大裂隙，导致涌水严重。为确保施工安全，采取全断面帷幕注浆堵水方式进行隧道治水，相关参数和设计见表 1、图 7。

表 1 全断面帷幕注浆设计参数

项 目	对 应 参 数 值
加固范围	掌子面和掘进轮廓线以外 50cm 距离
全断面帷幕厚度/cm	50
钻孔总数/个	44
下一循环岩盘的预留宽度/cm	50 ~ 70
止浆结构厚度/cm	30
浆液进行扩散范围/cm	60
开挖循环区间长度/cm	180 ~ 200 (根据堵水效果进行合理调整)

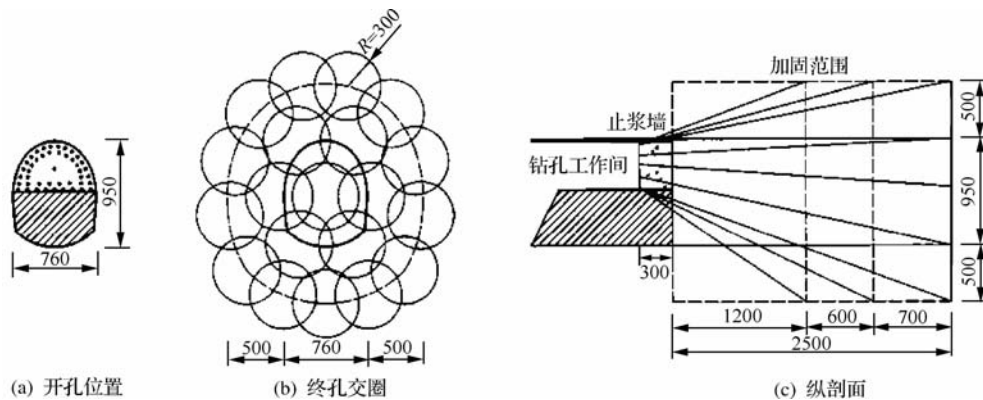


图 7 全断面帷幕注浆设计 (单位: cm)

b. 周边注浆。为了保证隧道开挖、支护时的安全，在妥善进行治水的同时，必须降低排水压力，确保施工和运营时涌水汇集后能够顺利排出洞外。对左右线共计 142m (DyK585 + 309 ~ DyK585 + 230) 段落通过周边注浆形式进行堵水施工。借助液压平台安装好中空注浆锚杆，然后采用高压注浆泵将浆液注入围岩中。每根注浆管之间按照 1m 的间距进行布置，并根据不同涌水形式采取不同的封堵方式：如果涌水点非常集中，径向注浆与顶水注浆同时进行；如果涌水是雨状或者散状，采取径向注浆形式。为达到较好的注浆效果，注浆范围可以适度扩大。出水段的围岩缝隙很多，为保证注浆堵水的效果，采用全断面径向注

对浆液按照“跳孔隔注、从上到下注、从外面朝里注”的原则进行施作。钻孔注浆相关规定为：如果涌水量在 $0 \sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ，注浆深度为 10m；如果水量在 $10 \sim 30 \text{ m}^3/\text{h}$ ，注浆深度为 5m，如果水量超过 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ，马上终止钻孔，立即开展注浆。注浆压力为 6MPa。

完成全断面帷幕注浆后，对钻孔进行检查，发现钻孔不存在坍孔现象，成孔效果良好。全断面帷幕注浆堵水共完成左、右线一共 13 个循环，长度共计 258m。完成注浆进行开挖时，发现隧道里比较大的裂隙通过浆液有效填充后，注浆堵水的效果颇佳，基本不存在渗漏现象，确保了富水带的安全施工，平均月掘进达到 26m 左右。通过对隧道开挖和全断面帷幕注浆工序进行有效分配，两者消耗时间比例为 2:3。

浆的形式，注浆参数和设计见表 2、图 8。

表 2 周边注浆设计参数

周边注浆设计参数	对 应 参 数 值
钻孔数/个	18
止浆结构厚度/cm	30
浆液扩散距离/cm	30
注浆循环段落长度/cm	250 (含止浆墙)
开挖循环区间长度/cm	180 ~ 200 (依据开挖实际注浆堵水效果确定)
加固范围	掘进轮廓线外 5cm
下一循环岩盘的预留宽度/cm	50 ~ 70

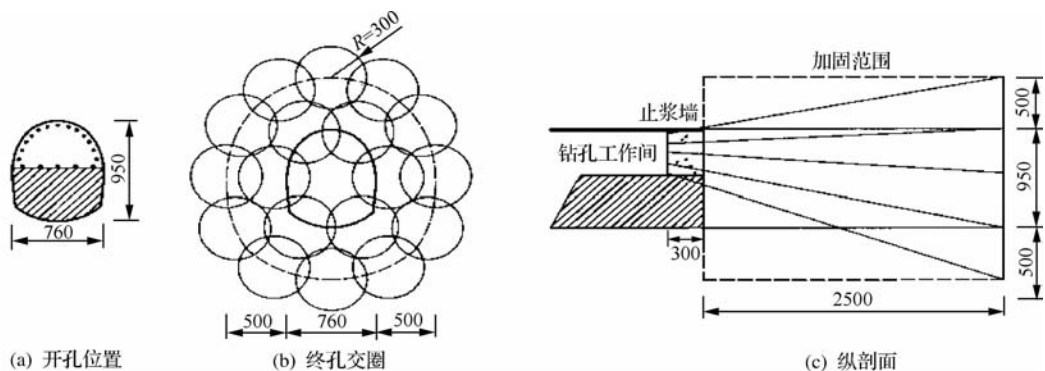


图 8 周边注浆设计 (单位: cm)

如果有些区间涌水量不大, 必须通过水泥—水玻璃双液浆形式先行封堵, 接着反复压注单液浆, 确保压浆的良好效果。

周边注浆堵水左右线共完成 7 个循环 140m 区间的施工。采取周边注浆方式, 能够满足检查孔每分钟出水 10L 的规范要求。通过对周边进行局部加密注浆, 确保良好的注浆堵水效果。

通过对周边注浆与全断面帷幕注浆进行对比, 堵水效果前者较好, 每月进度平均在 40m 左右。通过对隧道开挖和周边注浆进行有效分配, 开挖和注浆消耗时间比例为 3:2。

c. 注浆研究分析。通过对瓦日铁路太行山隧道富水带进行注浆研究, 能够得出以下结论: 无论全断面帷幕注浆还是周边注浆, 都能够确保开挖安全, 两种方式下, 每月开挖进度分别为 26m 和 40m。通过对全断面帷幕注浆和周边注浆进行对比, 前者比后者注浆孔数增加 59%, 注浆时间增加 56%, 进度降低 56%。通过综合比选, 周边注浆优势更为明显。

5.3.6 整体道床排水设计

由于工程涌水量过大, 如果仅仅采用边侧泄水沟形式, 排水能力远远不足, 所以在隧道中线增加一条泄水沟槽加快排水。但因为该隧道是供重载列车使用, 而且埋深很大, 为确保施工和运营安全, 在泄水沟槽上部增加扣拱。排水沟槽及上部结构见图 9。

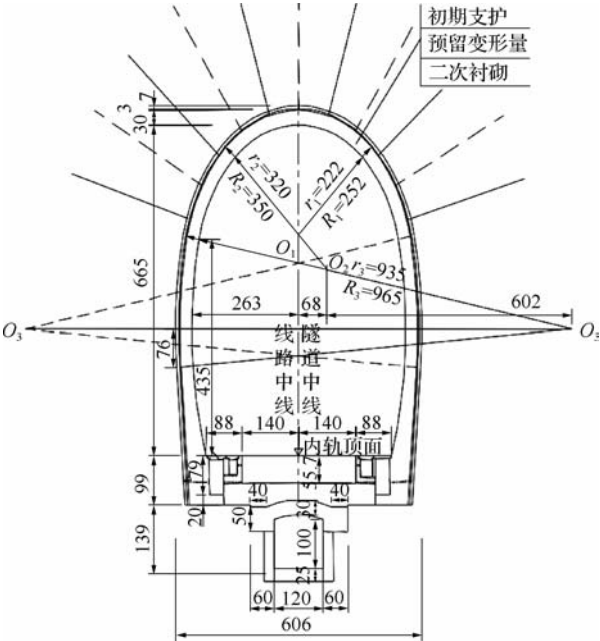


图 9 排水沟槽及上部结构 (单位: cm)

5.3.7 排水沟槽与边侧泄水沟比较

通过实践检验, 将下部排水沟槽和边侧泄水沟进行对比, 下部排水沟槽具备以下优势: 下部排水沟槽水压变化更为平均, 不容易出现水压偏心现象, 而边侧泄水沟容易产生水压偏心。下部排水沟槽施工方便灵活, 尺寸深度可以自由调整, 将基底进行加固后, 极大增强基底承载力, 下部排水沟槽断面面积较大, 能够通过机械进行开挖, 可有效节约施工时间, 而且方便排查、清淤和修整; 但是边侧泄水沟断面面积比较小, 不方便排查、清淤和修整, 如果出现拥堵, 不

方便疏解。

由于隧道所在地的林州市非常缺水,采用排水沟槽的设计,能够把太行山隧道的大量涌水通过集中收集后进行有效再利用,用于灌溉、降尘等,实现节水,利于环保;通过对下部排水沟槽进行科学设置,能够确保太行山隧道施工运营时的干燥。

下部排水沟槽能够实现与隧道开挖同步施工,施工更便捷、投入更小,不仅缩短工期,还便于维护;能很好处理排水问题,为无砟轨道施工创造良好的施工条件,能够极大削减后期病害,保证后期运营的安全。

6 结 语

针对太行山隧道面临的长大富水隧道施工难题,为最大程度消除突(涌)水风险,遵循“预报先行、治水紧跟、管棚超前、注浆配合、控制进尺、微弱爆破、强化支护、快速封闭、加强测量”的原则,采用“以排优先、防引堵相结合”的方法,对涌水段进行

(上接第8页)建,这些费用根据当地同类项目造价指标、现场情况等经分析测算后确定。总之,EPC报价编制需紧密结合项目设计方案,及时与设计沟通协调,以防报价脱离实际。此外,编制EPC报价时,对无法预估或不能量化的风险可考虑一定的风险费用,即在报价中计列不可预见费或风险费,具体金额根据项目情况及报价水平综合考虑。

5 结 语

海外风电项目EPC报价是一项复杂的、系统性工作,时间紧任务重,报价需考虑的风险因素较多,风险因素应对措施恰当与否将直接影响项目前期中标或执行阶段总承包商利益的获得。因此,EPC报价编制需报价人员与项目团队通力协作,全面分析影响

科学治理。通过配置横通道、截流排放与集水坑阶梯式排水并用、增加泄水孔,进行有效注浆、配置中部排水沟槽等一系列举措,取得了较好的治水排水效果。▲

参考文献

- [1] 杨磊.长大富水隧道水害防治措施研究[J].中国水能及电气化,2021(6):23-26.
- [2] 万泽恩,李树忱,赵一民,等.富水地层盾构隧道同步注浆惰性充填材料配比与试验研究[J].土木工程学报,2021,54(7):123-132.
- [3] 王家熠.临近既有线富水超浅埋暗挖隧道降水施工技术[J].工程机械与维修,2021(3):235-237.
- [4] 张勇.高风险富水隧道施工技术经济分析[J].铁道建筑技术,2021(4):119-122,143.
- [5] 雷晓丹,张晓景.富水区隧道围岩软化后衬砌变形研究[J].太原学院学报(自然科学版),2021,39(1):13-17.
- [6] 陈天明.高原富水冰碛隧道洞内坍塌成因与处置技术研究——以拉林铁路米林隧道为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(2):274-282.

报价的风险因素,提出合理的解决方案,才能使报价合理、准确、具备较强的市场竞争力。▲

参考文献

- [1] NB/T 31011—2019 陆上风电场工程设计概算编制规定及费用标准[S].北京:中国电力出版社,2011.
- [2] 温智,李哲,李月皎,等.海外EPC项目投标阶段风险分析和管理[J].当代化工,2018(4):780-783.
- [3] 柏桂清.海外工程项目投标风险分析[J].山西建筑,2012(5):267-268.
- [4] 张轶斐.海外发电总承包项目报价风险分析之物价风险[J].工程造价管理,2013(4):27-28.
- [5] 肖新华,刘洁.海外EPC项目风险在投标阶段的识别和防范[J].水利水电施工,2013(3):91-93.
- [6] 崔垒.浅谈沙特阿拉伯地区施工组织设计特点[J].中国水能及电气化,2019(3):56-58.

碾压混凝土坝体强渗漏灌浆处理关键技术

周尚玉 汤国辉

(中国水电基础局有限公司, 天津 301700)

【摘要】 为解决乌干达纳鲁巴奥水电站碾压混凝土坝体渗漏严重的问题,应用GIN灌浆方法并采用水泥稳定浆液对坝体进行了堵漏灌浆处理。处理后,坝体混凝土裂缝完全封堵,漏水问题彻底解决,坝体得到了很好修复。

【关键词】 GIN灌浆; 稳定浆液; 混凝土裂缝

中图分类号: TV642

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-019-05

Key Technology of Strong Seepage Grouting in RCC Dam

ZHOU Shangyu, TANG Guohui

(Sinohydro Foundation Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

Abstract: GIN grouting method and cement-stabilized grout were adopted for seepage blockage grouting treatment in order to solve the serious leakage problem of RCC dam body in Nalubao Hydropower Station in Uganda. The concrete cracks of the dam body are completely blocked after treatment. The water leakage problem is completely solved, and the dam body has been well repaired.

Key words: GIN grouting; stable grout; concrete crack

乌干达纳鲁巴奥水电站碾压混凝土坝坝体渗漏严重,坝面混凝土裂缝最大渗流量 67L/min。为了保证大坝安全和水电站的正常运行,对大坝进行了灌浆修复处理。灌浆材料通过室内试验、现场试验、理论计算等方法确定采用水泥稳定浆液,并通过现场灌浆试验确定GIN灌浆强度值等关键参数。坝体灌浆处理后通过现场实际表现、孔内成像、压水试验和钻孔取芯等方法判定修复取得了很好效果,坝面漏水减少至0。灌浆处理结果表明本碾压混凝土坝体裂缝采用稳定浆液灌注具有良好可灌性、可控性和耐久性,所采用的

GIN强度值不仅保证了大坝的安全、减少了裂缝劈裂破坏,也实现了堵漏目标。

1 工程概况

乌干达纳鲁巴奥水电站主坝位于乌干达、肯尼亚和坦桑尼亚三国交界处,位于维多利亚尼罗河上,地理位置坐标为东经 330°9',北纬 0°39'。其右岸的津加市是乌干达港口之一,也是仅次于首都坎帕拉的第二大商业中心。乌干达纳鲁巴奥水电站于1954年由英国人建造,主坝为碾压混凝土重力坝,主坝长约为

354.3m, 最大坝高 31m, 水库最大库容 2048 亿 m^3 。大坝经过几十年的生物破坏、风化、水流侵蚀等导致坝体出现了严重的渗漏情况, 坝面出现较多裂缝、布满青苔, 坝面最大渗流量为 $65\text{L}/\text{min}$, 渗漏严重影响大坝的整体安全和厂房发电效率, 为了保证大坝的正常运行和坝体安全, 业主决定对大坝进行灌浆修复处理。

为了解决坝体渗漏导致厂房发电机组不能满负荷工作的问题, 同时降低大坝的运行风险、提高水库库容, 考虑到传统灌浆工艺自身的局限性, 决定按照英国规范 (BS EN447—2007) 采用 GIN 灌浆法对其进行修复, 灌浆材料采用水泥稳定浆液。

2 GIN 灌浆法的特点

GIN 法灌浆, 是最先在国外出现的一项新的灌浆技术。GIN 灌浆强度值用灌浆压力 p (MPa) 和每米浆液注入量 V (L/m) 的乘积表示, 其含义为单位长度灌浆段内消耗的能量, 不管注入率的大小都要使 pV 的乘积为一常数, 这样就可以对宽大或者可灌性较大的裂缝限制其灌入量, 对较小的裂缝或者可灌性较差的裂缝提高灌浆压力。使得各灌浆段都有一大致相当的浆液扩散半径, 达到防渗堵漏的效果。

GIN 灌浆法相对于常规灌浆法具有以下优点:

a. 在灌浆过程中采用稳定浆液灌注, 灌注材料的黏聚力、流动性和扩散能力固定不变, 灌浆浆液在长时间、远距离的缓慢流动状态下沉淀少。浆液通过细微窄小的裂隙时受到挤压和过滤后析水率小, 对灌浆部位劈裂破坏小。

b. 由于灌浆过程简易快捷, 无须改变浆液配比, 更便于自动化控制, 提高灌浆的工作效率。

c. 灌浆浆液水泥含量高, 浆液在被灌入岩体中硬化后收缩性小, 与结构面结合强度高, 使防渗体具有较好的耐久性。

d. GIN 灌浆法在灌浆过程中逐渐提高压力, 直到 p 、 V 、GIN 中任意一值达到标准就可以结束灌浆, 相对于常规法要在设计压力和小注入率下持续较长时

间提高了工效。

e. 节约材料, GIN 法灌浆平均单位注入量一般情况下是常规灌浆的 30% ~ 55%。

3 灌浆稳定浆液研究

3.1 浆液原材料

灌浆水泥稳定浆主要由水泥、膨润土、减水剂等材料与水按一定的比例配制而成。水泥采用 Pozzolan 水泥 (CEM IV/B-P 32.5N); 膨润土采用某公司生产的 AT-Compound 高黏性膨润土; 减水剂采用 SIKA-NNG; 浆液拌和用水取自尼罗河; 速凝剂采用某公司生产的水玻璃。

3.2 浆液配合比试验

依据英国 BS EN447—2007 规范和中国《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》(SL 62—2014), 结合现场实际情况对水灰比为 5:1、2:1、1:1、0.7:1、0.5:1 的浆液进行试验, 采用控制变量方法对以上浆液作了含水率、析水率、黏度等各项性能的研究, 同时研究了不同添加剂对稳定浆液的影响, 最终采用正交试验进一步确定了稳定浆液。

浆液水灰比大于 1:1 的情况下过高的含水量使得析水率增加, 根据已有文献可知在水灰比小于 0.437:1 时, 水泥浆液中仅有水化水, 过于浓稠的浆液中, 流动水所占比例较少, 流动性和可灌性差的浆液难以渗透到细小裂缝中, 起不到堵漏效果。在水灰比 2:1 ~ 5:1 的浆液中析水率太高不适合作为稳定浆液, 虽然较多的含水具有较好的流动性, 但难以形成封闭的水泥结石。因此选择水灰比为 1:1、0.7:1 和 0.5:1 的浆液进行添加剂试验。

室内试验表明浆液配比中膨润土掺量对析水率、黏度影响较大, 增加膨润土的掺量, 浆液的析水率将明显下降, 膨润土能有效地改善水泥浆液的稳定性、降低析水率。通过对比马氏漏斗黏度可知, 增加膨润土可以提高浆液的黏度, 降低浆液的流动性。通过三组试验可知浆液的流动性和稳定性是相互矛盾的, 稳

定浆液是相互折中的结果。保证流动性和稳定性同时满足设计要求, 这样的稳定浆液才能是合格的, 因此, 稳定浆液的配置过程需经过多次试验。水灰比对黏度的影响大于减水剂的影响, 膨润土对黏度的影响大于减水剂的影响; 水灰比对析水率和强度的影响依然最大, 减水剂对强度的影响大于膨润土的影响。

3.3 浆液配合比确定

通过浆液试验得到的最优稳定浆液配比为: 水灰比 1:1, 膨润土的掺量为 2%, 减水剂的掺量为 0.4%。稳定浆液的密度为 1.51g/cm^3 , 2h 的析水率为 3.7% (小于规定值 5%); 采用马氏漏斗测试黏度为 44.52s, 符合规定的 33~50s 范围; 7 天抗压强度 3.8MPa (大于要求值 3.5MPa)。

4 灌浆 GIN 强度值研究

灌浆 GIN 强度值是基于灌浆压力与灌浆量两者共同作用的一种“能量”的体现, 避免了仅考虑单一因素的弊端。采用 GIN 强度值作为灌浆控制标准, 限定灌浆压力与灌浆量的乘积为一常数, 这样针对宽大裂隙限制其灌入量; 灌浆条件不佳时提高灌浆压力, 通过压力和灌浆量的共同控制, 保证相当的浆液扩散半径。

4.1 计算灌浆 GIN 强度值

灌浆强度值 GIN 定义为灌浆终压 p_f 与每米灌浆量 V_f 二者的乘积, 即

$$\text{GIN} = p_f V_f \quad (1)$$

式中 GIN——灌浆强度值, $\text{MPa} \cdot \text{L/m}$;

p_f ——灌浆速率为零时孔口灌浆压力值, MPa;

V_f ——灌浆终止单孔每 m 浆液用量, L/m 。

GIN 值为双曲线型反函数, 属无穷函数, 而工程应用中界定最大值 p_{\max} 、 V_{\max} 常用计算公式为

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{F_{\max} 3C}{\pi t^2}} \quad (2)$$

$$V_{\max} = 2\pi P_{\max}^2 t^3 / C^2 \quad (3)$$

式中 p_{\max} ——限制灌浆压力, MPa;

V_{\max} ——限制灌浆量, L/m ;

F_{\max} ——灌浆区域上方岩体的重量, kN;

C ——浆液凝固的黏聚力, MPa;

t ——裂隙宽度一半, mm。

由 GIN 强度值曲线、最大浆液用量和最大灌浆压力组成灌浆强度包络线 (见图 1)。

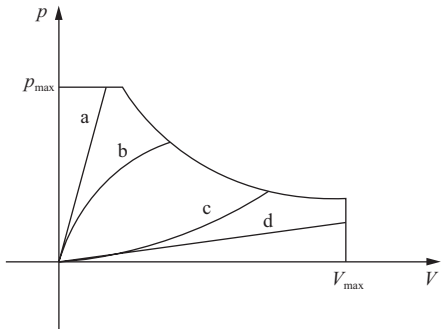


图 1 灌浆强度控制曲线与 GIN 限制包络线

在灌浆过程中, 实际灌浆强度曲线与 GIN 限制包络线相交即认为达到注浆标准, 可结束对此孔的注浆。总的来讲可以将注浆强度曲线分为 3 大类: ①灌浆压力达到 p_{\max} (图 1 曲线 a); ②灌浆压力和灌浆量的乘积达到包络线 (图 1 曲线 b、c); ③注入量达到 V_{\max} (图 1 曲线 d)。满足以上任意一种情况即可结束灌浆施工。在灌浆过程中仅需要使得 p_{\max} 、 V_{\max} 和 pV 值达到包络线就可以结束灌浆, 有利于减少人为的影响和实现自动化控制。

4.2 试验确定灌浆 GIN 强度值

为了得到适合本项目的灌浆 GIN 强度值, 同时验证室内试验配比的稳定浆液的适用性, 以灌浆量、灌浆压力、灌浆深度等实测记录为依据, 结合大坝堵漏效果, 采用 Execl 软件进行回归分析得到最合适的 GIN 强度值。在现场灌浆试验后, 认真统计现场试验的灌浆压力、灌浆量, 灌入率、灌浆耗时、结束标准等, 根据所取得资料成果进行综合统计分析和对比, 以求得最佳的灌浆参数。

4.2.1 试验区选择及布孔

根据现场情况选择了连接主坝和发电厂房的一个

区域作为试验区,该区既能体现坝体情况又能体现厂房情况;而且,该区渗漏比较严重,上下游易于观察,设计灌浆深度较大。灌浆试验孔采用双排 3m 孔距布置。

4.2.2 GIN 强度值的确定

在海拔 1128m 以下的坝体采用 $p_{\max} < 0.5\text{MPa}$, 最大注浆量 $V_{\max} < 4\text{L/m}$ 。在海拔 1128m 以上的坝体: $p_{\max} < 0.25\text{MPa}$, $V_{\max} < 1\text{L/m}$ 。通过稳定计算得到的 p_{\max} 为 0.746MPa , V_{\max} 为 6.13L/m 。通过现场试验实测数据回归分析可知 GIN 强度值为 $pV < 590.3\text{ kPa} \cdot \text{L/m}$ 。

5 灌浆施工

5.1 灌浆孔施工布置

本灌浆工程在主水坝、东引水渠坝、水闸坝沿坝轴线双排布置灌浆孔,进水口坝沿轴线单排布置灌浆孔,孔距均为 3 m,孔深 10 ~ 30m。灌浆施工轴线总长 937.3m,灌浆工程量 10241m。灌浆孔均安装孔口管,先施工下游排,再施工上游排;施工按分序加密的原则进行,按先导孔、I 序孔、II 序孔的施工顺序进行。

5.2 灌浆施工方法

灌浆孔钻孔采用 XY-2 型地质钻机,先导孔和检查孔采用金刚石或合金钻头回转钻进,普通灌浆孔采用风动冲击回转钻进,终孔孔径均不小于 56mm。灌浆采用 3SNS 注浆泵“自下而上分段卡塞灌浆”。灌浆段长为 5m,最后一段不大于 8m。灌浆压力根据 GIN 灌浆试验结果来确定,注浆段的实际压力为: $p = \text{在压力表高度测量的压力} - \text{灌浆线压头损失(需要校准)} - \text{裂缝中的水压(孔中水位)} + \text{灌浆密度} \times \text{压力表高度与底部灌浆塞之间的高度}$ 。

