

《中国水能及电气化》

水利水电工程建设的工法约稿（征稿）函

为更好地推广和宣传水利水电工程建设的工法，《中国水能及电气化》期刊开辟专栏，刊登优秀工法介绍。请有关单位严格按照稿件要求（见《中国水能及电气化》期刊官网投稿须知栏目）撰写工法内容，并将电子文稿发送至邮箱（wateree6346@163.com，请在邮件标题中注明“水利水电工法展示”字样）。本次宣传推广活动本着自愿参加的原则，不收取任何费用。

水利工程优秀质量管理小组成果约稿（征稿）函

为更好地推广和宣传水利工程优秀质量管理小组成果，《中国水能及电气化》期刊开辟专栏，刊登优秀质量管理小组成果介绍。请有关单位严格按照稿件要求（见《中国水能及电气化》期刊官网投稿须知栏目）撰写优秀质量管理小组成果内容，并将电子文稿发送至邮箱（wateree6346@163.com，请在邮件标题中注明“水利工程优秀质量管理小组成果展示”字样）。本次宣传推广活动本着自愿参加的原则，不收取任何费用。

单位：《中国水能及电气化》杂志社有限公司

联系地址：北京市西城区南滨河路 27 号 贵都国际中心 B 座 1119 室 邮政编码：100055

联系人：张洁 电话：010-63305281 投稿须知网址：<http://zgsm.cweun.org/tgxz.php>

〔期刊基本参数〕 CN 11-5543/TK*2005*m*A4*70*zh*P*¥16.00*15200*13*2022-10

中国水能及电气化

CHINA WATER POWER & ELECTRIFICATION

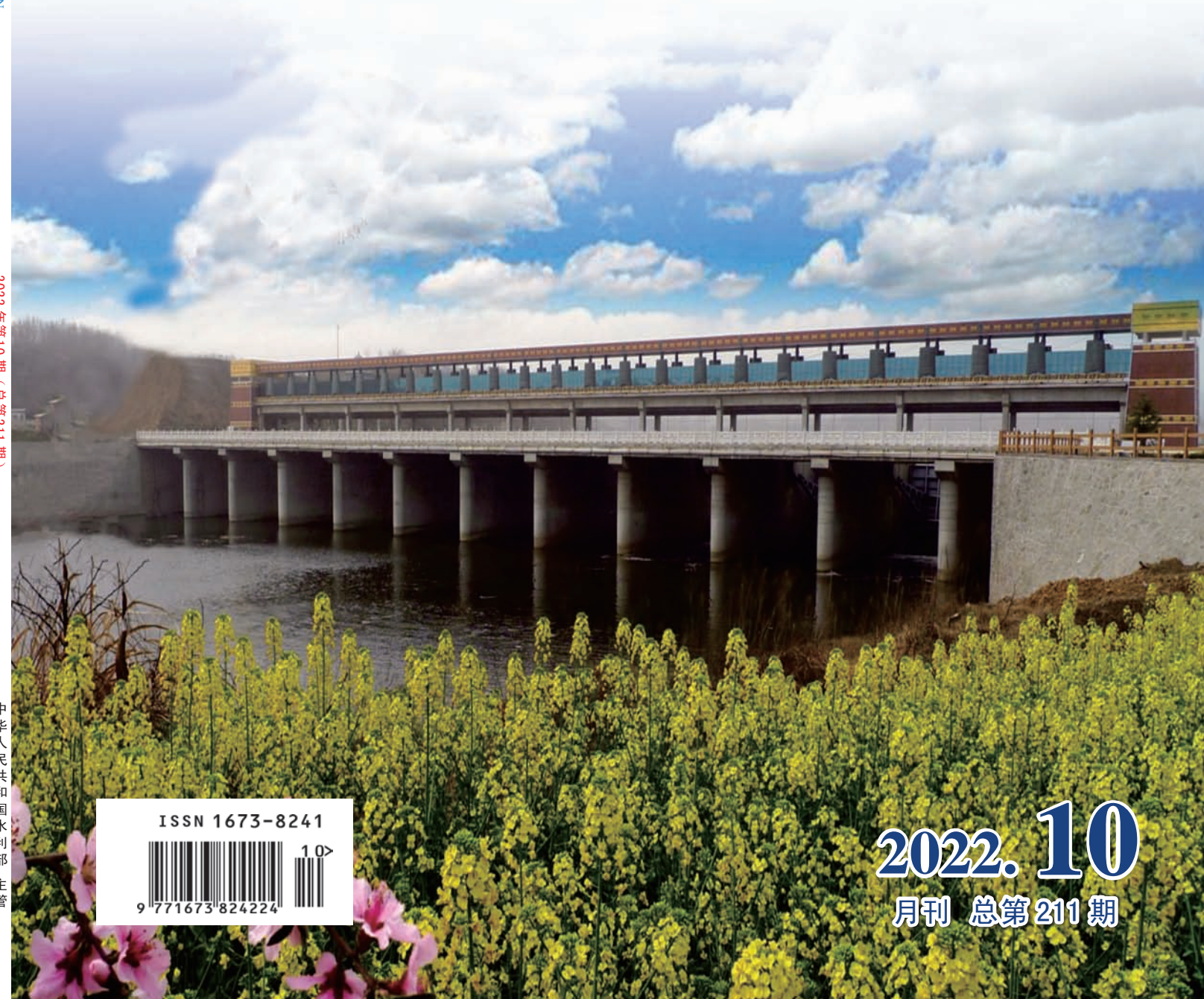
2022 年第 10 期（总第 211 期）

中华人民共和国水利部主管

ISSN 1673-8241 CN 11-5543/TK
中华人民共和国水利部 主管

中国水能 及电气化

CHINA WATER POWER
& ELECTRIFICATION



ISSN 1673-8241



9 771673 824224

10

2022. 10
月刊 总第 211 期

《水利建设与管理》

征集水利工程标准化管理 相关稿件的启事

2022年3月24日，水利部印发《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》等文件，加快推进水利工程标准化管理工作。《水利建设与管理》作为水利建设与管理领域的行业期刊，积极担负宣传引导、经验交流、知识积累的职责，刊发与此工作有关的指导文件、标准规范、典型案例、探讨研究等稿件。

欢迎科研机构、高等院校，尤其是水利工程管理单位和主管部门的管理、技术和研究工作者就水利工程标准化管理相关的成功经验、典型做法、问题与对策、思考与探讨等方面撰稿。稿件须为原创，字数在3500～4500字之间，文章须观点明确、用语规范、有理有据，能够结合实际、有资料支撑，其他要求详见网站投稿须知。

符合要求的稿件一律免费刊发，欢迎投稿。

投稿网址：<http://www.sljsygl.com/home/login>

投稿须知网址：<http://www.sljsygl.com/Home/Tgxz>

咨询电话：010-63305239

联系人：张雪虎

智慧水利和数字孪生专栏征稿函

水利部高度重视智慧水利建设，把推进智慧水利建设作为推动新阶段水利高质量发展的六大实施路径之一。《“十四五”数字孪生流域建设总体方案》顺利通过审查，标志着数字孪生流域建设进入全面实施阶段。为促进智慧水利建设成果的转化和应用，加快建设数字孪生流域，提升国家水安全保障能力，推广数字孪生技术和智慧水利先行先试经验，决定在《水资源开发与管理》期刊设置“智慧水利和数字孪生”专栏。现面向全国征集相关内容稿件，要求如下：

可围绕智慧水利体系的理论及技术研究、数字孪生流域建设、“2+N”水利智能业务应用体系构建、水利网络安全体系、智慧水利保障体系优化等内容撰写。

水利风景区建设与管理专栏征稿函

为总结交流水利风景区建设与管理工作经验，推动新阶段水利风景区高质量发展，宣传水利风景区发展成效、成功经验和模式，拟在《水资源开发与管理》期刊继续征集“水利风景区建设与管理”专栏稿件。现面向全国征稿（约稿），要求如下：

可围绕以下方面重点论述：1. 基于新发展理念，水利风景区的建设与管理、景区规划设计。2. 水利风景资源保护与开发、景区监督管理经验等。3. 高质量水利风景区典型案例建设经验、景区智慧管理推行情况、品牌建设经验与成效等。4. 其余内容可根据各自景区的实际探讨景区水文景观、地文景观、天象景观、生物景观、工程景观、文化景观及其组合的开发设计；水环境、水土保持和生态环境保护的具体措施；水利风景区的基础设施、服务设施、游乐设施和环境容量的规划建设；景区资源、安全、卫生和服务管理的经验交流等酌情添加。5. 文章内可添加高清景观图片，优质图片将登于杂志封面。

一、征稿要求

来稿按照学术论文的写作规范，应有两百字左右的摘要和三至五个关键词，正文部分有引言和结语，要求文章主题明确、数据可靠、逻辑清晰、行文规范，字数不少于4000字，严禁学术不端。

二、杂志背景情况

《水资源开发与管理》，国际标准连续出版物号 ISSN 2096-0131，国内统一刊号 CN10-1326/TV，由中国水利工程协会主管、主办，是公开发行的学术期刊。

三、投稿方式

登录杂志社官网：<http://www.sljsygl.com>，选择“《水资源开发与管理》在线投审稿系统”在线投稿。来稿择优录用，优先排期，免费刊登。

四、联系方式

联系人：杨燕 季雪威 电话：010-63305216/63305233

地址：北京市西城区南滨河路27号院贵都国际中心B座1119室 邮编：100055

2022 10 月刊
总第 211 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 水利部农村水电及电气化发展局
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 1119 室

邮政编码 100055

联系电话 010-63305281 (发行)
010-63305250 (投稿)
010-63305209 (广告)

网 址 <http://zgsw.cnweun.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 北京博海升彩色印刷有限公司

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
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

水电站技术与研究

- 1 水电站混流式机组随动自调整主轴密封应用研究
黄万虎 沈顺云 张续光

施工技术

- 5 大型泵站主机组垂直同心测量新技术研发
江如春 庄伟栋 邱晓侨
- 10 辽西北供水二期工程柴河供水施工三标 1-9 号支洞控
制段地面塌陷处理 刘 欢
- 16 绳索取芯技术在活动性断裂带中的应用研究 李鹏伟

科学研究

- 22 三相短路电流计算程序在水利工程中的应用 薛 媛
- 27 白莲崖大坝渗透压力监测分析 李君廷
- 36 采用透水排桩对河道影响的数值模拟分析 刘恒博
- 44 浅谈大型分洪工程 EPC 总承包优势 项宏敏 张友录
- 47 东庄水利枢纽工程智慧工地建设探析 王 普

工程设计

- 52 水库闸门泄洪远程控制系统设计 郎 涛
- 58 大口径顶管穿越不明地质高速公路的设计探究 张新宇

经验交流

- 62 风力发电基础冬季全过程温度控制 张 庚 郭延芳
- 68 浅谈水利水电工程最高投标限价编制的重点及方法
王勤学 李卓玉

Contents

Hydropower Station Technology and Research

- 1
- Study on the Application of Follow-up and Self-adjusting Main Shaft Seal of the Francis Unit in Hydropower Station
- HUANG Wanhui, SHEN Shunyun, ZHANG Xuguang

Construction Technology

- 5
- Research and Development of New Technology of Vertical Concentric Measurement for Main Unit of Large Pump Station
- JIANG Ruchun, ZHUANG Weidong, QIU Xiaoqiao
- 10
- Ground Collapse Treatment of the Control Section in No. 1-9 Branch Tunnel of the Third Bid in Chai River Water Supply Construction during the Second Phase of Water Supply Project in Northwest Liaoning Province
- LIU Huan
- 16
- Research on Application of Wire-line Coring Technique in Active Fault Zone
- LI Pengwei

Scientific Research

- 22
- Application of Three-phase Short Circuit Current Calculation Program in Water Conservancy Project
- XUE Yuan
- 27
- Monitoring and Analysis of Seepage Pressure of Lianya Dam
- Li Junting
- 36
- Numerical Simulation Analysis of the Influence of Permeable Drainage Pile on River Course
- LIU Hengbo
- 44
- Brief Discussion on Advantages of EPC General Contracting Mode of Large-Scale Flood Diversion Project
- XIANG Hongmin, ZHANG Youlu
- 47
- Analysis on Smart Site Construction of Dongzhuang Water Conservancy Project
- WANG Pu

Engineering Design

- 52
- Design of Discharge Remote Control System for Reservoir Sluice
- LANG Tao
- 58
- Study on the Design of Large Diameter Pipe Jacking Through Unknown Geological Highway
- ZHANG Xinyu

Engineering Design

- 62
- Temperature Control of Wind Power Generation in Whole Winter Process
- ZHANG Geng, GUO Yanfang
- 68
- Discussion on Key Point and Method of the Compilation of Maximum Bid Price of Water Conservancy and Hydropower Project
- WANG Qinxue, LI Zhuoyu

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

张翀

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

水电站技术与研究

水电站混流式机组随动自调整主轴密封应用研究

黄万虎 沈顺云 张续光

(华能甘肃水电开发有限公司, 甘肃 兰州 730070)

【摘要】 主轴密封是水轮机组的关键装置,因主轴密封结构、材质等因素,在机组运行中经常出现主轴密封失效,淹没、破坏水导轴承,影响机组正常运行的情况,特别是在高泥沙水质水电站中,主轴密封使用寿命短是普遍存在的问题。文章通过合理设计,应用了混流式机组随动自调整主轴密封,有效解决了主轴密封漏水及使用寿命短的问题,可在其他水电站机组密封结构改造及检修维护中推广应用。

【关键词】 水电站;水轮机;主轴密封;随动自调整;问题及对策

中图分类号: TV734.1

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-001-04

Study on the Application of Follow-up and Self-adjusting Main Shaft Seal of the Francis Unit in Hydropower Station

HUANG Wanhu, SHEN Shunyun, ZHANG Xuguang

(Huaneng Gansu Hydropower Development Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: Main shaft seal is the key device of hydraulic turbine unit. Due to such factors as structure and material of the main shaft seal, the failure of the main shaft seal often occurs in the operation of the unit, submerging and destroying the water guide bearing, which affects the normal operation of the unit. Especially in hydropower station with high sediment-laden water quality, the short service life of the main shaft seal is a common problem. In this paper, through rational design, the follow-up self-adjusting main shaft seal of the francis unit is applied, which effectively solves the problems of leakage and short service life of the main shaft seal, and can be widely applied in the reform and maintenance of the seal structure of other hydropower stations.

Key words: hydropower station; water turbine; main shaft seal; problem and countermeasure

水电站水轮机主轴密封是水轮机组的重要构件, 机组运行过程中, 为了防止压力水从转动部件和固定起着水轮机转动部分与固定部分的承接作用。水电站 部件之间泄漏, 通常在水轮机水导轴承和转轮之间设

收稿日期: 2022-08-01

作者简介: 黄万虎 (1976—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要从事水利水电建筑工程及水电站运营管理工作。

置水轮机的主轴密封部件^[1]。如果主轴密封失效,就会出现水淹机坑、水导轴承烧坏等事故,造成电站被迫进行非计划停机检修^[2],直接影响到电站的安全以及电站的经济效益^[3]。

1 工程概况

白龙江喜儿沟水电站位于甘肃省舟曲县境内的白龙江干流上游,电站为径流式水电站,额定水头 57.8m,设计引用流量 $141\text{m}^3/\text{s}$,电站装有 3 台混流式机组,总装机容量 72MW,年设计发电量 2.85 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,年设计利用小时数 3955h。电站水轮机转轮直径 2.35m,主轴密封体外径 1.25m、内径 1.15 m,为间隙式迷宫密封。

2 原主轴密封结构及密封原理

喜儿沟水电站原水轮机主轴密封位于转动油盆外侧,水导轴承安装于转动油盆内,主轴密封作用是防止水轮机上冠间隙漏水通过上冠流道后沿着主轴上溢。主轴密封由密封体、密封座、密封盖、支撑体、止水环等组成。为防止损坏内侧转动油盆,在间隙式迷宫密封体内壁镶嵌巴氏合金,密封体依靠比较长的迷宫逐步减压,通过固定密封体内壁的巴氏合金与转动油盆外壁之间较小的间隙达到封水的效果。在密封体和转动油盆间通过 0.35MPa 压力清洁水,形成水封和润滑水膜,保证摩擦面良好的密封效果。这种形式的主轴密封结构,一方面要有少量水流入,起到润滑水封的作用,另一方面水量过大又会造成排水不及时的问题。间隙值的大小是影响密封效果的主要因素。

3 间隙式迷宫密封的缺点

喜儿沟电站原水轮机主轴密封体内壁镶嵌硬度较小的巴氏合金,这种密封体构造适用于泥沙含量较小水质的水电站。喜儿沟电站水轮机顶盖与转轮的上冠只有一道梳齿减压,导叶后转轮前的压力水经这一道梳齿直接进入主轴密封,使密封体前水压力达到 0.35MPa,由于压力较大,密封间隙稍微增加,漏水

量将大量增多。若过机水流含泥沙量大,流经主轴密封间隙时,主轴密封与转动油盆面存在液体摩擦、干摩擦及混合摩擦^[4],使得密封体巴氏合金磨损加快,间隙增大,漏水量加大。在机组投产发电初期,运行工况与设计阶段相符,水轮机主轴密封封水效果好,但是随着运行年限的增加,机组各个部件不同程度发生磨损,尤其是随着上游河道水流泥沙含量的增多,主轴密封磨损严重,密封效果大打折扣,漏水加剧,影响电站的正常运行^[1]。机组负荷增加,导叶开度加大,水轮机上止漏环漏水处水压增加,水轮机漏水量增大。机组负荷与密封体间隙直接决定机组轴向水推力,随着密封间隙和机组负荷的增大,轴向水推力都会随之增大,使机组振动加剧^[5],从而使机组整体稳定性受到影响。

4 随动自调整主轴密封应用

4.1 改造原则

主轴密封体改造的核心是有效解决运行过程中主轴密封的磨损问题和减少密封体的漏水问题。主轴密封改造可选择的结构形式多种多样,具体的形式必须根据现有设备的结构特点和尺寸来进行布置设计^[6]。

喜儿沟水电站水轮机工作密封改造,以尽可能节约改造成本、尽量减少对水轮机本体结构的修改以及厂房整体布局的协调为总体要求,根据已有的主轴密封布置空间,在不更改水导轴承及转动油盆的条件下,以机组转动油盆外圆为基准,保持连接螺栓和定位止口尺寸不变,设计一种结构合理、适用于泥沙含量较大水质、使用寿命较长的新型密封结构。

4.2 随动自调整主轴密封结构设计

随动自调整主轴密封主要由空气围带盖、密封座、密封压盖、密封环、弹簧、橡皮条密封、压板及固定压紧螺栓等组成。空气围带盖套接在水轮机主轴外壁,密封座套接在水轮机主轴外壁上且安装在空气围带盖上,多个密封压盖依次拼合套接在水轮机主轴外壁上且安装在密封座上,在密封座和密封压盖内侧

设计有密封腔，密封腔内设置有密封环，密封环与密封腔内壁之间安装有弹簧，密封环另一侧直接与水轮机主轴接触，由弹簧给密封环提供径向压力，压力大小由密封水的压力计算而定，向上密封环的弹簧力逐层减小，密封水逐次通过每一层密封环后压力降低为零。

随动自调整主轴密封由六层盒式密封上下叠加而成，第一道为间隙密封，进入盒式密封座；第二道为由六层相同材质材料组成的接触式密封；六层采用添加碳纤维和石墨的高分子材料的密封环与主轴紧密接触，接触压力由外围的不锈钢弹簧提供，其大小由密封计算确定。

为便于安装，所有密封座、密封盖等可拆卸部件

均为分半结构，各个密封座与密封盖通过相互错位的螺栓连接，并形成六道密封腔。六个密封环逐个安装在六道密封腔中，并通过外圆上的弹簧使密封块与水轮机大轴紧密接触。在水轮机运行过程中，密封环随主轴摆动而摆动，密封环因密封水的压力不同而径向摆动使得密封环有效地减小了密封水的压力，又不会随着主轴在密封腔里进行轴向转动。

单个的密封环由六个密封块组成，每一个密封块与密封腔内壁之间安装有两个弹簧，通过对密封环的切分，使得各个密封块独自面对密封水的压力，大大减小密封环的磨损；密封块采用摩擦系数低、耐高温、抗磨性能强的高分子材料，有效提升了主轴密封的抗磨损能力，大大延长了主轴密封的使用寿命（见图1）。