5.3 灌浆段结束标准

灌浆施工使用自动灌浆记录仪,在 GIN 强度值包络线以内进行灌浆,达到包络线值则停止灌浆。在灌浆过程中,有 3 种主要情况:

a. 低压下达到最大灌浆量(图 2 中①):在 V_{\max} 的限制下停止灌浆,表示宽大的裂隙,稍加灌浆压力,灌入量就增加较多,最终在 $V = 4\text{L/m}$ 结束。

b. pV 成为 C 曲线上的边界(图 2 中②、③):灌浆的压力和灌浆量经过调整以跟踪曲线,直到达到 GIN 强度值包络线。表示在灌浆过程中裂缝宽度适中灌浆压力和灌浆量同步上升,二者的乘积达到包络线。

c. 压力达到极限,低灌浆量(图 2 中④):灌浆在 p 限制上停止。表示裂隙微细且紧密,灌浆压力很快升高到允许最大值,但总的灌入量 $V < 1\text{L/m}$,最终在 $p = 0.5\text{MPa}$ 结束。

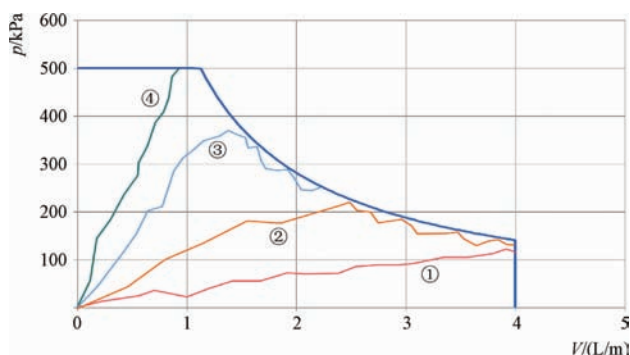


图 2 极限曲线

灌浆孔封孔应使用水灰比为 0.5 : 1 的水泥浆液,将灌浆管道送至孔底开始封孔,如果发生沉降,可以使用浓浆封填。

6 灌浆效果检查

根据灌浆成果统计,稳定浆液的平均灌入量呈现出按各序孔递减趋势, $V_I = 3.5\text{L/m} > V_{II} = 2.2\text{L/m} > V_{\text{检}} = 0.1\text{L/m}$ 。表明 I 序孔灌浆时,浆液随着裂缝向远处扩散,并形成了结石,对裂缝进行了填充;在进行 II 序孔灌浆时, I 序孔的浆液已经填充了部分较长贯通性较好的裂缝,因此 II 序孔的吃浆量远小于 I 序孔;检查孔在灌浆时几乎不吃浆无须变浆表明坝体内的裂缝完全被填充,体现了稳定浆液的流动性、稳定性和耐久性。为验证混凝土坝体渗漏灌浆处理的效果,在灌浆前和灌浆后均进行了孔内成像、压水试验、取芯观察等检查。

6.1 孔内成像检查

孔内成像是最直观的检测方法，通过孔内成像可

以看到灌浆完成后在裂缝处有结石产生，说明在灌浆时浆液渗透到裂缝中去，最终成了结石（见图3）。

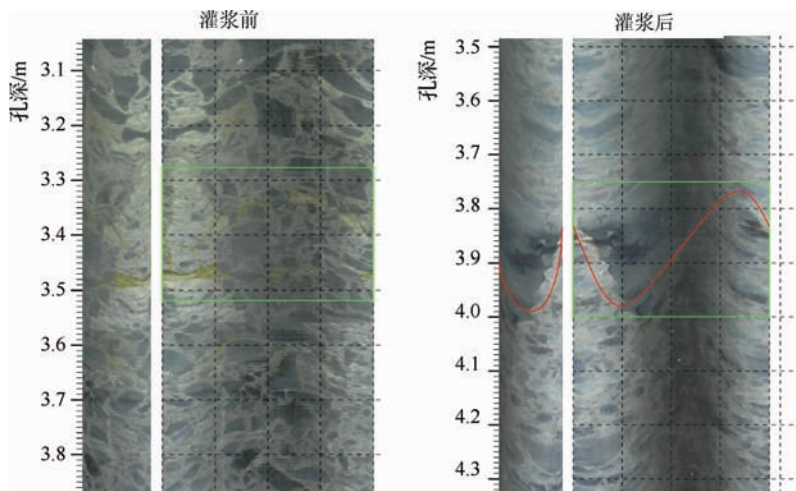


图3 灌浆前后典型孔内成像对比

6.2 压水试验检查

通过压水试验，可以了解灌浆前后岩体渗透性的变化，并以此来评价灌浆效果。压水试验检测结果显示 I 序孔的渗透率 $Q_I = 28.14\text{Lu}$ > II 序孔 $Q_{II} = 13.36\text{Lu}$ > 检查孔渗透率 $Q_{\text{检}} = 0.9\text{Lu}$ 。最后检查孔的渗透率为 0.9Lu ，满足不大于 1Lu 的设计要求。

6.3 取芯检查

在完成灌浆处理后，通过检查孔采取岩芯和岩芯

描述，了解到坝体裂缝水泥结石一般厚 $3 \sim 20\text{mm}$ ，局部见厚的水泥团块。取出的水泥结石和坝体混凝土黏结度高，可知浆液具有较高的稳定性和耐久性。

渗漏灌浆处理前混凝土坝面渗漏严重，布满青苔，灌浆处理后坝面干燥，已无渗漏现象，坝面漏水由原来的 $67\text{L}/\text{min}$ 减少至 0。前后对比见图 4。



图4 大坝下游面灌浆处理前后对比

（下转第5页）

水电站技术

小水电微网控制器研发与应用

陈志峰 沈娜 张紫凡

(广州城市理工学院电气工程学院, 广东 广州 510800)

【摘要】 小水电微网控制器是水电运行重要的控制装置, 有助于微网同时兼顾小水电最大发电性能与电能质量。文章对研发的一种新型的小水电微网控制器的原理与各个工作状态下的控制功能进行了详细介绍。该新型小水电微网控制器目前已投入实际运行, 已初步显示出良好的应用效果。

【关键词】 小水电; 微网; 控制器; 孤岛

中图分类号: TM76

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-024-05

Development and Application of a New Micro-grid Controller for Small Hydropower

CHEN Zhifeng, SHEN Na, ZHANG Zifan

(College of Electrical Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, China)

Abstract: The small hydropower micro-grid controller is an important control device for hydropower operation. It is beneficial for the micro-grid to focus on the maximum power generation performance and power quality of small hydropower simultaneously. In the paper the principle and control functions under all working states of a new small hydropower micro-grid controller are introduced in details. The new small hydropower micro-grid controller has been put into practical operation currently. Excellent application effects have been displayed initially.

Key words: small hydropower; micro-grid; controller; lonely island

1 概述

我国水力资源丰富, 但在季节上水电资源分布不均, 限制了小水电的使用^[1-2], 为了提升水电利用率, 提高供电可靠性, 小水电微网作为一种有效方法, 日益得到重视^[3]。

小水电微网可提高小水电利用率, 既可以通过联络变压器与传统电网(主网)并联运行, 也可断开联络变压器孤岛运行, 这两种状态可以做到平滑过

渡。这样可大大提高小水电微网运行的灵活性, 而且对于微网内的重要负荷有比传统电网更高的供电可靠性。此外, 小水电微网通过控制联络变压器的功率传输, 可以减少微网接入对主网的影响, 并且可以充分利用微网内的分布式电源, 提高小水电的利用率^[4]。

小水电微网控制器应用于水电微电网协调控制, 主要目的是在并网和孤网运行方式下, 通过与并网点保护控制设备及水电智能综合控制器进行信息交互,

对水电智能综合控制器进行模式切换、功率分配等操作,维持离网时微电网运行时功率和频率的稳定,并网时控制发电功率及功率因数,提高清洁能源的利用效率,提高水电发电经济效益,保障电网末端运行的灵活性、可靠性^[5]。

2 原理

小水电微网控制器上接调度主站,下接小水电微网控制器与水电智能综合控制器,通过对下端设备的数据(电压、电流、功率、状态等)采集,实现微网状态感知,根据调度指令或预设运行模式进行模式管理、切换等控制。

2.1 水电控制器控制模式切换

当微网孤岛运行时,须将水电控制器控制策略从 P/Q 控制切换为 V/f 控制,支撑系统的频率和电压;当并网运行时,须将水电控制器由 V/f 控制切换为 P/Q 控制,实现水电清洁经济效益。因此在离并网切换过程时,需要对水电智能综合控制器进行快速的切换。

可根据上述情况将微网系统分为 4 个工作状态,分别为准备离网、离网、准备并网、并网。根据微网运行的模式^[6],控制器具备并网转离网、离网转并网控制和并网控制功能(离网状态下由水电智能综合控制器维持电压、频率稳定,微网控制器不参与具体控制)。

2.2 状态控制

a. 并网转离网控制。当微网控制器收到后台或调度下发的离网指令后,通过控制水电智能综合控制器的发电功率目标,进行联络线功率控制,确保联络线有功、无功限制在允许范围内;当多台水电机组同时运行,主控机组容量裕度足够时,应关闭非主控机组,当联络线功率在允许范围内后,控制水电智能综合控制器切换运行模式,由 P/Q 模式切换为 V/F 模式,切换成功后,分联络线开关(控制逻辑见图 1)。

b. 离网转并网控制。当微网控制器收到后台或

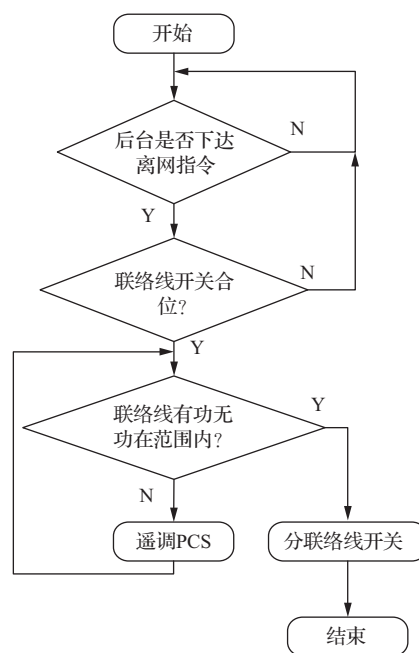


图 1 并网转离网控制逻辑

调度下发的并网指令后,通知并网点小水电微网控制器,并网点小水电微网控制器检测并网点两侧是否符合同期条件,同期条件满足则并网。微网控制器检测到并网成功后,命令水电智能综合控制器切换为并网控制模式,并根据调度指令或预先设置的目标值下发发电功率(控制逻辑见图 2)。

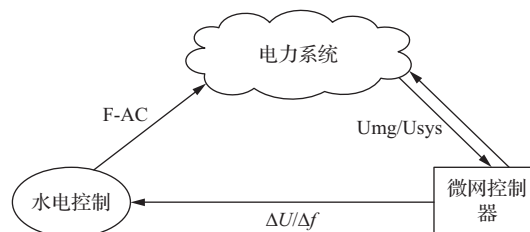


图 2 离网转并网控制逻辑

c. 并网控制。在并网状态下,微网控制器接受调度或者后台的有功、功率因数遥调,并将指令转发给水电控制器,控制水电机组的发电功率及功率因数。

3 硬件模块

3.1 CPU 插件

CPU 插件为装置的核心部件,由高性能的 SOC 处理器及其最小系统、模拟量采集及开入/开出控制、

通信接口等部分组成。SOC 处理器运行高稳定性的实时操作系统，主要负责模拟量采集与监测、保护算法与逻辑判断、开入/开出控制、事件记录与扰动录波、站内通信及对时等任务。

对于 RS-485 口，需使用屏蔽双绞线，共有 2 对双绞线，外层包裹屏蔽层（屏蔽双绞线的构造见图 3）。

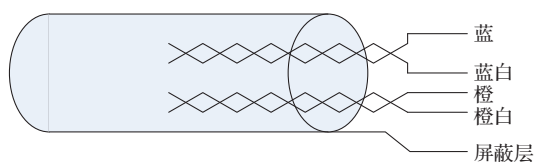


图 3 通信线示意图

对时端子将第一组双绞线的蓝线接 RS-485 接口的 A，蓝白线接 RS-485 接口的 B；将第二组双绞线的橙线、橙白线并接后接 RS-485 接口的 GND。屏蔽层应在对时装置侧单点接地（见图 4）。

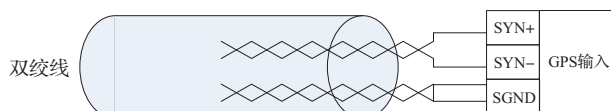


图 4 对时端子连接

3.2 电源/开入插件

电源/开入插件配置输入和输出隔离的电源转换模块，并提供 15 路光耦隔离开关量输入以及装置故障和运行异常触点输出。电源模块为装置其他各插件供电，其输出的直流电压为 5V，最大输出功率为 20W，电源模块支持直流电源极性反接。

3.3 开入/开出插件

开出插件 B4521 固定与电源/开入插件拼装，提供 11 组出口，共 11 副出口触点。

3.4 通信插件

通信插件 B44205 提供 6 路串口通信，可通过跳线设置为 485 通信或 232 通信。

3.5 人机接口

人机接口主要包括 LED 指示灯、LCD 液晶显示屏、按键、调试口等主要部分。

LED 指示灯。总共有 10 个“红”或“绿”颜色的 LED 指示灯，分别表征“装置运行”“任意告警信号动作”“并网状态”“离网状态”和六个“通信正常”的指示灯。

LCD 液晶显示屏。装置采用 240 × 160 单色点阵液晶，用于显示各类状态、参数定值、事件报告等。液晶显示屏背光在无按键操作 5min 后自动关闭，当任意键按下或跳闸、告警时背光自动点亮。

按键。装置配置 9 键键盘，分别为“▲”键（上行）、“▼”键（下行）、“◀”键（左行）、“▶”键（右行）、“+”键（加）、“-”键（减）、“确认”键、“取消”键、“功能”键。“▲”键、“▼”键、“◀”键、“▶”键用于控制光标上、下、左、右移动。在多级菜单显示时，“◀”键、“▶”键可用于进行各级菜单间切换；在多页显示时，“▲”键、“▼”键可用于翻页。“确认”键确认当前修改、执行当前选择或操作，“取消”键取消当前修改或操作、退出某项选择。“+”键、“-”键用于数值增加、减小操作。“功能”键为特殊功能键，可作为转换键与其他按键组合使用（“功能”键 +），如信号复归（“功能”键 + “取消”键）等。

3.6 菜单显示与操作

在主画面状态下按“功能”键可进入主菜单，通过“▲”键、“▼”键选择子菜单，按“确认”键进入所选子菜单，按“取消”键返回上一级子菜单。

信息查看菜单按包括各类开关量及模拟量查看、版本信息查看和参数定值查看等子菜单。在正常运行状况下，装置所反映的量值和实际系统的相应量一致。

定值整定菜单用来整定保护所需的各项参数及定值。在参数定值页面通过“▲”键、“▼”键选择要修改的参数定值项，按“确认”键进入参数定值项编辑界面，按“◀”键、“▶”键移动光标至要修改的数据位，使用“+”键、“-”键修改数值。参数定值编辑完成后按“确认”键自动退出该参数定值项的编辑界面，按相同方法继续编辑其他参数定值

项。参数定值编辑完毕按“取消”键，液晶提示“是否保存？”，选择“是”按“确认”键后输入4位密码（缺省值“右、左、下、上”）完成参数定值整定，选择“取消”返回参数定值页面，选择“否”按“确认”键放弃保存并退出。当整定保护定值时，需要先选择待整定的定值区号，可以是当前运行定值区，也可以是非运行定值区。当对当前运行定值区的保护定值进行整定并保存后，装置会短时闭锁并自动恢复正常运行状态。

3.7 调试接口

装置前面板配有 RJ-45 网络调试接口，用于与本地 PC 端保护和控制装置调试管理软件通信，实现参数定值整定、信号配置、逻辑编程、信号监视、报告及录波浏览、通信管理等功能。

4 主要功能

小水电微网控制器需要同时与多个小水电控制器和调度系统交互，通信功能是小水电微网控制器的一个重要功能。由微网控制器对上与调度或者监控后台通信，支持 IEC101/104 系列远动规约，实现远程监测、控制；对下与微网内各个控制设备通信，支持 IEC101/104 系列远动规约、IEC61850 规约和 IEC103 规约，汇集整个微网区域内的状态信息，感知微网状态，实现整体统筹控制，并能够转达远方调度控制要求，实现离网自行管理并网统筹考虑功能。

小水电微网控制器可配置 3 个 FE 以太网电口，2 个 RS-485 串口，用于与监控系统、保护信息管理系统通信。支持电力行业通信标准 DL/T 667—1999（IEC60870-5-103）协议，支持串口 Modbus 协议。

本模块可以使小水电微网控制器各个网络口与各个串口之间实现通信。通信数据具体包括网络口报文的收发、串口报文的收发、双机交互的数据收发、报文的收发时间序列信息。

微网控制器对下与微网内其他保护控制设备通信，其信息获得与控制策略均通过通信执行，故通信状态尤为重用，微网控制器实时对与其通信的设备进

行通信状态监测，发现异常立即报警，并闭锁相关微网功能。除此之外，还具有事件记录、时间管理、故障自检和参数定值等功能。

4.1 事件记录

小水电微网控制器支持以下几类事件记录：可循环记录 1024 次小水电微网控制器故障和运行异常警告报告、通信异常报告；可循环记录 1024 次状态变位报告，包括遥信开入、保护遥信、硬压板、软压板等状态变位；可循环记录 64 次操作报告。

4.2 时间管理

小水电微网控制器可连接多种时钟源信号进行准确的时钟同步，支持的时钟源包括差分 IRIG-B、SNTP 等。

4.3 故障自检

小水电微网控制器具备完备的硬件、软件自检功能以确保运行的高可靠性，当检测到小水电微网控制器内部故障时，运行指示灯灭、小水电微网控制器故障触点闭合，并闭锁所有保护和控制功能。小水电微网控制器故障包括 CPU 插件异常，主要包括程序、定值、数据存储器出错等。

4.4 参数定值

小水电微网控制器参数定值包括设备参数定值、保护定值、测控参数、通信参数、辅助参数等，以下分别介绍。

保护定值为多区定值，其余定值和参数不分区。小水电微网控制器提供 4 个独立的保护定值区，可以满足电力系统不同的运行工况和系统参数。正常运行时，运行定值区可以是其中任一个，且仅有运行保护定值区的保护定值是有效的。

5 应用

所研发的小水电保护控制装置，已投入韶关乳源 10kV 东下山支线运行，研究以小水电为主电源的微电网并网运行、离网运行和并离网切换控制策略（见图 5）。

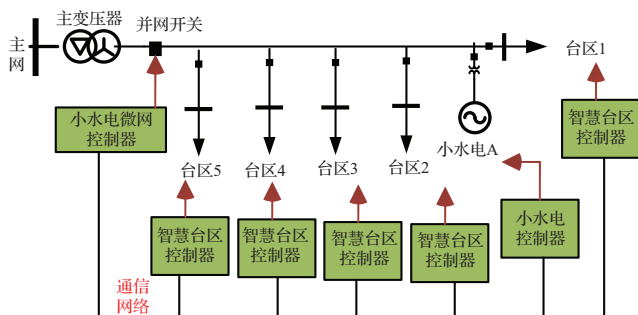


图5 小水电微网控制器的应用

该小水电微网范围包括5个配变台区、1座带库容的小水电。目前开展的10kV东下山支线以小水电为主电源的微电网建设，效果良好。

5.1 小水电能量管理系统建设

建设本地能量管理系统，通过本地微网能量管理及控制系统对光伏、水电和储能系统的协调控制，实现离并网的无缝切换，以及各种运行工况下的稳定运行。该微电网的建设，可以实现区域内新能源的自消纳、自平衡，实现能源供给的绿色化、零碳化，实现小水电微网与大电网的友好互联。

5.2 通信系统建设

为保证本地能量管理系统对整个微网系统控制的时效性和可靠性，能量管理系统与水电站和并网开关之间需采用光纤通信。

6 结语

小水电新型微网控制器作为小水电的重要控制设

(上接第11页)工程建设监督检查，坚持以问题为导向，以规范为依据，以问责为抓手，以整改为目的，开展规范化监督检查工作。本文提及的工作程序着重围绕“查、认、改、罚”四个环节，进一步细化明确了监督检查的各个步骤和流程，可为各级监督检查部门提供参考。

6 小结

“四不两直”方式已逐渐成为水利工程建设监督检查的主要方式，在水利工程建设管理及运行管理中发

挥了重要作用。“四不两直”工作看似简单，但从查前准备、现场检查、问题认定、问题整改、责任追究以及成果资料归档等环节分析，是一个系统性、程序性、全面性要求很强的工作，通过明晰检查的工作标准和程序，可为今后开展类似工作时提供指引方向。▲

参考文献

- [1] 梁海华. 基于强化学习算法的孤岛微电网智能发电控制[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [2] 陈志峰,王玘,王智东,等. 考虑并离网模式切换的小水电微网调频策略研究[J/OL]. 中国农村水利水电,1-10[2021-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20211116.2145.058.html>.
- [3] 王玘,王智东,张紫凡,等. 小水电站内电转气及储能设备协同规划[J]. 电工电气,2020(1):66-69,73.
- [4] 杨永江,张晨笛. 中国水电发展热点综述[J]. 水电与新能源,2021,35(9):1-7.
- [5] 陈志峰,吴勇,金滇黔. 考虑山区小水电的智能型备自投装置的研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(8):120-122,12.
- [6] 欧传奇. 新时代农村水电绿色发展的思考[J]. 中国水能及电气化,2021(6):60-65,22.
- [7] 陈志峰,徐兴发,王嫻. 一种新型小水电安全自动解列装置的研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(1):144-148.
- [8] 温永森,王玘,陈志峰,等. 小水电集群的功率外送型配电网孤岛暂态频率特性研究[J]. 环境技术,2021,39(5):185-189,205.

挥了重要作用。“四不两直”工作看似简单，但从查前准备、现场检查、问题认定、问题整改、责任追究以及成果资料归档等环节分析，是一个系统性、程序性、全面性要求很强的工作，通过明晰检查的工作标准和程序，可为今后开展类似工作时提供指引方向。▲

参考文献

- [1] 车小磊.“四不两直”“五个百分百”防灾抗灾和应急处置能力显著提升[J]. 中国水利,2015(24):198-201.
- [2] 周晓曦,汪明元.“四不两直”安全暗访落地[J]. 中国石油企业,2015(7):48.

ENT-16H 高油压调桨装置在前进水电站中的应用

谢 勇

(南平市水利工程运行维护中心, 福建 南平 353000)

【摘 要】 转桨式水轮机的导水叶和桨叶开度保持协联关系, 始终获得较高的水能转化效率, 但其桨叶通过受油器调节, 受油器因其结构复杂, 密封困难, 常常存在漏油、窜油问题, 污染环境的同时导致调速器油压装置中的油泵启动频繁, 对油泵磨损严重, 且损耗大量厂用电。文章以松溪县前进水电站为例, 介绍了电站在技改中采用 ENT-16H 高油压调桨装置后, 提高了电站的经济效益, 降低了电站的技改及运营成本, 给电站的维护、维修带来便利的同时杜绝了含油尾水对河道流域的生态影响。

【关键词】 前进水电站; 漏油; 污染河道; 桨叶接力器

中图分类号: TV74

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-029-04

Application of ENT-16H High Oil Pressure Propeller Adjusting Device in Qianjin Hydropower Station

XIE Yong

(Nanping Water Conservancy Project Operation and Maintenance Center, Nanping 353000, China)

Abstract: The guide blade of kaplan turbine keeps association relationship with the blade opening, thereby always gaining higher water energy conversion efficiency. However, the blade thereof is adjusted through the oil head. Due to its complex structure and difficult sealing, the oil head often suffers from the problems of more or less oil leakage and oil diversion, which pollutes the environment and leads to frequent start of the oil pump in the governor oil pressure device, serious wear of the oil pump, and a large amount of power consumption. Qianjin Hydropower Station in Songxi County is adopted as an example in the paper. It is introduced that the economic benefit of the power station is improved, the technical transformation and operation cost of the power station are lowered after the ENT-16H high oil pressure propeller adjusting device is adopted in the technical transformation of the power station, thereby facilitating the maintenance and repair of the power station, and eliminating the ecological influence of oily tail water on the river basin at the same time.

Key words: Qianjin Hydropower Station; oil leakage; polluted river; blade relay

1 工程概况

松溪县前进水电站位于松溪县郑墩镇前进村的松溪干流上, 大坝地理位置为东经 $118^{\circ}43'$, 北纬

$27^{\circ}26'$, 距松溪县城 17km。主河道全长 104km, 河道平均比 4.9%, 坝址以上流域面积 2082km^2 , 多年平均径流量 $66.84\text{m}^3/\text{s}$, 正常蓄水位 177.00m, 总库容 1049 万 m^3 。

前进水电站自 1998 年建成投产以来，厂房、泄洪闸、右岸副坝等水工建筑物运行正常，各项指标基本能达到设计水平，水轮发电机组为 2 台 ZZ560-LH-300 水轮机，配备 SF3200-44/4250 发电机，电站总装机容量为 6400kW，电站多年平均发电量约为 2062 万 kW·h。

2 技改措施

2.1 2017 年技改情况

由于原来的设计理念保守，水能资源未得到充分利用，且电站于 1998 年建成投入运行，大部分的设备都已经老化严重，机组效率低下，漏油严重，设备故障频发，安全运行可靠性差，水资源的利用率低。

电站于 2017 年开始技改，2020 年完成技改，技改后电站采用型号 ZZ660b-LH-300 的水轮机及型号 SF3800-44/4250 的发电机；更换了机组励磁、调速器、主变等电气设备。改造后，新增装机容量 1200kW，电站总装机容量为 7600kW。电站设计多年平均发电量 2352 万 kW·h，较技改前增加约 290 万 kW·h，年利用小时数为 3095h。

2.2 此次技改措施

2.2.1 设备结构

前进水电站水轮机组具备导叶、桨叶双调节功能，本次技改中桨叶调节采用 ENT-16H 高油压调桨装置（主体结构见图 1）。

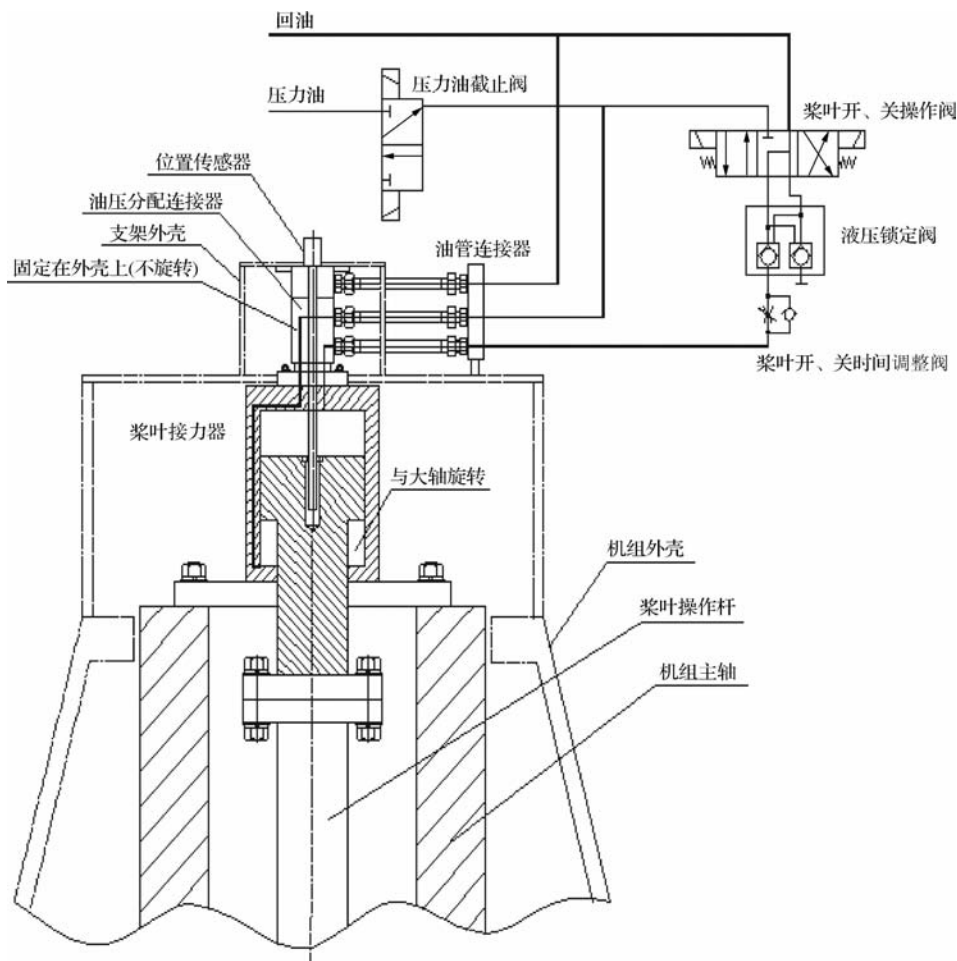


图 1 ENT-16H 高油压调桨装置结构

ENT-16H 高油压调桨装置是通过油压调节水轮机桨叶转动的装置，主要功能为：设备接入高压油（工

作压力为 16MPa），通过压力油截止阀、桨叶开关操作阀等电磁阀组的操作控制，将高压油通过弹性高压

软管分配至和主轴同步旋转的接力器活塞的两个油缸,在轴向位置的层面,油管连接器(固定油管)的油口和进入接力器活塞的和主轴同步旋转的进油口是相对应的,从而有利于压力油进入转轴的进油口,进而转向为轴向油流,进入接力器缸内活塞两边的油缸,在接力器缸内活塞两边形成油压差,从而推动活塞运动,并传递给桨叶操作杆,以调整桨叶开度,并通过安装的桨叶位移传感器,监测转轮桨叶的开度,并反馈到自动控制系统及中控室监控系统中,当转动到所需的转角时,投入液压或机械锁定,将桨叶固定在这个开度,以实现调整桨叶角度的适度调节。

2.2.2 主要设备

机组旋转主轴:将水轮机转轮与发电机转子相连,传递扭矩的轴。

桨叶接力器:液压油缸设备,将压力油的液压能量转换为机械能,实现机械活塞的往复运动。

电磁阀组:由桨叶开关操作阀、液压锁定阀、桨叶开关时间调整阀等元器件组成,控制接力器活塞的运动方向、位置锁定以及压力油的畅通与中断。

油路集成块:由油管连接器及油压分配连接器等元器件组成,将外来高压的压力油根据需要通过弹性高压软管分配至旋转的接力器活塞的两个油缸。

位置传感器:通过内部非接触的方式,精准地检测活动件位置移动的元件。

桨叶操作杆:将活塞的往复运动传递到桨叶控制设备,实现桨叶的旋转。

2.2.3 操作方式

桨叶接力器外壳固定在旋转的机组主轴上,接力器活塞固定在桨叶操作杆上,活塞经液压油压力的作用下往返运动,从而带动桨叶叶片转动,油压分配连接器固定于发电机外壳上,不随着主轴旋转,分配油管路中的压力油送至旋转的桨叶接力器的两个油室,操作接力器的所有电磁阀可以有电动和手动两个操作方式。

2.2.4 工作原理

ENT-16H 高液压调桨装置中的液压油和回油通过

过滤精度小于 $10\mu\text{m}$ 的过滤器过滤后进入三位四通操作电磁阀,操作电磁阀具有自动电气脉宽调节及手动操作功能,操作电磁阀以改变桨叶接力器两压力油室的压力油和回油以达到控制接力器移动的目的。

操作电磁阀下端叠加了一个单向节流阀,可以调节桨叶接力器移动的速度以满足桨叶接力器移动的速度符合机组调节保证计算所需的要求。压力油和回油经过操作电磁阀和单向节流阀后进入油路分配连接器,油路分配连接器由壳体、衬套、旋转体、油路1和油路2等组成,油路分配连接器采用高压间隙密封方式密封,其间隙约为 0.01mm ,可以为桨叶接力器(与机组大轴同步旋转)提供液压油以及回油的通道(见图2)。

桨叶接力器的移动是通过油路分配连接器后的液压油控制的,当操作电磁阀到达需要的位置时,油路分配连接器内的油路与回油通道接通,液压锁封闭桨叶接力器两室的油路,桨叶接力器被固定在当前位置。如果桨叶接力器一油室受到外力影响,导致油室内油压升高或达到额定压力的1.2倍时,将触发装置的溢流阀动作,将接力器两室串通,避免桨叶接力器一个油室形成真空;如溢流阀不动作,或压力升高过快,致使油室内油压压力升高到额定压力的1.25倍时,将触发安全阀动作,避免桨叶接力器被损坏。

2.2.5 具体措施

当需要改变桨叶角度时,可手动或自动电气控制操作电磁阀,控制压力油经分配连接器进入桨叶接力器右室(或左室),桨叶接力器左室(或右室)与回油油路相通,从而推动接力器左移(或右移)。

为了提高旋转部分的安全性,保障不至于因旋转部分浮头卡住导致高压油管跟随旋转,打结拉断,造成高压油泄露,ENT-16H 高液压调桨装置采用以下工作方式:一是正常运行时主用油路分配器的旋转轴旋转,外壳与连接法兰相连并与备用油路分配器旋转轴相连为一体,不旋转。二是当主用油路分配器故障,即外壳一起旋转时,接近开关发出信号,要求停机,整个主用油路分配器与连接法兰一起带动备用油路分

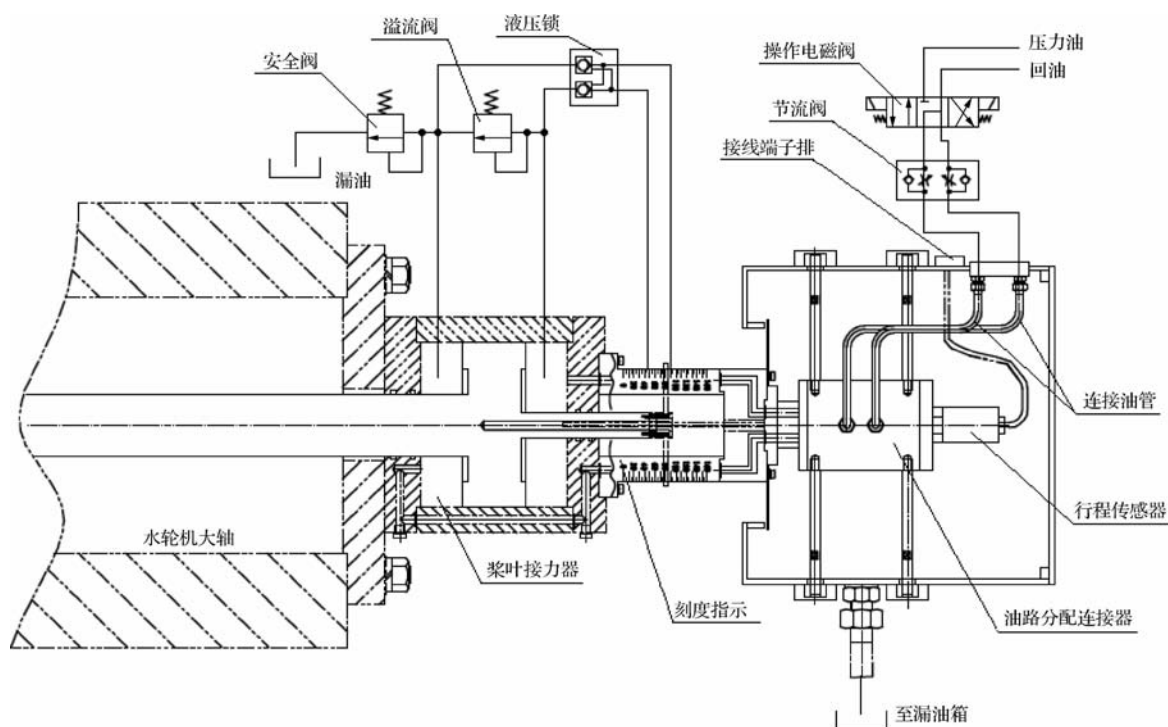


图2 ENT-16H 高油压调桨装置工作原理

配器旋转轴旋转。三是机组停止并做好安全措施后，修复或更换主用油路分配器。

3 改造效果

ENT-16H 高油压调桨装置的操作油压为 16MPa，可不用另行设置高压空气系统，大大降低了前进水电站的技改及运营成本；装置蓄能是采用囊式蓄能，囊内的氮气和液压油不相互接触，油质也就不易发生恶化，可增加液压油使用期限。

采用 ENT-16H 高油压调桨装置替代原桨叶操作方式，取消了密封困难、结构复杂的受油器，简化转桨式水轮机桨叶操作结构，解决了前进电站传统桨叶

操作系统受油器密封困难的问题，既解决了机组漏油造成油泵频繁动作的问题，也杜绝了含油尾水对河道流域的生态影响。

相较于传统桨叶操作系统受油器及油路布置于水轮机内部，ENT-16H 高油压调桨装置布置于机组主轴顶部，给电站的维护、维修带来极大的便利。

4 结语

随着经济社会的发展，人们越发重视生产对自然环境的影响，前进水电站高油压调桨装置改造既提升了经济效益、简化了设备检修。▲

工程设计

北塔山风区 100MW 风电项目电气设计

甘天文

(水利部新疆维吾尔自治区水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

【摘要】 风力发电场电气设备设计是风电项目建设的重要设计内容, 文章以新疆北塔山风区开发建设 100MW 风电项目为例, 对该工程的主接线方式、短路电流设计值、不同电压电路电气设备等电气设计工作内容进行了详细阐述。实施效果表明, 该项目达到了 100% 合格率。

【关键词】 北塔山区; 100MW 风电; 电气设计

中图分类号: TM614

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-033-04

Electrical Design of 100MW Wind Power Project in Beitashan Wind Generating Area

GAN Tianwen

(Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute
of Ministry of Water Resources, Urumqi 830000, China)

Abstract: Wind farm electrical equipment design belongs to important design content of wind power project construction. Development and construction 100MW wind power project of Xinjiang Beitashan Wind Generating Area is adopted as an example in the paper. The main wiring mode, the short circuit current design value, different voltage circuit electrical equipment and other electrical design contents of the project are described in details. The implementation result shows that the project reaches 100% qualified rate.

Key words: Beitashan Area; 100MW wind power; electrical design

风能作为清洁能源之一, 在我国被大力推广利用。目前, 我国风力发电累计装机总量达到 214.2GW, 占全球风电总装机量的 35% 以上, 发展前景广阔。而在风力发电项目建设中, 风力发电场电气设备设计是重要的设计内容。

1 工程概况

本风电项目为新疆生产建设兵团五家渠鑫垣六师北塔山风区开发建设的 100MW 风电项目, 是我国规划建设的准东能源基地 (共计 120 万 kW 风电项目) 的组成部分。本风电场距奇台县城 143km, 交通状况良好。根据推荐接入方案, 五家渠鑫垣六师北塔山牧

场 100MW 风电项目新建 1 座 110kV 升压站（见表 1）。

表 1 五家渠北塔山牧场 100MW 风电项目
110kV 升压站规模

序号	名 称	本 期 新 建
1	主变压器容量及数量	100MVA
2	110kV 出线回路数	1 回
3	35kV 风电馈线回路数	4 回
4	35kV 动态无功补偿 SVG 装置	-24MV ~ +24MV/1 套
5	35kV 接地变 + 小电阻成套装 置	DKSC-500/36.5、 106.1Ω/1 套
6	35kV 站用变	SCB11-250/36.5/0.4/1 套
7	导线采用 LGJ-240/30	2.5km

2 风电场电气主接线设计

2.1 箱式变低压侧接线方式设计

该风电场设计安装 45 台 2200kW 风力发电机组，机组出口电压设计值 0.69kV，并配套 45 台组合箱式变压器。发电机组和变压器之间的连线方式为对号串联，互不干扰^[1]。

组合箱式变压器的容量为 2350kVA，安设位置设计在以发电机组为圆心、半径不超过 20m 的范围内，在其低压侧配置低压断路器，箱式变低压侧至风力发电机地面控制柜选用 6 根 ZR-YJV23-0.6/1-3 × 240 + 1 × 120 型电力电缆连接^[2]。

2.2 箱式变高压侧接线方式设计

由于本风场单机容量较大，为了降低电能传输过程中的损耗，设计采用 35kV 高压传输，接线方式为汇流干线，架空线路，避免对地面建筑的影响，提升电力传输的安全性。

根据本项目发电机组和变压器的布置形式，设计 4 回集电线路，每一路连接 10 或 12 台箱式变压器，容量为 22MW 或 26.4MW。箱式变高压侧设计相应的负荷开关以及断路器起到保护作用，并利用电缆（型号：ZR-YJV23-26/35-3 × 70）与 35kV 架空输电线路相连接，35kV 电缆与架空输电线路 T 接处设检修用防风型跌落式熔断器和氧化锌避雷器^[3]。

2.3 机组和电网连接线

本项目发电机组电能通过导线（型号：LGJ-240/30）输送至 110kV 升压站外，再采用 3 根 ZR-YJV62-26/35-1 × 300 型交联聚乙烯绝缘电力电缆引接至风电场 110kV 升压站 35kV 电缆馈线柜，实现与电网的连接。

3 短路电流和电气设备设计

3.1 短路电流计算

根据本工程接入系统报告提供的数据，预测 2030 年风电场 110kV 升压站 35kV 母线系统处的短路电流（见表 2），以此设计本项目主要电气最大承受短路电流值：110kV 电压等级为 40kA；35kV 电压等级为 31.5kA^[4]。

表 2 短 路 电 流 计 算 数 据

序号	项 目	三 相 短 路	
		短路电流/kA	短路容量/MVA
1	110kV 侧	7.93	1579
2	35kV 侧	12.36	792.1

3.2 主要电气设备选择

本项目依据《导体和电器选择设计技术规定》（DL/T 5222—2005）的规定，升压站中相关的电气设备技术参数选择严格以额定工作条件为标准，校验标准为短路情况下的热稳定。

a. 主变压器选择。本项目选取 1 台主变压器（见表 3^[5]）。该产品具有负载损耗小、结构简单（内部硅钢片和变压油量减少）等优点。

表 3 主 变 压 器 参 数

项 目	参 数
型 式	三相双绕组，油浸风冷式有载调压升压变压器， 型号：SFZ11-100000/110
容量比	100/100MVA
额定电压	(115 ± 8) × 1.25% / 36.5kV
接线组别	YN-d11
阻抗电压	12%

续表

项 目	参 数	
冷却方式	风 冷	
套管 TA	高压侧套管	附套管 CT: 800-1600/1A, 0.2/0.5/5P30 外绝缘爬电距离不小于 3906mm
	高压中性点套管	附套管 CT: 300/1A, 5P30/5P30 外绝缘爬电距离不小于 2232mm

b. 110kV 电气设备选择及绝缘水平。本项目 110kV 相关 GIS 设备被安置在户外，信号接收更好（表 4）。相关系统的绝缘水平主要参考雷电过电压值，达到这一水平后基本上可耐受操作过程中的过电压问题。相关绝缘水平见表 5，经核算后完全符合相关要求^[6]。

表 4 110kV 主要设备选择技术参数

序 号	设 备 名 称	型 式 及 主 要 参 数
1	110kV GIS 出线间隔	126kV, 2000A, 40kA, 100kA
2	110kV GIS 主变进线间隔	126kV, 2000A, 40kA, 100kA
3	110kV GIS 母线 PT 间隔	126kV, 2000A, $\frac{110}{\sqrt{3}}:\frac{0.1}{\sqrt{3}}:\frac{0.1}{\sqrt{3}}:0.1\text{kV}$
4	110kV 氧化锌避雷器（带钢支架）	Y10W-102/266（W），额定电压 102kV，残压 266 kV，标称放电电流：10kA

表 5 110kV 电气设备的绝缘水平

设备名称	设 备 耐 受 电 压 值					雷电冲击保护水平配合系数
	雷电冲击耐压/kV（峰值）			1min 工频耐压/kV （有效值）		
	全 波		截 波			
	内绝缘	外绝缘		内绝缘	外绝缘	
主变压器	480	450	550	200	185	1.4×266=372.4kV（峰值），实际配合系数 450/266=1.69，截波配合系数 550/297=1.85
其他电器	550	550	630	230	230	
断路器断口	550	550		230	230	
隔离开关断口间		630		265	265	

c. 35kV 电气设备选择及绝缘水平。本项目 35kV 呈双列布置。断路器、互感器等型号见表 6，电气设
配电装置高压开关设备型号为 KYN 40.5 型，在户内 备绝缘水平见表 7。

表 6 主要设备技术参数

序 号	设备名称	型 式 及 主 要 参 数	备 注
1	断路器	真空断路器: 40.5kV, 2500A, 31.5kA	主变进线
		真空断路器: 40.5kV, 1250A, 31.5kA	电缆馈线
		真空断路器: 40.5kV, 1250A, 31.5kA	站用变馈线
		真空断路器: 40.5kV, 1250A, 31.5kA	接地变馈线
		SF ₆ 断路器: 40.5kV, 1250A, 31.5kA	SVG 馈线
2	电流互感器	LZZBJ-35: 户内, 干式, 40.5kV, 2000/1A, 5P30/5P30/5P30/0.5/0.2s	主变进线
		LZZBJ-35: 户内, 干式, 40.5kV, 600/1A, 5P30/5P30/5P30/5P30/0.5/0.2s	电缆馈线
		LZZBJ-35: 户内, 干式, 40.5kV, 600/1A, 5P30/5P30/5P30/5P30/0.5/0.2s	站用变馈线
		LZZBJ-35: 户内, 干式, 40.5kV, 100-600/1A, 5P30/5P30/5P30/5P30/0.5/0.2s	接地变馈线
		LZZBJ-35: 户内, 干式, 40.5kV, 600/1A, 5P30/5P30/5P30/5P30/0.5/0.2s	SVG 馈线
3	电压互感器	JDZX10-35D: 户内, 干式, $35/\sqrt{3}:0.1/\sqrt{3}:0.1/\sqrt{3}:0.1/3\text{kV}$, 0.2/0.5/3P	35kV 母线

4 升压站接地设计

升压站接地可保障人员和设备不受短路故障、雷电侵入等损害；而且能够及时将设备外壳静电消除，保证其安全运行。

表7 电气设备绝缘水平

设备名称	设备耐受电压值				
	雷电冲击耐压/kV (峰值)		1min 工频耐压/kV (有效值)		
	全波		载波	内绝缘	外绝缘
	内绝缘	外绝缘			
主变低压侧	200	185	220	85	80
主变压器中性点	325	325	325	140	140
断路器断口间	185	185		95	95
隔离开关断口间		215			118
其他电器	185	185		95	95

4.1 站址土壤电阻率分析

根据项目区地质报告资料，升压站土壤电阻率为 $560 \sim 600 \Omega \cdot \text{m}$ 左右，电阻率级别较高，最大冻土层深度 200cm，地基土中含有酸性物质，定义为中等腐蚀性。本工程设计拟采用黄土和成品接地来达到降阻目的。

4.2 接地装置设计技术

按照相关规范，本项目围绕建筑物和屋外设备敷设闭合条形接地网，打造有效接地系统和低电阻接地系统，设计接地电阻满足 $R \leq 2000/I_G$ 。

本项目升压站接地网遵循“水平接地体为主，垂直接地体为辅”原则。接地线热稳定以单相接地短路电流为标准，分流系数设计为 75%；水平接地体为热镀锌扁钢（型号：-60×6），垂直接地体成品接地模块，110kV 设备接地引下线、主变压器、户外接地、引下线截面均采用 -60×8 热镀锌扁钢，接地网寿命按 30 年计算，所选材料满足热稳定的要求，水

平接地体的深度要求较大，应大于最大冻土层厚度。为有效降低接地电阻值，本工程将升压站接地网与光伏区可靠连接。

设备接地：全站一次电气设备基础及外壳均通过接地支线两点同主接地网相连，凡有二次回路的一次设备均要求采用两根接地线，接入主接地网不同位置；设计在 110kV 及 35kV 的氧化锌避雷器以及带操作箱的电气设备四周设置均压地面或绝缘地坪，使接触电势小于允许值，保证人身安全。

5 结语

风力发电作为绿色能源，在我国已列入发展规划中，尤其是当前环保压力日益增大的背景下，其必然受到越来越多的重视。五家渠北塔山牧场 100MW 风电项目电气设备设计充分参考其他工程经验，并严格按照国家标准实施，达到了 100% 合格率，为其他风电项目提供借鉴。▲

参考文献

- [1] 刘文颖,文晶,谢昶,等.考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J].中国电机工程学报,2019,35(5):1079-1088.
- [2] 付媛,王毅,张祥宇,等.变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J].中国电机工程学报,2020,34(27):4706-4716.
- [3] 刘巨,姚伟,文劲宇,等.大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J].电网技术,2018,38(3):638-646.
- [4] 马伟明,肖飞.风力发电变流器发展现状与展望[J].中国工程科学,2020,13(1):10-13.
- [5] 汤广福.高压直流输电装备核心技术研发及工程化[J].电网技术,2019,36(1):1-6.
- [6] 阳熹,杨源.智慧型海上风电场一体化监控系统方案设计[J].南方能源建设,2019,01(8):34-37.
- [7] 辛焕海,周飞,杨欢,等.摘箸山海岛新能源电网设计关键技术[J].系统科学与数学,2020,32(4):396-409.

CNCCBIM OPENROADS 在辽干防洪提升堤防工程三维设计里的应用

胡荣欣

(辽宁省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110006)

【摘要】 文章通过辽河干流防洪提升堤防工程三维设计实例, 分析了三维设计在水利行业设计工作中的可行性、必要性、紧迫性, 以此抛砖引玉, 引起行业设计工作者的重视, 为将来开展的三维设计工作提供一定参考。

【关键词】 CNCCBIM OPENROADS; 水利行业; 堤防工程; 设计

中图分类号: TV222

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-037-04

Application of CNCCBIM OPENROADS in Three-dimensional Design for Flood Control and Lifting Embankment Project of Liaohe River Trunk Stream

HU Rongxin

(Liaoning Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: It is imperative to carry out three-dimensional design in order to keep pace with the development of science and technology development and improve the design efficiency and effect of water conservancy industry. The feasibility, necessity and urgency of three-dimensional design in water conservancy industry design are analyzed through the three-dimensional design example of flood control and lifting embankment project of Liaohe River in the paper, so as to start a discussion, attract the attention of industry designers, and provide certain reference for future three-dimensional design.