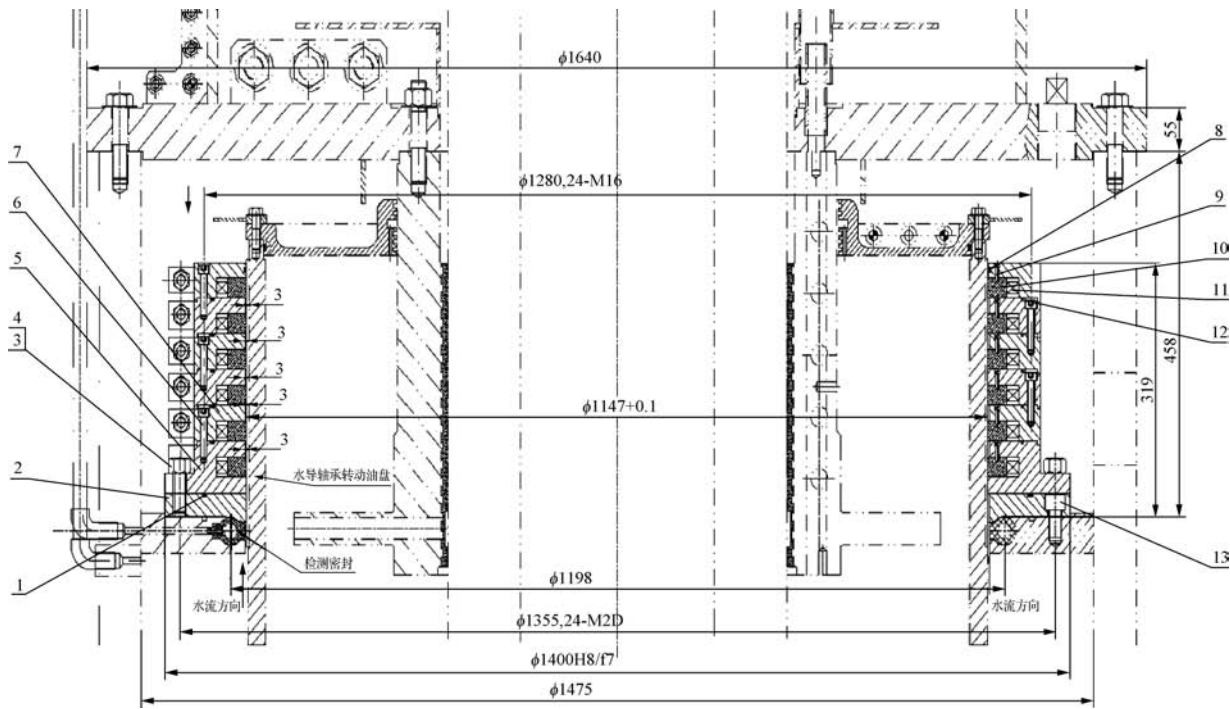


图1 新型水轮机主轴密封结构示意图

1-橡皮密封条；2-空气围带盖；3-密封座；4-螺栓；5-密封压盖；6-螺钉；7-密封盖；8-密封条；9-定位螺钉；10-密封环；11-弹簧；12-螺钉；13-螺栓

安装时，利用密封腔与密封环之间的间隙涂满抗水性、机械安定性、防锈性和氧化安定性好的锂基润滑油脂，可以有效阻止泥沙进入密封腔内，避免泥沙对密封腔内部表面的磨损破坏。密封座和空气围带盖固定在水轮机顶盖上，使得整个主轴密封结构与水轮

机连接为一个整体，减少了由于摆动带来的不必要的磨损。

水轮机运行时，多个密封环随主轴摆动而摆动，密封环始终与大轴紧密接触，可以有效阻止水中的泥沙通过密封环与主轴的间隙进入密封，避免主轴与密

封环的磨损破坏。密封圈随主轴同速旋转，形成旋转梳齿密封。当紧急停机，主轴向发电机方向移动时，密封圈与主轴相对移动，主轴复位时，再相对移动，同时复位。

4.3 随动自调整主轴密封优点

通过设计由多道接触式径向可调密封组成的旋转密封，使得密封水的压力逐层减小，直至为零，有效减少了漏水量；水轮机运行时，多道密封环通过密封压盖割开，密封环在各自的密封腔内上下、左右摆动，始终与主轴接触，密封效果非常好。根据运行情况分析，水轮机采用四道密封环已不再漏水，增加密封环数量会大大提高密封效果。

通过弹簧给密封块提供径向压力，结构简单，密封效果良好；密封块采用高分子材料，具有摩擦系数低、自润滑的特性，密封块为随动结构，在密封腔内上下、左右均有间隙，间隙内有少量水作为润滑剂，提高了密封块的磨损能力，增加了主轴密封结构的寿命。密封上下和左右均可调，密封块允许干摩擦，在没有任何密封润滑水的情况下也可正常运行。

根据电站的水质、水头、转速，采用相同材质材料（添加碳纤维和石墨的高分子材料）与不同布置的多层密封结构，并与主轴接触，结合动静间隙密封、旋转甩水密封与台阶式间隙的特点，抗磨损、防泥沙效果显著。

主轴密封可靠性高，价格低、运行维护经济性好，所有容易磨损的密封件均可在市场轻易采购。

5 随动自调整主轴密封实施效果评价

5.1 提升设备本质安全

随动自调整主轴密封封水效果得到显著提高，机组顶盖上水减小，提高了渗漏排水系统运行可靠性，消除了水淹机组事故、水淹厂房的风险，有效提升了设备本质安全水平。

5.2 提高经济效益

随动自调整主轴密封的使用，有效减小了机组运

行过程中的顶盖排水量，减少了电站排水系统的运行时间，降低了综合厂用电量。原主轴密封维护时需要拆解后返厂，对主轴密封巴氏合金进行重新浇铸；随动自调整主轴密封可现场拆解、现场维护保养，维护方便、快捷，节约维护成本。随动自调整主轴密封抗磨损、防泥沙功能良好，可提高机组主轴的密封性能，延长维保时间，维护工作量小，节省人力资源。

6 结 语

随动自调整主轴密封的结构设计，充分考虑了电站水轮机尺寸和结构特点，随动自调整主轴密封使用三年来，漏水量仅为改造前的 1/3 左右，密封的磨损量很小，运行可靠。

根据随动自调整主轴密封改造过程与近几年运行维护情况分析，改造后结构比原结构在安装、检修等方面有较大改善，设备检修维护方便。随动自调整主轴密封结构，可根据不同水轮机密封漏水的压力和流量等参数，对主轴密封性能进行科学计算，采用不同数量的密封层和不同材质的密封环以适应不同工况。混流式机组随动自调整主轴密封的研究应用，提高了设备安全可靠，减少了主轴密封装置更换、维护的人工投入，提升了水电站经济效益，可在轴流式和贯流式机组中普遍推广应用。▲

参考文献

- [1] 马艳丽,周强,任江涛.黑河水电站水轮机主轴密封的优化改造[J].液压气动与密封,2021,41(2):35-38.
- [2] 翟建平,廖焕华.水轮机主轴密封漏水的故障分析及处理[J].润滑与密封,2011,36(12):104-106,116
- [3] 蔡仁良.流体密封技术[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [4] 黄昌.水轮机活塞式端面橡胶密封甩水过大分析处理[J].广西电力,2005,28(1):29-30,67.
- [5] 李琪飞,张毅鹏,敏政,等.混流式水泵水轮机密封间隙流动分析[J].兰州理工大学学报,2016,42(1):51-55.
- [6] 彭育斌.贯流水轮发电机主轴密封改造[J].水电站机电技术,2022,45(2):28-30.

施工技术

大型泵站主机组垂直同心测量新技术研发

江如春 庄伟栋 邱晓侨

(江苏省江都水利工程项目管理处, 江苏 扬州 225200)

【摘要】 水泵电机固定部件垂直同心的测量和调整,是机组安装必不可少的重要工作环节,其测量精度直接影响机组检修安装质量,决定着机组使用寿命和稳定安全运行。机组垂直同心测量调整的工序复杂、技术要求高,基于机组垂直同心测量原理,经过反复实践,文章研发了“激光测距定值法”,通过激光测距仪(精度0.01mm)测量定子铁芯半径,由软件生成实时测距波形,自动确定测量数据,既缩短了测量工期、保证了测量精度,也排除了人为判断误差因素,任何人进行测量,都能得到唯一数值。此技术科学、求实、创新,更新了行业关键工序工艺,提高了水泵机组安装检修效率和质量。

【关键词】 水泵电机;垂直同心;测量调整;技术实践

中图分类号: TV547.4

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-005-05

Research and Development of New Technology of Vertical Concentric Measurement for Main Unit of Large Pump Station

JIANG Ruchun, ZHUANG Weidong, QIU Xiaoqiao

(Jiangsu Jiangdu Water Conservancy Project Management Office, Yangzhou 225200, China)

Abstract: The vertical concentric measurement and adjustment of fixed parts of water pump motor is an essential part of unit installation. The measurement accuracy directly affects the quality of unit maintenance and installation and determines the service life as well as the stable and safe operation of the unit. The process of vertical concentric measurement and adjustment of unit is complicated and has high technical requirements. Based on the vertical concentric measurement principle of unit, this paper develops a “laser ranging value determination method” after repeated practice. The stator core radius is measured by laser rangefinder (accuracy 0.01mm). Real-time ranging waveform is generated by software, and the measurement data is automatically determined, which not only shortens the measurement period, ensures the measurement accuracy, but also eliminates the error factor of human judgment. Anyone can get the unique value through measurement. This technology is scientific, practical and innovative, which updates the key process technology of the industry and improves the efficiency and quality of the installation and maintenance of the pump unit.

Key words: water pump motor; vertical concentric; measurement and adjustment; technology practice

收稿日期: 2022-07-06

作者简介: 江如春(1987—),男,本科,工程师,主要从事大型水利泵站工程生产运行管理、机电安装检修工作。

本文主要探讨泵站主机组安装重要工序——机组垂直同心测量^[1]。水泵机组为分散式结构，需现场组合安装，立式泵机组垂直同心，是指电机定子铁芯中心与水泵轴窝（安装导轴承处）中心在同一条垂直（铅垂）线上，垂直同心影响大型立式泵机组的稳定性和耐久性^[2]。在基于垂直同心测量原理的前提下，对测量施工工艺进行创新，提高测量科学性、准确性、快捷性，提升机组安装质量，进一步保障工程安全稳定运行。

1 工程概况

江都水利枢纽工程，由第一抽水站（简称江都一站）与江都其他三座泵站及相关配套工程共同组成，工程位于江都市区，地处京杭大运河、新通扬运河和淮河入江尾闾芒稻河的交汇处，具有灌溉、排涝、泄洪、通航、发电、过鱼、改善生态环境等综合功能，既是江苏省江水北调的龙头，也是南水北调东线工程的源头。江都一站于1961年12月开始兴建，1963年3月竣工，是新中国成立后国内第一个自行设计、自行建设、自行管理的大型泵站。1996年12月完成更新改造，现装有8台1.75ZLQ-6型立式机械全调节轴流泵，叶轮直径1.64m，配套TL1000-24/2150型1000kW立式同步电机，总装机容量8000kW，单机流量 $10.2\text{m}^3/\text{s}$ ，总抽水流量 $81.6\text{m}^3/\text{s}$ ，设计扬程6m。工程采用提身式结构，肘形进水流道，虹吸式出水流道，真空破坏阀断流方式。

2 创新背景

目前，在我国大、中、小型泵站安装或日常检修工作中，水泵电机固定部件垂直同心的测量和调整是一项重要的工作环节，其测量调整的精度、安装检修的质量与机组使用寿命密切相关，直接影响机组稳定及安全运行。

机组垂直同心测量调整的工艺复杂、技术要求高，绝大多数水泵机组安装人员都难以熟练掌握，特别是在测量机组垂直同心数据时，都是采用传统技术

工艺“电气回路辨声法”，选择12V安全电源串联一只喇叭，一端连接在机座上，另一端接在钢琴线上，然后用螺旋测微器测量机座内壁到钢琴线上的距离。此螺旋测微器在测量时相当于一个控制开关，当其长度刚好等于其测量距离时即接通电源与喇叭，喇叭就会发出声音，此时螺旋测微器的读数即为要测的距离^[3]。由测量人员依据工作经验，凭个人听觉，测出定子铁芯上下四个等方位的半径（见图1）。



图1 电气回路辨声法——测量机组垂直同心

由于每位测量人员对测杆触碰钢琴线时接收的电流声音大小感觉不一样，在实际安装检修时，往往不同人测量，得到的数据都不一样，存在明显的人为误差因素，且“辨声法”需要测量工具不断尝试触碰钢琴线，才可以听到微弱的电流声，势必容易使钢琴线产生抖动，使测量工作无法高效持续进行，这时需要长时间等待钢琴线完全静止，才可以继续进行测量，显著增加机组安装或抢险维修施工工期。

3 创新思路

为了更好地助力“世界一流、国内领先”现代化水利工程榜样建设，进一步充分发挥南水北调工程效益，依托大型水利泵站工程管理设施^[4]，以提高机组安装或抢险维修质量，保障工程安全稳定运行为目标，开展泵站机组安装关键施工工艺新技术攻关研究。

基于机组垂直同心测量原理，结合高精度激光测距技术在各行各业中的广泛应用，通过巧妙构思，反复研究，创新探索出一种新的工艺——“激光测距定值法”，其测量原理见图2。

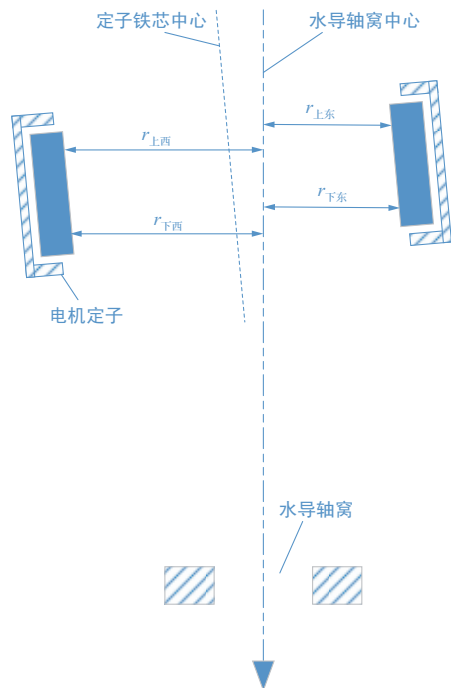


图2 机组垂直同心测量原理

选用测量精度高达0.01mm的激光测距仪，安装在专用定制的辅助测量杆上，在机组安装或检修测量垂直同心数据时，通过激光测距仪扫描钢琴线，由软件自动连续读取测距数值，形成实时测距波形，能实时自动显示测量“最小值”（点到直线距离，垂线最短），此方法既不用反复触碰钢琴线，也不受人为主观判断误差因素影响，任何人测量，都只会得到唯一数值，测量精度高，工艺科学高效。

4 具体实施

4.1 硬件设施

硬件主要包括激光测距仪（精度0.01mm）、测量辅助定制杆、笔记本电脑、通信模块等，见图3、图4。

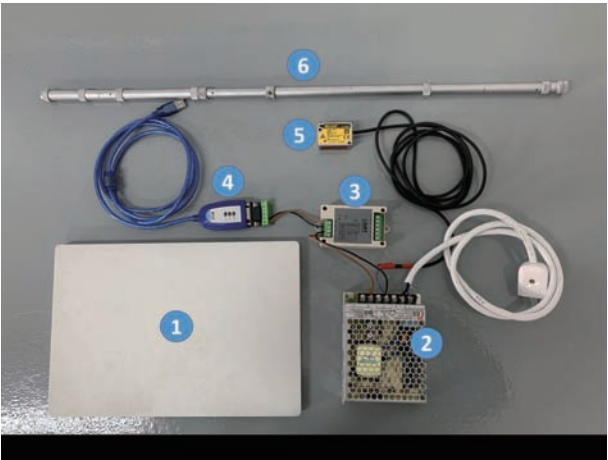


图3 激光测距定值法——硬件设施

①-笔记本电脑；②-电源模块（DC12-24V，5A）；③-DAM-3154 模拟量转485 模块；④-485 转 USB 模块；⑤-激光测距仪；⑥-定值辅助杆

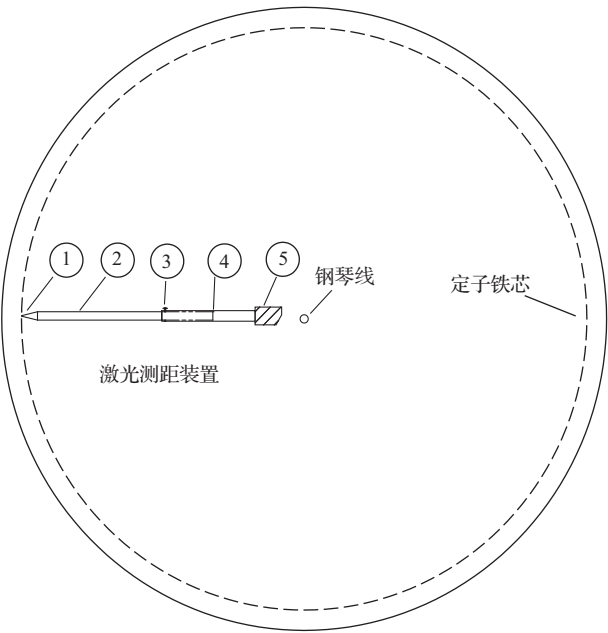


图4 激光测距定值法——测量垂直同心示意图

①-测杆至定子铁芯接触端；②-定制测杆杆身；③-螺旋锁定装置；④-伸缩测杆杆身；⑤-激光测距仪

4.2 测量垂直同心步骤（激光测距定值法，见图5）

标记垂直同心测位。在水泵水导轴窝，电机定子铁芯上、下止口东、南、西、北四个方位做好测位标记。

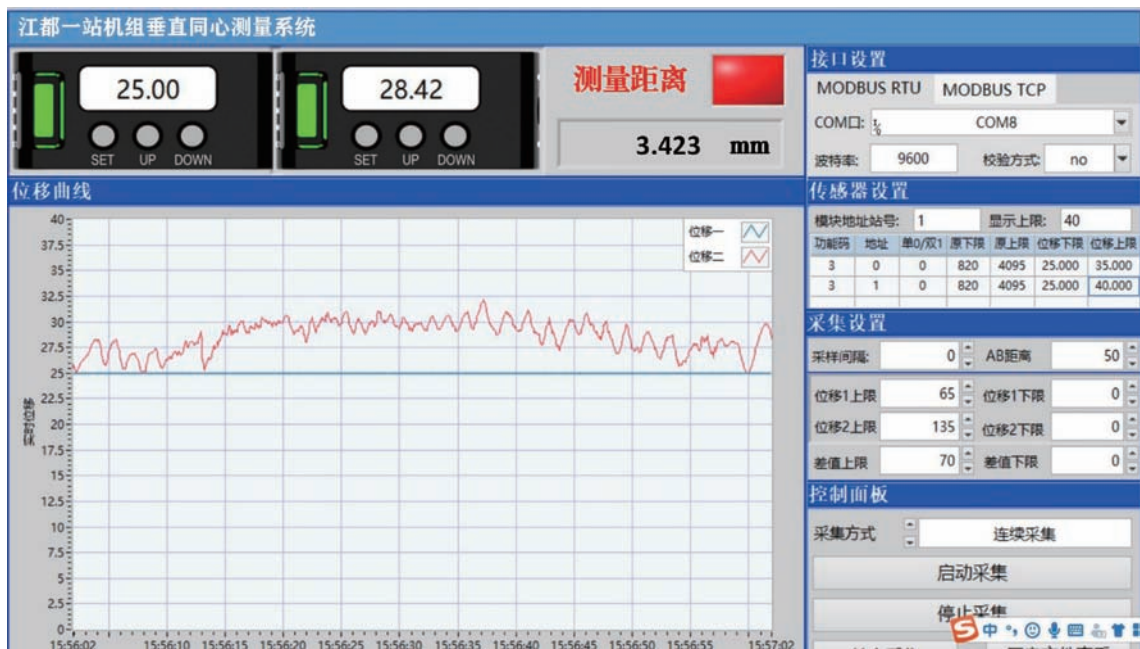


图5 机组垂直同心测量系统

测量水导轴窝中心。选用长度合适的辅助定制杆配合激光测距仪，测量水泵水导轴窝东、西、南、北四个止口，根据测距波形自动确定“最小值”，得到4个数值，根据数值调整钢琴线位置，进行反复测量调整，直到钢琴线与水泵轴窝中心重合。