Key words: CNCCBIM OPENROADS; water conservancy industry; embankment project; design

本文通过采用 CNCCBIM OPENROADS 软件建立辽河干流防洪提升中昌图县堤防工程的三维模型, 简述 BIM 技术在水利行业线性工程设计中的具体使用及应用效果。

1 工程概况

辽河干流防洪提升工程是 2018 年 11 月生态环境部、国家发改委、自然资源部三部门联合印发《渤海

综合治理攻坚战行动计划》重要工程之一, 也是 2019 年国家发改委、水利部和辽宁省政府会商重点推进的项目。工程主要建设内容包括 4 大项 12 小项, 位列第一项的即为堤防加固及新建工程。

堤防加固及新建工程包括堤防加培 (含防汛备料平台, 下同)、砂堤砂基治理、穿堤建筑物治理、新建堤防、防汛路贯通 (含支流口桥梁)、堤坡硬性防护、防浪林补植 7 个分项。本次三维模型主要针对上

述堤防加培、砂堤砂基治理、新建堤防、防汛路贯通（含支流口桥梁）、堤坡硬性防护 5 项建立。

2 三维模型建立

CNCCBIM OPENROADS 三维模型主要建立流程为：导入地模→绘制平面控制线→导入设计纵断→绘制横断面模板→新建廊道及三维路面（套图）→廊道报表（工程量清单）→制图出图。

a. 导入地模。地模文件即三维地形文件，主要由测量专业技术人员绘制，文件格式一般为“.tin”，导入后设置激活，选择是否关闭三角网格。

b. 绘制平面控制线。考虑线路的平整度要求，平面控制线绘制一般采用几何图形菜单下直线、插入直—缓—圆—缓—直曲线绘制；亦可采用复杂几何图形菜单下的几何图形构建器绘制，通过表格数据的形

式对线路进行实时修正。绘制完成后给其赋予特征定义并命名，定义线路起点桩号、方向。

c. 导入设计纵断。即赋予平面控制线高程，本工程为设计堤顶线及设计水位、背水堤脚设计纵断高程，分别用于控制设计堤顶高程、堤坡防护顶高程、背水堤脚透水后戕和排渗沟高程等，采用几何图形菜单下导入导出命令，导入文本格式中桩号、高程中间须为空格 SPACE。导入后设置激活，每条平面控制线仅对应一条激活纵断面。

d. 绘制横断面模板。横断面模板即为典型横断面，绘制方式为廊道→模板→创建模板。考虑本工程涉及横断面模板较多，本次仅列出堤防加培（模板中含砂堤砂基治理、防汛路贯通、堤坡硬性防护）2 个具有代表性的典型断面（见图 1）。

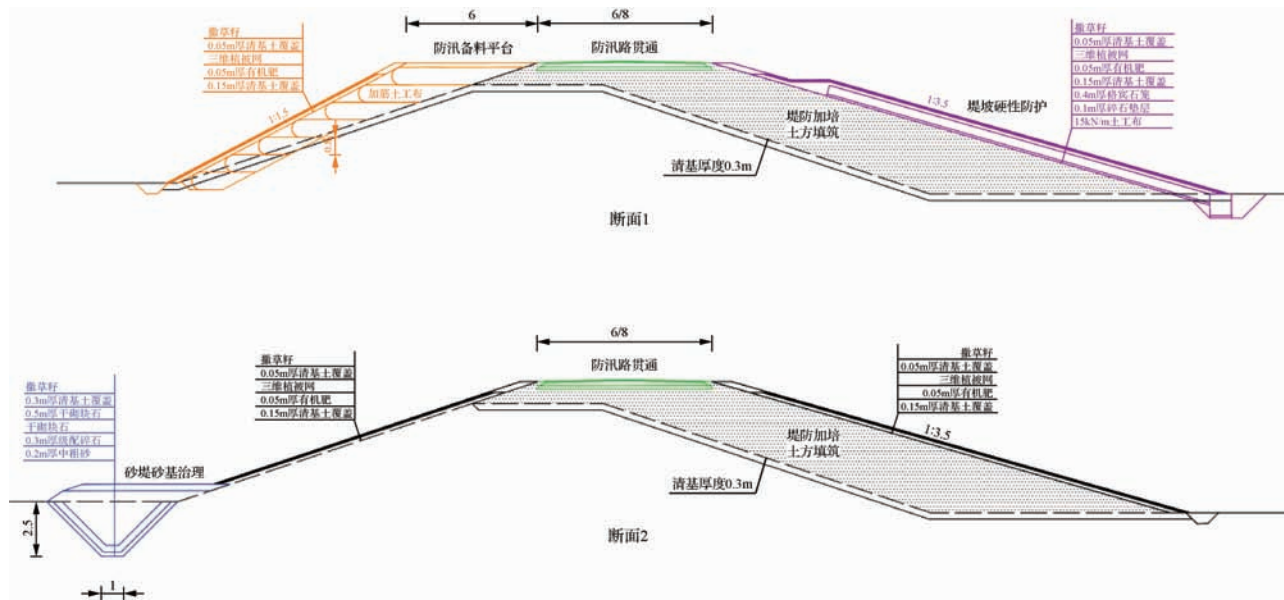


图 1 典型横断面示意图（单位：m）

组件类型如下：

模板中用到的组件包括受约束、末端条件、重叠/剥离、圆，上述亦是水利行业线性工程绘制模板时常用的几种构件。

受约束主要是指基于某个固定点，与其他点水平、竖向高差、连线坡度、矢量偏移、角度距离等固定的相关关系，如堤顶宽度为 8m，下一个点相对于

上一个点约束条件为水平 8m；清基土恢复为 0.3m，上部线条相对于下部线条矢量偏移 0.3m。

末端条件主要是指末端位置随地形变化，如堤坡放坡至地面的时候，坡度是固定的，堤坡竖向距离是随地形变化而变化的。本工程临水堤坡即采用末端条件绘制。

重叠/剥离主要用于表示堤防清基或构件与地面之

间、构件与构件之间的相关关系。本工程清基、土方填筑（上至构件、下至表面）即通过重叠/剥离体现。

圆仅在防汛备料平台的加筋土工布中使用，使用频率相对较低。

组件特性如下：

组件特性表中需要注意的主要有 4 处：名称、特征定义、显示规则、父组件。因模板涉及到的组件可能较多，命名须避免重复，且易于记忆。特征定义主要在后续廊道报表区分工程量及三维可视化成果展现时使用。显示规则即通过制定逻辑关系，设定组件显示及计量等的条件，在水利行业设计过程中常涉及到的是石笼挡土墙模板建立，石笼挡土墙层数随挡土墙高度变化而变化，如 5m 高石笼挡土墙一般为 5 层 1m 厚石笼，4m 高则为 4 层。父组件是指当前组件依附于父组件，父组件不显示或不计量时，当前组件亦不显示不计量。另外，重叠/剥离中有重叠/剥离属性选项，须确定顶部、底部构成和组件或表面深度。

e. 新建廊道及三维路面（套图）。平面、纵断、横断面模板确定后，在廊道菜单里选择新建廊道、新建三维路面，设定廊道范围、断面间距（间距越小，精度越高），完成套图工作，生成三维立体模型。

f. 廊道报表（工程量清单）。选择廊道菜单下的廊道报表→组件数量，一键读取工程范围内的工程量清单，导出样式可根据需要自行选择。

g. 制图出图。在制图菜单下分别选择组件标准、标注模型、命名边界，完成平面、纵断、横断的制图和出图工作。需要说明的是，制图出图过程中涉及到的组件标注、标注模型需要自行在工作空间中进行设置，模型标准过程中可单个视口标注，亦可对整个模型进行标注。

3 应用效果

3.1 速度大幅提升

辽干防洪提升工程采用 CNCCBIM OPENROADS 软件进行三维设计后，工作效率提升了 3 倍，按传统二维方式设计可能需要 1 个月，采用三维设计仅需 1 周左右时间；传统二维设计需要反复修改核对的工作

在三维设计中大部分可以一键完成，包括平面、纵断、横断及工程量的联动，后期制图、出图的一键化处理等。

3.2 三维设计计算成果相对准确

传统二维设计成果受断面间距影响较大，水利行业线性工程设计过程中，断面间距在可研阶段要求为 50 ~ 100m，地形突变处不能完全体现；三维设计过程中，断面间距可根据计算机配置情况设定为个位数（一般为 5m 左右），大大提高了计算成果的准确性，缺点就是三维设计对三维地形精度要求较高，测绘成本相对较大。本次选取了辽河干流沿线昌图县堤防工程进行了工程量及占地面积成果对比（见表 1）。

表 1 工程量及占地面积对比

项 目	单位	传统二维 计算数值	三维计算 数值	差 值	差值比 例
清 基	m ³	152570	155684	3114	2%
开 挖	m ³	46570	45214	- 1356	- 3%
回 填	m ³	456658	452137	- 4521	- 1%
临水堤坡植草	m ²	318266	328109	9843	3%
背堤坡植草	m ²	303569	297617	- 5952	- 2%
清基土覆盖	m ³	114597	112350	- 2247	- 2%
三维植被网	m ²	638241	625726	- 12515	- 2%
有机肥	m ³	28577	28017	- 560	- 2%
沥青面层	m ³	7378	7378	0	0
水稳层	m ³	22135	22135	0	0
级配碎石	m ³	22135	22135	0	0
占地面积	亩	1186	1155	- 31	- 3%

3.3 查看方便

未来 BIM 普及后，三维设计成果在工程施工及后期管护过程中亦将有着不可忽视的作用，比如施工过程中通过手机端或其他移动端查看工程立体模型及相关图纸，能大范围地实现无纸化办公；比如通过查看三维设计成果，能切实保证堤防工程隐患的排查及堤防工程的日常养护到位等。

3.4 提高了设计数值可靠度

由表 1 可知，三维计算成果与传统二维计算成果相差较小，均在 3% 以内。总体而言，三维计算数值

成果较为可靠,加之三维设计过程中断面间距较二维设计密,成果可信度较传统二维设计高。

3.5 可实现成果可视化

三维设计实现了成果可视化,辅以 VR 灵境技术,能立体、完美地展现设计成果,大大提升设计效果(见图2)。

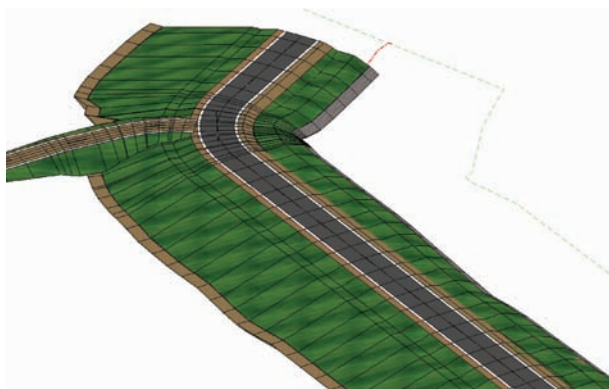


图2 三维全景视图

4 结 语

BIM 设计是整个设计行业大势所趋,各地方政府相继出台推行 BIM 设计的政策文件。目前,尚无完全针对水利行业线性工程设计研发的软件,考虑公路行业与水利行业线性工程有很多相似之处,经实践分

(上接第44页)间无明显的相关性;沿海地区水闸混凝土的碳化值普遍高于内地,这是因为氯离子侵蚀和海水腐蚀环境加速了混凝土碳化,而沿海闸墩的碳化值又普遍高于排架的碳化值,表明海水水位变动区的碳化损伤更明显。通过对沿海地区水闸闸墩碳化的可靠度指标进行计算,得到不同水闸的长期服役状态,得出三里闸、烧香河闸以及车轴河闸闸墩进行大修或者拆除重建的结论。

针对水闸混凝土碳化问题,提出了防碳化处理措施和碳化处理方法,对维持沿海地区水闸工程长期服役性能具有一定的借鉴意义。▲

参考文献

- [1] 黄文涛.沿海水闸混凝土碳化寿命的可靠度分析[J].居业,2017(1):89-90.
- [2] 姜圣军,赵远,翟百江.沿海水闸防渗系统修复技术[J].水利

析,采用公路行业线性工程设计软件 CNCCBIM OPENROADS 进行堤防工程设计是可行的。▲

参考文献

- [1] 白蕾. BIM 技术在公路工程决策设计阶段造价管理中的研究与应用[D]. 郑州:华北水利水电大学,2018.
- [2] 周理圆. 建筑工业化背景下 BIM 应用障碍分析——基于工程项目设计阶段[D]. 兰州:兰州理工大学,2018.
- [3] 张景林. BIM 技术在水利工程中的应用[J]. 砖瓦世界,2020(2):232.
- [4] 解凌飞,李德. 基于 BIM 技术的水利水电工程三维协同设计[J]. 中国农村水利水电,2020(3):105-111.
- [5] 盖海英. BIM 技术在提高水利工程建设现代化水平中的探讨[J]. 信息技术与信息化,2020(5):46-48.
- [6] 孟影影. BIM 技术在水利工程设计中的应用研究[J]. 城市建筑,2020,17(23):98-99.
- [7] 张晓阳,钱锋,李彧玮. OpenRoads Designer 在河道三维设计中的应用探索[J]. 建筑工程技术与设计,2019,(2):967.
- [8] 蒋艺,雷鹏,曹磊. 基于 OpenRoads 技术的道路三维设计方法研究[J]. 中国水运(下半月),2015,15(11):244-246,249.
- [9] 邵富祥. 生态堤防设计在水利工程中的应用探讨[J]. 中国科技投资,2020(3):175-176.
- [10] 刘谦周. 浅析水利工程建设中生态堤防设计[J]. 魅力中国,2020(9):334.
- [11] 建设与管理,2018,38(11):71-75.
- [12] 戚蓝,汪洋胜,马洪霞,等. 沿海地区水闸安全鉴定分析[J]. 中国农村水利水电,2014(12):134-138.
- [13] 韩良凯. 沿海地区水闸设计有关问题探讨[J]. 黑龙江水利科技,2020,48(6):75-77.
- [14] 张晓丽. 混凝土碳化的影响因素及其控制措施[J]. 黑龙江交通科技,2020,43(10):33-35.
- [15] 张晓英,宋力,何岗忠. 黄河中下游水闸混凝土碳化深度研究[J]. 人民黄河,2018,40(1):108-110.
- [16] 王金晶. 某流域混凝土水闸结构碳化模型研究[J]. 水利科技与经济,2017,23(12):21-27.
- [17] 赵海娟,王军. 水闸混凝土碳化深度预测研究[J]. 山西建筑,2019,45(22):151-152.
- [18] 王禹迪,梁梓煜,夏江涛. 北京玉渡山水库大坝质量检测评价[J]. 中国水能及电气化,2020(4):61-64.
- [19] 汪魁峰,徐志林,张永先. 高寒地区水工混凝土建筑物表面预防防护技术应用探讨[J]. 中国水能及电气化,2017(8):9-12,41.

科学研究

碳化对沿海水闸工程的影响及
长期服役性能研究

商志清 陆风华 周阜军

(江苏盐城水利建设有限公司, 江苏 盐城 224014)

【摘要】 沿海水闸处于复杂的工作环境之中, 对水闸寿命有重要影响。文章采用理论分析+现场检测的方法, 对沿海地区水闸工程的碳化问题和长期服役性能进行了研究。结果表明: 氯离子侵蚀和海水腐蚀环境会加速水闸混凝土的碳化, 同时水位变动区的碳化损伤又显著大于其他区域的碳化损伤; 对沿海地区水闸闸墩碳化的可靠度指标进行计算, 得到沿海地区不同水闸的长期服役状态, 得出需要对三里闸、烧香河闸以及车轴河闸闸墩进行大修或者拆除重建的结论; 根据研究结果, 提出了防碳化处理措施和碳化处理方法, 可为沿海地区水闸工程的长期运行提供借鉴。

【关键词】 沿海地区; 水闸工程; 碳化; 长期服役性能; 可靠度指标

中图分类号: TV66

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-041-04

Research on Influence of Carbonization on Coastal Sluice Project and
Long-term Service Performance thereof

SHANG Zhiqing, LU Fenghua, ZHOU Fujun

(Jiangsu Yancheng Hydraulic Engineering Construction Co., Ltd., Yancheng 224014, China)

Abstract: The coastal sluice is in a complex working environment. It has important influence on the service life of the sluice. The carbonization problem and long-term service performance of the sluice project in coastal area are studied by means of theoretical analysis and field detection in the paper. The results show that the chloride ion erosion and seawater corrosion environment can accelerate the carbonization of the sluice concrete. Meanwhile, the carbonization damage in the water level fluctuation area is significantly more serious than that in other areas. The reliability index of carbonization in sluice piers in coastal areas is calculated. The long-term service status of different sluices in coastal areas is obtained. It is concluded that the sluice piers of Sanli Sluice, Shaoxianghe Sluice and Chezhouhe Sluice should be overhauled or dismantled and rebuilt. The anti-carbonization-treatment measures and carbonization treatment methods are proposed according to the research results, which can provide reference for the long-term operation of the sluice projects in the coastal areas.

Key words: coastal area; sluice project; carbonization; long-term service performance; reliability index

我国海岸线约有 1.8 万 km，分布有大大小小的 1800 多个入海口，在这些入海口大部分都修建了水闸，发挥着挡潮和排涝等重要作用，但是由于沿海水闸处于复杂的工作环境之中，对于水闸的破坏和老化具有重要影响，造成其结构损伤、安全性降低和寿命减少，因而有必要对沿海水闸的长期服役性能进行研究^[1-3]。

影响沿海地区水闸工程长期运行的因素较多，主要包括外部环境因素和内部人为因素。外部环境因素包括软土地基、碳化作用、氯离子侵蚀、碱骨料反应、海水腐蚀、冻融作用等；内部人为因素包括设计、材料、施工、养护等。其中，水闸混凝土碳化问题对于水闸安全运行是一个不可忽视的重要问题，特别是在沿海地区高盐腐蚀环境作用下，水闸的碳化损伤更加明显，对沿海水闸结构碳化规律进行研究，能够为科学合理制定沿海水闸的运行维护策略提供理论依据^[4-8]。

本文对沿海水闸工程碳化作用下的损伤及长期服役性能进行了探讨，以期能为准确评估沿海地区水闸工程的长期服役性能并制定合理碳化处理措施提供指导。

1 碳化机理分析

水闸混凝土结构的碳化损伤主要是指空气中的二氧化碳通过毛细管、孔隙、气泡等孔隙结构向闸室混凝土内部扩散，并与混凝土中的氢氧化钙等物质发生化学反应，生成碳酸钙等物质的过程。主要分为三个过程：化学反应过程、CO₂ 在混凝土中的扩散过程以及 Ca(OH)₂ 的扩散过程。其中 Ca(OH)₂ 的扩散过程速度最慢，但此过程决定了水闸混凝土结构碳化速度和分层特性。影响混凝土碳化的影响因素较多，可分为外部因素和内部因素，外部因素主要包括 CO₂ 浓度、环境温度、环境湿度以及应力状态等，内部因素主要包括水灰比、水泥用量、水泥品种以及施工质量等。混凝土碳化会降低混凝土内部的碱度，从而破坏混凝土结构中钢筋表面的钝化膜，引起钢筋锈蚀和损

伤，同时，碳化还会加大混凝土的脆性，使得混凝土中的裂缝结构增多，从而影响水闸的长期服役性能。

2 碳化对水闸的影响分析

2.1 研究对象

本文选择沿海不同碳化时间（检测时间、建成时间）的水闸，并选择内地碳化时间与之基本相同的水闸进行对比研究。其中，沿海地区水闸最短碳化时间为 5 年，最长碳化时间为 61 年；内地地区水闸最短碳化时间为 6 年，最长碳化时间为 58 年。统计的沿海水闸闸墩样本数为 980 个，水闸排架样本数为 726 个，内地水闸闸墩样本数为 1020 个，排架数为 830 个，取统计构件的样本平均值作为检测值（见表 1）。

表 1 统计各水闸碳化时间

沿海水闸			内地水闸		
水闸编号	水闸名称	碳化时间/a	水闸编号	水闸名称	碳化时间/a
1	竹港新闻	5	11	李楼节制闸	6
2	中深泓闸	9	12	慈湖闸	9
3	北深泓闸	19	13	沙集闸站	19
4	新港闸	27	14	邳洪河闸	23
5	四卯西闸	36	15	秦淮新河节制闸	35
6	黄沙港闸	45	16	新沂市塔山老闸	43
7	桃花洪闸	50	17	圩港节制闸	44
8	三里闸	55	18	泗阳闸	49
9	烧香河闸	57	19	天星港节制闸	52
10	车轴河闸	61	20	泰兴市口岸闸	58

2.2 碳化时间对闸墩的影响

从检测得到的水闸闸墩碳化值随碳化时间的变化曲线（见图 1）可以看到：沿海水闸闸墩碳化值随碳化时间呈明显的正相关关系，碳化时间越长，闸墩的碳化值越大，而内地水闸闸墩的碳化值随碳化时间增加反而呈逐渐减小趋势，出现这种反差的主要原因可能是不同水闸修建的年代不同，所使用的混凝土有较大区别，从 20 世纪 80 年代开始，商品混凝土由于效率高、速度快，逐渐取代自拌混凝土，在水闸闸墩等

大体积混凝土浇筑中也得到广泛应用,但是由于各方面原因导致商品混凝土在配合比、原材料、强度以及运输方面存在一定弊端,如商品混凝土胶凝材料用料多,坍落度大,掺加粉煤灰和外加剂情况较多,增大了混凝土干燥收缩,使得闸墩易出现裂缝,导致抗渗性能变差,因而抗碳化能力降低,总之,商品混凝土在水闸工程中的应用会在一定程度上加速新闻的碳化,因而使用商品混凝土修建的新水闸闸墩碳化值反而高于旧水闸闸墩的碳化值。但是对于沿海水闸闸墩

而言,除了受到上述因素影响之外,还会受到海洋环境的影响,海洋环境对水闸的侵蚀主要为氯离子侵蚀和海水腐蚀,一方面,氯离子侵蚀会破坏钝化膜、形成锈蚀电池,同时氯离子具有去极化和导电作用,容易引发钢筋锈蚀,另一方面,海水中 $MgSO_4$ 、 $MgCl_2$ 会与混凝土中的 $Ca(OH)_2$ 发生化学反应,导致混凝土孔隙率增大,结构被破坏,海水环境对混凝土碳化的影响超过了商品混凝土对碳化的影响,因而沿海地区的碳化值随碳化时间增加而增加。

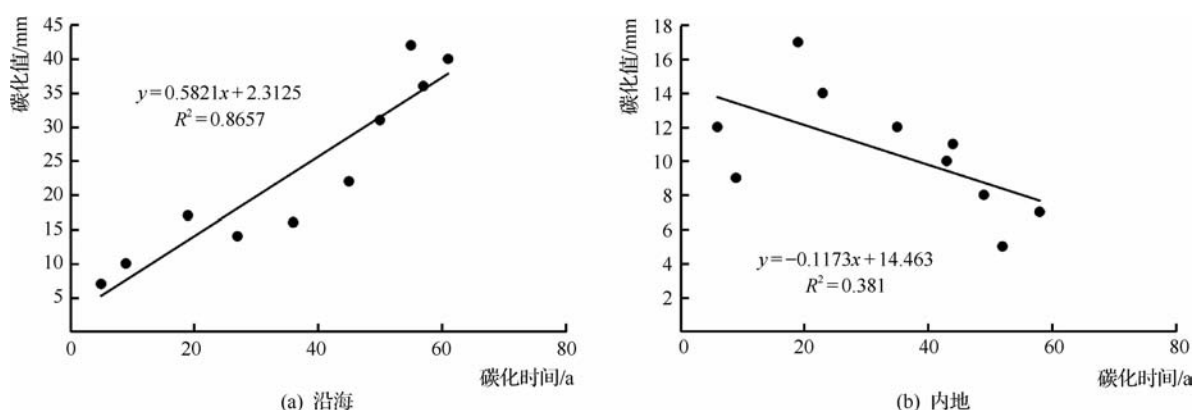


图1 水闸闸墩碳化值变化曲线

2.3 碳化对排架的影响

从检测得到的水闸排架碳化值随碳化时间的变化曲线(见图2)可以看到:不管是沿海地区还是内地地区,水闸排架的碳化值与碳化时间无明显的相关性,这可能与排架所接触的环境有关;沿海地区和内地地区水闸闸墩的碳化均值分别为 23.5mm 和 10.5mm,排架的碳化均值分别为 14.9mm 和 10.5mm;由此可

见,沿海地区水闸混凝土的碳化值普遍高于内地,这是因为氯离子侵蚀和海水腐蚀环境加速了混凝土碳化,而沿海闸墩的碳化值又普遍高于排架的碳化值,这主要是由于水闸闸墩处于海水水位变动区,水位变动又会造成频繁的干湿循环,因而也会加速混凝土的碳化损伤,但内地闸墩和排架的碳化值相差不大。

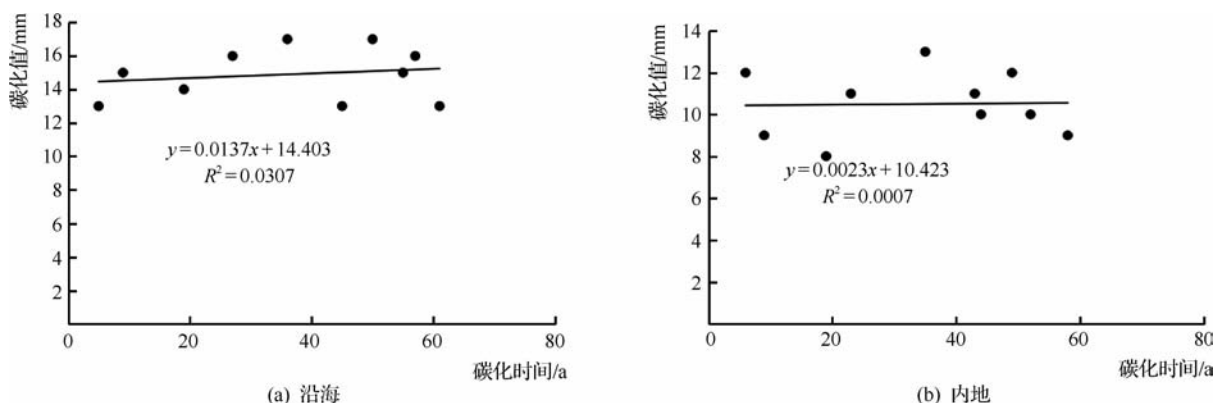


图2 水闸排架碳化值变化曲线

3 长期服役性分析

水闸混凝土的碳化损伤极限状态可用下式表示：

$$Z = C - T \quad (1)$$

式中 Z ——水闸混凝土剩余保护层厚度，mm；

C ——混凝土最开始的保护层厚度，mm；

T ——混凝土的碳化深度值，mm。

定义水闸混凝土的碳化深度功能函数的概率密度表达式为

$$f_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z - \mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (2)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_T^2} \quad (3)$$

$$\mu_z = \mu_c - \mu_T \quad (4)$$

式中 μ_z ——功能函数均值，mm；

σ_z ——功能函数标准差，mm；

σ_c 和 μ_c ——保护层标准差和均值，mm；

σ_T 和 μ_T ——碳化标准差和均值，mm；

T ——碳化时间，a。

定义水闸混凝土碳化寿命的可靠度指标为 β ：

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_c - \mu_T}{\sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_T^2}} \quad (5)$$

当 $\beta > 3.5$ 时，表明水闸结构稳定性良好；当 $3.5 > \beta > 2.3$ 时，表明水闸结构稳定性一般；当 $2.3 > \beta$ 时，表明水闸结构稳定性较差。

对沿海地区 10 个水闸的闸墩进行了碳化寿命预测计算（见图 3），从中可以看到：水闸闸墩可靠度指标为 β 随着服役年限的增加而呈逐渐降低的趋势，服役 10 年以内，水闸闸墩处于结构稳定性良好状态，服役 10~50 年，水闸闸墩处于结构稳定性一般状态，服役 50 年以上，水闸闸墩处于结构稳定性较差状态。现场进行的 10 个水闸闸墩的检测表明：三里闸、烧香河闸以及车轴河闸闸墩混凝土开裂现象严重，存在较多露筋现象，同时局部钢筋还出现了锈断情况，因此，需要对三个水闸进行大修或者拆除重建。

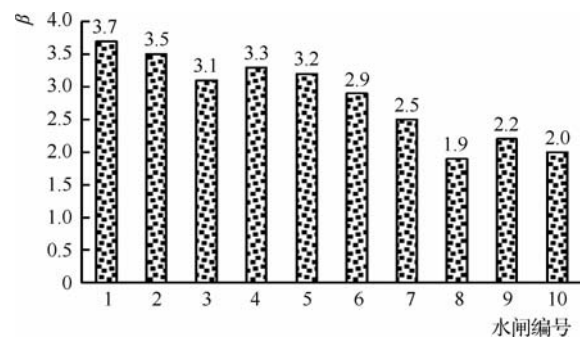


图 3 沿海地区水闸闸墩可靠度指标

4 碳化处理

4.1 防碳化处理措施

合理设计水闸混凝土配合比，严格控制水胶比和保护层最小厚度；尽量选用活性掺和料以及减水剂，最大限度限制混凝土中氯化物的含量；选择合适的模板进行施工，模板施工时需要固定牢，拆模后需要合理养护；混凝土浇筑完成后需在表面进行涂覆。

4.2 碳化处理方法

若碳化损伤比较严重，且出现了大面积的钢筋锈蚀情况，结构安全性得不到保障，则需要对水闸进行拆除重建；对于碳化损伤较小，碳化深度仍然小于钢筋保护层厚度，且混凝土碳化层比较坚固的，可采用优质涂料对碳化部位进行封闭处理；对于碳化深度大于钢筋保护层厚度或者碳化深度小于钢筋保护层厚度，但混凝土碳化层疏松易剥落的，需要凿除这部分碳化层，然后用高强砂浆或者高强混凝土进行回填；对于钢筋锈蚀的部位，需要在修补前对钢筋进行除锈处理，同时对于锈蚀比较严重的部分进行加补钢筋处理^[9-10]。

5 结 语

本文以沿海地区水闸工程为研究对象，探讨碳化作用对沿海水闸的影响极其长期服役性能。结果表明：沿海地区闸墩混凝土碳化随服役时间的增加而逐渐增大，内地闸墩混凝土碳化随服役时间的增加而逐渐减小；水闸排架的碳化值与碳化时（下转第 40 页）

防腐阻锈和防腐涂料技术在甘肃省昌马大型灌区改造项目中的研究与应用

吴学广

(甘肃省疏勒河流域水资源利用中心, 甘肃 玉门 735211)

【摘要】 甘肃省昌马灌区地处昌马洪积扇扇缘, 地下水经洪积扇到达灌区后, 造成土壤中含有大量 SO_4^{2-} 、 Cl^- , 对混凝土和混凝土中的钢筋造成了严重腐蚀, 如对新建渠道不进行防腐处理, 将使渠道使用年限大幅降低, 造成巨大经济损失。文章研究与应用了防腐阻锈外加剂水性和厚质弹性防腐涂料技术, 解决了混凝土渠道和钢筋混凝土渠道内外质量受 SO_4^{2-} 、 Cl^- 的破坏问题, 大幅提升了工程质量和使用年限, 可供其他类似灌区推广借鉴。

【关键词】 防腐阻锈; 技术; 研究应用

中图分类号: TV47

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-045-05

Research and Application of Anticorrosive Rust-resistant and Anticorrosive Coating Technology in Gansu Changma Large Irrigation Area Reconstruction Project

WU Xueguang

(Gansu Shule River Basin Water Resources Utilization Center, Yumen 735211, China)

Abstract: Gansu Changma Irrigation Area is located in the edge of Changma Diluvial Fan. After the groundwater reaches the irrigation area through the diluvial fan, the soil contains a lot of SO_4^{2-} and Cl^- as a result, thereby causing severe corrosion on concrete and reinforcing steel bars in concrete. If the new-constructed channels are not treated with anti-corrosion treatment, the service life of the channels will be greatly reduced, thereby causing huge economic losses. The anticorrosive rust-resistant additive water-based and thick elastic anticorrosive coating technology is studied and applied in the paper. The damage problems of internal and external quality of concrete channels and reinforced concrete channels by SO_4^{2-} and Cl^- are solved, thereby greatly improving the project quality and service life, which can be used for reference by other similar irrigation areas.

Key words: anticorrosive rust-resistant; technology; research and application

甘肃省昌马大型灌区始建于二十世纪五六十年代, 经多年配套完善, 现状灌区灌溉渠系布置较为完整。已建骨干渠道共计 92 条 669.83km。由于昌马灌

区地处洪积扇扇缘, 地下水经洪积扇到达灌区后, 造成土壤中含有大量 SO_4^{2-} 、 Cl^- , 对混凝土和混凝土中的钢筋造成了严重腐蚀, 渠道使用年限大幅降低。

1 基本情况

1.1 工程概况

甘肃省疏勒河昌马灌区位于河西走廊最西端疏勒河中下游,涉及玉门市5个乡镇以及甘肃农垦4个国有农场,灌区地处东经 $96^{\circ}30' \sim 97^{\circ}30'$ 、北纬 $40^{\circ}11' \sim 40^{\circ}34'$ 之间,呈东西向弧形带状分布,东西长约104km,南北最宽处达35km。昌马灌区位于昌马洪积扇西北部,总体地势南高北低,东高西低,海拔1300~1400m。灌区为一完整盆地,灌溉面积63.92万亩。盆地内地势南高北低,灌区内主要土壤类型为高山地区高山寒冷漠土、低山灰土、棕漠土和山麓棕钙土等。

甘肃省昌马大型灌区“十四五”续建配套与现代化改造项目,是经水利部批复实施的甘肃省重点建设项目。

1.2 水中腐蚀元素检测

为了确保工程质量,2021年7月17日,委托土壤检测单位对灌区的渠道地基土进行了取样。检测结果表明: SO_4^{2-} 含量 $5004.89 \sim 8401.06\text{mg/kg}$,对混凝土结构腐蚀性为硫酸盐强腐蚀, Cl^- 含量 $1036 \sim 2331\text{mg/kg}$,对钢筋混凝土结构中钢筋为中等腐蚀性,pH值 $7.44 \sim 8.46$,对钢结构为微腐蚀。地下水对混凝土具有硫酸盐中等腐蚀性,对钢筋混凝土中的钢筋具有弱腐蚀性;地基土对普通混凝土结构有硫酸盐强腐蚀性,对混凝土中的钢筋具有强腐蚀性。为此,经多方论证,对于 SO_4^{2-} 含量大于 10000mg/kg (参考土木工程院试验成果:防腐阻锈外加剂能有效抵抗 SO_4^{2-} 含量在 15000mg/kg 以内的腐蚀)的现浇钢筋混凝土矩形渠道外壁喷涂水性无机防腐涂料进行二次保护, SO_4^{2-} 含量大于 4500mg/kg 的RCP管道(抗硫酸盐混凝土管道对弱—中等 SO_4^{2-} 腐蚀有效,II类环境类型土 SO_4^{2-} 含量大于 4500mg/kg 为强腐蚀性)外壁喷涂水性无机防腐涂料进行二次保护。

2 防腐材料性能简介

2.1 防腐阻锈外加剂

2.1.1 LST-6 防腐阻锈外加剂

根据渠基土样检测数据,本次改造的西干五分干渠 SO_4^{2-} 含量为 $1652 \sim 11053\text{mg/kg}$,西干六分干渠 SO_4^{2-} 含量为 $19204 \sim 27153\text{mg/kg}$,西干五分干四支渠 SO_4^{2-} 含量为 $531 \sim 21691\text{mg/kg}$,西干一支渠 SO_4^{2-} 含量为 $411 \sim 8401\text{mg/kg}$,总一分干四支渠 SO_4^{2-} 含量为 $340 \sim 5005\text{mg/kg}$, SO_4^{2-} 含量上限均大于 4500mg/kg (强腐蚀等级),对混凝土具有强腐蚀。本次对该几条渠道进行相应的防腐处理,现浇钢筋混凝土渠道添加防腐阻锈高性能混凝土外加剂,RCP埋管采用抗硫酸盐混凝土管道,同时对于 SO_4^{2-} 含量大于 10000mg/kg (参考土木工程院试验成果:防腐阻锈外加剂能有效抵抗 SO_4^{2-} 含量在 15000mg/kg 以内的腐蚀)的现浇钢筋混凝土矩形渠道外壁喷涂水性无机防腐涂料进行二次保护, SO_4^{2-} 含量大于 4500mg/kg 的RCP管道(抗硫酸盐混凝土管道对弱—中等 SO_4^{2-} 腐蚀有效,II类环境类型土 SO_4^{2-} 含量大于 4500mg/kg 为强腐蚀性)外壁喷涂水性无机防腐涂料进行二次保护(见表1)。

2.1.2 技术说明

LST-6防腐阻锈外加剂,采用外掺法,掺量为胶凝材料的8%,以粉剂直接掺入,按普通混凝土施工方法施工,施工完毕后湿养护(见表2)。

LST-6防腐阻锈外加剂除满足以上技术指标外,还能保证渠道抵御长期浸泡、干湿交替硫酸盐(SO_4^{2-} 浓度不超过 50000mg/kg)单独腐蚀情况下的耐久性技术要求。该产品能够有效阻止钙矾石结晶膨胀破坏、石膏结晶膨胀破坏、镁盐结晶破坏、碳硫硅钙石结晶破坏,从而提高混凝土结构耐久性。

表 1 土 化 学 分 析 结 果

序 号	试样编号		取样位置	阴 阳 离 子 含 量										pH 值	易溶盐总量		盐渍土 类型	含盐量 分类
	室内	野外		单位	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + k ⁺	ΣCa ²⁺ +	Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	ΣK		mg/kg	%		
1	868	渠首	五支干四 支渠	mg/kg	2647.80	994.36	9309.25	12951.41	1392.25	10977.90	183.06	120.04	24502.25	8.86	37362.12	3.74	1.86	中盐渍土
				mg/kg	66.03	40.92	404.75	511.70	397.75	106.95	3.00	4.00	511.70					
2	869	1 + 500	五支干四 支渠	mg/kg	2796.98	790.97	6963.02	10550.97	10683.75	9205.42	183.06	30.01	20102.24	8.21	30561.67	3.06	1.59	中盐渍土
				mg/kg	69.75	32.55	302.74	405.04	305.25	95.79	3.00	1.00	405.04					
3	870	3 + 100	五支干四 支渠	mg/kg	298.34	113.00	696.07	1107.41	530.95	786.48	1037.34	60.02	2414.79	8.87	3003.53	0.3	0.93	中盐渍土
				mg/kg	7.44	4.65	30.26	42.35	15.17	8.18	17.00	2.00	42.35					
4	871	渠尾	五支干四 支渠	mg/kg	2983.44	1039.55	14171.45	18194.44	21691.25	9473.54	610.20	150.05	31925.04	8.80	49814.38	4.98	3.14	中盐渍土
				mg/kg	74.40	42.78	616.15	733.33	619.75	98.58	10.00	5.00	733.33					
5	877	1 + 055	西干一 支渠	mg/kg	1156.08	271.19	1901.87	3329.14	2331.00	5004.89	244.08	0.00	7579.97	7.44	10787.07	1.08	0.64	中盐渍土
				mg/kg	28.83	11.16	82.69	122.68	66.60	52.08	4.00	0.00	122.68					
6	872	3 + 650	西干一 支渠	mg/kg	261.05	76.84	518.79	856.68	453.25	411.12	793.26	60.02	1717.65	8.46	2177.69	0.22	—	—
				mg/kg	6.51	3.16	22.56	32.23	12.95	4.28	13.00	2.00	32.23					
7	873	6 + 580	西干一 支渠	mg/kg	2237.58	587.57	943.92	3769.07	1036.00	8401.06	122.04	60.02	9619.12	8.40	13327.18	1.33	0.17	中盐渍土
				mg/kg	55.80	24.18	41.04	121.02	29.60	87.42	2.00	2.00	121.02					
8	874	0 + 100	总一支干 四支渠	mg/kg	126.80	13.56	195.82	336.18	129.50	339.62	183.06	60.02	712.20	8.32	956.85	0.1	—	—
				mg/kg	3.16	0.56	8.51	12.23	3.70	3.53	3.00	2.00	12.23					
9	875	0 + 520	总一支干 四支渠	mg/kg	141.71	9.04	227.33	378.08	142.45	357.49	244.08	60.02	804.04	8.30	1060.09	0.11	—	—
				mg/kg	3.53	0.37	9.88	13.78	4.07	3.72	4.00	2.00	13.79					
10	876	2 + 120	总一支干 四支渠	mg/kg	119.34	11.30	159.30	289.94	25.90	348.55	305.10	30.01	709.56	8.60	846.95	0.08	—	—
				mg/kg	2.98	0.47	6.93	10.38	0.74	3.63	5.00	1.00	10.37					

表 2 防腐阻锈外加剂性能指标

检 测 项 目	技术指标	实测值
凝结时间	初凝/min	≥45
	终凝/h	≤10
抗压强度比/%	7d	≥90
	28d	≥100
膨胀率/%	1d	≥0.05
	28d	≤0.60
抗侵蚀性	抗蚀系数	≥0.85
	膨胀系数	≤1.50

2.1.3 特性

该外加剂为非膨胀类混凝土外加剂，可达到防腐阻锈效果，同时兼具防水抗裂的技术性能；产品与普通硅酸盐水泥复合使用，可代替高抗硫水泥，同时兼具阻锈性能；提高混凝土密实度及抗渗能力的同时提高了混凝土的其他耐久性，极大地增强了混凝土的抗冻融能力。

2.1.4 使用方法及施工工序

使用方法：采用外掺法，掺量为胶凝材料 8%，以粉剂直接掺入，按普通混凝土施工方法施工，施工完毕后湿养护。

施工工序：配合比试配→混凝土搅拌→运输→浇筑 LST-6 防腐阻锈混凝土→养护。混凝土搅拌、运输、浇筑、振捣、养护按照普通混凝土规范执行。

LST-6 防腐阻锈外加剂终凝后应及时覆盖保温（保湿）养护或洒水养护，养护时间不宜少于 14d。

混凝土浇筑时，施工单位必须按照施工方案进行施工，尤其注意要使混凝土振捣密实，不得过振和欠振；在混凝土浇筑完成后，密切关注凝结时间，在初凝之后终凝之前进行二次抹压，防止混凝土出现塑性塌陷或塑性收缩裂缝。

2.1.5 检测与验收

地下钢筋混凝土结构在不同环境条件和环境作用等级情况下的专业检测，按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T 50082）的相关要求进行。

2.1.6 混凝土工程质量验收

混凝土质量除应满足《地下工程混凝土结构防腐阻锈防水抗裂技术规程》（DB62/T 25-3109—2016）要求外，尚应满足以下规定：混凝土质量应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》（GB 50164）的规定。混凝土强度检验评定应符合现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》（GBJ 107）的规定，混凝土结构工程的施工质量验收应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB 50204）的规定。

2.2 水性厚质弹性防腐涂料

产品型号：FD-201（加强型）。本产品有 A、B 两组分构成，A 组分为液料，B 组分为粉料，质量比 A:B=1:1（见表 3）。

表 3 FD-201（加强型）厚质弹性防腐涂料（水性）性能指标

检 测 结 果			
检测项目		技术要求	检测结果
固体含量/%		≥70	75.5
干燥时间	表干时间/h	≥4	2
	实干时间/h	≤8	5
无处理拉伸强度/MPa		≥0.7	1.8
无处理断裂伸长率/%		≥100	247
低温柔度		-30℃ 无裂纹	φ50，-30℃ 无裂纹
不透水性		0.2MPa，30min 不透水	0.3MPa，30min 不透水
水泥砂浆黏结强度/MPa		≥0.6	0.78、0.80、0.76

除满足以上技术指标外，还应满足抗氯离子迁移系数不大于 $5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ，同时还应具备耐水性、耐热性、耐碱性、耐盐水性、耐工业乙醇、与下道涂层的适应性。

2.2.1 特性

水性环保产品，存储、施工及长期使用过程均不会对环境构成污染；混凝土及钢材表面只需用出口压力大于 2.5MPa 高压水枪冲洗即可，从而有效降低了表面清理成本；耐久性高、耐候性好，适用性广泛，

可在各种气候区域内使用；无火灾隐患，不助燃不自燃，适用于高危火险环境的施工及使用。

2.2.2 配比及混料方法

配比为乳：粉=1：1。混料方法：将1/2~3/4的A组分（乳液）倒入搅拌桶中（重量比），再加入B组分（粉料），采用手持式电动搅拌机或电动搅拌机进行搅拌，按配比补足A组分（乳液）搅拌至均匀，继续加粉料，待粉料完全加入后持续搅拌5min以上，搅拌彻底均匀后再使用。切记顺序不可颠倒。

2.2.3 使用方法（建议无气喷涂，效果更佳）

施工工序：基面处理→涂刷（喷涂）FD-201（加强型）厚质弹性防腐涂料（水性）→养护。

基面处理：基面必须坚实清洁，没有浮尘、油污、明水或杂物。用出口压力大于2.5MPa高压水枪冲洗即可。

喷涂：对现浇钢筋混凝土矩形渠道外壁喷涂FD-201（加强型）厚质弹性防腐涂料（水性），进行多遍薄涂（2遍以上），每遍喷涂必须均匀不遗留，待完全干透后再涂刷下一遍，喷膜厚度为0.6~0.8mm，完成后自然养护即可。

涂刷：待混凝土表面无明水后，将配置好的FD-201（加强型）厚质弹性防腐涂料（水性）用毛刷或滚刷在表面上进行滚涂或滚刷，进行多遍薄涂（2遍以上），每遍涂刷互相垂直，待完全干透后再涂刷下一遍，涂膜厚度为0.6~0.8mm，涂刷完成后自然养护即可。

材料用量：0.8mm厚不小于2~3kg/m²，1mm厚不小于2.5~3kg/m²（以实际使用量为准）。

2.2.4 涂层养护和质量检查

涂层养护：涂层宜在通风干燥环境下自然养护，养护温度不应低于5℃，养护时间不宜少于7d；养护期间应避免外力破坏、雨淋和阳光曝晒；当空气相对湿度大于90%时，宜采取强制通风措施或降低湿度。

质量检查：质量检验应在养护期结束后进行；外观应连续平整、颜色均匀，无针孔、缩孔、气泡、开裂和剥落等缺陷；涂层的层数和厚度应符合设计规定，最小厚度应不小于设计厚度的80%；涂层干膜厚度的检测应按现行国家标准GB/T 13452进行。

3 结 语

昌马灌区地处洪积扇扇缘，地下水经洪积扇到达灌区后，造成土壤中含有大量SO₄²⁻、Cl⁻，对混凝土和混凝土中的钢筋造成了严重腐蚀。该技术的研究与应用，解决了混凝土渠道和钢筋混凝土渠道内外质量受SO₄²⁻、Cl⁻破坏的问题，大幅提升了工程质量和使用年限。该技术已在甘肃省昌马大型灌区改造项目中得到应用，可供其他类似灌区推广借鉴。▲

参考文献

- [1] 吴学广. 双塔水库调整汛限水位的可能性探讨[J]. 中国水能及电气化, 2018(4): 46-49.
- [2] 尚伯忠, 李文娟. 灰色优势分析在沥青混凝土面板防渗层性能研究中的应用[J]. 中国水能及电气化, 2014(11): 52-56.
- [3] 王亚伟. 水丰水电站坝址趾板建基面的处理分析[J]. 中国水能及电气化, 2016(4): 12-15.
- [4] 孙永清, 杨新明, 朱海东. 岩溶地区拱坝建基岩体质量检测技术应用[J]. 红水河, 2021, 40(5): 80-86.
- [5] 张一林, 侯兴民, 孙蒙. 利用振动法定量评价工程岩体的完整性[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(35): 14425-14430.
- [6] 陈玺, 马光明. 基于压水试验及声波检测的固结灌浆效果分析[J]. 水利规划与设计, 2020(5): 131-134.
- [7] 王宪志. 蒙自市蚂蚌冲水库坝基声波测试成果分析[J]. 水利建设与管理, 2014, 34(2): 67-70.
- [8] 何帮静. 保丰水库坝基岩体完整性跨孔声波测试分析[J]. 中国水能及电气化, 2021(4): 51-54, 67.
- [9] 徐建闽, 王昊, 王祖国, 等. 坝基岩体质量分级影响因素及分级标准[J]. 水利水电技术, 2017, 48(10): 87-92.

（上接第54页）

花坝水库坝基开挖岩体质量超声波检测分析

辛维东¹ 孟祥利² 白 恺³

(1. 德州市水文中心, 山东 德州 253016;

2. 德州市水利局, 山东 德州 253000;

3. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

【摘 要】 岩体完整性是坝基岩体质量评价、坝基处理及大坝枢纽布置的重要参考指标。为准确探明沥青混凝土心墙坝坝基开挖后岩体内部裂隙发育状况, 文章采用单孔声波法测试岩块纵波波速, 并结合实验室声波测试数据, 求得待测岩体完整性系数。分析成果表明: 坝基岩体为“较破碎”至“较完整”, 左岸坝肩局部岩体裂隙发育, 较破碎, 需采取固结灌浆、帷幕灌浆等措施进行处理, 以增强地基承载力和改善基岩抗渗能力。单孔声波检测能准确反映基岩复杂结构面的声波传输规律, 可指导工程设计优化和实践施工建设。

【关键词】 单孔声波法; 纵波波速; 岩体质量; 完整性系数

中图分类号: TV62

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-050-05

Ultrasonic Detection and Analysis of Rock Mass Quality during Excavation of Huaba Reservoir Dam Foundation

ZAI Weidong¹, MENG Xiangli², BAI Kai³

(1. Dezhou Hydrology Center, Dezhou 253016, China;

2. Dezhou Water Conservancy Bureau, Dezhou 253000, China;

3. Water Resources and Hydropower College of Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Rock mass integrity is an important reference index for dam foundation rock mass quality evaluation, dam foundation treatment and dam junction layout. The single-hole acoustic wave method is used for measuring the longitudinal wave velocity of rock mass in the paper in order to accurately explore the rock mass internal fracture development condition after the foundation excavation of asphalt concrete core dam. The integrity coefficient of to-be-tested rock mass is obtained by combining with the acoustic test data in laboratory. The analysis results show that the rock mass of the dam foundation is “relatively broken” to “relatively complete”, and the local rock mass fissures of the left bank abutment are developed and relatively broken. Consolidation grouting, curtain grouting and other measures should be taken for treatment so as to enhance the bearing capacity of the foundation and improve the impermeability of the bedrock. The single hole acoustic detection can be used for accurately reflecting the acoustic transmission law of complex structural plane in the bedrock, thereby guiding the optimization of engineering design and practical construction.