测量定子铁芯半径。选用长度合适的辅助定制杆配合激光测距仪，测量电机定子铁芯东、西、南、北四个测位的上下止口，根据测距波形自动确定“最小值”，共8个数值，根据数值调整定子位置，进行反复测量调整，直至电机定子铁芯中心与钢琴线高度重合，使定子铁芯东西及南北向的半径差值之半，不超过设计空气间隙的 $\pm 5\%$ ^[5]，保障机组垂直同心数值符合标准要求。

4.3 垂直同心测量数据分析

水泵机组垂直同心“激光测距定值法”既保证了测量数据精度，也提高了测量工作效率，但是数据的计算和定子调整也较为烦琐，大多数安装检修人员难以熟练掌握，特别是根据测量数据计算结果，对定子基础如何加垫、定子水平方向如何位移，经常出现

人为判断错误，导致反方向调整情况，消耗人力，延误机组安装检修进度。

基于计算机软件的广泛使用，通过将机组垂直同心计算公式开发成程序^[6]，在机组安装或检修过程中，自动采集测量数据进行计算，给出准确的调整方案，以便安装检修人员迅速、准确地进行调整，进一步缩短机组安装检修工期。实现水泵机组垂直同心的测量、计算、调整一体化，测量后迅速直接给出调整决策，使机组安装或抢险维修更加科学、更加准确、更加高效。

4.3.1 垂直同心错位

同心： $r_1 - r_3 = r_5 - r_7 \neq 0$ 或 $r_2 - r_4 = r_6 - r_8 \neq 0$ ；
垂直： $r_1 - r_5 = r_2 - r_6 = r_3 - r_7 = r_4 - r_8$ ；倾斜值： $X = Y = 0$ （见表1、图6）。

表1 机组垂直同心测量计算

水泵水导		东	西	东西差	南	北	南北差
		a_1	a_3	$a_1 - a_3$	a_2	a_4	$a_2 - a_4$
定子铁芯	上	r_1	r_3	$r_1 - r_3$	r_2	r_4	$r_2 - r_4$
	下	r_5	r_7	$r_5 - r_7$	r_6	r_8	$r_6 - r_8$
上下差				X			Y

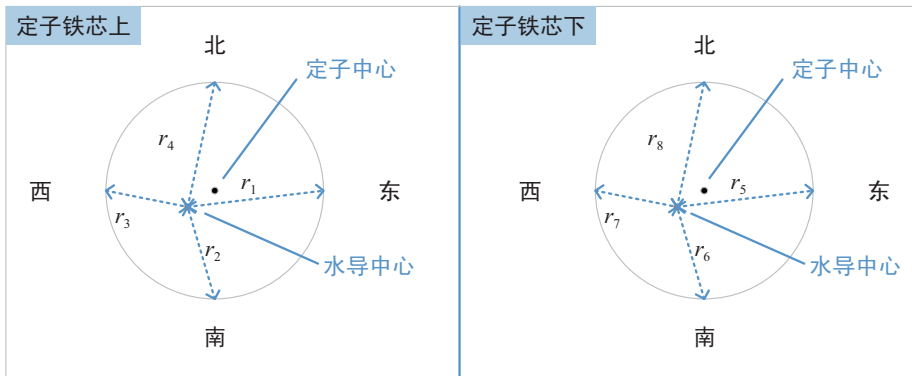


图 6 垂直同心错位状态示意图

4.3.2 垂直同心倾斜
同心： $r_1 - r_3 \neq r_2 - r_4$ 或 $r_5 - r_7 \neq r_6 - r_8$ ；垂直： $r_1 - r_5 \neq 0$ 或 $r_2 - r_6 \neq 0$ 或 $r_3 - r_7 \neq 0$ 或 $r_4 - r_8 \neq 0$ ；倾斜值： $X \neq 0, Y \neq 0$ （见表 1、图 7）。

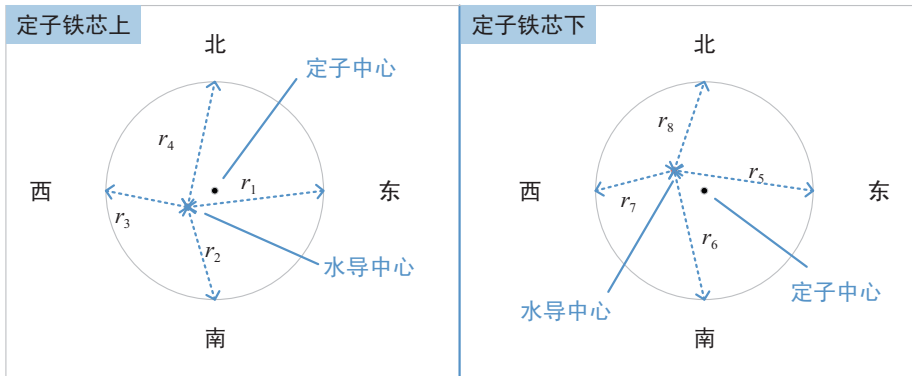


图 7 垂直同心倾斜状态示意图

4.3.3 垂直同心合格
同心： $r_1 - r_3 = r_6 - r_8, r_2 - r_4 = r_5 - r_7$ ；垂直： $r_1 - r_5 = r_2 - r_6 = r_3 - r_7 = r_4 - r_8 = 0$ ；倾斜值： $X = Y = 0$ （见表 1）。

5 运用价值

当前，我国经济发展已由高速增长阶段转向高质量发展阶段。推动新阶段水利高质量发展，对水资源的利用工作提出了新的更高的要求。要求通过更科学的调水来优化水资源配置，在满足调水、排涝、航运等要求的同时，发挥更大的社会效益和经济效益。这就要求水利行业提供更高效的运行服务保障能力。随着南水北调东线一期工程全线通水运行^[7]，各梯级泵站工程水泵机组长时间调水运行将成为常态，机组长

时间运转将缩短机组的检修周期，而频繁的检修将使机组的运转效率大大降低，直接影响社会服务能力。因此，要尽可能地缩短机组检修时间，以保证机组更长时间的运转。目前机组垂直同心测量的工艺和方法存在精度不佳、耗时长等现象。基于这种需求，“激光测距定值法”的应用显著提高了机组垂直同心测量精度，提高了施工质量和工作效率，缩短了机组垂直同心测量时间，大大缩短了整个机组安装检修时间，保障水泵机组能尽快完成检修安装，及时投入运行。随着南水北调东线各级大中型泵站陆续投入运行，要求有更多的新科技、新技术应用到设备管理和机组的运行与检修中^[8]。机组垂直同心“激光测距定值法”必将得到更广泛的应用。（下转第 15 页）

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.10.03

辽西北供水二期工程柴河供水施工三标 1-9号支洞控制段地面塌陷处理

刘 欢

(辽宁省水资源管理集团有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000)

【摘 要】 文章根据水工输水隧洞突泥、涌水导致地面塌陷的工程实例, 充分分析地面塌陷发展趋势及影响, 提出采用洞内灌浆、洞外水冲砂和充填灌浆结合方式, 同时加强监测并制定应急预案, 完成塌陷处理。

【关键词】 辽西北供水二期工程; 突泥、涌水; 地面塌陷

中图分类号: TV672+.1

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-010-06

Ground Collapse Treatment of the Control Section in No. 1-9 Branch Tunnel of the Third Bid in Chai River Water Supply Construction during the Second Phase of Water Supply Project in Northwest Liaoning Province

LIU Huan

(Liaoning Water Resources Management Group, Shenyang 110000, China)

Abstract: Based on the project example of ground collapse caused by mud and water gushing in hydraulic tunnel, this paper fully analyzes the development trend and influence of ground collapse, puts forward the combination mode of grouting inside the tunnel, sand flushing outside the tunnel and filling grouting while strengthening monitoring and formulating the emergency plan to complete the collapse treatment.

Key words: the Second Phase of Water Supply Project in Northwest Liaoning Province; mud and water gushing; ground collapse

喀斯特地区地面塌陷是一种较为常见的不良地质现象^[1], 在喀斯特地区进行工程建设的情况非常普遍^[2]。因地质复杂性, 水工输水隧洞突泥、涌水现象频发, 隧洞长期排水, 在断层、喀斯特、地下水等地质条件共同作用下, 地面发生塌陷。辽西北供水二期

工程柴河供水施工三标 1-9 号支洞控制段因突泥、涌水造成地面塌陷, 采用洞内外结合处理的方式, 解决了工程问题, 可为以后水工隧洞处理因突泥、涌水造成的地面塌陷问题提供借鉴。

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 刘欢 (1991—) 男, 本科, 工程师, 主要从事水利规划、水利水电工程管理工作。

1 工程概况及塌陷情况

1.1 工程概况

辽西北供水工程项目是根据辽宁省水资源东多西少的特点，将东部的丰沛水资源向中、西部配置，从辽宁东部引水至辽西北地区的一项大型跨流域输水工程^[3]。柴河水库供水施工三标主洞线总长 14570m，城门洞形，3.6m×4.3m（宽×高）。区间共布置 4 个支洞，其中 1-9 号支洞投影长 838.08m，控制段主洞桩号范围为 S21+550~S24+934，洞室埋深约 78~136m。工程区地层主要为蓟县系铁岭组和第四系地层，第四系地层主要为全新统坡洪积、冲积黏性土含少量碎石，覆盖于蓟县系铁岭组岩层之上。工程区推断断层 F₁、F₂、F₃ 共 3 条，F₁、F₂ 两条断层中间地带，即两条断层共用下降盘推断为岩溶构造破碎带。

1.2 塌陷情况

工程区 2017 年 6 月 7 日第一次涌水，涌水位置为隧洞开挖右侧洞底揭露溶蚀构造处（溶洞 0.4m），现场测涌水量约 3m³/min，无突泥，持续近一个月后进行阻水灌浆。2017 年 8 月 12 日第二次涌水及突泥，出水量 5.3m³/min，突泥量 1177.42m³，采取引排方案后，处于稳定状态。2019 年 8 月 12 日第三次涌水及突泥，突泥量约 2691m³，突泥成分为地表第四系松散堆积粉质黏土，说明自地表至洞室部位已形成基本固定连通通道，且具备一定的规模。2019 年 9 月—2020 年 2 月逐渐发现塌陷，塌陷统计见表 1，塌坑分布见图 1。

2 塌陷原因及发展趋势分析

2.1 塌陷原因

2.1.1 本段喀斯特发育情况

从区域地质资料和本区岩性、地下水活动情况及钻探、开挖揭露的地质情况看，本区岩性属变质白云质灰岩，喀斯特发育中等，不具备强烈喀斯特发育条件和较大喀斯特溶洞，钻孔最大可见洞径 2~3m，一般小于 1m，溶洞及溶蚀裂隙一般沿断裂构造发育，

表 1 地面塌陷坑统计

编号	发现时间	规 模	影响范围、对象
TX01	2019 年 9 月 17 日	直径约 3m，深约 1.5m	房屋
TX02		直径 0.15m，发育初期	公路
TX03	2019 年 9 月 4 日	范围 10m×8m，深度 3~4m	农田
TX04		直径约 3m，深约 3m	农田
TX05		直径约 3m，深约 3m	农田
TX06		直径约 2.0m，深约 3m	农田
TX07		直径约 1.5m，深约 3m	农田
TX08	2019 年 9 月 18 日	直径约 3m，深约 0.4m (地表凹陷未塌)	农田
TX09	2020 年 2 月 28 日	直径约 0.5m，深约 6m， 底部宽度约 6m	公路
TX10	2020 年 2 月 28 日	直径约 4m，深约 5m	农田

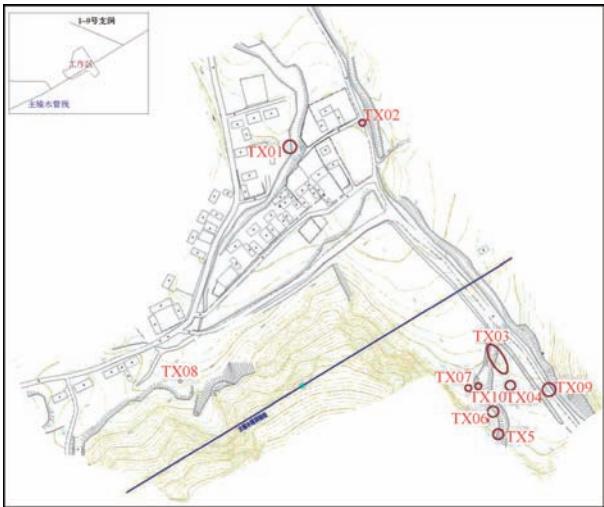


图 1 塌坑分布示意图

多为溶蚀裂隙。已有溶洞及溶蚀裂隙多为泥沙充填型，未见地下土洞，这和天然状态下地下水排泄基准面高程有关，根据历史调查，隧洞开挖前附近未发生较大规模塌陷。

2.1.2 水文地质分析

工程区地下水类型主要为喀斯特水，主要补给来源是大气降水和地表水，径流通道包括裂隙、喀斯特管道及孔洞，一般均为浅循环，局部断层构造带内则存在深循环。最早出现突涌后 1.1km 范围内上升泉、

水井均出现干枯现象。

2.1.3 洞内开挖、排水、排泥影响因素分析

地表塌陷前的长期人居历史中未发现地表塌陷现象，洞室开挖突泥排水，使原本多为充填状态的古老喀斯特塌陷区松散物质在洞室附近开始流失，形成空腔，随着时间推移，土体变形从底部向上发展，直至地表，当地表部分变形超过土体强度时，发生地表塌陷。

综上所述，地面塌陷是在洞内长期排水、突泥条件下，断层、喀斯特、地下水等地质条件共同作用下的结果。

2.2 发展趋势

从已处理塌陷回填方量较洞内突泥总量少约2000余m³来看，地下仍存在未完成沉降塌陷的空腔。空腔体积基本等于泥沙排出的体积（可能略大些，可考虑1.5~2.0倍系数）。

由于洞内持续排水，地面黏性土以下和下部岩体内产生的空腔未得到及时回填，在地下水作用及岩土体作用下，会产生新的塌陷，但塌陷位置基本围绕断层发育带或在已有塌陷范围附近。

地面塌陷将对农田、林地及房屋、道路产生影响，威胁洞室安全，同时严重破坏地下水环境。塌陷影响分区见图2。

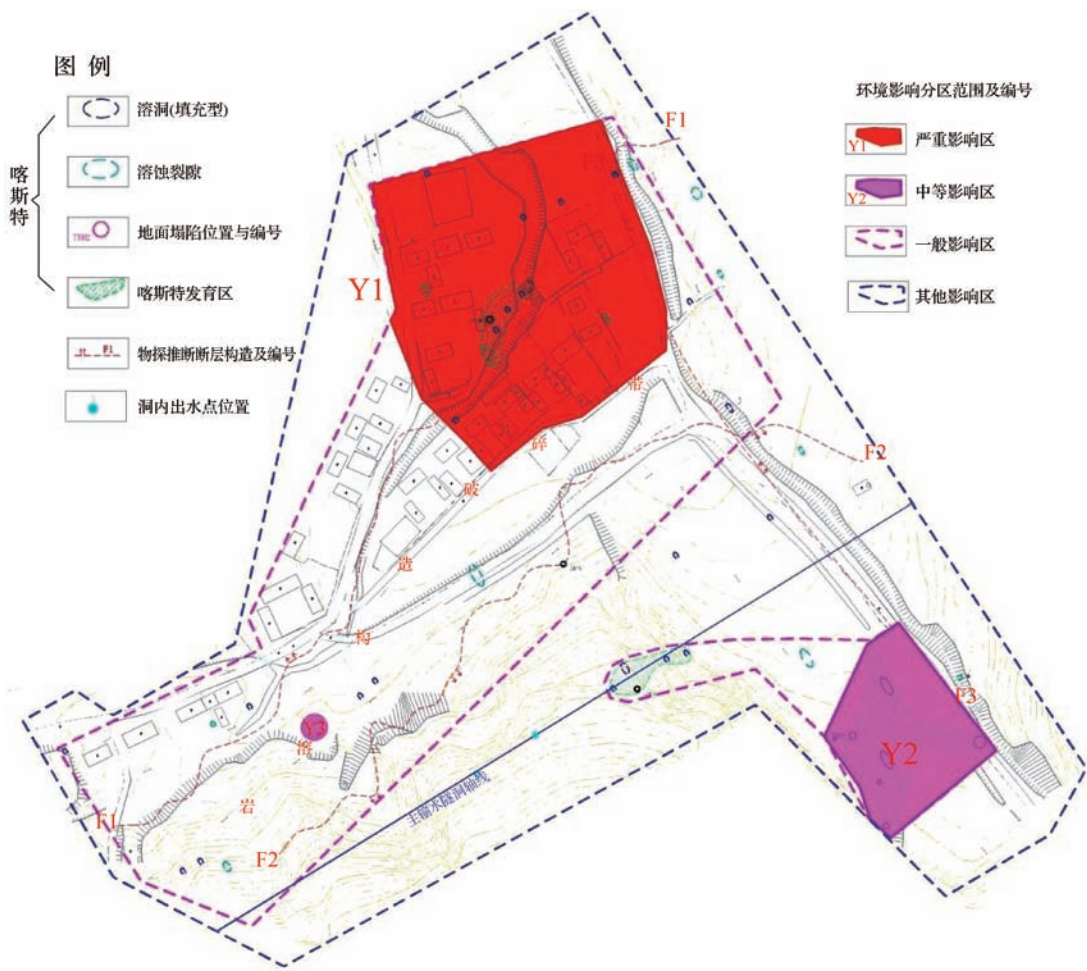


图2 地面塌陷环境影响分区

严重影响区：主要为受到影响的居民区，此区有11户居民，影响对象主要为居民房屋和村内道路。

中等影响区：为现状已经出现塌陷的耕地区域，影响对象为耕作作物。

一般影响区：若处理不及时，有可能进一步造成中等以上环境影响的区域，包括部分居民区、耕地区和林地区。

其他影响区：其他有可能产生次生影响的区域。

3 洞内外处理方案

塌陷处理的基本原则为：先洞内，后地面，同时开展长期监测。

3.1 洞内处理

本段洞室出水点上下游开挖、初期支护已完成，为保证隧洞运行检修时安全稳定，在地面出现塌陷后根据洞内出水情况及涌水压力，重新复核隧洞衬砌外水水头对隧洞永久衬砌的影响，对塌陷影响范围内的衬砌结构进行加强。

洞内涌水部位的封堵在衬砌施工完成后结合衬砌

固结灌浆对涌水点上下游洞室围岩进行加固并阻水，根据对洞轴线附近塌陷区域的影响及洞内阻水灌浆效果评价确定本洞段固结灌浆加固范围，固结灌浆由确定好的桩号两端向涌水点灌注，同时观察灌浆钻孔的出水情况，并进行固结及阻水灌浆。

3.1.1 隧洞结构设计复核

本工程段主洞为圆形有压隧洞，内径 3.9m，采用 HRB400 钢筋，混凝土强度等级为 C35，衬砌保护层厚度 50mm，衬砌混凝土结构按限裂设计，有压隧洞按限裂宽度为 0.25mm 进行限制。对工程的持久、短暂、偶然状况均应按承载极限状态设计^[4-5]，并利用电算法程序《水工隧洞钢筋混凝土衬砌计算机辅助设计软件用户手册》SDCAD5.1 进行衬砌计算，结果见表 2。

表 2 1-9 号主洞混凝土衬砌内力及裂缝计算成果

位 置	围岩类别	部 位	轴 向 力	弯 矩	裂 缝 宽 度	衬 砌 厚 度	配 筋
			N/kN	M/(kN·m)	W _{max} /mm	h/mm	A _s /mm ²
1-9 号主洞	Ⅲ	顶拱	27.9	2.1	0	300	5Φ14 单层
		底拱	70.4	0.7	0	300	5Φ14 单层
	Ⅳ	顶拱	82.5	20.2	0.19	400	5Φ22 双层
		底拱	198.4	13.3	0.04	400	5Φ22 双层