Key words: single hole acoustic wave method; longitudinal wave velocity; rock mass quality; integrity coefficient

1 概述

岩体是在长期的内力和外力作用下形成的复杂构造、形态和组成的地质体。坝基岩体在开挖、爆破和施工扰动等作用下,原有赋存的平衡条件会发生相应变化,地应力释放及重新分配,会引起岩体性状和物理力学特征改变甚至会造成岩体破坏^[1]。坝基岩体风化及施工扰动产生的破坏和分布具有相当不确定性,为降低其对大坝基础工程施工的风险,确保坝基施工质量,急需一种全面、准确的定性探测评估方法。声波检测是弹性波测试中的一种,其通过观测声波在基础岩体中传播的波速、频幅等声学指标,掌握岩体宏观缺陷、组织结构和力学性质,进而准确评估岩体的风化程度和完整性^[2,3]。本文采用单孔声波检测技术来定性评估坝基岩体质量,以便为方案优化、坝基处理和施工实践提供翔实的数据支撑,确保工程高效优质地施工建设。

2 坝基质量单孔声波检测原理

近年来,岩体质量声波测试技术广泛应用在水利、水电、隧洞等工程领域,其通过测试声波在不同岩体中传播的波速、频幅来真实反映岩体内部的层次结构与力学性能,进而实现对岩体质量和完整性的定性评价^[4]。《水利水电工程物探规程》(SL 326—2005)、《水电水利工程物探规程》(DL/T 5010—2005)、《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)等均对岩体声波测试给出了明确的技术规定和操作指导,即:测试钻孔中发射声波能量较小且作用时间较短,岩体基本不会发生塑性变形,近似为弹性介质。根据弹性波原理,纵波波速与岩体的岩性、层次结构、风化裂隙和力学特性等指标均有关,其函数表达为^[5]

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_d(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (1)$$

式中 V_p ——岩体声波测试的纵波波速;

G ——切变模量;

E_d ——杨氏纵向弹性模量;

μ ——泊松比;

λ ——拉梅弹性模量;

ρ ——波速传输中岩体密度。

纵波波速是评价岩体质量优劣的重要指标,通过测试钻孔纵波波速即可定性评估岩体质量和完整性^[6]。单孔声波检测利用岩体测试钻孔“一发双收”换能器完成,即钻孔外主机控制发射换能器 T 发射超声波信号,经耦合剂(通常为水)沿孔壁纵向传输,分别经过 t_1 和 t_2 时间由距离 L_1 和 L_2 两处的接收换能器 R_1 和 R_2 接收,利用距离和时间差就能计算出岩体纵波波速^[2],其工作原理见图 1。

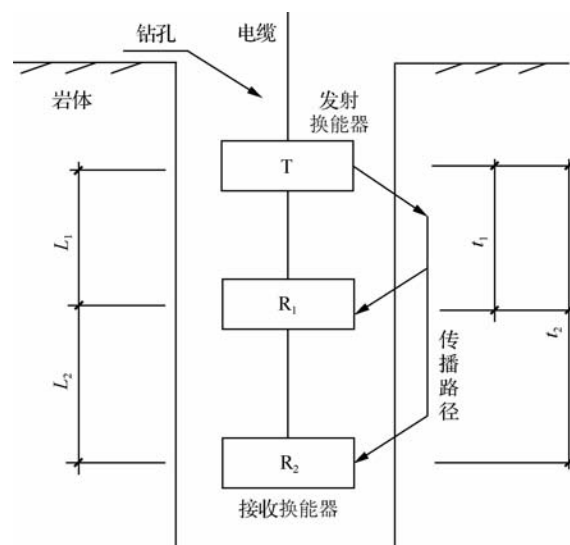


图 1 单孔声波测试工作原理

将现场钻孔测试获得的纵波波速及数据进行记录,经控制器内部模块运算,即可获得钻孔不同测段的纵波波速平均值,然后结合规范定性指标即可判定岩体质量和完整性。岩体钻孔测段纵波波速 ΔV_p 计算公式为

$$\Delta V_p = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

3 岩体单孔声波测试实例分析

3.1 工程概况

花坝水库是一座以防洪、灌溉为主的 IV 等小(1)型水库,总库容 738 万 m^3 。大坝为沥青混凝土

心墙坝,最大坝高 53.6m。水库坝址区两岸以陡峻坡地形为主,岸坡地形顺河流发育,地形综合坡度 50°。坝址河床及岸坡基岩多裸露,为单斜岩层,岩层产状为缓倾上游偏左岸,为对称性较好“V”形横向河谷结构。坝基基岩主要坐落于中厚层岩屑石英砂岩,两坝肩中厚层石英砂岩、粉砂岩、泥岩各层相间分布。为探明坝基岩体质量,采用单孔声波检测技术来定性评估坝基岩体质量及完整性,以期为后期坝基处理及施工组织提供翔实的数据支撑。

3.2 钻孔布置及测试参数

根据《水利水电工程物探规程》(SL 326—2005)测试要求,结合水库沥青混凝土心墙坝平面布置及坝基物探数据,在大坝迎水面 C20 混凝土趾墙与坝基交接部位,共布置 6 个部位 18 个岩体质量检测钻孔,孔深 5m。沥青混凝土心墙坝单孔声波检测钻孔布置见图 2。

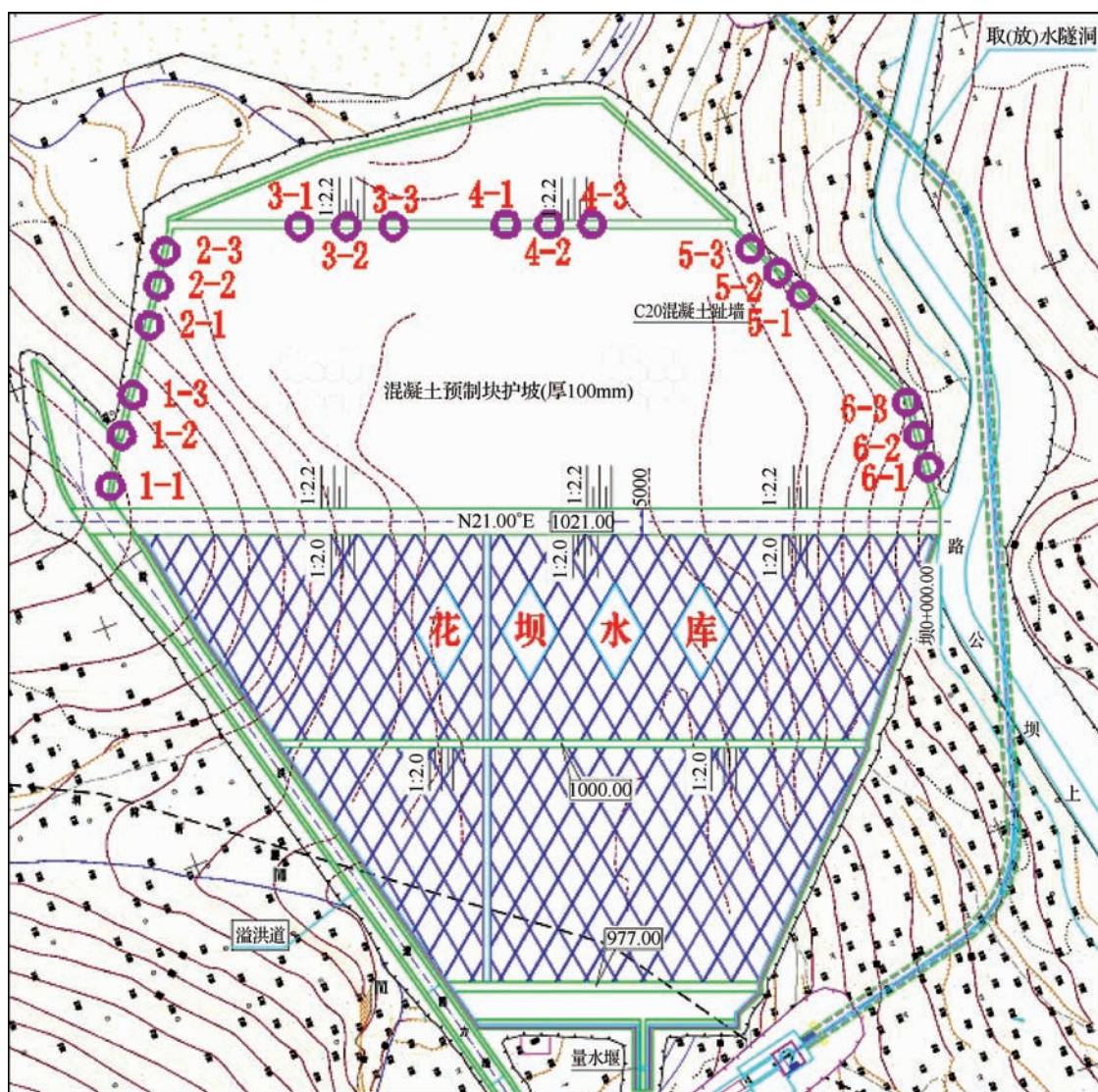


图2 单孔声波检测钻孔布置

为获得准确的岩体声波测试数据,采用 ZBL-U520A 非金属超声检测仪进行岩体纵波波速测试,以

评估坝基岩体的完整性和风化程度。ZBL-U520A 测试系统可以实现单、双通道自动连续快速采集, 通道数

为“1 发射 + 2 接收 + 1 外触发”，最小采集间隔为 0.05μs，最大采集长度为 1024 点。检测工作开始前，首先用清水清洗钻孔，再在钻孔内加入耦合剂水，最后将“一发两收”三个超声换能器分别连接到主机通道上，R₁ 和 R₂ 接收换能器距离发射换能器 T 间的初始距离设置为 0.4m 和 0.6m，并完成测试系统的调零操作。从孔底向孔口逐段测试，点距为 20cm。电缆深度标识清晰，严格按每 10 点校调一次，确保测试数据准确可靠。

3.3 检测结果及分析

基于实测纵波波速求得的完整性系数 k_v 又称裂隙系数，是评价坝基岩体完整程度的重要指标^[8]，其具体函数表达为

$$k_v = \left(\frac{V_p}{V_{pr}} \right)^2 \tag{3}$$

式中 V_p ——待测岩体现场实测的纵波波速，km/s；
 V_{pr} ——新鲜完整岩块室内测试的标准纵波波速，km/s。

《水利水电工程物探规程》（SL 326—2005）规范中，将岩体完整性系数划分为完整、较完整、完整性差、较破碎、破碎五大类，具体系数指标见表 1^[9-10]。

表 1 岩体完整性系数指标

内 容	岩体完整性指数 k_v				
	$k_v > 0.75$	$0.75 \geq k_v$	$0.55 \geq k_v$	$0.35 \geq k_v$	$k_v \leq 0.15$
岩体完整程度	完整	> 0.55 较完整	> 0.35 完整性差	> 0.15 较破碎	破碎

水库坝基开挖后，选取岩块样本进行室内声波测试，各测试岩块均为新鲜无卸荷完整岩体，累计完成 23 组（主频为 25kHz）。实验室测试结果表明，测试岩块声波波速范围为 4.896 ~ 5.132km/s，综合分析确定岩体声波标准值 $V_{pr} = 4.95\text{km/s}$ 。

采用 ZBL-U520A 非金属超声检测仪，对 6 个部位 18 个钻孔逐一进行现场测试，并结合实验室岩体声波标准值 V_{pr} ，按式（3）和表 1 进行计算和评估，获得坝基岩体质量检测及评价成果（见表 2）。

表 2 坝基岩体质量及完整性声波检测分析成果

钻孔编号	测试深度/m	单孔声波现场实测值 $V_p / (\text{km/s})$		声波实验室标准值 $V_{pr} / (\text{km/s})$	完整性系数 K_v	岩体完整程度
		范 围	均 值			
1-1 号	0.4 ~ 4.6	2.16 ~ 3.76	1.83	4.95	0.37	完整性差
1-2 号	0.4 ~ 4.6	1.95 ~ 3.81	2.13	4.95	0.43	完整性差
1-3 号	0.4 ~ 4.6	1.96 ~ 3.56	1.93	4.95	0.39	完整性差
2-1 号	0.4 ~ 4.6	2.23 ~ 4.15	2.08	4.95	0.42	完整性差
2-2 号	0.4 ~ 4.6	2.38 ~ 4.20	2.43	4.95	0.49	完整性差
2-3 号	0.4 ~ 4.6	2.19 ~ 4.05	1.93	4.95	0.39	完整性差
3-1 号	0.4 ~ 4.8	2.57 ~ 4.33	3.02	4.95	0.61	较完整
3-2 号	0.4 ~ 4.8	2.61 ~ 4.27	3.12	4.95	0.63	较完整
3-3 号	0.4 ~ 4.8	2.71 ~ 4.19	2.92	4.95	0.59	较完整
4-1 号	0.4 ~ 4.8	2.35 ~ 4.32	3.22	4.95	0.65	较完整
4-2 号	0.4 ~ 4.8	2.41 ~ 4.27	3.37	4.95	0.68	较完整
4-3 号	0.4 ~ 4.8	2.39 ~ 4.36	3.02	4.95	0.61	较完整
5-1 号	0.4 ~ 4.6	2.28 ~ 4.16	2.28	4.95	0.46	完整性差
5-2 号	0.4 ~ 4.6	2.32 ~ 4.07	1.93	4.95	0.39	完整性差
5-3 号	0.4 ~ 4.8	2.47 ~ 3.98	2.13	4.95	0.43	完整性差
6-1 号	0.4 ~ 4.8	2.05 ~ 3.62	1.34	4.95	0.27	较破碎
6-2 号	0.4 ~ 4.6	1.98 ~ 3.57	1.53	4.95	0.31	较破碎
6-3 号	0.4 ~ 4.8	1.85 ~ 3.72	1.4355	4.95	0.29	较破碎

由表 2 可知, 每个部位 3 个钻孔的现场实测数据均相近, 限于文章篇幅, 每个部位选取 1 个典型钻孔

共 6 个钻孔来分析岩体声波波速传播规律。钻孔声波波速 V_p 随测试深度 H 间的关系见图 3。

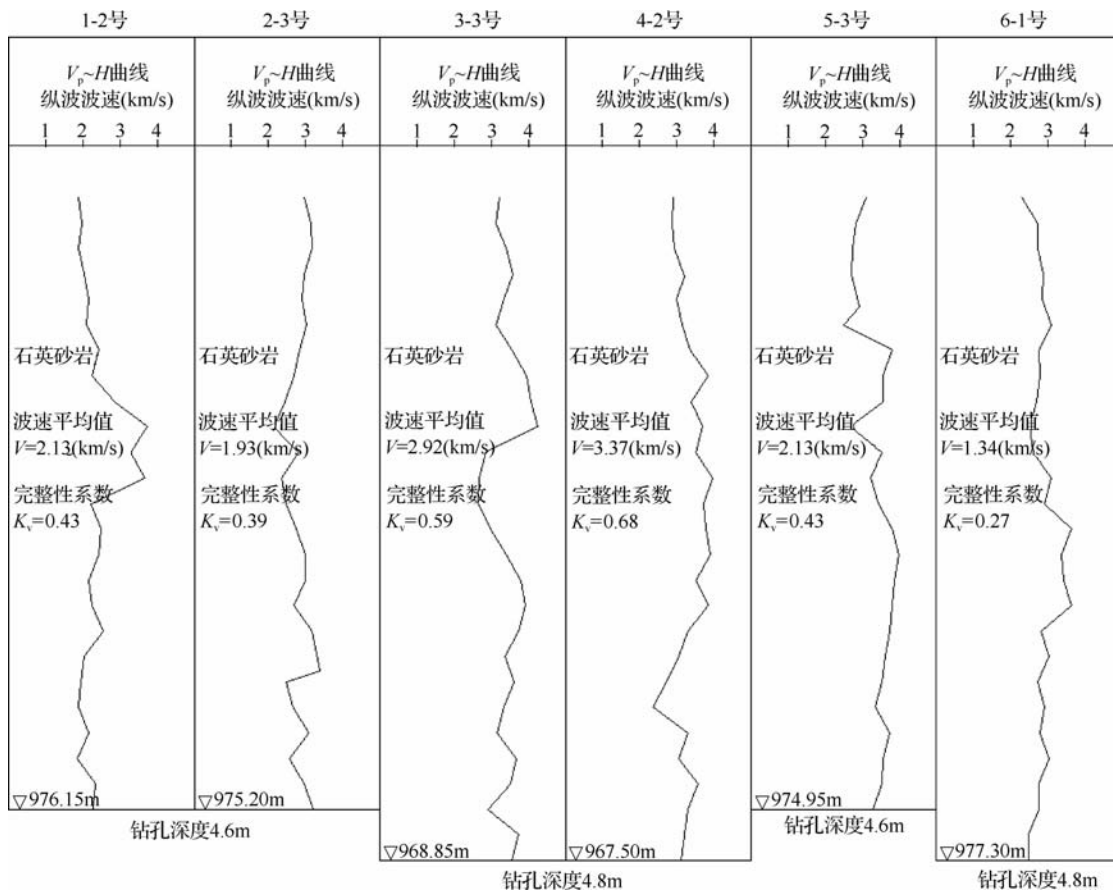


图 3 声波波速与孔深关系曲线

由表 2 和图 3 可知, 大坝迎水面 C20 混凝土趾墙与坝基交接部位岩体整体完整性为“较破碎”“完整性差”和“较完整”三大类, 岩体岩性为“较破碎”至“较完整”, 波速最大值为 4.36km/s , 最小值为 1.85km/s , 整体呈现随钻孔深度增加波速增大。左岸靠近坝肩位置 (6-1 ~ 6-3 号钻孔) 岩体完整性评价为“较破碎”, 需采取固结灌浆、帷幕灌浆等措施进行处理, 以增强地基承载力和改善基岩抗渗能力。

4 结 论

花坝水库坝基 C20 混凝土趾墙带附近岩体产状变化较大, 采用单孔声波检测技术测量岩体的纵波波速。测试成果表明: 坝基岩体完整性系数最低为 0.27, 最高为 0.65, 为“较破碎”至“较完整”, 除

局部裂隙发育外, 基岩质量整体较好。

坝基开挖后, 对左岸坝肩“较破碎”裂隙发育破碎岩体应及时清除, 并采取固结灌浆、帷幕灌浆等措施进行加固和防渗处理, 确保坝基乃至整个大坝具有较高建设质量; 单孔声波检测能准确反映钻孔纵向岩体波速分布规律, 其检测成果可为大坝坝基岩体质量及完整性评价提供翔实数据支撑, 确保工程高效优质的施工建设。▲

参考文献

- [1] 魏树满, 刘栋臣, 王志豪, 等. 龙口水利枢纽基础岩体检测研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(12): 99-100.
- [2] 许强. 岩体弹性波测试中超声波与地震波速度差异研究[J]. 水利规划与设计, 2018, 176(6): 110-112, 123.

(下转第 49 页)

经验交流

塔里木河荒漠化地区水化学特性及其
对胡杨林生长的影响

王梦如

(塔里木河流域干流管理局, 新疆 库尔勒 841000)

【摘要】 干旱荒漠地区, 水是绿洲生态系统发展和稳定的根本, 决定了干旱区的生态演化方向。文章以塔里木河流域中的胡杨林保护区为研究对象, 通过实地调研、采样分析研究的方式, 对比分析了塔里木河水质条件及其与胡杨生长之间的联系, 研究荒漠化水质条件下, 胡杨林的生长发育情况, 为拯救胡杨林提供了相应的科学依据。研究结果显示: 区域内的地下水比地表水有着更高的盐分, 难以支撑胡杨幼苗的发育, 胡杨林仅在河道周边位置才能实现更新迭代, 而在该过程中制约其发展的因素里最为重要的是地下水盐碱度。

【关键词】 水化学特性; 胡杨林; 塔里木河; 荒漠化

中图分类号: S792.11

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-055-04

Hydrochemical Characteristics and Its Effect on the Growth of *Populus Euphratica* in Desertification Area of Tarim River

WANG Mengru

(Tarim River Basin Mainstream Management Bureau, Korla 841000, China)

Abstract: Water is the basis for the development and stability of oasis ecosystem in the arid desert areas. It determines the ecological evolution direction of the arid areas. The *populus euphratica* forest reserve in the Tarim River Basin is adopted as the research object in the paper. The relationship between Tarim river water quality condition and *populus euphratica* growth is comparatively analyzed through field investigation and sampling analysis study. The growth and development situation of *populus euphratica* forest under desertification water quality condition is studied, thereby providing corresponding scientific basis for saving *populus euphratica* forest. The research results show that the groundwater in the region had higher salinity than the surface water, so it is difficult to support the development of *populus euphratica* seedlings. The *populus euphratica* forest can be regenerated and iterated around river channels only, and the most important factor restricting their development in the process is the salinity of groundwater.

Key words: hydrochemical properties; *populus euphratica* forest; Tarim River; desertification

1 概 述

在干旱荒漠地区,水是绿洲生态系统发展和稳定的根本,决定了干旱区的生态演化方向。胡杨是绿洲生态中的代表性植物,而水的质量和数量则共同制约了胡杨的发展^[1]。塔里木河中游段有胡杨林分布,但严峻的环境导致胡杨自然保护区内的胡杨林种群维持日趋困难。

河岸边防护堤的修筑对胡杨个体生长有着较大的影响,其在一定程度上使得胡杨群落在堤外的分布数量有所减少,在胡杨林中数量众多的是中老龄个体,种群结构呈衰退型。从2015年的胡杨林保护区统计数据可知,相比2006年,林地减少了约9.85%,疏林地减少了约13.66%,灌木林减少了约15.04%,保护并恢复胡杨林迫在眉睫。天然植被受环境影响较大,不同流域或不同区段下,环境对绿洲植被的影响也不一致^[2]。现多对胡杨林的生长发育与水文条件的联系进行研究,但对其与水质的联系却研究较少。本文以此为切入点,分析荒漠化区域胡杨林在不同水质条件下的生长规律。

2 研究概况

以塔里木河中游段轮台县英巴扎到尉犁县恰拉断为研究区域,该区域内存在绿洲和沙漠相互交错的现象,生态环境极为脆弱。在塔里木河汛期,通过布设样地、植被调查以及试验分析的方法研究胡杨林保护区在不同生态环境时,地表水以及潜水的化学特征。以塔里木河中游南岸作为样品地,并将其编号为Z1、Z2、Z3,在汛期内样品地点可被河水淹没,为地表水的采集提供了便利。样品地中水域面积最大的是Z3,水域面积最小的是Z1。为便于对照,在干流尉犁大桥下设置了Z4样品地。

各样品地胡杨林生长发育情况不同,Z1样品地的胡杨仅有7m左右的高度,生长逐渐减弱,且有小部分已经死亡;Z2样品地的胡杨有着较好的生长态势,与草本植物等种群共同形成稳定结构的群落;Z3

样品地的胡杨处于旺盛的生长态势,有着稳定增长的种群。

在所选的三个样品地中对地表水样进行收集,采用GPS定位系统对样品地的经纬度以及高度等信息进行记录,挖掘Z2样品地至潜水出露,以取得所需样品,在W4处取河水样品。为使结果更加精确,以每水体3份的方式开展水质检测,结果以其平均值为准。化学指标检测方法见表1。

表1 化学指标及试验方法

化 学 指 标	试 验 方 法
pH 值	酸度计法
溶解性总固体	质量法
总碱度、碳酸根离子、重碳酸根离子	双指示剂滴定法
硫酸盐	EDTA 二钠容量法
氯化物	硝酸银容量法
游离二氧化碳	中和法
钙离子、镁离子、总碱度	EDTA 二钠络合滴定法

3 研究成果分析

3.1 塔里木河中游水化学特性

化学分析结果(见表2)表明,各样品地地表水均有着较高的总硬度,在15~30度时为硬水,在30度以上时则为极硬水(见图1、图2)。Z2样品地采样点潜水样则有着170度的硬度,Z4样品地采样点则仅有17度的硬度。

表2 各样品地水质分析结果

项 目	Z1	Z2		Z3	Z4
水体类型	地表水	地表水	潜水	地表水	地表干流
pH 值	7.61	7.81	7.31	7.41	7.81
总硬度/(mg/L)	369.0	325.2	3034.2	769.4	300.2
总碱度/(mg/L)	165.1	142.5	665.6	290.2	115.0
溶解性总固体/(mg/L)	751.1	838.1	14476.2	1037.4	615.2
氯化物/(mg/L)	252.1	216.0	3452.1	486.2	204.0
钙/(mg/L)	77.6	67.5	438.3	132.7	70.0
镁/(mg/L)	42.4	38.1	471.1	106.3	30.3
氨氮/(mg/L)	0.19	0	0	0.44	0

续表

项 目	Z1	Z2		Z3	Z4
重碳酸根/(mg/L)	201.3	173.8	799.3	353.8	140.2
碳酸根/(mg/L)	0	0	0	0	0
游离二氧化碳/(mg/L)	16.4	6.5	69.2	27.4	4.3

区域内的河水在丰水期内仍为淡水或微咸水。在大桥下有着 615.2mg/L 的 TDS。Z2 样品点地表水有 287mg/L 的矿化度；Z2 样品点的潜水出现在 64cm 位置，其有着 14476.2mg/L 的矿化度，为盐水。Z3 样品点有着 1037.4mg/L 的 TDS，属微咸水，相比于地表水干流，其 TDS 高出约 68.5%。

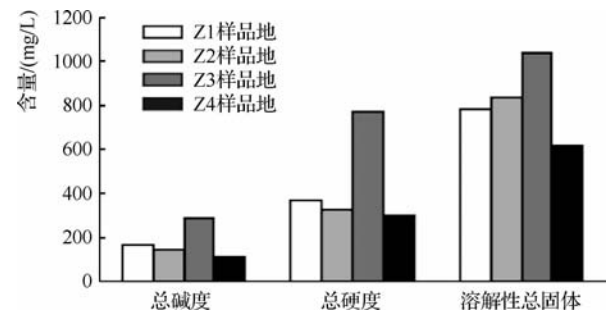


图1 各样品地水化学特性对比

地表水和潜水样品约有着 7.31 ~ 7.81 的 pH 值，大桥下的地表干流有着 7.81 的最高 pH 值，Z2 样品点则有着 7.31 的最低 pH 值。各样品地约有着 100 ~ 300mg/L 的总碱度，干流水样有着 115.1mg/L 的最低总碱度。