根据现场出水情况及地面物探结果，以及断层 F₂ 产状分布穿越洞室的范围及塌陷区域在地质剖面图中的投影长度，衬砌加强段需跨越上述影响范围，拟定衬砌加强段桩号为 S24 + 251 ~ S23 + 850，加强段长度

为出水点上游 120m 至下游 281m，总长度为 401m，加强段衬砌厚度不做调整，衬砌配筋由原设计单层配筋调整为双层配筋，配筋调整见图 3。

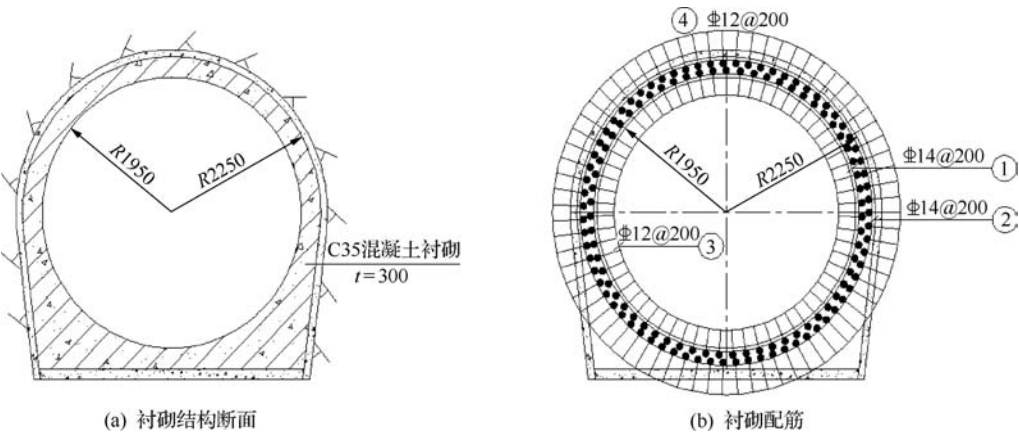


图 3 Ⅲ类加强段衬砌配筋

3.1.2 洞内灌浆设计

灌浆水泥等级不低于 P·O 42.5；拌浆水的温度不得高于 40℃，接触灌浆拌浆水的温度不得高于 20℃^[6]；砂应为质地坚硬的天然砂或人工砂，粒径不宜大于 2.5mm，细度模数不宜大于 2.0，SO₂ 含量宜小于 1%，含泥量不宜大于 3%，有机物含量不宜大于 3%；黏性土塑性指数不宜小于 14，黏粒（粒径小于 0.005mm）含量不宜少于 25%。

衬砌固结范围拟定为桩号 S24 + 130.1 ~ S24 + 180，下游灌浆长度为 50m；根据出水点上游地表物探情况及地面塌陷区域分布，上游洞室穿越 F₂ 断层，顺水流方向左侧塌陷区域较为集中，鉴于上述情况衬砌加强段为 300m，拟定固结桩号为 S24 + 130.1 ~ S23 + 930，上游灌浆长度为 200m。

固结灌浆顺序：由两端桩号 S24 + 180、S23 + 930 分别向涌水点进行分序推进，隧洞 360°全周设置灌浆孔，灌浆孔排距为 3.0m，灌浆孔每环按 60°范围垂直均布在隧洞衬砌断面上，灌浆孔每环间隔 3.0m 梅花形布置；设计孔深为 3.0m；灌浆孔径 38 ~ 40mm。灌浆孔分段、分序布置，应遵循环间分序、环内加密的原则，灌浆时应自较低的一端开始，向较高的一端推进。灌浆布置见图 4。

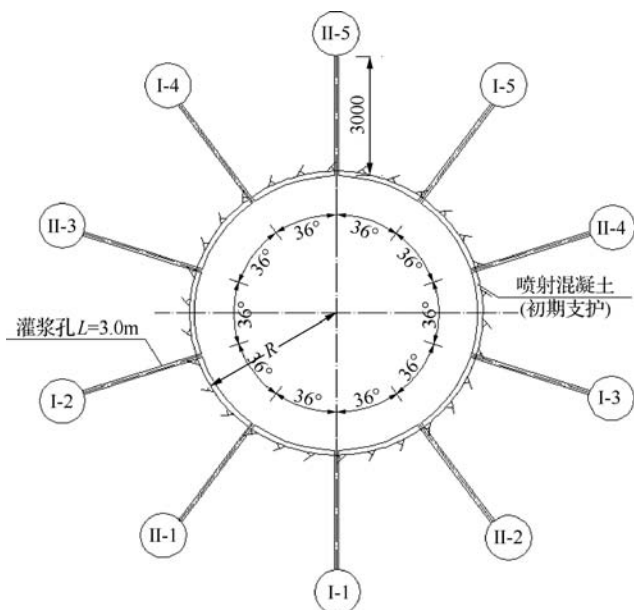


图4 灌浆布置示意图

3.2 地面处理

3.2.1 处理部位及方法

处理区为徐千户村头冲沟屯，位于范家屯水库上游左侧最大支沟的沟底，距离柴河供水主洞线约 120m 左右，居民约 17 户，有乡村公路通过。依据本区地质灾害评价及调查成果，本居民区范围内共查得溶洞 16 处，溶蚀裂隙点 9 处，地面塌坑 2 处。

根据《采空塌陷防治工程设计规范（试行）》（T/CAGHP 012—2018）和《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》（SL 62—2014）及工程特点，结合国内类似工程地面塌陷处理的工程经验^[7-9]，在居民区地面塌陷范围内采取水冲砂和充填灌浆处理方法。

3.2.2 技术要求

a. 灌孔。喀斯特和溶蚀裂隙点每处布置灌浆孔 1 个；地面塌陷坑根据其大小，每个塌陷坑布置 1 ~ 2 个充填灌浆孔，即塌陷坑中心 1 ~ 2 个水冲砂钻孔，靠近隧洞侧塌陷坑边缘 1 ~ 2 个灌浆孔。灌浆孔数结合充填情况适当进行增减。充填灌浆孔深度为 30 ~ 40m，冲砂孔深度为 20 ~ 30m。冲砂孔孔径 146mm，灌浆孔孔径 108mm。塌陷坑中心孔作为水冲砂孔，边缘孔作为充填灌浆孔。成孔方式采用泥浆护壁的回转方式。

b. 灌浆。注浆管可采用 PE 管或钢管。灌浆孔注浆管管径 89mm，水冲砂孔管径 127mm。砂浆水灰比为 0.8 : 1 ~ 1 : 1（全填充喀斯特及喀斯特孔土层部分注浆），黏土浆水土比 1.0 : 1.0，水泥砂浆水灰砂比 1.0 : 1.0 : 0.6。灌浆压力宜采取 0.05 ~ 0.1MPa。检查孔数为总孔数的 5%，根据取芯浆液充填情况直观判断注浆效果。

3.3 长期监测

采用专业的仪器设备对地表变形、居民房按 1 次/月频率进行周期性观测，准确测定地表沉降观测点的高程。通过数据处理提供地表变形观测点垂直位置的动态数据，分析掌握地质灾害的地表变形动态，并预测发展趋势。

3.3.1 沉降监测网布设

本工程监测基准网由3个基准点和2个工作基点组成,以“辽西北供水二期工程柴河供水一至四标施工控制网复测成果”(简称“柴河供水控制成果”)为基础,“柴河供水控制成果”中1-9号支洞和竖井高程控制点C9-3、SJ2、SJ3作为基准点,C9-1、C9-2作为工作基点。使用DNA03数字水准仪及与之匹配的钢瓦水准尺按三等水准精度进行测量,沉降监测网布设成三等水准闭合环,以工作基点C9-1为起算点,将建造的沉降观测点均纳入网中,以工作基点C9-2为检核点。

3.3.2 制定预警方案

成立以项目法人为首的应急管理机构,根据本项目的实际情况,以及施工期和施工后期塌陷影响风险程度不同,按施工期和施工后期两个阶段制定应急处理预案,以工程措施为主、非工程措施为辅的基本原则进行处置,确保居民人身财产安全和工程安全。

4 结 语

a. 由于水工隧洞出现突泥、涌水,导致地面出现塌陷问题,应从工程地质、水文地质、地形地貌、洞内涌水处理情况、突泥性状等多重方面分析产生原因。

b. 因水工输水隧洞突泥、涌水导致地面塌陷时,

(上接第9页)

6 结 语

目前,水泵机组垂直同心“激光测距定值法”技术,已在江都第一抽水站机组检修中得到实践运用,根据检修现场实测数据,形成实时连续波形,自动确定测量数值并进行运算,直接给出科学调整决策,指导机组安装或抢险维修人员高效率完成任务,显著提高了机组垂直同心测量调整的效率和准确率,符合新时代“世界一流,国内领先”水利现代化建设创新发展要求。▲

要从洞内外两方面采取处理措施,洞内采取加强二次衬砌及固结灌浆强度措施,洞外采取水冲砂与灌浆相结合措施。

c. 塌陷处理完成后,本着人民生命财产安全至上原则,加强后续检测,并制定应急预案,从工程措施、非工程措施等多方位提供保障。▲

参考文献

- [1] 宫昆峰. 浅谈岩溶地区地面塌陷及处理[J]. 岩土工程界, 2004(12): 56-58.
- [2] 张广杰. 岩溶地区桩基施工时地面塌陷分析及处理[J]. 建筑技术, 2022, 53(2): 160-163.
- [3] 哈顾, 孙志学. 辽西北供水工程项目使用林地对医巫闾山自然保护区影响可行性分析[J]. 新农业, 2019(19): 87-88.
- [4] 中华人民共和国水利部. 水工隧洞设计规范: SL 279—2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 18-22.
- [5] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范: SL 191—2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [6] 丁威, 冷发光, 赵文春. 《混凝土用水标准》JGJ 63—2006 主要技术指标修订说明[J]. 粉煤灰, 2007(1): 42-43.
- [7] 洪健. 某立交泵站地面塌陷问题分析及处理[J]. 四川建筑, 2022, 42(2): 281-282, 285.
- [8] 陈丹, 任卫波. 广东省英德市岩溶地面塌陷勘察与治理[J]. 西部资源, 2022(2): 77-79.
- [9] 李容. 广州白云区某高速桥梁桩基地面塌陷成因分析及处理[J]. 资源信息与工程, 2019, 34(1): 155-156.

参考文献

- [1] 郝金贵, 段红波, 曹显勇. 东侯峪水电站1号机组检修调整[J]. 中国水能及电气化, 2013(5): 53-55.
- [2] 刘国华. 简述水泵检修中同心度校正的方法及技巧[J]. 广东水利水电, 2008(1): 85-87.
- [3] 徐国焕. 高抗渗抗裂保护层在泵站屋面抗渗中的应用分析[J]. 中国水能及电气化, 2020(7): 10-13.
- [4] 沈欣. 基于泵站机组安装的垂直同心计算调整系统[J]. 治淮, 2017(3): 29-31.
- [5] 李渭杰. 小型水电站机组与闸门的联动控制研究[J]. 中国水能及电气化, 2021(10): 26-29.
- [6] 缪宜江, 夏晶. 南水北调东线一期工程开始全线试运行[J]. 江苏水利, 2013(11): 5.
- [7] 张敏, 岳继灵, 刘淑萍. 嘉祥县南水北调干线灌排影响处理探讨[J]. 中国水能及电气化, 2021(5): 56-60.

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.10.04

绳索取芯技术在活动性断裂带中的应用研究

李鹏伟

(中铁十八局集团第二工程有限公司, 河北 丰润 064000)

【摘要】 为解决隧洞内极软岩、破碎散体结构、泥质等地层在超前地质预报钻探取芯的技术难题, 文章应用金刚石绳索取芯钻进工艺和无固相泥浆技术对狮子山隧洞穿越 F_{16} 活动断裂带进行水平深孔取芯钻探。结果表明: 绳索取芯技术在破碎或极软岩地层隧洞的超前水平钻探中能够有效钻取岩芯, 采取率大于 80%; 金刚石绳索取芯工艺和无固相泥浆钻探技术能够确保钻孔区域范围内的岩芯所包含的地质信息不失真, 有利于提高特殊不良地质洞内钻探结果的准确性与可靠性。研究结果对狮子山隧洞及类似工程的断层破碎带勘探或超前钻探地质预报具有一定的借鉴和参考作用。

【关键词】 引水隧洞; 超前钻探; 绳索取芯钻进技术; 活动断裂带

中图分类号: U456.3

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-016-06

Research on Application of Wire-line Coring Technique in Active Fault Zone

LI Pengwei

(The Second Engineering Co., Ltd. of China Railway 18th Bureau Group, Fengrun 064000, China)

Abstract: The diamond wire-line coring drilling technology and solid-free mud technology are adopted in the paper for horizontal deep hole coring and drilling in Shizishan Tunnel crossing F_{16} active fault zone in order to solve the technical problems of advance geological forecast drilling and coring in strata such as extremely soft rock, broken bulk structure, mud, etc. in tunnels. The results show that the wire-line coring technology can be used for effectively drilling the rock core in the advance horizontal drilling of the broken or extremely soft rock strata tunnels. The coring rate is more than 80%. Diamond wire-line coring drilling technology and solid-free mud drilling technology can ensure that the geological information contained in the rock core within the drilling area is not distorted, which is conducive to improve the accuracy and reliability of drilling results in special poor geological caves. The research results can be used as reference in the fault fracture zone exploration or advance drilling geological prediction in Shizishan tunnel and similar projects.

Key words: diversion tunnel; advance drilling; wire-line coring drilling technology; active fault zone

活动断裂带具有特殊活动性, 长期处于活动状态 的断裂带在几百万年下将产生超过几十厘米甚至几十

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 李鹏伟 (1991—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水利水电工程建设管理工作。

米位移^[1-2]。活动断裂一般为区域控震构造，地震活动强烈，可能发生破坏性地震或位错等问题。由于多数工程竣工时间距今较短且获得的监测数据有限，如何科学地解决这一工程难题，国际上尚未取得共识^[3-5]。

隧洞穿越活动断裂具有地质复杂、多重灾害叠加的特点。国内外针对隧洞跨越活动断裂构造的重点研究内容为工程结构抗断问题，归纳总结为“超挖、铰接、隔离消能”3种设计基本理念。在前期设计勘测阶段，对活动断裂特性与位置推测常存在一定偏差，因此需在开挖揭露之前进行补勘，掌握其规模、工程地质特征以及活动性质，为防震抗震设计和安全施工提供科学的依据。目前隧洞穿越不良地质的超前地质预报技术方法的研究和应用已经比较系统全面，超前钻探作为预报的一种常规方法，具有直观反映钻孔所经过部位的岩层岩性、岩体完整程度、裂隙发育程度与地下水情况等优点。普遍使用的冲击钻探具有占用作业时间少等优点，但在复杂地质条件下钻进工作参数所包含的地质信息易失真，难以从中有效提取。因

此探究一种适用于软弱破碎区的复杂地层取芯技术显得极为重要。

本文以滇中引水狮子山隧洞 F₁₆ 活动断裂带为研究对象，对极软岩、断层泥等不良地质体的水平深孔钻芯取样探测方法及其赋存特征进行深入研究，为下一步施工措施制定提供技术资料和理论支撑。

1 工程概况

狮子山隧洞跨越 F₁₆ 程海—宾川活动性断裂带（见图1）。断裂为 Q₃ 晚更新世活动性断裂，上盘残留较高的构造应力，岩体产生极严重挤压变形。岩体结构破碎（ $R_b < 2\text{MPa}$ ， $K_v < 0.15$ ），主要呈散体结构，断层带岩体呈泥包石状（ $R_b < 2\text{MPa}$ ），泥化夹层发育普遍。地下水位高出底板 67m，断层带中等透水。围岩强度应力比 0.03，岩石强度应力比 0.17。预测 F₁₆ 活动性断裂 100 年水平位错量为 1.7m（范围值为 1.3~1.7m），垂直位错量 0.3m，隧洞存在抗剪断问题。

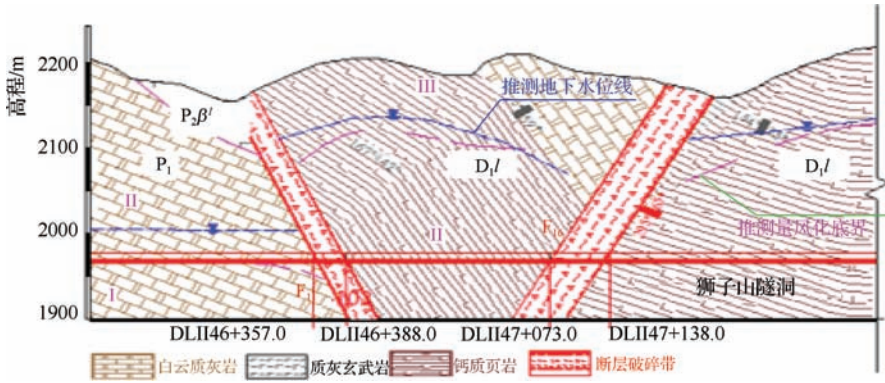


图1 F₁₆活动断裂地质纵断面

2 绳索取芯法

超前钻探预报法适用于探测前方突泥、突水、断层等地质灾害^[6]。隧道及地下工程洞内超前钻孔探测应用绳索取芯钻探技术，相对其他地质钻芯取样方法具有适用软弱破碎围岩、采取率高、减少钻进时间、机械化程度高的特点。

2.1 取芯钻具

绳索取芯钻具由外管总成和内管总成组成^[7]。外管总成由外管、内管扶正器、钻头等组成，直接与钻杆相连，通过钻头进行钻进施工。内管总成由矛绞链式头机构、泵送机构、弹卡定位器、到位报讯器、岩芯堵塞报警器、内管保护结构和调节机构等组成。附属工具包括钻杆、取芯绞车、钻杆夹持器。

壁，松散、完整地层钻进采用优质钻井液（无固相泥浆）进行护壁，以确保钻孔施工的安全和高效。开孔孔径不小于95mm，终孔口径不小于75mm；满足设计和施工技术要求，开孔和终孔及换径皆须测量钻头内径，每次提升钻具应观察钻头是否变形，变形应换钻头，保证岩芯直径与钻头直径相吻合，以利于地质样品的采集。

c. 钻进参数。钻进参数包括钻压、转速和泵量^[10]，绳索取芯钻进效率取决于选择合理的钻进参数。应用绳索取芯钻进技术在隧洞洞内极软岩、断层等不良地质进行水平深孔钻芯补勘的工况研究案例极少。因此，在实施阶段钻进参数应通过现场试钻确定，其原则为：①在软弱围岩地层适当控制钻压和转速：钻压6~10kN，转速300~500r/min；当钻进钻破碎岩层钻具跳动大时，应采用低钻压、低转速、较大泵量钻进；②每回次控制在1.0~1.5m；③泥浆泵量的选择：较小的泵量和较高的泵压是绳索取芯钻进的要求，泵量控制在30~60L/min，泵压小于3MPa。

d. 泥浆性能。泥浆性能是制约复杂地层应用绳索取芯钻探施工成败的关键因素，也是安全钻探中的必要措施。根据地质条件、钻进速度等确定应用高黏无固相泥浆，其主要功能是：起到护壁作用，保证孔壁稳定；起到保护岩芯作用；清洗孔底，携带岩屑；冷却、润滑钻头和钻具；控制和平衡地层压力等。

泥浆要达到这些功能的表观指标主要有泥浆比重、黏度、失水量、pH值等^[11]。

根据F₁₆活动断裂主要地层岩性为钙质页岩，具有围岩强度极低、松散破碎，夹有断层泥且对水敏感，遇水崩解泥质化等工程特点，选配水敏抑制性泥

浆^[12]，采用特级植物胶、聚丙烯酰胺等配置。经过现场试验选择最佳配比浆液性能：密度1.02~1.06kg/cm³，黏度22~24s，失水量6.6~8mL/30min，pH值8.0。该泥浆护壁效果好，能对孔壁和岩芯起到很好的保护作用，流动性好、携粉能力强、润滑性好，充分发挥了聚丙烯酰胺的絮凝作用和植物胶的黏弹性和润滑减振作用^[13]。

3.3 钻探成果分析

3.3.1 掌子面地质

现场进行水平深孔钻芯工作面桩号为DLII47+028.5，揭示地质见图3。该段处于F_{III-102}与F₁₆构造夹持破碎带，围岩岩性为钙质页岩、炭质页岩，属极软岩，局部经构造动力作用变质，出现糜棱岩化特征；受构造挤压影响，软弱挤压泥化夹层发育，主要有4组结构面，岩体破碎，呈散体结构，顶拱及掌子面发育线状流水。该段隧洞埋深约233m，先期应力荷载强，开挖后受应力释放影响，围岩承受的变形松弛荷载较强，岩体遇水软化严重，围岩极不稳定。



图3 DLII47+028.5 开挖揭示的围岩地质情况

3.3.2 钻孔取芯情况

a. 钻孔布置见表1。

表1 钻孔布置参数一览

孔号	开孔位置	孔径/mm	设计孔深/m	是否取芯	终孔孔深/m
ZK1	中心线位置，拱顶下2.0m	95	150	全孔取芯	60
ZK2	拱顶下6.0m，中心线左侧4.0m	95	150	全孔取芯	62.54
ZK3	拱顶下6.0m，中心线右侧4.0m	95	100	全孔取芯	81.45

b. 钻孔结构。开孔采用130mm口径钻进3.50m，下入3.86mφ127井口套管护壁。第二级口径采用

95mm 金刚石绳索取芯钻进取芯至终孔。上部复杂坍塌孔段采用 110mm 口径扩孔后下入 $\phi 108$ 套管护壁。为保证岩芯采取率及钻孔安全，全孔钻进冲洗液采用高黏无固相泥浆。

c. 钻孔描述。钻孔孔深：ZK1、ZK2、ZK3 号钻孔终孔深度分别为 60m、62.54m、81.45m。岩芯采取率：钻孔采取全孔取芯，平均岩芯采取率大于 80%（代表性岩芯见图 4）。

孔深校正：孔深校正误差小于 1‰。

岩芯描述：主要描述内容为颜色、岩石单层厚

度、结构构造、矿物成分、填隙物、圆度及分选性、胶结类型与胶结物、结核及包裹体、层面构造与层理特征、裂隙节理及断口、对盐酸的反应、条痕光泽、坚硬程度等。例如样品箱标号 3：18.93 – 20.16（总进尺 1.23m/芯样长度 1.06m）– 20.66（总进尺 0.5m/芯样长度 0.4m）– 21.06（总进尺 0.4m/芯样长度 0.3m）。灰黑色、细—中颗粒，夹少量泥质物，次圆状颗粒；岩石取样滴盐酸试验，气泡丰富，判定为白云质灰岩。

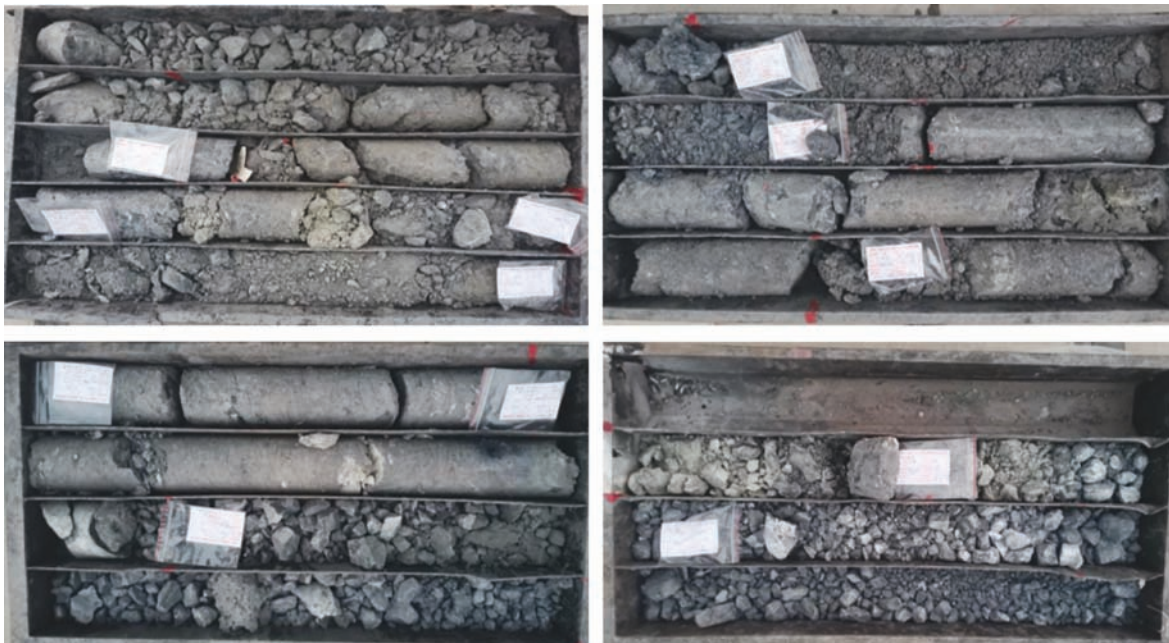


图 4 现场钻芯取样情况

d. 钻探成果。DLII47 + 028.5 向下游方向（掌子面左侧 81.45m，掌子面右侧 63.15m）钻孔取芯及芯样分析：

根据钻孔揭露情况，隧洞掌子面前方 0 ~ 80m 主要为炭质页岩，软弱破碎；夹断层泥（灰黑色或杂色黏土）、压碎岩（泥包石状）、碎裂岩（白云质灰岩）。

钻孔深度 1.8m 时有裂隙水流出，钻孔终孔总出水量约 0.05L/s，水无色无味。

根据取芯钻孔揭露，从桩号 DL II 47 + 056 开始进

入 F_{16} 活动断裂带。构造挤压破碎带发育，岩体破碎，呈碎裂—碎屑散体状结构，岩屑夹泥充填，局部发育软弱泥化夹层，隧洞掘进过程中，掌子面及顶拱易发生掉块、塌方失稳破坏，存在滴水—渗水现象，围岩极不稳定，断层破碎带存在涌水突泥风险。

4 结 语

本文依托滇中引水工程狮子山隧洞，对断层破碎带的钻芯技术进行研究。得到如下主要结论：

a. 钻探取芯直接揭露隧洞前方地质条件是最直观的超前地质预报方法。现场钻芯结果表明绳索取芯

钻进工艺是解决在极软岩、破碎散体结构、泥质等地质层难以钻取合格岩芯问题的关键技术手段。

b. 现场应用研究表明科学的钻进参数和优质的泥浆性能是复杂地层绳索取芯钻探施工成败的控制要素,也是安全钻探中的必要措施。

c. 绳索取芯钻进工艺和高黏无固相泥浆技术在狮子山隧洞 F_{16} 活动断裂带中的试验的应用,证明了该工艺和技术在隧洞超前钻探地质预报的适用性,为类似工程提供了方法支撑。▲

参考文献

- [1] 罗睿洁,吴中海,黄小龙,等.滇西北宾川地区主要活动断裂及其活动构造体系[J].地质通报,2015,34(1):155-170.
- [2] 黄小巾,吴中海,黄小龙,等.滇西北程海—宾川断裂带第四纪分段活动性的构造地貌表现与限定[J].地球科学,2018,43(12):4651-4670.
- [3] 张建,陈宏斌,王永刚,等.隧道穿越活动断层抗位错量研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(S1):297-302.
- [4] 周云,房艳国,王家祥,等.滇中引水工程穿过活动断裂防震抗震思路研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(S1):

7-11.

- [5] 谷柏森,吴行,韩光钦.隧道穿越活动性断层处置技术的探讨[J].现代交通技术,2015,12(4):64-67.
- [6] 中国铁路总公司.铁路隧道超前地质预报技术规程:Q/CR 9217—2015[S].北京:中国铁路总公司,2015.
- [7] 彭得利.一种新型坑道水平绳索取芯钻具的设计[J].世界有色金属,2020(18):162-163.
- [8] 谢玉萍,王颂,杨鸣,等.绳索取芯钻进技术在深埋隧道勘察孔中的应用[J].人民长江,2015,46(21):58-60.
- [9] 赵鹏宇.公路山岭隧道超前钻探地质预报研究[D].西安:长安大学,2014.
- [10] 金水源,张红纲,傅克登,等.绳索取芯和液压式压水试验技术在水利工程地质勘探中的联合应用[J].工程勘察,2018(S1):257-262.
- [11] 张杰.绳索取芯工艺在景泰郭家台项目施工的泥浆技术研究与应用[J].煤,2016,25(3):14-16.
- [12] 张芳寅,闻义.浅谈绳索取芯钻机在复杂岩层中的施工方法[J].江西地质,2017(18):314-316.
- [13] 李华志,宋桂红,高阳,等.白鹤滩厂房错动带的KL植物胶钻孔取芯方法[J].工程勘察,2019,47(4):12-17.

(上接第46页)评定优良,下步将申报“瓯江杯”“钱江杯”“大禹奖”等奖项,实现工程优良。

5 结 语

EPC 总承包模式,有利于对项目成本和风险进行控制,从项目的规模、功能、工艺流程、设备材料选型、成本控制等方面进行全面细致的分析,树立优化意识,在满足业主要求的前提下尽可能采用优化方案,降低造价,提高效率,缩短工期,确保 EPC 项

目顺利实现工程预期目标。▲

参考文献

- [1] 陈等红,陈璐.EPC 总承包模式下总承包项目如何实施设计管理[J].建筑工程技术与设计,2016(28):126-128.
- [2] 罗春成.建筑行业 EPC 总承包模式业主管理重难点分析[J].中华建设,2019(23):52-53.
- [3] 王江.EPC 总承包模式下建筑工程管理的优化方法分析[J].建筑·建材·装饰,2020(1):64-65.

科学研究

三相短路电流计算程序在水利工程中的应用

薛 媛

(湖北省水利水电规划勘测设计院, 湖北 武汉 430070)

【摘 要】 在电气主接线方案设计、电气设备和导体选择中, 都需要进行短路电流计算。针对目前短路电流计算程序所需原始数据较多、不适用于水利工程前期设计阶段的问题, 文章提出以电力网络的数学模型为算法的理论支撑, 运用 VB 编程技术, 实现三相短路电流计算算法并加以阐述, 通过实际工程案例, 介绍该三相短路电流计算程序的操作方法和优越性。实践证明, 程序操作简单, 结果准确可靠, 值得推广与应用。

【关键词】 短路电流计算; 数学模型; 程序推广及应用

中图分类号: TM711

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-022-05

Application of Three-phase Short Circuit Current Calculation Program in Water Conservancy Project

XUE Yuan

(Hubei Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan 430070, China)

Abstract: It is necessary to calculate the short circuit current during main electrical wiring scheme design, electrical equipment and conductor selection. Aiming at the current problems that too much original data is required for short circuit current calculation program, which is not suitable for the preliminary design stage of water conservancy projects. The mathematical model of the power network is adopted as the theoretical support of the algorithm in the paper. VB programming technology is used for realizing and describing the three-phase short circuit current calculation algorithm. The operation method and superiority of the program for calculating three-phase short-circuit current are introduced through practical engineering cases. Practice shows that the program is simple in operation, the result is accurate and reliable, which is worthy of popularization and application.

Key words: short circuit current calculation; mathematical model; program promotion and application

收稿日期: 2022-04-11

作者简介: 薛媛 (1985—), 女, 本科, 工程师, 主要从事水利工程电气设计工作。

电力系统在运行中会产生各种系统故障，其中最严重的一种就是电力系统短路。在实际工作中，涉及有关电力系统和电气设备设计的内容，特别是在电气一次主接线方案设计、电气设备和载流导体选择、电气二次继电保护的选择和整定计算等方面，都需要进行短路电流计算。

工程设计人员进行电气方案设计中，通常是采用《电力工程电气设计手册》中的“短路电流计算”方法来计算。此方法为人工计算，不但计算工作量大，而且在进行Y/△变换及有环形网的网络化简时极易出错，效率不高。

目前市面上《短路电流计算程序》很多，功能也很强大，但所需要的原始数据较多，这些数据在水利工程可行性研究阶段和初步设计阶段很难收集齐。另外这些“程序”推广使用需要进行专门的培训，一段时间不使用又会遗忘。这些“程序”不能被广大电气设计人员所采用。因此，开发一种既适用于工程实际设计阶段又方便设计人员操作的短路电流计算程序显得重要而紧迫。

1 三相短路电流计算程序的研发

1.1 数学模型的建立过程

我们研究电力系统运行状态时通常会将其转换成数学问题，并通过建立数学模型来分析描述。短路电流计算一般用恒定参数的电路表示线路和变压器，用给定电势源的恒参数支路表示发电机，用恒定阻抗表示负荷，这样电力系统的等值网络就转化成了一个线性网络，而线性网络的数学模型为一组线性代数方程组。我们在进行短路电流计算时，需要将原始数据转换成与线性代数方程相对应的形式，即形成节点导纳矩阵。

具体做法是先将各电气节点（母线）编号，然后将网络中各支路（如变压器、电抗器、线路等）化成标么值再编号。最后将发电机及系统编号。计算方法是先把网路中的电压源化成电流源，并以标么值的形式注入对应的节点上。网路中各支路采用导纳，根据注入各节点电流的代数和为零，可以列出下式：

$$\sum Y_{ij}(V_i - V_j) + Y_{ji} - I_i = 0 \quad (1)$$

式中 Y_{ij} ——两节点之间的导纳；

V_i, V_j ——节点电压；

$I_i = \frac{1}{X_{ji}}$ ——注入节点的电流；

X_{ji} ——电源的内阻。

整理上式得

$$[Y][V] = [I] \quad (2)$$

式中 $[Y]$ ——已知的 $n \times n$ 阶方阵；

$[I]$ ——已知的 $n \times 1$ 阶列阵。

该方程组为线性方程组。可用高斯消去法或约当消去法求解，求出 $[V]$ $n \times 1$ 阶列阵，即各节点的 V_i, V_j 电压值。按串联电路中电流处处相等的原理，第 i 节点上的电源点到 D 点的直连电抗为

$$X_z = X_{id} + X_i = X_i \left(\frac{1}{1 - V_i} \right) \quad (3)$$

从上式的推导可知，在同一网络中，由于电源点注入的电流值不一样，该节点的电压就不同，直连电抗值也就变了。求得直连电抗后，再查曲线即可求得有名值。

1.2 数学模型的程序实现方法

1.2.1 节点编号顺序优化

根据《电力系统分析》相关章节的知识，我们知道节点的编号反映了高斯消去法的消元次序，也代表了星网变换时的节点消去次序。为了减少注入元的数目，我们应该尽量避免先消节点出现大量新增支路的情况，所以节点编号顺序优化的原则是消去时增加新支路最少的节点应该优先编号。

优化编号分为静态和动态两种，如果网络的原始接线图算出每一节点的连接支路数或新增支路数在整个编号过程中保持不变，则称这种优化编号为静态的；如果在节点编号过程中，每消去一个节点，未消节点的连接支路数或新增支路数都要随着网络接线的变化而进行修改，则称这种优化编号为动态的。

本文介绍的三相短路电流计算程序采用半动态优化处理。首先对出线最少的节点优先编号，当节点未编号时，未去掉支路节点编号小的先编。接着对节点

出线数相等，与所消去节点相连的节点先编，若均与已编号节点相连，则与先编号节点相连的先编。最后将已编号节点相连的所有支路去掉，加上注入元支路，再对出线最少的节点编号。

1.2.2 因子表法求阻抗矩阵和电流

首先将等值网络的原始数据形成节点导纳矩阵，只存上三角元素（电力系统为对称矩阵），节点所有相连的阻抗倒数（节点的自导纳）为三角的对角元素；节点间的阻抗倒数（节点的互导纳）为三角形的非对角元素。此时节点电压方程为

$$\mathbf{I} = \mathbf{YV} \quad (4)$$

式中 \mathbf{I} ——节点注入电流列向量；

\mathbf{V} ——节点电压列向量；

\mathbf{Y} ——节点导纳矩阵。

因为

$$\mathbf{Z} = 1/\mathbf{Y} \quad (5)$$

则导纳矩阵的逆矩阵（阻抗矩阵）为

$$\mathbf{V} = \mathbf{ZI} \quad (6)$$

由上式可知，当电流为单位值时，节点电压即节点阻抗。

在不计负荷（或负荷短路电流小得多）的简化短路电流计算中，假定故障前节点电压标幺值为 1，并忽略正常通过支路的电流，相当于计算发电机电势为零，仅在故障点加一极性相反标幺值为 1 的电势时的故障点短路电流。

由式（6）：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots \\ z_{21} & z_{22} & \cdots \\ z_{31} & z_{32} & \cdots \\ z_{41} & z_{42} & \cdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix}$$

可知故障点短路电流 $I_d = \frac{-1}{Z_{dd}}$ （ Z_{dd} ——节点 d 的自阻抗，倒数为自导纳）。

任一支路电流为

$$I_{ij} = \frac{Z_{id} - Z_{jd}}{Z_{ij}} \cdot \frac{-1}{Z_{dd}} = \frac{Z_{id} - Z_{jd}}{Z_{dd}} y_{ij} \quad (7)$$

式中 Z_{id} ——节点 i 与节点 d 的互阻抗，阻抗 \mathbf{Z} 矩阵 d 列元素；

Z_{jd} ——节点 j 与节点 d 的互阻抗，阻抗 \mathbf{Z} 矩阵 d 列元素；

y_{ij} ——节点 i 与节点 j 的互导纳。

我们仅需解得元素 Z_{id} , Z_{jd} , Z_{dd} ，即可求得电流。这些元素都处于阻抗 \mathbf{Z} 矩阵 d 列，可以通过式（8）对 \mathbf{Y} 求解 d 列逆阵。

$$\mathbf{YZ}_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

对短路点取 1 求解 y 逆，就是因子表在给定短路点 1（其余点为 0）的回代过程，得短路点的 d 列元素。

短路点电流即 $\frac{1}{Z_{dd}}$ 。

同理，分支电流按公式简化为

$$I_{jd} = \frac{Z_i - Z_j}{Z_{ij}} \frac{1}{Z_{dd}} \quad (9)$$

式中 Z_i , Z_j , Z_{dd} ——求逆中的 d 列元素；

Z_{ij} ——相应回路的阻抗。

每个电源点供给的短路电流为短路点与电源点的连接阻抗，即电源支路的自阻抗 Z_{ij} 。

1.2.3 求计算电抗

将电源支路电流的倒数（转移电抗）折算为以该电源容量为基准的计算电抗，通过式（10）求得计算电抗，进而求得任意时刻的短路电流值。

$$X_{js} = X_{jd} S_e / S_j \quad (10)$$

2 三相短路电流计算程序计算结果分析

选取一个具体的水利工程实例，分析三相短路电流计算程序计算结果是否正确。已知土司港泵站 10kV 系统电抗标幺值为 0.149，线路电抗标幺值为 1.37，同步电机电抗标幺值为 4.275，得到泵站系统阻抗图（见图 1）。

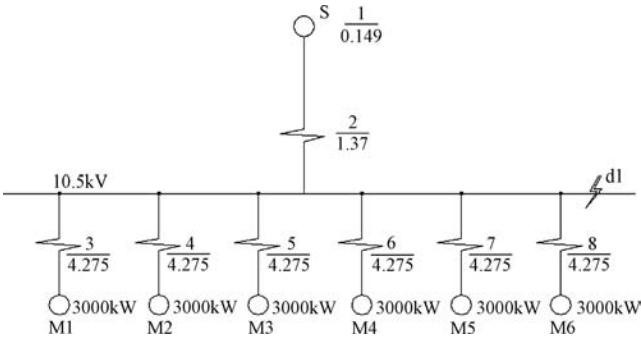


图1 泵站系统阻抗

将短路容量和各电源点至节点的电抗标么值等原始数据输入计算程序，通过运行程序得到系统和六台

电动机在不同时刻的短路电流值，结果见图2。

经验证，程序计算出的短路电流值和手工计算出的结果非常接近。由此可见：此程序计算结果准确可靠，计算精度满足设计要求。

3 三相短路电流计算程序的操作方法和优越性

3.1 程序的操作方法

a. 通过浏览器登录网站 <http://192.168.114.79/SC/index.asp>，进入短路电流计算程序界面，见图3。

计算：薛媛

短路点	电压等级	电源名称	计算电抗	额定电流/kA	I''/kA	$I_{0.1}/kA$	$I_{0.2}/kA$	$I_{0.6}/kA$	$I_{1.0}/kA$	$I_{4.0}/kA$	i_{ch}/kA	I_{ch}/kA	S_d/MVA
d-1	10.5kV	S	1.519	5.499	3.620	3.620	3.620	3.620	3.620	3.620	9.484	5.660	65.833
		M1	0.150	0.193	1.429	1.106	0.976	0.758	0.616	0.130	3.743	2.234	25.985
		M2	0.150	0.193	1.429	1.106	0.976	0.758	0.616	0.130	3.743	2.234	25.985
		M3	0.150	0.193	1.429	1.106	0.976	0.758	0.616	0.130	3.743	2.234	25.985
		M4	0.150	0.193	1.429	1.106	0.976	0.758	0.616	0.130	3.743	2.234	25.985
		M5	0.150	0.193	1.429	1.106	0.976	0.758	0.616	0.130	3.743	2.234	25.985
		M6	0.150	0.193	1.429	1.106	0.976	0.758	0.616	0.130	3.743	2.234	25.985
		合计			12.193	10.258	9.475	8.170	7.315	4.400	31.944	19.065	221.740