Z2 样品地的潜水主要由地表水的下渗补给，潜水的的水质比起地表水的水质，约有 17.2 倍的 TDS、9.2 倍的总硬度以及 4.6 倍的总碱度。

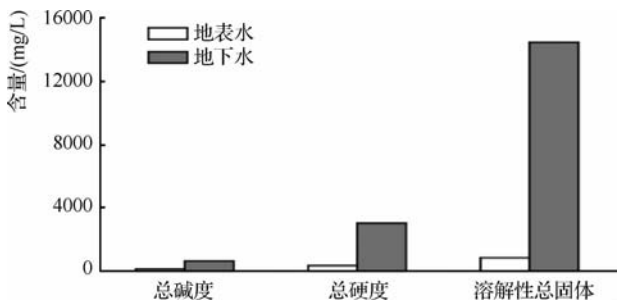


图2 相同区域地表水与潜水水质对比

在胡杨林保护区内的地表水有着 204 ~ 486mg/L 的硫酸盐含量以及 70.8 ~ 239.8mg/L 的氯化物含量，桥下干流氯化物以及硫酸盐有着 132mg/L 和 204mg/L 的含量，均在水质卫生规范 250mg/L 以下。Z3 样品点硫酸盐有着 486.2mg/L 的含量，为苦咸水^[3-4]。Z1 和 Z3 样品点的氨氮有着 16.4mg/L 的含量，远在 0.15mg/L 以上，游离的二氧化碳同样有着 27.4mg/L 的高含量。

3.2 塔里木河中游胡杨林生长状况

从 9 月开始荒漠河岸的胡杨林步入落叶期，旱生以及盐生植物成为植被的主要组成部分。胡杨林群落的生长环境按照植被的覆盖程度等可以划分为荒漠化区域、过渡带区域和河岸辐射区域。现场调查发现，保护区内的胡杨和灰胡杨种群仅有较少的幼龄个体，新生资源较少，种群结构呈现出倒金字塔形^[5]。

Z1 样品点处于南岸阶地，为过渡带，地表盐结晶较多，在季节性洪水的影响下其存在短时间的淹没期；怪柳是众多植被中的优势种，胡杨在该区域内分布较为稀疏。Z2 样品点在河岸边，汛期内水量较大，胡杨多处于中龄期，有着较为稳定的结构^[6]。Z3 样品地处于河漫滩位置，胡杨林有着成片的分布，较易出现更新演替，幼树一般有着 10 年以内的树龄，在 100m² 内约有 30 株左右，幼树分化已经开始，存在较多凋亡现象，伴生种类以怪柳幼株为主。

3.3 水化学特征对胡杨生长的影响

该流域中，地下水的 TDS 比起地表水有更高数值，其原因主要在于修建了中游堤防之后，导致沿河的地下水淡化带出现一定程度的萎缩，使离子含量有所上升，此外，汛期不断抬升的地下水水位，导致水流排水不及时，同时，在漫溢河水下渗时土壤上层盐类也随之下渗到地下水中。在人为和自然因素的影响之下，该区域内的地表水不断恶化，一方面出现不断融化的地表积盐，另一方面因为种植经济类作物，不断汇入的农田排水对其造成一定影响。

在塔里木河中游段，因洪水期输水堤坝的引水作

用,对两侧河岸的胡杨林进行漫灌,使得该区域水域面积有所扩大,河岸两侧的地下水淡化带在季节性洪水冲刷作用下不会出现过分萎缩,使两岸所修建的堤坝导致的生态负效应得到减缓,确保现有胡杨林生长得到维持。但这种作用的影响范围有限,仅能保证靠近河道的小区域的胡杨林幼苗生长需要。因不断恶化的地下水化学性质,导致该区域内的胡杨林缺乏自然更新演替的条件,因此该区域内现存的多为老龄胡杨。此外,胡杨幼苗的生长受到塔里木河气候条件的抑制,上游水土资源的高强度开发降低了中游来水量,过度开荒等人为因素带来了不良后果,加之土壤盐碱化,导致胡杨林种群出现衰退。

4 结 语

综上所述,为使塔里木河土壤环境有所改善,以提供给胡杨林一个良好的生长环境,首要措施是先进行排盐,此外培肥、保水以及退耕措施也需要同步跟上,以最大程度促进胡杨林更新复壮。

a. 塔里木河地下水主要通过汛期河水漫溢下渗进行补充,因此地表水与地下水水力联系较密切。通过本次研究可知,在塔里木河流域中,中游沿岸地下水 TDS 值较大,主要是因为堤防修建后,河岸淡化带地下水萎缩,离子含量增大,而地下水在汛期内持续上升,难以进行排水,在河水漫溢下渗时土壤盐类也随之流入地下水。

b. 洪水期中游段水域面积有所增加,河岸地下水淡化带得到有效补充,使生态负效应有所缓解,维持住了现有的胡杨林。但该种作用的影响范围有限,

仅河道周围地带可以保证胡杨幼苗生长。地下水化学性质对生物进行自然淘汰,故区内更新较慢,多为耐盐性强的中老龄胡杨及灌木。胡杨幼苗受当地气候的影响生长发育受到抑制;中游来水量因上游高强度开发而有所减少;土壤的盐碱化、种群间的内部竞争等都会对胡杨种群造成一定的影响,导致其有所衰退。

c. 洪水期增加了塔里木河中游水域面积,使胡杨林的生长发育得以维持,但地表水的矿化度和总硬度在漫溢的地下水作用下不断提高,此外,地下水盐分因农田排水不断增加,使其难以提供给胡杨幼苗所需的营养。

d. 旱生和盐生植物是区内植被的重要组成部分,胡杨幼龄个体较少,种群表现为衰退型,仅在河道周边适宜胡杨幼苗的生长。▲

参考文献

- [1] 王庆杰,李国东,刘晓曼,等.塔里木河流域胡杨生长模型研究[J].林业资源管理,2020(5):100-107.
- [2] 史军辉,刘茂秀,王新英,等.塔里木河胡杨林生长过程土壤层碳氮磷化学计量变化特征及其与叶含量的相关性[J].新疆农业科学,2019,56(10):1879-1887.
- [3] 苟晓霞.塔里木河干流胡杨径向生长对温度和地表径流变化响应研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2019.
- [4] 苟晓霞,叶茂,汪亮亮,等.塔里木河干流胡杨径向生长对地表径流变化的响应[J].植物学报,2018,53(6):801-811.
- [5] 苟晓霞,叶茂,汪亮亮,等.塔里木河上游河岸胡杨径向生长对温度的敏感性[J].干旱区研究,2018,35(4):899-904.
- [6] 钟家骅.塔里木河流域植被生态变化研究[D].西安:长安大学,2018.

田头寨水库大坝坝基地质条件探查 及其防渗处理

赵 静¹ 郑培溪²

(1. 新疆兵团勘测设计院(集团)有限责任公司云南分院, 云南 昆明 650217;

2. 云南鲁布革顾问有限公司, 云南 昆明 650051)

【摘要】 地勘单一物探方法存在诸多专业缺陷, 文章综合采用高密度电法、声波测试及钻孔全景图像测试, 结合钻孔岩芯、压注水试验成果分析, 基本查清了田头寨水库大坝坝基覆盖层厚约 1~13m, 下伏基岩为侏罗系中统统房街组(J_{2s})砾岩与含砾粉砂质泥岩、泥质粉砂岩互层, 局部有轻微溶蚀, 以溶坑、溶孔为主, 连通性差; 岩体透水率随深度增加而减小; 左坝肩存在挤压破碎带, 宽度、深度有限; 坝基具备防渗处理条件。据此, 设计采用坝基帷幕灌浆加心墙截水槽部位固结灌浆的处理方案, 较合理地解决了坝基防渗问题。相应勘察设计可供类似工程参考。

【关键词】 田头寨水库; 坝基; 探查; 防渗处理

中图分类号: TV64

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-059-06

Exploration of Geological Condition of Dam Foundation in Tiantouzhai Reservoir and Anti-seepage Treatment Thereof

ZHAO Jing¹, ZHENG Peixi²

(1. Yunnan Branch of XPCC Surveying and Designing Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. Yunnan Lubuge Consulting Co., Ltd., Kunming 650051, China)

Abstract: There are many professional defects in the single geophysical exploration method of geological exploration. The high-density electrical method, acoustic wave test and borehole panoramic image test are comprehensively adopted in the paper. The results of borehole core and pressure water injection test are combined for analysis. It is basically discovered that the overburden layer of the dam foundation in Tiantouzhai Reservoir is about 1-13m thick. The underlying bedrock is the interbedded layer of conglomerate, pebbly silty mudstone and argillaceous siltstone of J_{2s} with slight dissolution locally. It is mainly composed of solution pits and pores with poor connectivity. The permeability of rock mass is decreased with the increase of depth. The left dam abutment has a compresso-crushed zone with limited width and depth. The dam foundation has anti-seepage treatment conditions. Therefore, the treatment scheme of dam foundation curtain grouting plus consolidation grouting at the cut-off trench of the core wall is designed to solve the seepage prevention problem of the dam foundation reasonably as a result. The corresponding survey and design can be used as reference for similar projects.

Key words: Tiantouzhai Reservoir; dam foundation; exploration; anti-seepage treatment

破碎带、喀斯特等不良地质现象对水库大坝地基防渗处理影响较大,甚至起到控制性作用^[1]。需采用多种合理、可靠勘察手段查清其发育规律、分布特征,相应制定处理措施,才能确保水库正常蓄水、安全运行。探查范围广、精度高、成本低的工程物探技术^[2-3],以及针对性的地质钻探,非常适合中小型水库勘察设计。

1 工程概况

田头寨水库位于云南省临沧市,大坝为黏土心墙坝,最大坝高 50m,坝轴线长 220m,为 IV 等小(1)型水库,总库容 232.65 万 m³。坝址区出露岩层为侏罗系中统税房街组(J_{2s})砾岩与含砾粉砂质泥岩、泥质粉砂岩互层,还发育多条挤压破碎带。综合采用高密度电法、钻孔声波测试、钻孔全景图像测试等物探方法,结合地质钻探,基本查清了覆盖层、岩性、破碎带、喀斯特等的分布范围和特征,为坝基防渗设计提供了翔实的数据支持。本文拟对其勘察设计成果进行分析和探讨,以期为类似工程提供有益的启示。

2 物探简介及本工程应用

2.1 高密度电法

2.1.1 测试原理

高密度电法是以地下介质导电性差异为基础,通过观测和研究与这些差异有关人工电场的分布规律,达到查明地层岩性分界、地质构造和寻找地下电性不

均匀体(喀斯特、风化夹层、破碎带等)的一种地球物理勘探方法。

高密度电法有多种电极排列方式,如 AMNB 温纳四极排列、ABMN 偶极排列、 ρ_s AB 联合三极排列、微分排列等^[4]。根据现场实验,田头寨水库采用稳定性较好的 AMNB 温纳装置。同时,考虑地形、地质条件和目标层埋深,选用 4m 电极距,每个排列布置电极 60 根。

2.1.2 数据处理分析

高密度电法现场所测视电阻率,经数据格式转换、数据预处理、地形校正、正演和反演计算后,得到视电阻成像色谱图,据此进行地质解释和分析。

具体步骤如下:一是将转换格式的视电阻率,经数据预处理、消除坏点(如图 1 中红色标记的 4 个点),保留较一致的数据点,并结合现场实验和与其他资料对比分析,选择正演、反演计算参数。二是将预处理后的数据经地形校正,按剖面桩号为 X 轴、层数为 Y 轴,绘成测试原始数据视电阻率成像色谱图(见图 2)。再采用最小二乘法进行正演计算,得到正演成像色谱图(见图 3)。三是进行反演计算分析,目的是由正演视电阻率观测数据,定量推断该剖面下的地电断面,确定地下岩体的真电阻率分布。反演采用最佳拟合法,给定一个初始地电断面,在该断面上计算视电阻率的理论曲线,将理论曲线与实测曲线对比(拟合),通过调整参数获得最佳拟合效果。图 4 为反演拟合所得成像色谱图。

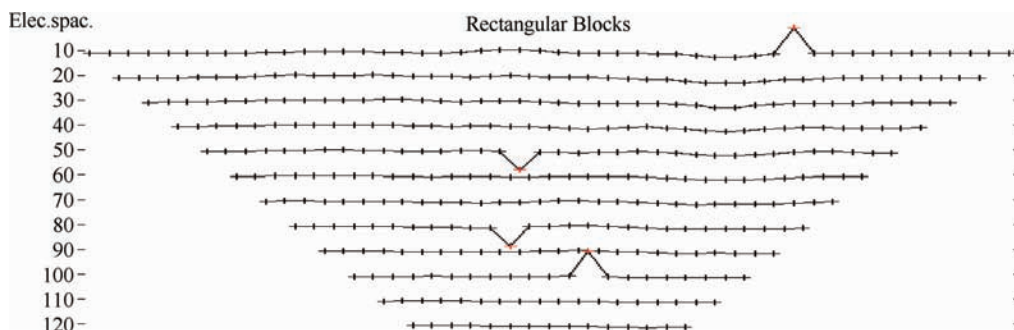


图 1 原始数据示意图

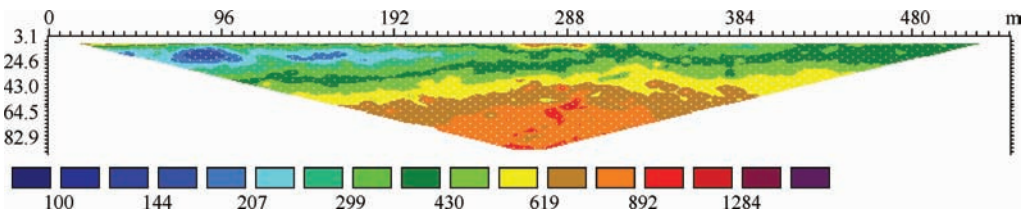


图2 原始数据色谱

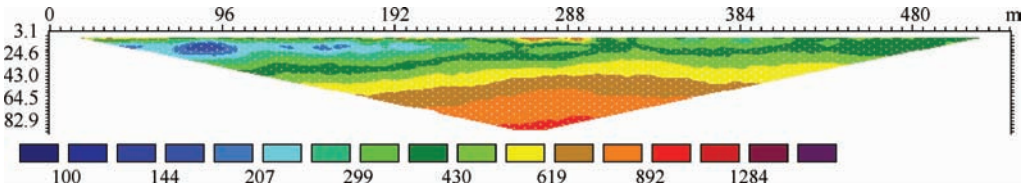


图3 正演成像色谱

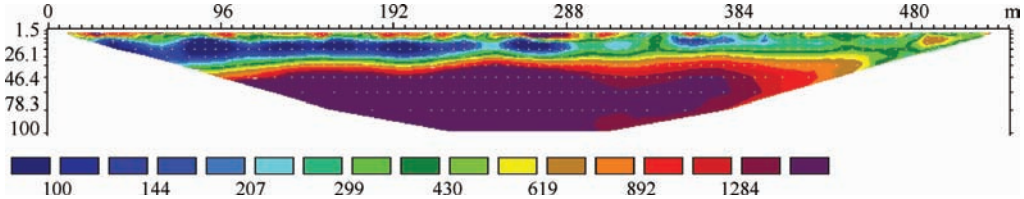


图4 反演成像色谱

2.2 钻孔声波测试法

钻孔声波测试法建立在固体介质中弹性波传播理论基础上，以人工激振方法向介质发射声波，在一定空间距离上接收被测介质的传播速度、振幅、频率等声波参数，经数据处理与分析，了解沿孔深方向岩体的质量、破碎带、喀斯特等的空间分布，是一种轻便、灵活、快捷、高效的检测方法。

2.3 钻孔全景图像测试法

钻孔电视利用井下摄像探头将孔壁图像信息经电缆传送至控制器和电脑，可实现探头全景摄像，图像清晰逼真、剖面实时自动提取、方位及深度自动准确校准，具有观测直观、定位准确、操作简单、精度高、效率高（观测提升速度最高可达 0.20m/s）、分析功能强、图像自动保存及拼接等优点，非常适合对裂隙或不连续面的埋深、倾向、倾角、宽度、粗糙度、充填物等性质的观察和分析。

2.4 物探布置简介

田头寨水库坝址区布设高密度电法剖面 11 条（顺河向 6 条，横河向 5 条，编号 WTZ1 ~ WTZ6、WTH1 ~ WTH5），合计 5642m；布设钻孔声波测试 3 孔（坝轴线左岸 ZK04、河床中部 ZK06、右岸 ZK08），合计 225.4m；布设钻孔全景图像测试 2 孔（坝轴线河床中部 ZK06、右岸 ZK08），合计 78.4m。探查范围涵盖了坝址附近区域。

3 物探成果分析

3.1 高密度电法

3.1.1 总体情况

高密度电法探测结果揭示，田头寨水库坝址区及上下游覆盖层主要为含砾粉质黏土、局部夹孤块石，电阻率为 50 ~ 250Ω·m，左、右岸坡覆盖层分别厚 7 ~ 16m、9 ~ 12m，河床覆盖层厚 1 ~ 30m。下伏基岩主要为含砾粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、砾岩，其中含

砾粉砂质泥岩、泥质粉砂岩电阻率为 $200 \sim 350 \Omega \cdot \text{m}$ ，砾岩电阻率为 $400 \sim 700 \Omega \cdot \text{m}$ 。同时，近坝左库岸存在低阻的挤压破碎带（电阻率小于 $70 \Omega \cdot \text{m}$ ），单条宽度一般 1m 左右，累计总宽度 $15 \sim 20\text{m}$ 。

3.1.2 坝址河床中部顺河向情况

WTZ4 剖面位于河床中部，与坝轴线正交，长 670m （探测成果见图 5）。由图 5 分析可知：河床中部顺河向覆盖层厚 $2 \sim 30\text{m}$ ，主要为含砾粉质黏土、局部夹孤块石。其中在剖面桩号 $0 \sim 140\text{m}$ 范围内覆盖层平均厚约 30m ，其他部位厚 $2 \sim 10\text{m}$ ，电阻率介于

$50 \sim 250 \Omega \cdot \text{m}$ 。下伏基岩在整个电阻率反演剖面图横向上呈现电阻率高低明显变化的多个分区，即存在岩性变化区域。在剖面桩号 $135 \sim 285\text{m}$ 范围内电阻率呈低值反映（ $200 \sim 350 \Omega \cdot \text{m}$ ），结合钻探及地表调查，推测该区域分布含砾粉砂质泥岩、泥质粉砂岩。在其他位置电阻率呈高值反映（ $400 \sim 700 \Omega \cdot \text{m}$ ），推测该区域分布砾岩。在剖面桩号 $505 \sim 537\text{m}$ 范围内（近坝左库岸），电阻率表现为极低值（小于 $70 \Omega \cdot \text{m}$ ），结合钻探及地表调查，推测该区域为挤压破碎带，由数条挤压带组成，宽约 $15 \sim 20\text{m}$ ，顶部埋深约 9m 。

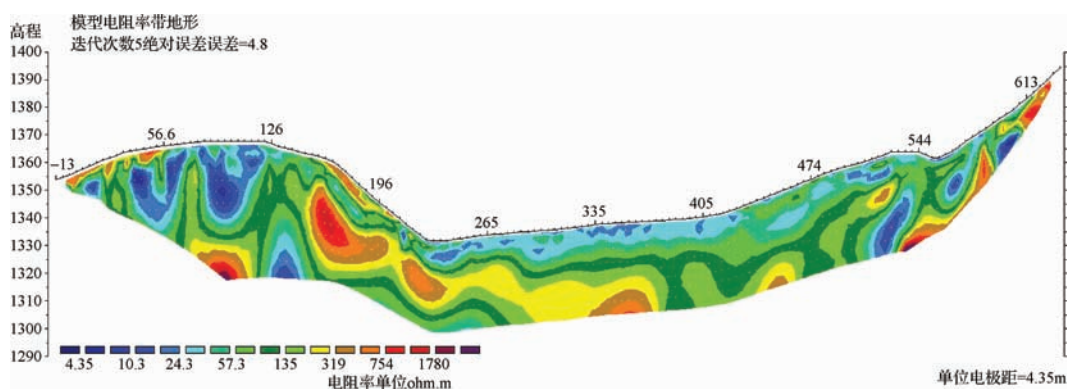


图 5 河床中部顺河向 WTZ4 剖面成果

3.1.3 坝轴线方向情况

沿坝轴线布设的 WTH5 剖面（长 540m ，成果见图 6）显示该剖面地形起伏较大，覆盖层厚 $1 \sim 13\text{m}$ ，主要为含砾粉质黏土、孤块石等，电阻率 $50 \sim 250 \Omega \cdot \text{m}$ 。下伏基岩在整个电阻率反演剖面图横向上呈现电阻率高低明显变化的分区，即存在岩性变化区域。在剖面

桩号 $90 \sim 110\text{m}$ 范围内电阻率呈低值反映（ $200 \sim 350 \Omega \cdot \text{m}$ ），结合钻探及地表调查，推测该区域为含砾粉砂质泥岩、泥质粉砂岩。在其他位置电阻率呈高值反映（ $400 \sim 700 \Omega \cdot \text{m}$ ），推测该区域分布砾岩。该剖面无破碎带的明显反映特征。

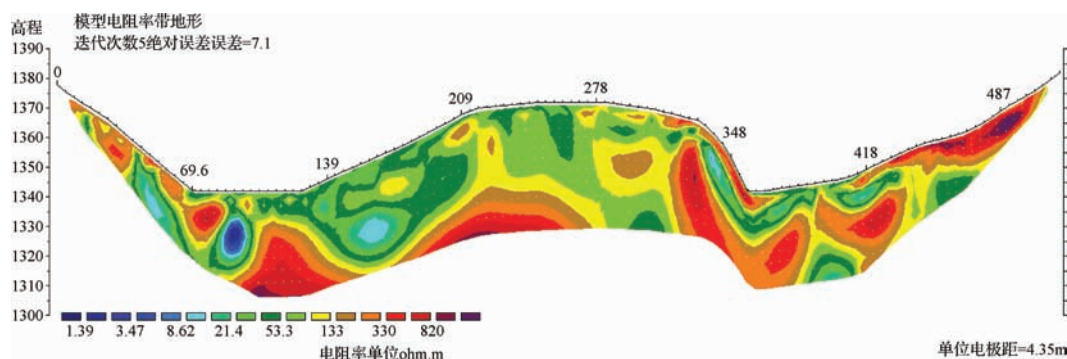


图 6 坝轴线 WTH5 剖面成果

3.2 钻孔声波测试成果

声波速度及其分布规律与地层、岩性、构造、风化卸荷等地质因素密切相关，是衡量岩体质量优劣的

重要量化指标^[5]。田头寨水库坝址处钻孔声波测试岩体完整性系数 K_v 与岩体平均波速 v_p 对应情况以及岩体完整性评价见表 1、表 2。

表 1 K_v 与 v_p 对应情况

完整程度	完 整	较 完 整	完整性差	较 破 碎	破 碎
K_v	$K_v > 0.75$	$0.75 \geq K_v > 0.55$	$0.55 \geq K_v > 0.35$	$0.35 \geq K_v > 0.15$	$K_v \leq 0.15$
$v_p/\text{m/s}$	$v_p > 3897$	$3897 \geq v_p > 3337$	$3337 \geq v_p > 2662$	$2662 \geq v_p > 1743$	$v_p \leq 1743$

表 2 坝轴线方向钻孔岩体声波测试成果

序号	钻孔编号	钻孔分段/m	$v_p/\text{m/s}$	K_v	岩体完整程度
1	ZK04	50.0 ~ 72.0	2678	0.35	较破碎
		72.0 ~ 83.8	2982	0.44	完整性差
		83.8 ~ 86.2	3710	0.68	较完整
2	ZK06	10.0 ~ 25.6	3756	0.70	较完整
		25.6 ~ 30.0	3086	0.47	完整性差
		30.0 ~ 49.6	3772	0.70	较完整
		49.6 ~ 52.2	2796	0.39	完整性差
		52.2 ~ 69.6	3880	0.74	较完整
3	ZK08	17.0 ~ 28.0	2818	0.39	完整性差
		28.0 ~ 47.2	3876	0.74	较完整
		47.2 ~ 69.6	3582	0.63	较完整


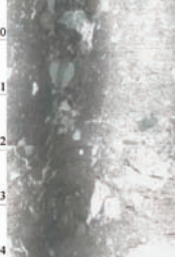


由表 1、表 2 可知：坝轴线钻孔岩体平均波速多在 2678 ~ 3880m/s 之间，随钻孔深度增加，波速均有增大趋势，岩体也从较破碎—完整性差变为较完整。另外，岩体完整程度和风化程度有一定对应关系，总体表现为：强风化岩体破碎—较破碎，弱风化岩体完整性差—较完整，微风化岩体较完整，破碎带岩体构造挤压强烈，岩体破碎。

3.3 钻孔全景图像测试成果

对坝轴线河床中部 ZK06、右岸 ZK08 钻孔进行了全景图像测试，结合钻孔岩芯加以佐证分析（典型图像见表 3）。结果表明：ZK06、ZK08 钻孔覆盖层分别厚 4m、12.4m，测试深度范围内下伏基岩均为砾岩，角砾成分多为砂岩，少量为灰岩。砾岩中未发现溶洞或其他大规模喀斯特现象，仅在灰岩成分的角砾中发现轻微喀斯特现象，多表现为很小很浅的溶坑或溶孔，直径一般 0.5 ~ 2cm，个别 2 ~ 6cm，深度一般

0.5 ~ 2cm，大多无充填，少量充填黏土夹砾石，连通性差。此外，基岩中还发育部分张裂隙，张开宽度一般 1 ~ 3cm，个别 5 ~ 8cm，延伸短，充填泥和岩屑。

表 3 钻孔声波测试与钻孔全景图像典型资料对照

钻 孔	钻孔全景图像	$v_p/\text{m/s}$	测试 结 果 描 述
ZK06		2876	深度 9.0 ~ 9.5m，波形振幅小，信号弱，初至不明显。裂隙发育，波速与上、下段差异较大，岩性为砾岩
ZK06		3902	深度 21.0 ~ 21.4m，波形振幅大，信号强，初至非常明显。岩体完整，波速较高，岩性为砾岩
ZK08		3284	深度 35.6 ~ 36.0m，波形振幅较小，信号弱，初至明显。发育长 2 ~ 5cm、深 0.5 ~ 2cm 的溶坑，声波与上、下段差异较大，岩性为砾岩
ZK08		3346	深度 40.5 ~ 40.8m，波形振幅小，信号不强，初至明显。发育 5 ~ 7cm 宽的裂隙，声波与上、下段差异较大，岩性为砾岩

4 地质钻探成果分析

区域地质调查、地质钻孔及压注水试验成果如下：. 坝址区出露基岩为侏罗系中统统房街组（ J_{2s} ）砾岩与含砾粉砂质泥岩、泥质粉砂岩互层，空间上表现为一套粗细相间的多旋回沉积地层。砾岩泥质胶结，抗风化能力弱，属较软岩，砾石呈角砾状，粒径以 1~3mm 和 2~4cm 为主，少量达 8~15cm，母岩以灰岩为主，少量为砂岩、石英岩，砾岩局部有轻微溶蚀现象，以溶坑、溶孔为主，连通性差；含砾粉砂质泥岩、泥质粉砂岩岩性软弱，遇水易软化，抗风化能力弱。

两岸坡及坡脚处第四系全新统残坡积层（ Q_4^{edl} ）为含砾粉质黏土，松散—稍密，厚 3~15m。河床部位冲洪积层（ Q_4^{pl} ）主要为含砾粉质黏土，厚 1~13m，偶见孤块石，土质呈黄褐色，松散—稍密，稍湿。



图7 挤压破碎带岩芯及挤压擦痕

5 防渗设计

物探、地质钻孔以及原位测试等较为全面客观地查明了坝地质条件，左坝肩挤压破碎带宽度和深度有限，未发现规模较大喀斯特通道，坝基防渗处理难度不大。经综合比选，设计采用帷幕灌浆防渗处理，防渗边界为正常蓄水位 1362.80m 与地下水位相交处，防渗底界为弱透水层（ $q \leq 10Lu$ ）以下 5m。具体如下：

坝址左坝肩顺河向发育多条沿大田沟—库盆—左坝肩延展的挤压破碎带，延伸长度大于 300m，单条宽度 1m 左右，深度在基岩面以下 30~60m，累计破碎带总宽度 15~20m。破碎带在含砾粉砂质泥岩部位多见挤压擦痕。总体产状为 $N5^\circ \sim 30^\circ E/NW \angle 50^\circ \sim 60^\circ$ 。岩芯多呈碎块、岩屑，局部呈泥状。透水率 q 一般 10~50Lu，为中等透水；但局部钻孔垮孔严重，无法进行压水试验，推测透水率应大于 50Lu，为中等—强透水；存在渗漏问题。

根据钻孔压水试验，坝址区岩体透水性主要受岩体风化程度、构造挤压及贯通性节理的发育程度控制，透水率 q 整体上随深度增加而减小。其中，左岸岩体 q 小于 10Lu 埋深一般在基岩面以下 25~30m，河床岩体 q 小于 10Lu 埋深在基岩面以下 15~20m，右岸岩体 q 小于 10Lu 埋深一般在基岩面以下 50~60m（见图 7）。

左岸坡坝基段：基础灌浆盖板坐落在弱风化层上部，挤压破碎带帷幕灌浆设 2 排，孔排距均为 1.5m，其余部位设 1 排，孔距 1.5m，最大灌浆深度 79m。河床坝基段：基础灌浆盖板坐落在弱风化层上部，坝基帷幕灌浆设 1 排，孔距 1.5m，最大灌浆深度 21m。右岸坡坝基段：基础灌浆盖板坐落在弱风化层上部，坝基帷幕灌浆设 1 排，孔距 1.5m，最大灌浆深度 61m。

心墙截水槽部位建基面置于弱风（下转第 70 页）

五里坡土石坝薄防渗墙组合防渗技术应用

张 琪 侯超新 赵晓天

(德州市水文中心, 山东 德州 253000)

【摘 要】 在五里坡水库土石坝薄(超薄)防渗墙方案设计时,单一防渗施工技术很难兼顾防渗厚度、防渗深度和深入坝基(肩)相对不透水层等问题。文章结合水库大坝特性,对坝体和坝基(肩)采用“振动沉模+高喷灌浆”的组合防渗体系进行除险加固防渗设计。探坑开挖揭露及试验室检测结果表明:利用两者防渗技术间的优势互补,具有较好技术可行性和经济优越性。防渗墙施工后,在大坝内形成一道连续完整且密实的防渗幕墙,防渗加固效果良好。

【关键词】 坝体渗漏;组合防渗;探坑开挖;渗透系数

中图分类号: TV223.4+2

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 02-065-04

Application of Combined Anti-seepage Technology of Thin Cutoff Wall of Wulipo Earth-rockfill Dam

ZHANG Qi, HOU Chaoxin, ZHAO Xiaotian

(Dezhou Hydrology Center, Dezhou 253000, China)

Abstract: It is difficult for the single anti-seepage construction technology to pay equal attention to the anti-seepage depth, anti-seepage thickness and relatively impermeable layer in deep dam foundation (shoulder), etc. when Wulipo Reservoir earth-rockfill dam thin (ultra-thin) cutoff wall scheme is designed. The characteristics of reservoir dams are combined in the paper. The combined anti-seepage system of “vibratory sinking mold + high sprinkler irrigation slurry” is adopted on the dam and dam foundation (shoulder) for danger-eliminating reinforcement anti-seepage design. The deep-pit excavation disclosure and laboratory testing results show that it is technically feasible and economically advantageous to use the complementary advantages of the two anti-seepage technologies. A continuous, complete and dense impervious curtain wall is formed in the dam after the construction of impervious walls. The effect of impervious reinforcement is excellent.

Key words: dam leakage; combined anti-seepage; pit excavation; permeability coefficient

除险加固是水库提高防洪标准、提升防灾减灾能力的重要工程举措。“十四五”期间,水利部计划到2025年底完成现有1.88万座小型水库除险加固任务,确保水库安全运行。渗漏是中小型水库常见的病险问题,而防渗墙是小型水库大坝除险加固整治中重要的截渗防渗手段^[2]。薄(超薄)防渗墙作为一种可靠

的垂直防渗设施,具有工程量小、造价低、防渗效果好等优点,在小型水库土石坝除险加固工程中具有非常好的应用效果。目前,水利工程中常用薄(超薄)防渗墙施工技术较多,各有其适应性和弊端,单一防渗技术很难兼顾技术、经济等多方面因素。因此,结合工程特性选择2种或多种防渗技术,通过相互间优

势互补形成与工程实际相匹配、经济实用的组合防渗体系，合理消除水库病险问题，恢复其兴利减灾效益尤为重要。

1 工程概况

五里坡水库建于 1965 年 3 月，建设中由于各种原因不间断停工 2 次，于 1972 年 2 月竣工。大坝为均质土坝，建基面高程 228.30m，最大坝高 29.80m。由于工程属于典型“三边”工程，加上建设中设计、施工、质量监管等原因，原坝基直接置于强风化岩石上，防渗深度未达到相对不透水深度，工程蓄水试运行期间就存在局部渗漏问题，虽采取局部防渗处理，但整体效果不明显，导致降低水位运行。2016 年，对大坝进行全面安全鉴定，开挖揭露大坝存在坝基面清理不彻底、坝基防渗未达相对不透水层、坝体及坝

基渗漏严重等问题，严重威胁到水库大坝的正常运行，鉴定为三类坝，急需采取合理除险加固措施，消除大坝病险隐患。

2 防渗加固技术比选

土石坝除险加固过程中，要考虑防渗技术的适应性、防渗深度和工程投资等因素，优选与工程较匹配的防渗加固技术方案，确保工程高效优质地施工建设。该水库由于大坝施工时，筑坝材料选择不佳、施工质量控制不严和工程技术标准偏低等，存在透水层渗漏严重等问题。为优选出与大坝病险现状相匹配的技术性和经济性均较优的防渗方案，根据五里坡水库大坝病险现状，结合同类型坝除险加固经验，拟定 3 种方案进行比选（见表 1）。

表 1 坝体防渗方案比选

方 案	方 案 简 介	优 点	缺 点
方案一： 振动沉模 + 高压旋喷	坝体上部 20m 内采用振动沉模，下部至坝基相对不透水层采用高压旋喷相结合形成连续防渗墙	振动沉模双模板交叉施工，具有施工工效高、造价低等优点 ^[3] 。同时，结合高压旋喷灌浆，可形成连续防渗墙，防渗效果及经济性好	坝体上、下部搭接部位施工工艺相对较复杂
方案二： 土工膜 + 高压旋喷	在坝体上游面铺设土工膜，并与伸入坝基相对不透水层的高压旋喷桩相结合形成连续防渗墙	土工膜防渗施工时对坝体扰动较小，施工技术成熟 ^[4] 。坝体高压旋喷可以为土工膜提供一个支撑结构，经济性较好	土工膜与高压旋喷桩间的搭接技术难度高，防渗施工质量和防渗效果难保证
方案三： 劈裂灌浆 + 高压旋喷	坝体部分沿坝轴线方向劈裂并灌注防渗泥浆，并结合坝基高压旋喷相结合形成连续防渗墙	劈裂灌浆浆液有效充填原渗水通道，同时与坝基高压旋喷可以形成整体性较好的连续防渗墙，防渗效果好，经济性适中	劈裂对坝体扰动大，灌浆施工难度高、工期较长，且防渗墙的耐久性不佳

从表 1 可知，方案二，防渗土工膜与两坝肩、坝基结合可靠性较差，且与高压旋喷桩间的搭接质量控制和整体防渗效果难以保证；方案三，虽然劈裂灌浆和高压旋喷可以形成连续防渗墙，但劈裂施工对坝体扰动较大、防渗墙耐久性不佳且综合成本较高。相比之下，方案一，振动沉模不仅施工工效高且能无缝形成连续密实防渗墙，同时不污染环境，防渗效果及经济性好。另外，采用高喷灌浆将防渗墙体深入基岩，有效解决振动沉模难达坝基相对不透水层的缺点，实

现对坝基与坝体填筑土间接触渗漏的有效切断^[5]。

综上分析，方案一具有防渗施工技术可行、防渗效果好、综合投资较优等优点，推荐采用“振动沉模 + 高压旋喷”相结合的组合防渗技术进行大坝渗漏除险加固修复。

3 坝体组合防渗除险加固技术应用

3.1 防渗加固方案

根据大坝病险现状，优选“振动沉模 + 高压旋

喷”组合防渗方案。振动沉模防渗板墙采用激振锤将A、B两块矩形钢板桩交叉振入坝体内部，达到预设深度后利用泥浆泵将防渗浆液灌入钢板桩内，边灌浆边交叉提升A、B钢板桩，最终与坝体形成一面连续的防渗墙板^[6]（见图1）。

振动沉模防渗板墙施工技术，非常适用防渗深度低于20m、防渗板墙厚8~20cm的薄（超薄）混凝土板墙工程，但其难以达基岩相对不透水层也是防渗工

程中必须考虑的问题。根据除险加固大坝最大坝高29.80m，存在坝体渗漏、绕坝渗漏等问题，防渗板墙设计从坝顶一直贯穿到坝基相对不透水层，即：沿着坝轴线上半部20m范围内布置振动沉模，坝基、坝肩间则采用高压旋喷，将防渗帷幕深入到坝基相对不透水层（3m以上）及两坝肩（2m以上）范围（见图2）。

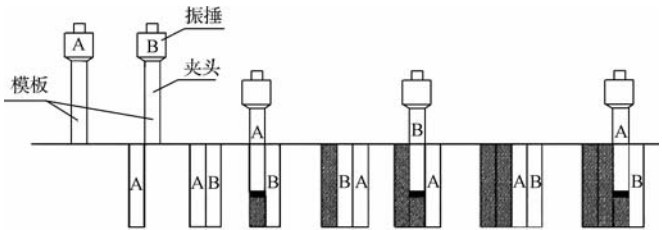


图1 振动沉模灌浆工艺

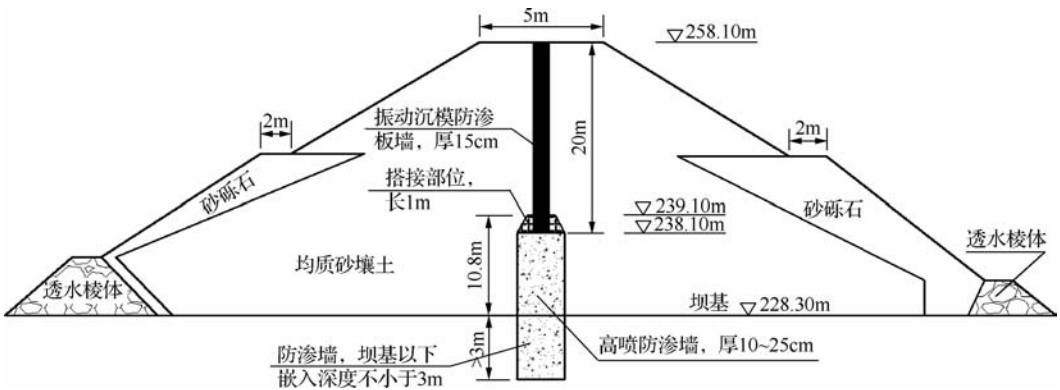


图2 “振动沉模+高压旋喷”组合防渗方案

按施工工序，坝体上段采用振动沉模，下段采用高喷灌浆，搭接长度为1m。从坝顶往下20m范围内采用振动沉模技术进行全坝段灌浆，防渗板墙厚15cm；下部13.8m（嵌入基岩3m）则采用高压旋喷施工防渗墙，厚10~25cm。帷幕灌浆按单排布置，孔距为1.5m。灌浆浆液配合比为水：水泥：粉煤灰：砂=0.56：1：1：2。帷幕防渗墙28d龄抗压强度为4MPa，弹性模量为 2×10^3 MPa。

3.2 防渗加固修复效果分析

防渗板墙灌浆结束60天后，对防渗板墙开挖进

行外观检查，即：根据大坝整体布置在典型部位挖3个探坑（深2.0m×长3.0m×宽1.0m）。开挖揭露，振动沉模形成的防渗板墙连续性、平整度、完整性均较好，浆液与坝体固结结实可靠，无接缝、无断板和开叉等缺陷，沉模灌浆缝贯通到坝顶顶部，厚度较均匀为20mm左右，灌浆钢桩孔间浆脉搭接在92%以上，成墙质量好。

为进一步检测防渗板墙的综合防渗效果，通过施工过程中留取试块和非利用段钻孔取芯样，对防渗墙特性参数进行试验室检测，结果见表2。

表2 防渗板墙钻孔取芯样检测结果

芯样编号	28d 渗透系数/(cm/s)		抗压强度/MPa		弹性模量/10 ³ MPa	
	检测值	设计值	检测值	设计值	检测值	要求值
ZKXY1	0.75 × 10 ⁻⁷	≤1 × 10 ⁻⁷	7.5	≥4	4.35	≥3
ZKXY2	0.82 × 10 ⁻⁷		6.8		3.98	
ZKXY3	0.58 × 10 ⁻⁷		9.5		5.22	
ZKXY4	0.49 × 10 ⁻⁷		11.2		5.57	
ZKXY5	0.57 × 10 ⁻⁷		10.8		5.03	
ZKXY6	0.66 × 10 ⁻⁷		8.3		4.85	

从表2可知,钻孔取芯样检测的28d渗透系数最大值为0.82 × 10⁻⁷,满足不大于1 × 10⁻⁷要求;抗压强度最小值为6.8MPa,满足不小于4MPa要求;弹性模量最小值为3.98 × 10³MPa,满足不小于3 × 10³MPa要求。防渗板墙的28d渗透系数、抗压强度和弹性模量等指标,均满足设计技术指标要求。通过振动沉模和高压旋喷灌浆施工,大坝坝体、坝基和坝肩等部位的裂隙、空洞等渗漏通道得到有效充填,坝体渗漏、绕坝渗漏等得到有效处理,防渗加固效果良好。

4 结 论

采用“振动沉模 + 高喷灌浆”组合防渗体系,通过防渗技术间的优势互补,有效解决了五里坡水库土石坝薄(超薄)防渗板墙墙板厚度小、防渗深度大和难以达到坝基基岩相对不透水层等问题。组合防渗体系综合发挥了振动沉模在薄(超薄)防渗板墙施工中的施工工效高、防渗效果及经济性好、无污染等优点。同时,结合高压旋喷灌浆,克服了振动沉模防渗深度小、难达基岩相对不透水层等缺点。采用“振动沉模 + 高喷灌浆”组合防渗体系,在五里坡水库土石坝坝体、坝基和坝肩等部位形成了一道连续

性、平整度、完整性均较好的垂直防渗体,有效阻断了裂隙、空洞等渗漏通道。

探坑开挖及钻孔取芯样检测结果表明:防渗板墙外观均一完整、连续密实,28d渗透系数、抗压强度和弹性模量等指标均满足设计要求。经汛期高水位运行检验,大坝坝体渗漏、绕坝渗漏等现象基本消失,坝体浸润线水位降低1.0 ~ 1.8m,除险加固防渗修复效果好,确保了水库安全稳定运行。▲

参考文献

[1] 新浪财经. 水利部:2025 年底前对现有病险水库全面完成除险加固[A/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s? id = 1697742032120772986&wfr = spider&for = pc>.

[2] 黄开生. 西沱水库除险加固方案设计[J]. 陕西水利,2021(7): 245-246,249.

[3] 唐恺,赵倩,马瑞. 振动沉模防渗板墙技术在花园湖退洪闸工程中的应用[J]. 治淮,2016(9):31-32.

[4] 李新广,张娜,班懿根,等. 希尼尔水库除险加固坝基与坝面防渗连接处理[J]. 人民黄河,2021,43(S1):116-118.

[5] 李万里,牛飞,李森,等. 高压旋喷灌浆技术在病险水库大坝防渗的应用[J]. 河南水利与南水北调,2019,48(12):41-42.

[6] 张灿峰,孙晓范,白永年. 振动沉模超薄防渗墙成墙技术新进展[J]. 水利建设与管理,2010,30(9):1-3.

水利大讲堂

我国七大水系

流域内所有河流、湖泊等各种水体组成的水网系统,称作水系。中国大陆地区由于地域的宽广,气候和地形差异极大,境内河流主要流向太平洋,其次为印度洋,少量流入北冰洋。中国境内“七大水系”均为河流构成,为“江河水系”,均属太平洋水系。从北到南依次是:松花江水系、辽河水系、海河水系、黄河水系、淮河水系、长江水系、珠江水系。

1 松花江水系

松花江全长 1927 公里,流域面积约为 54.5 万平方公里,占东北地区总面积的 60%,地跨吉林、黑龙江两省。其主要支流有嫩江(全长 1089 公里,流域面积 28.3 万平方公里,占松花江流域总面积的一半以上)、呼兰河、牡丹江、汤旺河、倭肯河、拉林河等。佳木斯以下,为广阔的三江平原,沿岸是一片土地肥沃的草原,多沼泽湿地,为我国著名的“北大荒”。松花江虽然是黑龙江的支流,然而在经济意义上却远远超过黑龙江。

2 辽河水系

辽河全长 1430 公里,流域面积 22.94 万平方公里,地跨内蒙古、辽宁二省区。东、西辽河在辽宁省昌图县福德店附近汇合后始称辽河。辽河干流河谷开阔,河道迂回曲折,沿途分别接纳了招苏台河、清河、秀水河,经新民至辽中区的六间房附近分为两股,一股向南称外辽河,在接纳了辽河最大的支流——浑河后又称大辽河,最后在营口入海;另一股向西流,称双台子河,在盘山湾入海。

3 海河水系

海河是中国华北地区最大水系。海河干流起自天津金钢桥附近的三岔河口,东至大沽口入渤海,其长度仅为 73 公里。但是,它的却接纳了上游北运、永定、大清、子牙、南运河五大支流和 300 多条较大支流,构成了华北最大的水系——海河水系。这些支流像一把巨扇铺在华北平原上。它与东北部的滦河、南部的徒骇与马颊河水系共同组成了海河流域,流域面积 31.8 万平方公里,地跨京、津、冀、晋、豫、鲁、内蒙古等 7 省、自治区、直辖市。

4 黄河水系

黄河全长 5464 公里,为中国第二长河。黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等 9 省、自治区,在山东省垦利区注入渤海。黄河流域面积 79.5 万平方公里(包括鄂尔多斯内流区 4.2 万平方公里),汇集了 40 多条主要支流和 1000 多条溪川,流域面积达 75 万平方公里。

5 淮河水系

淮河位于长江与黄河两条大河之间,是中国中部的一条重要河流,由淮河水系和沂沭泗两大水系组成,流域面积 26 万平方公里,干支流斜铺密布在河南、安徽、江苏、山东 4 省。流域范围西起伏牛山,东临黄海,北屏黄河南堤和沂蒙山脉。淮河发源于河南与湖北交界处的桐柏山太白顶(又称大复峰),自

西向东，流经河南、安徽和江苏，干流全长 1000 公里。淮河是中国地理上的一条重要界线，是中国亚热带湿润区和暖温带半湿润区的分界线；中国平均 950 毫米的等雨量线也基本沿淮河干流；在农业上，淮河以北一般以两年三熟耕作制居多，粮食作物以小麦为主，而淮河以南水田比重大，以稻麦两熟制较为普遍。

6 长江水系

我国的第一大河——长江，全长 6300 公里，在世界河流中，仅次于非洲的尼罗河和南美洲的亚马孙河，居世界第三位。长江从唐古拉山主峰——各拉丹冬雪山发源，干流流经青、藏、川、滇、渝、鄂、湘、赣、皖、苏、沪等 11 个省、自治区、直辖市，支流延至甘、陕、黔、豫、浙、桂、闽、粤等 8 省、自治区。其中，流域面积以嘉陵江为最大，为 16 万平方公里；长度以汉江最长，为 1577 公里；水量以岷江最丰，为 877 亿立方米。长江流域大部分处于亚

热带季风气候区，温暖湿润，多年平均降水量 1100 毫米，多年平均入海水量近 1 万亿立方米，占中国河川径流总量的 36% 左右，等于 20 条黄河。

7 珠江水系

珠江是中国第四大河，干流总长 2215.8 公里，流域面积为 45.26 万平方公里（其中极小部分在越南境内），地跨云南、贵州、广西、广东、湖南、江西以及香港、澳门 8 省、自治区和特别行政区。珠江之名，始于宋代，原指流溪河流至广州白鹅潭至虎门一段 70 多公里的河段。珠江，是个水系的概念，它由西江、北江、东江和三角洲河网组成的珠江水系，干支流河道呈扇形分布，形如密树枝状。西江是珠江水系的主干流，全长 2214 公里，流域面积 35.3 万平方公里。珠江水系河流众多，集水面积在 1 万平方公里以上的河流有 8 条，1000 平方公里以上的河流有 49 条。▲

（来源：水利家园微信公众号）

（上接第 64 页）化基岩上部，为保证心墙坝基形成完整承载体，避免出现不均匀沉降造成应力集中而导致心墙开裂，对心墙截水槽部位进行固结灌浆处理。在帷幕灌浆轴线及帷幕灌浆上、下游各设 1 排常规固结灌浆孔，孔排距 1.5m。灌浆深度 5m，分 II 序错孔布置。

6 结 语

采用高密度电法对田头寨水库坝址区进行全面探查，结合重要部位的钻孔声波测试、钻孔全景图像测试，以及区域地质调查、地质钻孔和原位测试综合分析，较全面查清了坝址区的地质条件，未发现规模较大喀斯特通道，仅局部存在小而浅的溶坑或溶孔，连通性差，左坝肩挤压破碎带深度和宽度有限，为坝基防渗处理方案的制定提供了技术依据。

综合物探方法和地质钻孔等相互印证，克服了单

一物探方法存在的专业缺陷，极大地提高了勘探精度和可信度。鉴于田头寨水库大坝地基防渗的重要性以及左岸存在挤压破碎带，建议在施工过程中，根据开挖揭示的地质情况和现场灌浆试验，及时优化调整设计，并严格控制灌浆质量。▲

参考文献

- [1] 道正全,董家兴. 河边水库坝基溶蚀泥化夹层发育特征及处置措施[J]. 云南水力发电,2020,36(1):98-101.
- [2] 何灿高,王杰. 综合物探法在水利工程岩溶探测中的应用分析[J]. 水科学与工程技术,2020(5):61-64.
- [3] 刘加朴. 综合物探技术在大古水电站建基面优化选择中的应用[J]. 云南水力发电,2020(5):59-65.
- [4] 化建新,郑建国,王笃礼,等. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [5] 原野,王志修,于世波. 基于声波钻孔测试技术的岩体完整性分析[J]. 中国矿业,2019(Z1):85-87.