图2 短路电流计算结果

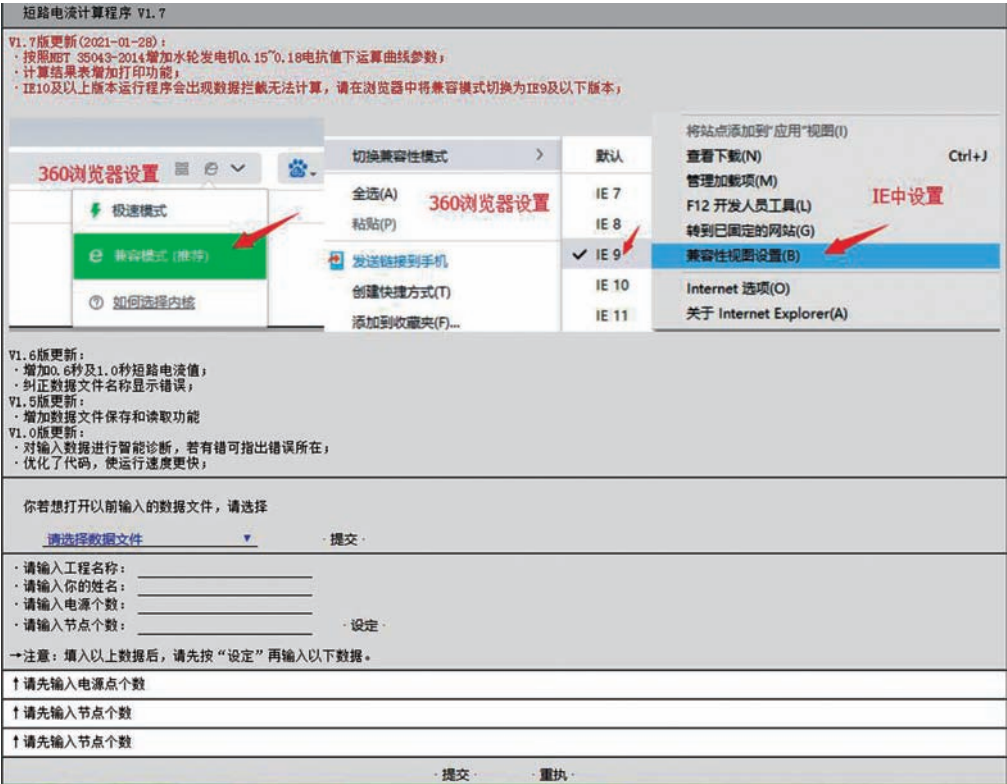


图3 计算程序界面

· 请输入工程名称:

· 请输入你的姓名:

· 请输入电源个数:

· 请输入节点个数:

· 设定 ·

→ 注意: 填入以上数据后, 请先按“设定”再输入以下数据。

→ 提示: 系统容量按100MVA考虑; 发电机电抗取 $X''_d\%$

电源点1名称: <input type="text" value="S"/>	容量 (MVA): <input type="text" value="100"/>	电源到 <input type="text" value="1"/> 号节点的电抗: <input type="text" value="1.519"/>
电源点2名称: <input type="text" value="M1"/>	容量 (MVA): <input type="text" value="3.51"/>	电源到 <input type="text" value="1"/> 号节点的电抗: <input type="text" value="0.15"/>
电源点3名称: <input type="text" value="M2"/>	容量 (MVA): <input type="text" value="3.51"/>	电源到 <input type="text" value="1"/> 号节点的电抗: <input type="text" value="0.15"/>
电源点4名称: <input type="text" value="M3"/>	容量 (MVA): <input type="text" value="3.51"/>	电源到 <input type="text" value="1"/> 号节点的电抗: <input type="text" value="0.15"/>
电源点5名称: <input type="text" value="M4"/>	容量 (MVA): <input type="text" value="3.51"/>	电源到 <input type="text" value="1"/> 号节点的电抗: <input type="text" value="0.15"/>
电源点6名称: <input type="text" value="M5"/>	容量 (MVA): <input type="text" value="3.51"/>	电源到 <input type="text" value="1"/> 号节点的电抗: <input type="text" value="0.15"/>
电源点7名称: <input type="text" value="M6"/>	容量 (MVA): <input type="text" value="3.51"/>	电源到 <input type="text" value="1"/> 号节点的电抗: <input type="text" value="0.15"/>

→ 提示: 电压等级请填写基准电压:

节点1处的电压等级 (KV):

图 4 短路电流计算程序数据输入界面

b. 在计算程序界面中输入电源点名称、短路容量等原始数据, 输入完成后点“提交”, 见图4。

c. 运行短路电流计算程序进行计算, 得出短路电流计算结果表。

3.2 程序的优越性

a. 该网络版三相短路电流计算程序在有网的环境下随时可以运行, 不受局域网的限制; 不需要安装任何软件安装包, 节省了电脑的硬盘容量。

b. 相对于其他三相短路电流计算程序, 该计算程序所需的原始数据较少, 计算前期准备工作较简单, 非常适用于工程可研阶段和初设阶段; 程序操作简单方便, 功能实用, 易懂易学, 很容易被广大电气设计人员所接受。

c. 对于水利水电行业的设计工作, 该三相短路电流计算程序从实际工作内容出发, 简化了计算过程, 减少了设计工作量, 计算精度满足设计要求。

4 结 语

近几年国家对水利行业投入的资金增大, 推进了水利基础设施建设, 同时对工程设计周期和设计质量

提出了更高的要求。针对早期短路电流采用手工计算, 工作量大且极易出错的情况, 设计院研发了这款网络版三相短路电流计算程序。程序操作步骤简单, 结果准确可靠, 值得在水利设计工作中推广和应用。

目前该程序只能进行三相短路电流计算, 不能适用于不对称短路电流的计算, 因此适用范围有一定的局限性, 在今后的研究中还需进一步升级。▲

参考文献

- [1] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析: 上册[M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [2] 李瑞荣. 短路电流实用计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [3] 陈岭, 李晓明, 舒欣, 等. 基于专家系统的短路电流计算数据库管理与优化查询[J]. 广东电力, 2007, 20(4): 50-55.
- [4] 迟瑶. 短路电流计算在当前电力设计中采用的主要方法[J]. 中国新技术新产品, 2014(9): 138.
- [5] 黄冠标. 基于 IEC60909 标准的短路电流计算软件设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [6] 唐克银, 姜泽伟, 于文蓬. 山区长距离供水工程提水泵站高压直配电方案设计[J]. 水利技术监督, 2021, 164(6): 228-231.
- [7] 王寓, 王主丁, 张宗益, 等. 国内外常用短路电流计算标准和方法的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 148-153.

白莲崖大坝渗透压力监测分析

李君廷

(安徽省临淮岗洪水控制工程管理局, 安徽 合肥 230088)

【摘要】 白莲崖水库最大坝高 104.6m, 是安徽省唯一一座百米高坝。文章对白莲崖水库大坝渗透压力 32 个测点和 7 个大坝扬压力测点监测数据进行统计分析, 结果表明, 库水位变化是大坝渗透压力的主要影响因素, 各测点的扬压水位变化平稳, 无明显异常趋势性。

【关键词】 大坝; 渗透压力; 监测; 分析

中图分类号: TV642.2

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-027-09

Monitoring and Analysis of Seepage Pressure of Lianya Dam

Li Juntong

(Anhui Linhuaigang Flood Control Project Management Bureau, Anhui 230088, China)

Abstract: Bailianya Reservoir has a maximum dam height of 104.6m, which is the only 100-meter-high dam in Anhui Province. In this paper, the monitoring data of dam seepage pressure at 32 measuring points and uplift pressure at 7 measuring points of Bailianya Reservoir are statistically analyzed. The results show that the change of reservoir water level is the main influencing factor dam seepage pressure, and the uplift water level at each measuring point changes smoothly without obvious abnormal trend.

Key words: dam; seepage pressure; monitoring; analysis

水库大坝安全运行极其重要, 对于大坝各种数据监测及分析方法, 国际和国内都有一整套的规程规定, 但是每座大坝的地理位置都有不同, 坝型、高度、地质条件等均有区别。白莲崖水库大坝监测数据有多种、多组, 如环境量监测、大坝变形监测、大坝渗流监测、坝体内部监测、泄洪设施监测等。大坝渗流监测又有渗透压力、渗漏量等监测。本文对大坝渗透压力进行定量分析, 综合评价大坝安全状态, 提出监测建议。

1 工程简介

白莲崖水库在淮河南岸主要支流淠河的主源漫水河上, 佛子岭水库大坝上游 26km 处, 东淠河流过霍山县城在下游 33km 的六安市裕安区两河口处与西淠河相会为淠河, 淠河向北流经横排头、六安市城区继续北流 130km 至寿县正阳关西南注入淮河。淠河横排头以上流域面积 4370km²。白莲崖水库流域面积 745km², 占佛子岭水库流域面积 1840km² 的 40.5%。

收稿日期: 2022-04-11

作者简介: 李君廷 (1966—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程管理、水资源调度工作。

水库于2006年5月开工建设,2009年5月下闸蓄水。

大坝为碾压混凝土坝,坝型为抛物线双曲变厚拱坝,坝顶高程234.60m,坝基高程130.00m,最大坝高104.6m,正常蓄水位208.00m,汛限制水位205.00m,设计洪水位209.24m,校核洪水位234.50m,死水位180.00m。两岸地形非对称,坝轴线与河道中心线斜交。拱坝中心线走向 $NE5^{\circ}5'29.9''$,拱冠处坝顶曲率半径右岸为189.41m、左岸为199.81m,底拱右岸半中心角 26.3060° ,底拱左岸半中心角 25.5511° ,顶拱右岸半中心角 47.5° ,顶拱左岸半中心角 39.185° ,坝顶宽8.0m,拱冠处坝底最厚处30.064m,厚高比为0.287;坝顶弧长421.860m,弧高比为4.033;弦长366.99m,弦高比为3.509。

坝体泄洪中孔共3孔;左岸单独一孔,右岸两孔平行并排布置,三孔总泄量 $3895m^3/s$ 。三道泄洪中孔下游泄槽均为滑雪道式,末端为挑流消能。泄洪底孔布置于左岸,采用“龙抬头”式无压隧洞,由闸门井、龙抬头段和下平洞三部分组成,出口末端采用挑流消能。发电引水隧洞总长1813.03m,包括进水口、洞身段、调压井三部分。电站装机 $2\times 25MW$ 。

2 工程区域地质概况

工程位于大别山在安徽境内主干山脉的北侧,其山脉和水系均明显地受区域地质构造的影响和控制,大多呈 NWW 和 NE 走向。本工程库区和坝址所在的山区,四周群峰簇拥,山体雄伟厚实,河流与冲沟切割剧烈,构成库区主河道的漫水河,自 SW 向 NE 斜切山脉,穿越于群山峻岭之中,受本区 $N50^{\circ}E$ 与 $N70^{\circ}W$ 两组主要断裂控制而迂回曲折。两岸近河山脊高出河水面200~300m以上,谷坡陡峻,坡角一般在 30° 以上,亦有达到 50° 的,局部可出现悬崖,坡积覆盖层厚一般0~2m;河床狭窄,坡降较大,急流浅滩多,近代冲积物零星浅薄,只在河流拐弯的凸岸一侧,有1~3m厚漂石、砂卵石组成的狭长滩地。

坝址区出露基岩岩性主要为前震旦系水竹河组角

闪斜长片麻岩以及燕山期细粒花岗岩两种,为坚硬岩石。在花岗岩与片麻岩中尚分布有灰黄夹绿色蚀变岩石,大部分受构造影响,沿断裂构造分布,在新鲜时强度较高,岩体完整,为中硬岩石,但抗风化能力较差,出露在地表一般为强风化。

3 扬压力监测资料分析

白莲崖大坝共设有32个大坝渗透压力监测测点,其中P-01-P-11为坝基纵断面渗压计,从11坝段到1坝段方向,每个坝段依次布置一个;P-12-P-21为坝基横断面渗压计,从坝踵到坝趾方向,6号坝段依次布置P-12-P-15,5号坝段依次布置P-16~P-18,4号坝段依次布置P-19-P-21;P-22-P-32为坝体渗压计,在6号坝段从上游坝面至下游坝面方向,于高程141.00m处依次布置P-22-P-26,于高程172.00m处依次布置P-27-P-29,于高程195.00m处依次布置P-30-P-32。其中P-12-P-32系列起止时间为2008年1月11日—2017年9月7日,P-01-P-11系列起止时间多为从2009年开始,2017年9月7日结束。由于仪器故障,P-04与P-11两个测点测值失效,有效测点30个。

白莲崖大坝共设有7个扬压力监测测点,测孔布置在3号坝块~9号坝块内,测孔编号为UP-I~UP-7。从2009年开始基本每天监测1次。各测孔监测起止时间为2009年4月15日—2017年9月7日。

大部分数据测值都存在突起突降现象。

对大坝监测资料进行整理,绘制扬压力测点实测过程线(见图1~图16)。

3.1 扬压力监测资料变化规律分析

a. 大部分测点在2008年测值较低,2009年时扬压力上升,之后稳定在一定范围内,主要受库水位的影响,随库水位的升降而升降。2010—2017年间,扬压力受温度变化影响较大,温度升高,扬压力降低,反之温度降低,扬压力升高。UP-5测点在2011年有一个突降,可能是排水孔堵塞所致。

29

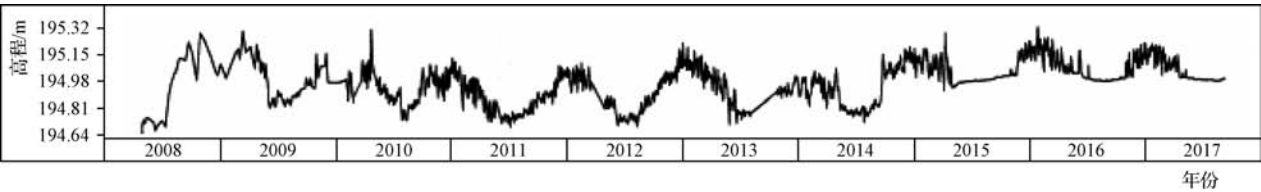


图3 扬压力 P-01 测点实测过程线

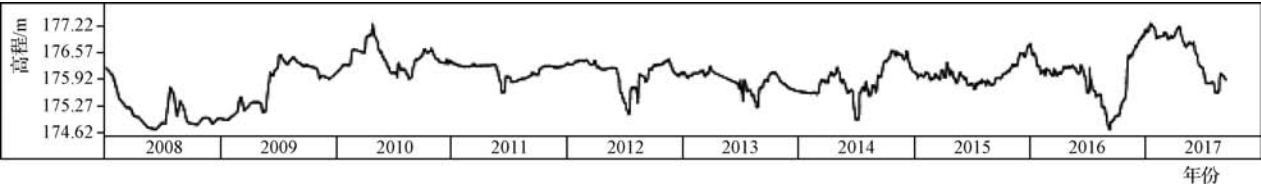


图4 扬压力 P-02 测点实测过程线

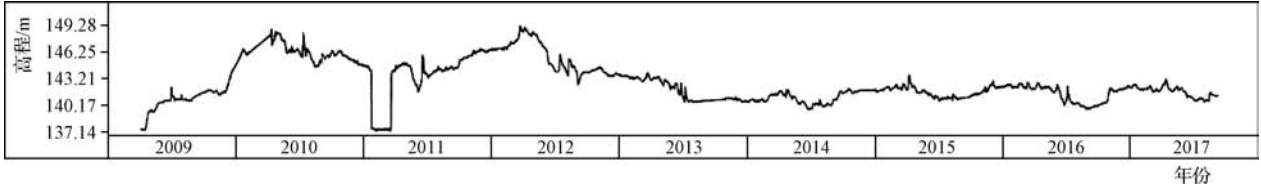


图5 扬压力 P-05 测点实测过程线

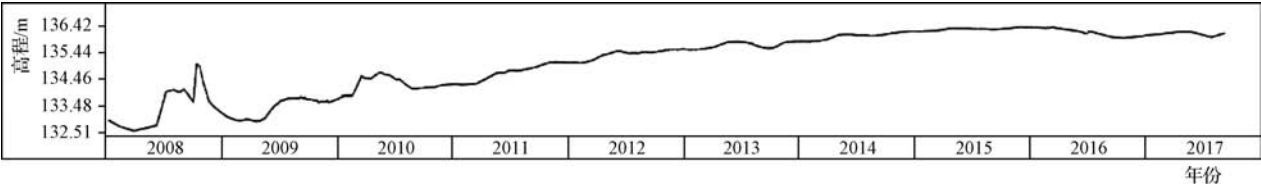


图6 扬压力 P-21 测点实测过程线

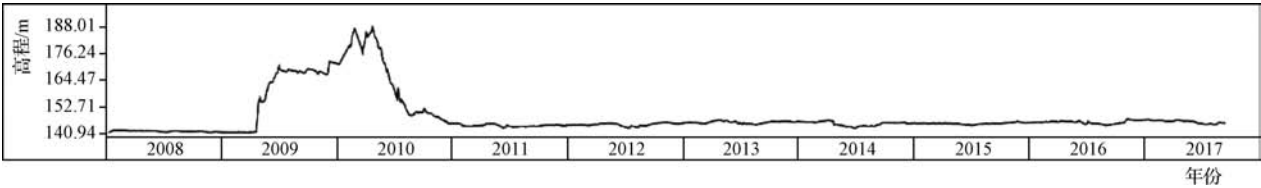


图7 扬压力 P-22 测点实测过程线

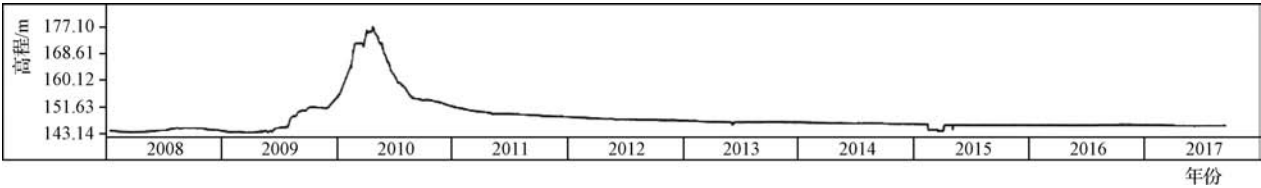


图8 扬压力 P-23 测点实测过程线

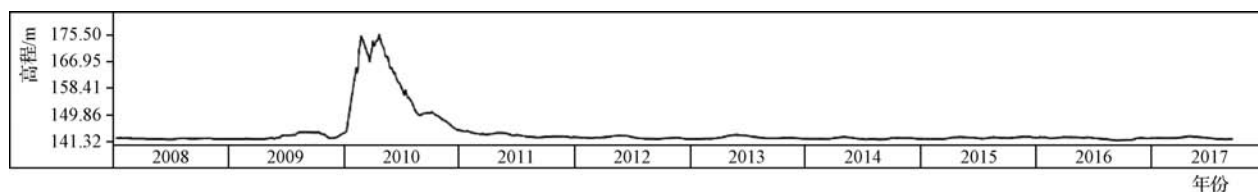


图9 扬压力 P-24 测点实测过程线

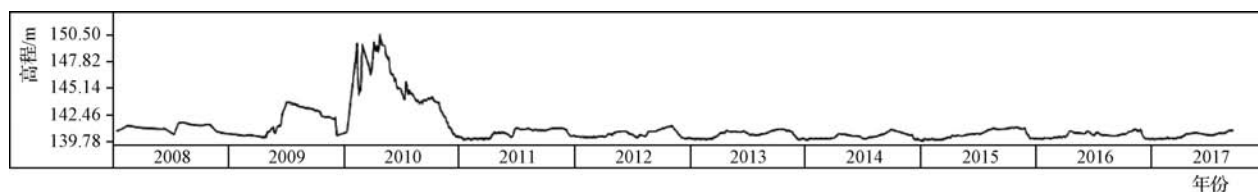


图10 扬压力 P-25 测点实测过程线

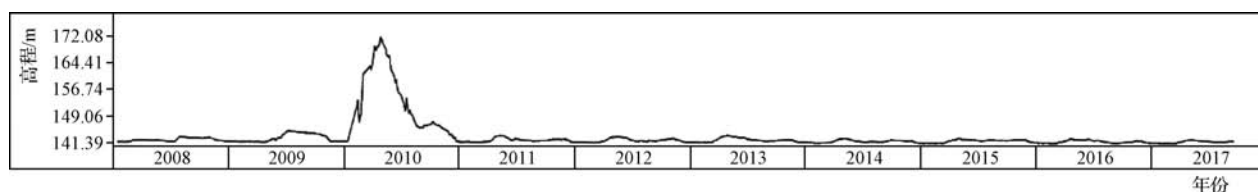


图11 扬压力 P-26 测点实测过程线

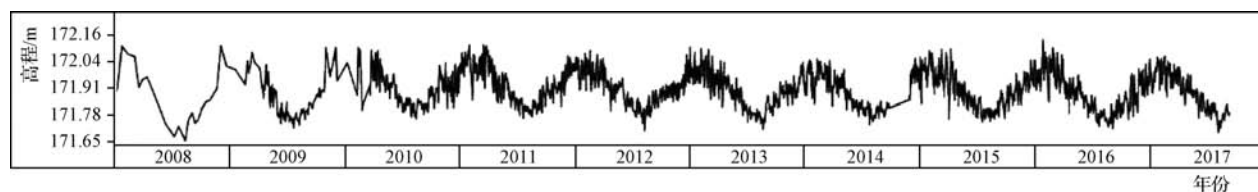


图12 扬压力 P-28 测点实测过程线

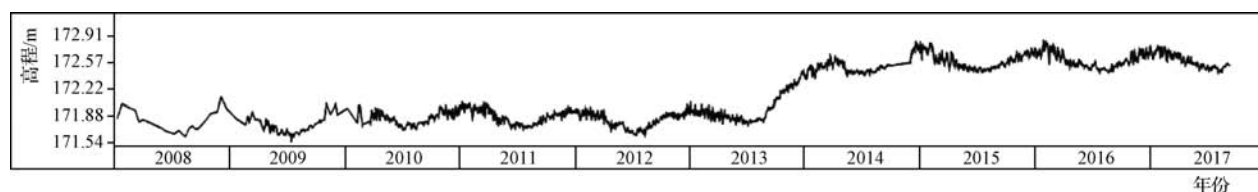


图13 扬压力 P-29 测点实测过程线

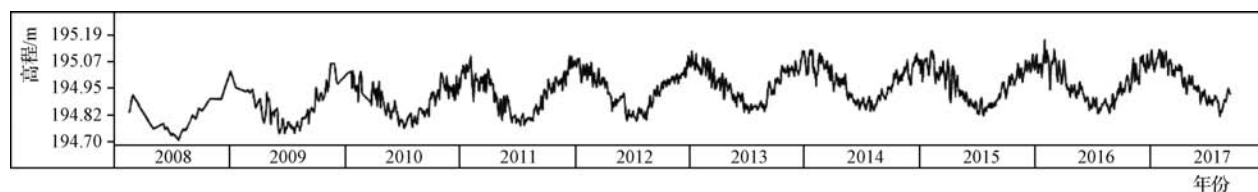


图14 扬压力 P-30 测点实测过程线

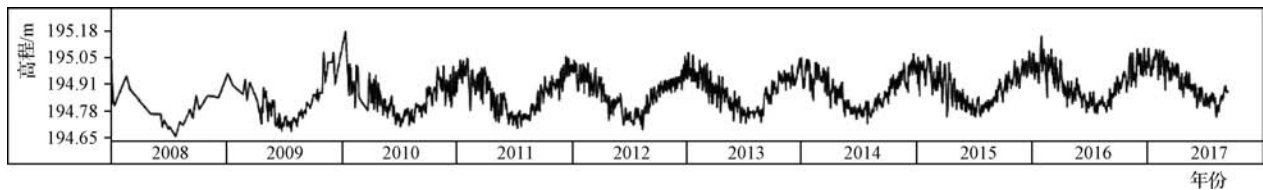


图 15 扬压力 P-31 测点实测过程线

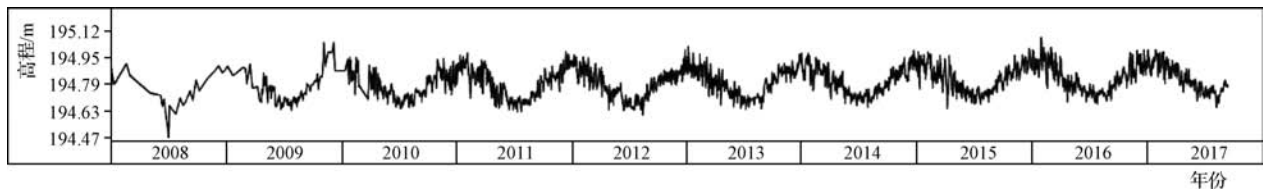


图 16 扬压力 P-32 测点实测过程线

b. P-21 测点测值一直在缓慢地上升，P-22 ~ P-26 测点在 2009 年和 2010 年有突起情况，2010 年年末回复，以后平稳。P-28 ~ P-32 存在周期性起伏现象，因温度波动，夏低冬高。

c. 周期性变化规律不强的测点受库水位的变化影响较大，库水位上升，测值上升，库水位下降，测值下降。降雨量对大坝扬压力也有影响，降雨越多，

扬压力越大，且库水位和降雨量对扬压力的影响都有一定的滞后效应。

3.2 扬压力监测资料特征值分析

除去突变点后，统计了 2008—2016 年大坝渗透压力特征值及 2010—2016 年扬压力测孔特征值，包括极大值、极小值、最大年变幅、最小年变幅、最大年均值和最小年均值（见表 1）。

表 1 大坝扬压力特征值统计

单位：m

测点	极大值	日 期	极小值	日 期	最大年变幅	年份	最小年变幅	年份	最大年均值	年份	最小年均值	年份
P-01	195.32	2016-01-25	194.68	2011-07-07	0.59	2010	0.36	2016	195.06	2016	194.86	2011
P-02	177.22	2010-04-24	174.62	2016-09-04	2.45	2016	0.76	2011	176.35	52010	175.09	2008
P-03	160.67	2010-04-25	156.18	2014-06-26	3.74	2010	2.07	2015	159.19	2010	157.19	2014
P-05	149.28	2012-03-24	137.15	2011-02-08	9.50	2011	2.38	2014	146.06	52010	141.08	2014
P-06	146.8	2010-04-24	141.41	2012-09-03	5.19	2010	3.08	2015	144.82	2015	143.72	2014
P-07	179.67	2010-04-28	137.94	2011-06-01	31.39	2011	2.7	2014	1686	2010	142.74	2016
P-08	152.06	2010-04-24	148.93	2016-09-02	2.67	2010	1.31	2015	150.94	2010	149.97	2014
P-09	165.14	2013-05-10	160.35	2016-09-01	4.23	2016	2.46	2012	163.64	2012	162.54	2016
P-10	181.81	2012-02-15	179.31	2011-07-07	2.48	2012	1.39	2015	180.34	2012	179.63	2009
P-12	197J2	2015-04-07	134.18	2008-04-16	43.36	2009	9.06	2008	190.24	2015	140.06	2008
P-13	140.62	2010-04-24	134.93	2009-04-19	3.94	2009	1.96	2008	139.15	2015	136.35	2008
P-14	139.82	2010-04-24	134.35	2008-04-16	3.67	2009	1.8	2014	137.88	2010	136.07	2008
P-15	138.33	2009-07-01	134.35	2008-04-16	3.59	2009	1.05	2014	136.74	2009	135.11	2016
P-16	192.81	2010-04-23	142.63	2008-01-11	39.95	2009	8.52	2008	176.86	2010	144.95	2008

续表

测点	极大值	日 期	极小值	日 期	最大年 变幅	年份	最小年 变幅	年份	最大年 均值	年份	最小年 均值	年份
P-17	144.96	2009-07-12	142.6	2008-09-15	2.03	2009	0.39	2014	143.61	2011	142.94	2008
P-18	145.59	2009-07-15	142.86	2008-01-11	2.50	2008	0.51	2010	145.08	2012	143.56	2008
P-19	150.87	2013-03-21	133.97	2008-04-16	6.47	2016	3.82	2011	148.24	2013	136.57	2008
P-20	140.85	2010-02-19	133.73	2008-04-16	5.33	2008	0.85	2014	139.51	2010	136.17	2008
P-21	136.42	2015-12-17	132.51	2008-04-01	2.46	2008	0.18	2015	136.33	2015	133.37	2009
P-22	188.01	2010-04-23	140.94	2008-01-11	42.94	2010	0.91	2008	162.06	2009	141.41	2008
P-23	177.1	2010-04-23	143.14	2009-03-23	25.42	2010	0.23	2016	160.43	2010	143.97	2008
P-24	175.5	2010-04-23	141.32	2008-07-11	31.42	2010	0.52	2008	156.68	2010	141.65	2008
P-25	150.5	2010-04-23	139.78	2011-01-14	10.46	2010	1.04	2016	144.6	2010	140.21	2014
P-26	172.08	2010-04-23	141.39	2011-02-08	30.52	2010	1.39	2014	152.24	2010	141.99	2014
P-27	172.98	2010-02-08	171.56	2008-08-15	0.79	2010	0.35	2011	172.35	2016	171.77	2009
P-28	172.16	2016-01-24	171.65	2008-08-15	0.46	2008	0.32	2014	171.93	2011	171.85	2009
P-29	172.91	2016-01-24	171.54	2009-07-15	0.72	2013	0.32	2010	172.65	2016	171.71	2009
P-30	195.19	2016-01-26	194.7	2008-07-23	0.33	2016	0.24	2008	194.99	2016	194.8	2008
P-31	195.18	2010-01-08	194.65	2008-07-23	0.48	2010	0.32	2008	194.94	2016	194.78	2009
P-32	195.12	2016-01-24	194.47	2008-06-30	0.46	2008	0.31	2010	194.87	2016	194.75	2009
UP-1	166.86	2016-04-12	163.05	2012-07-08	2.77	2010	2.09	2015	65.55	2016	164.58	2013
UP-2	160.25	2016-07-02	151.54	2010-02-03	7.86	2016	3.08	2011	56.52	2012	154.84	2016
UP-3	147.89	2012-03-24	139.13	2014-05-30	6.41	2012	2.61	2015	44.55	2012	141.35	2014
UP-4	158.39	2016-07-02	147.07	2010-08-15	9.59	2016	4.62	2015	53.48	2015	150.80	2010
UP-5	181.86	2010-04-23	129.39	2011-05-24	41.68	2011	0.33	2015	171.8	2010	132.85	2012
UP-6	148.38	2010-03-04	140.96	2014-02-18	5.71	2010	0.75	2015	144.38	2010	141.54	2013
UP-7	166.93	2015-04-07	163.19	2011-12-19	2.92	2014	2.08	2011	165.42	2015	163.93	2011

a. 极值分析。分析库水位对扬压力影响时，扬压力较大值一般发生在库水位较高的时期，而较小值通常发生在库水位较低的时期；分析降雨量对于大坝渗透压力影响时，大坝渗透压力较大值一般发生在降雨量较大时段，而较小值通常发生在降雨量较小时段。

扬压力极大值为 197.12m（2015 年 4 月 7 日），发生在 P-12 测点，其次为 195.32m（2016 年 1 月 25 日），发生在 P-01 测点；各测点极大值范围为 136.42 ~ 197.12m。扬压力极小值为 129.39m（2011 年 5 月

24 日），发生在 UP-5 测点，其次为 132.51m（2008 年 4 月 1 日），发生在 P-21 测点；各测点极小值范围为 129.39 ~ 194.70m。

b. 年变幅分析。扬压力最大年变幅为 43.36m（2009 年），发生在 P-12 测点，其次为 42.94m（2010 年），发生在 P-22 测点；各测点最大年变幅范围为 0.33 ~ 43.36m。最小年变幅为 0.18m（2015 年），发生在 P-21 测点，其次为 0.23m（2016 年），发生在 P-23 测点；各测点最小年变幅范围为 0.18 ~ 9.06m。

c. 年均值分析。扬压力最大年均值为 195.06m

(2016 年), 发生在 P-01 测点, 其次为 194.99m (2016 年), 发生在 P-30 测点; 各测点最大年均值范围为 136.33 ~ 195.06m。最小年均值为 132.85m (2012 年), 发生在 UP-5 测点, 其次为 133.37m (2009 年), 发生在 P21 测点; 各测点最小年均值范围为 132.85 ~ 194.86m。

由以上分析可以看出: 岸坡坝段的坝基扬压力较大, 河床坝段扬压力较小。同一个坝段, 同一高程, 越靠近下游, 扬压力越小, 坝体内部, 高程越高, 扬压力越大。

3.3 扬压力折减系数分析

扬压折减系数计算公式为

$$\alpha_i = \frac{H_i - H_d}{H_u - H_d}$$

式中 α_i ——第 i 个测压孔的扬压折减系数;
 H_i ——第 i 个渗压计的实测扬压水位, m;
 H_u ——上游水位, m;
 H_d ——下游水位, m, 当测孔对应的基岩高程高于下游水位时, H_d 用基岩高程代替。

应用上式计算了各测点各时刻的渗透压力系数。统计了 2016 年 7 月 2 日, 库水位为 206.92m 时, 各测点在高水位时段 (水位高于 200m) 的渗透压力系数 (见表 2)。

表 2 典型日高水位时段各测孔渗透压力折减系数统计

测点	测压管水位/m	基岩高程/m	渗压系数	备 注
P-01	194.99	195.00	-0.001	
P-02	175.74	175.00	0.023	
P-03	157.75	155.00	0.053	
P-05	145.07	130.00	0.196	
P-06	146.88	130.00	0.219	
P-07	145.58	130.00	0.203	
P-08	150.73	130.00	0.269	
P-09	164.58	155.00	0.185	
P-10	180.42	180.00	0.016	
P-12	202.91	129.50	0.948	帷幕前
P-13	141.18	129.50	0.151	

续表

测点	测压管水位/m	基岩高程/m	渗压系数	备 注
P-14	138.28	129.50	0.113	
P-15	136.06	129.50	0.085	
P-16	188.56	141.00	0.722	帷幕前
P-17	143.12	141.00	0.032	
P-18	145.04	141.00	0.061	
P-19	150.74	133.00	0.240	帷幕前
P-20	138.19	133.00	0.070	
P-21	136.18	133.00	0.043	

a. 白莲崖水库大坝纵向扬压力呈现出河床坝段渗压系数较大、岸坡坝段渗压系数较小的分布规律; 大坝横向扬压力呈现出帷幕前测点的渗压系数较大、帷幕后测点的渗压系数较小的分布规律。

b. 布置于帷幕前的 P12、P16 和 P19 三个测点的渗压系数分别为 0.95、0.72 和 0.24, 其余布置于帷幕后测点的渗压系数均小于 0.27。

c. 白莲崖水库坝基扬压力折减系数最大值为 0.269, 出现在 8 号坝段的 P-08 测点处, 其次为 0.219, 出现在 6 号坝段的 P-06 测点处, 大坝扬压力折减系数均较小, 尤其是岸坡坝段扬压力折减系数远小于规范值, 监测资料表明大坝帷幕防渗效果良好。

4 大坝扬压力变化规律评价

通过对大坝扬压力的定量和定性分析, 基本得到其变化规律:

总体上, 越靠近岸坡坝段坝基扬压水位越高, 受库水位、山坡地下水位和温度变化影响也较大; 越远离岸坡坝段坝基扬压水位越低, 受库水位、山坡地下水位和温度变化影响也相对较小。对于同一坝段同一高程的横向扬压力监测点, 越靠近下游, 扬压水位越小。

大部分扬压力变化受库水位变化的影响较大, 库水位升高则扬压水位上升, 库水位下降, 则扬压水位降低, 并且扬压水位变化滞后于库水位的变化。

温度变化对测点扬压水位变化也有显著的影响,统计模型分离成果表明,坝基扬压水位的温度分量约占 15%,各个测点扬压水位的温度分量也存在一定差异,即温度变化对不同位置的测点扬压水位影响程度不同。

降雨量对扬压力水位有影响,孔水位变化的降雨量分量约占 10%。靠近山坡的 P-20 等测点扬压水位受降雨影响较大,应关注。

时效对大坝扬压力的影响较小, P-21 测点自蓄水到 2014 年底扬压力水位由 132.51m 上升至 136.42m, P-29 测点自 2013 年 8 月到 2014 年 12 月测值由 171.70m 上升至 172.85m,这两个测点曾产生一定的时效变化,但它们的测孔水位变幅不大,且 2015 年初至今扬压力水位变化平稳,时效分量趋于收敛。除上述两个测点外,其余测点的扬压力水位变化平稳,无明显趋势性变化。

白莲崖水库大坝纵向扬压力呈现出河床坝段渗压折减系数较大、岸坡坝段渗压折减系数较小的分布规律;大坝横向扬压力呈现出帷幕前测点的渗压折减系数较大、帷幕后测点的渗压折减系数较小的分布规律。

大坝坝基扬压力折减系数最大值为 0.269,出现在 8 号坝段的 P-08 测点处,其次为 0.219,出现在 6 号坝段的 P-06 测点处,大坝扬压力折减系数均较小,尤其是岸坡坝段扬压力折减系数远小于规范阈值,表明大坝帷幕和排水措施的渗流控制效果较好。

综上所述,白莲崖水库大坝坝基扬压力主要受库水位变化的影响。大坝坝基渗压折减系数呈现出河床

坝段大于岸坡坝段、帷幕测点大于帷幕后测点的分布规律。

5 结 语

通过对白莲崖水库大坝监测资料进行统计分析,并对在监测中发现的疑点和异常及时进行成因分析,大坝帷幕防渗效果较好,各测点的扬压力水位变化平稳,无明显异常趋势。大坝在运行过程中,每 3~5 年须对监测资料进行一次全面分析,并及时修正相关指标,确保白莲崖水库大坝安全运行。▲

参考文献

- [1] 郑东健.老坝安全的评价方法研究[D].南京:河海大学,2000.
- [2] 程嫒嫒.大别山水库群优化调度研究[D].合肥:合肥工业大学,2011.
- [3] 郭兴轩,何艳华.白莲崖水库坝基工程地质条件分析[J].治淮,2013;26-27.
- [4] 张艳芳.大坝基础扬压力模型研究及其应用[D].南京:河海大学,2006(5):4-10.
- [5] 薛磊.白莲崖水库坝体渗漏监测初步分析[J].江淮水利科技,2019(3):19-20.
- [6] 余常新.梅山水库连洪坝右岸渗流变化分析[J].江淮水利科技,2020(2):14-16.
- [7] 赵志明.混凝土坝运行初期安全监控方法研究[D].西安:西安理工大学.
- [8] 金秋,陈新杰.棉花滩大坝扬压力综合分析[J].人民黄河,2010(3):114-115,117.
- [9] 齐永才,王淑敏.断层水造成坝基扬压力值高的分析方法[J].内蒙古水利,2015(1):124-125.

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.10.07

采用透水排桩对河道影响的数值模拟分析

刘恒博

(新疆维吾尔自治区塔里木河流域干流管理局, 新疆 库尔勒 841000)

【摘要】 为了研究不同结构对水流动力和河道形态的影响规律, 文章通过室内试验和数值模拟对水流形态和河床变形规律进行了分析, 研究了不透水丁坝和透水排桩(分为全透水和半透水排桩)三种类型的结构对流场和河床变形的影响。由于半透水排桩的特殊构造, 流经该结构的水流不能形成循环流, 从而降低了河岸附近的侵蚀强度, 半透水排桩作为一种有效的河道整治方法, 可以替代传统的丁坝结构。

【关键词】 透水排桩; 不透水丁坝; 流型; 非淹没状态

中图分类号: TV86

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-036-08

Numerical Simulation Analysis of the Influence of Permeable Drainage Pile on River Course

LIU Hengbo

(Tarim River Basin Mainstream Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla 841000, China)

Abstract: The flow pattern and riverbed deformation law are analyzed through laboratory tests and numerical simulation in the paper in order to study the influence law of different structures on flow dynamics and river morphology. The influence of three structures of impermeable spur dike and permeable pile (divided into full permeable pile and semi-permeable pile) on flow field and riverbed deformation is studied. The water flowing through the structure cannot form a circulation flow due to the special structure of the semi-permeable drainage pile, which reduces the erosion intensity near the bank. As an effective method of river regulation, the semi-permeable drainage pile can replace the traditional spur dike structure.

Key words: permeable drainage pile; impermeable spur dike; flow pattern; non-submerged condition

可作为河道整治结构的建筑物种类繁多, 有护堤、沟坝、护岸、堰等, 通过相关防护措施可减少河岸侵蚀^[14]。近年来, 我国大力倡导保护河流生态系统的多样性, 恢复退化河流的鱼类栖息地^[5-6]。

丁坝周围多样化的水流创造了适合河岸植被和水生生物生存的条件, 大多数学者研究了各种构筑物对

河道的冲刷规律, 傅宝龙^[7]针对新疆地区的山溪性河流特点, 提出了同时考虑河势现状和演变趋势的河道整治原则, 包括布置顺坝、护岸或丁坝; 黄春花^[8]提出河道综合治理重点应从河道景观、水质修复治理和生态护坡三方面出发; 黄建权^[9]利用二维泥沙控制方程, 对冲淤和河床变形进行模拟, 得出结论: 经整治

收稿日期: 2022-06-23

作者简介: 刘恒博 (1985—), 男, 工程师, 主要从事工程规划、工程建设、水利标准化运行管理等工作。

后对流量和潮位影响甚微，但可增加断面面积增强过流能力。

以上研究主要集中在稳定水流的局部冲刷深度和速度分布上，并且对其他类型的结构在河道整治中的应用鲜有对比分析。本文提出一种透水排桩结构（分为全透水和半透水排桩），用于改善塔里木河水流状态。其中半透水排桩结构的特征是在其下方有一个开口（可通过部分水流），允许流速降低的水流通过此结构，并使泥沙在河岸附近沉积，而上部（不透水部分）封闭，导致近地表水流向主河道方向。

为了分析透水排桩对水流动力和河道形态的影响，通过室内试验和数值模拟对河道治理构筑物进行了分析，对比不透水丁坝和透水排桩结构，研究了三

种类型的结构物在非淹没条件下对流场和河床变形的影响。

1 室内试验

1.1 试验装置

试验研究在乌鲁木齐试验室进行，水槽长 10m，宽 0.80m，深 0.28m（试验区深 0.45m）。试验装置见图 1。河道坡度为 1/800。凹槽附在水槽钢壁上，在水槽活动部分之前，在上游设置距水槽底部 0.1m、长 1.0m 的假底板，以减小水面变化。在水槽入口安装了 V 形缺口堰，用来测量流入流量（见图 1）。水槽水深由位于下游端的钢制后挡板调节。使用精度为 $\pm 0.5\text{mm}$ 的游标卡尺测量水位。

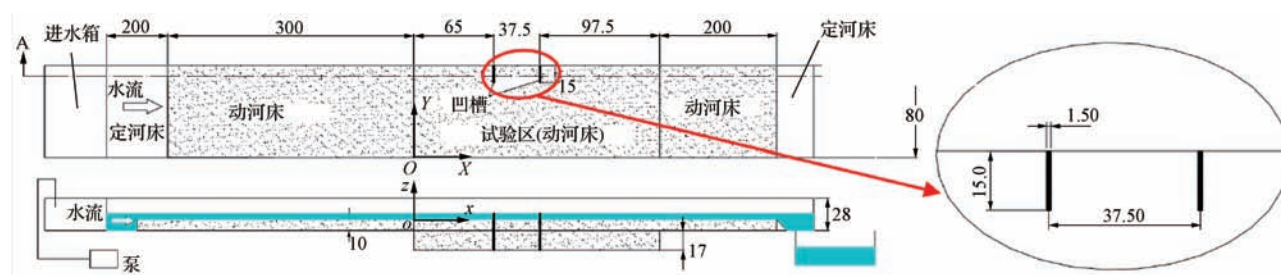


图 1 试验设置（单位：cm）

1.2 试验过程

试验采用的水力条件见表 1，每次开始试验之前，水槽由下游的塑料管慢慢灌满水。一旦达到所要求的水深和流量，试验就在该冲刷条件下进行。冲刷深度随所研究结构的不同而变化。用盾构图确定沉积物（煤）物质的临界剪切速度 u_{*c} 。

试验运行时间为 6h，然后，流量逐渐减少，防止河床物质移动。为了确定最终的河床变形轮廓，仔细地在水槽中排空剩余的水，并使用型号为 LK-2500 的激光位移传感器测量不同断面的冲刷深度。在变形床面测量后，立即将水泥粉均匀地撒在冲刷床面上以固定床面，将充分浸渍水泥粉的沉淀物干燥 24h。

采用电磁测流仪测量三维速度分量，电流计的 I 形探头测量水平方向（X-Y 平面）的速度，另一个 L 形探头测量垂直方向（X-Z 平面或 Y-Z 平面）的

表 1 试验方案

排桩类型	I ^A	P ^B	BS ^C
编 号	案例 1	案例 2	案例 3
淹没情况	非淹没		
流量 $Q/(L/s)$	7.76		
平均速度 $u/(cm/s)$	24.25		
深度 h/cm	4.00		
横波速度 $u_*/(cm/s)$	2.22		
横波速度比 u_*/u_{*c}	1.91		
u_*/w_s	0.573		
雷诺数 Re	7406		
弗劳德数 Fr	0.387		

注 A-不透水丁坝；B-全透水排桩；C-半透水排桩。

速度，连接到模拟/数字信号转换器。探头放在水中，通过游标卡尺固定，以确定所需位置的速度，通过连接电脑来存储测量数据。

X 轴、 Y 轴和 Z 轴见图 1。不透水丁坝由 1.5cm 厚的木制长方体制成，透水排桩由一系列直径为 0.6cm 的钢圆棒制成，设计透水率为 50%，并用钢板堵塞上半部分来代表不透水部分。试验分三种方案进

行，分别为案例 1、案例 2 和案例 3，对应不透水丁坝、全透水排桩和半透水排桩；在不透水边界条件下测试，三种排桩的测试条件完全相同，见表 1。

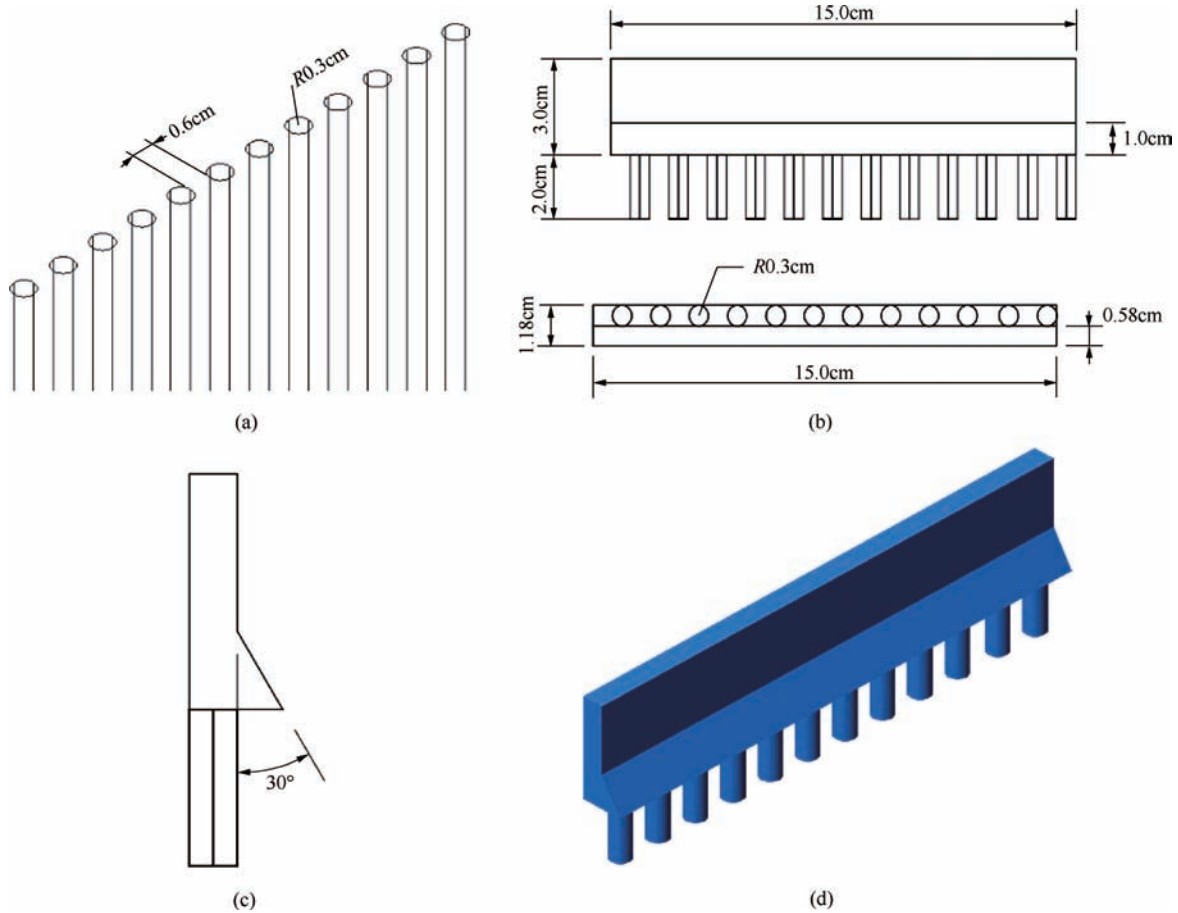


图 2 透水排桩结构

(a) 全透水排桩；(b)、(c)、(d) 半透水排桩

2 数值模拟

2.1 水动力模型

流动计算的控制方程是基于三维的平均雷诺方程和连续性方程，连续性方程的张量表示为

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中 u_i ——时均速度分量 ($i=1, 2, 3$)；

x_i ——坐标分量；

ρ ——流体密度；

F_i ——体积力；

p ——时均压力；

ν ——流体的运动黏度；

$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ ——雷诺应力张量；

u'_i ——脉动速度分量，湍流采用 $k-\varepsilon$ 模型。

通过线性本构方程得到雷诺张量：

$$-\overline{u'_i u'_j} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

式中 k ——湍流动能；

ν_t ——涡黏系数； $\nu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ ， C_μ 为常量， ε

为单位流体脉动功能的耗散率；

S_{ij} ——应变率张量；

δ_{ij} ——变形速度张量。

在模拟中，将入口边界视为狄利克雷边界，并给出了所有的数值。出口边界设置在远离凹槽区域的地方，假设在那里有一个零梯度的第二类边界。在不透水边界处采用壁面函数法，排桩的上封闭区和下透水开口用一些细网格表示，仿真过程遵循半隐式连接压力法计算流体动力学方程^[11-12]。

2.2 沉积物运移模型

明渠中的泥沙输运由泥沙质量平衡方程在水深 h 上的积分控制：

$$(1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial(q_{Tx})}{\partial x} + \frac{\partial(q_{Ty})}{\partial y} + (E - D) = 0 \quad (4)$$

式中 z_b ——基准面以上的局部层位；

λ ——河床孔隙度；

q_{Tx} 、 q_{Ty} ——总输沙量在 x 和 y 方向的分量；

E ——向上的近床流；

D ——向下的近层通量。

为了计算输沙率，将其细分为床沙和悬沙。

用芦田-美惠的经验公式计算河床输沙量。

$$\frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd^3}} = 17\tau_{*c}^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \quad (5)$$

式中 q_b ——河床荷载；

s ——沉积物比重；

d ——沉积物直径；

τ_* 、 τ_{*c} 、 τ_{*e} ——无量纲切应力、临界切应力和有效切应力；

u_* 、 u_{*c} ——摩擦速度和临界摩擦速度。

3 结果和讨论

3.1 速度分布

3.1.1 X-Y 平面结构体周围速度分布

水平面内不同类型结构周围实测和计算的流速分布结果见图3~图4。在案例1（见图3）中，当水流接近上游的丁坝时，流向主河道的阻塞流在丁坝顶部前形成了混合区。该水流流向下流，在丁坝之间以及在河岸附近的丁坝下游形成再循环流。通过对实测结果和模拟结果的比较，发现不透水丁坝周围的流动规律非常相似。由于在模拟计算中对网格进行了细化，可以清楚地看到两个丁坝之间的再循环流，以及上游丁坝头部的流动分离。

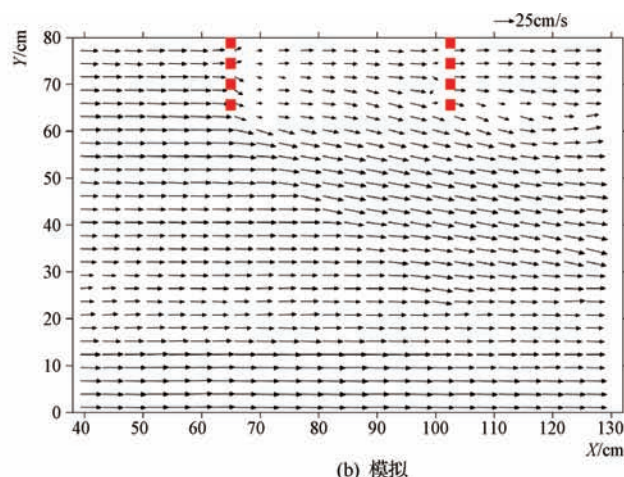
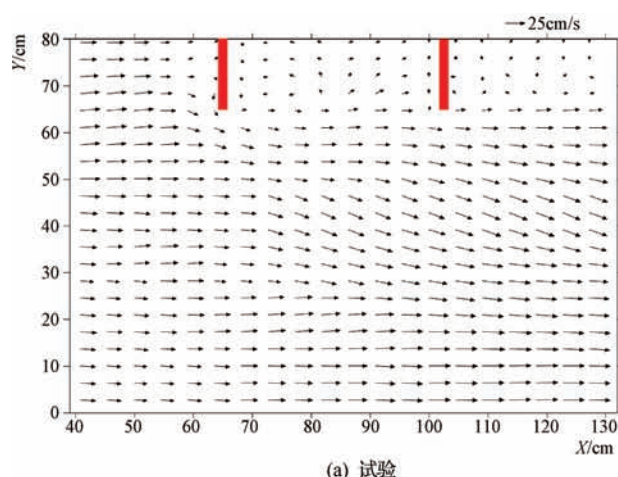


图3 案例1：不透水丁坝在水平面上的流速

与不透水丁坝有很大的不同，全透水排桩模拟结果表明（见图4），水流方向没有发生很大的变化，

实际上与水槽方向平行。试验结果和模拟结果均表明，流向全透水排桩头部主河道的水流方向，由于透

水性的影响,水流强度较小。在排桩上游方向,靠近河岸处速度会减小;在水流经过下游后,速度减小更明显,这对河岸形成了保护作用。

在观察半透水排桩时,由于水流通过较低的开口,可以观察到水流形态的差异,特别是在两个排桩

结构之间的区域。从图5可以看出,水流经过上游结构后,流向主河道方向,阻止了二次流的形成。此外,由于上半部分不透水挡板导致的流动分离,使近地面的流动偏离主河道方向,速度也会降低。

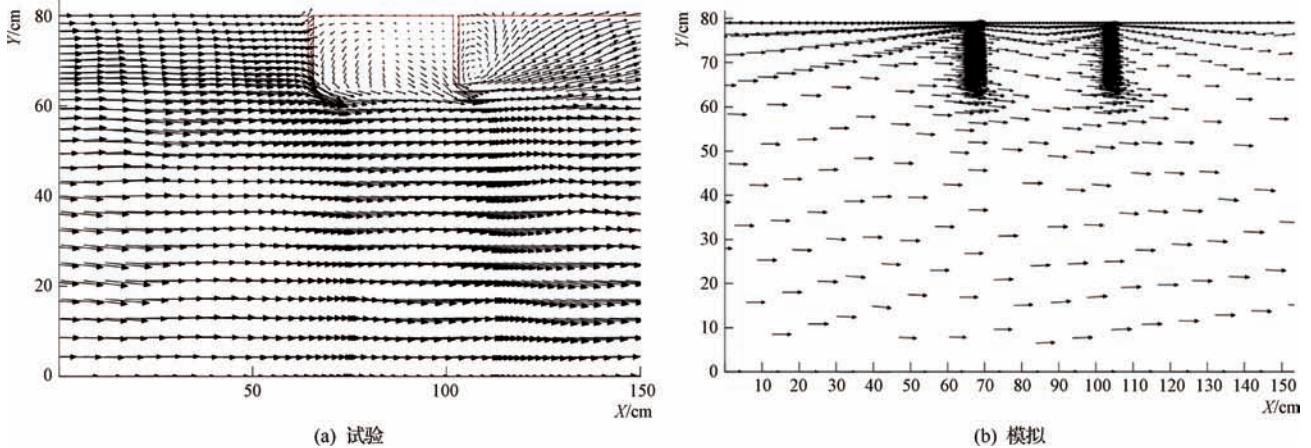


图4 案例2:全透水排桩在水平面上的流速

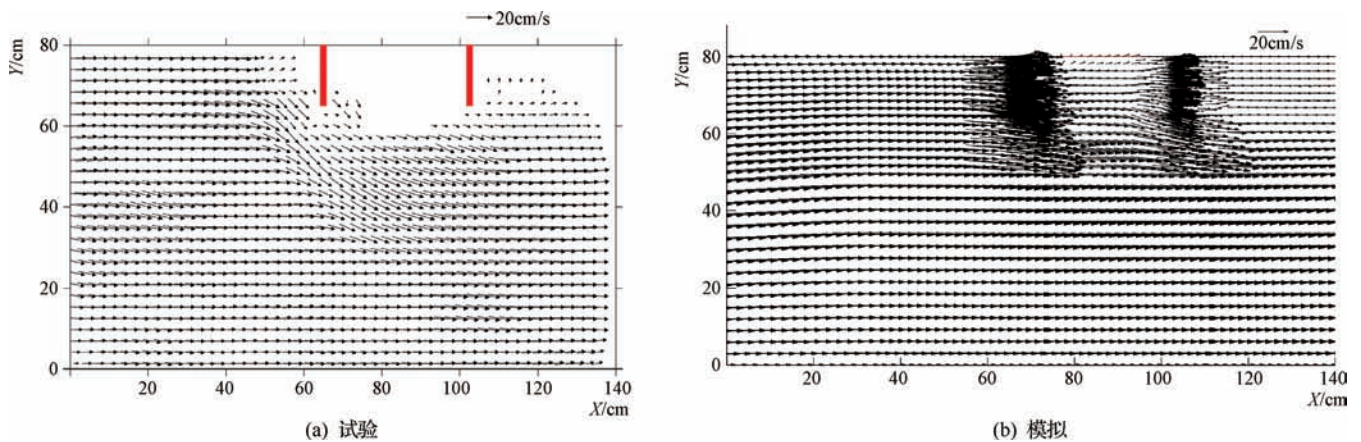


图5 案例3:半透水排桩在水平面上的流速

3.1.2 $Y-Z$ 平面和 $X-Z$ 平面截面速度分布

通过分析见图6~图9的横断面和纵断面的速度分布,可以更详细地了解结构周围复杂的三维流速分布。比较了半透水排桩和不透水丁坝情况(案例1和案例3),分析这些结构对流型的影响,典型的流型主要包括泡状流、弹状流、分层流、波状流及环状流。对 $X=62.0\text{cm}$ (横截面)分析,距离上游结构仅 2.25cm , $Y=72.0\text{cm}$ (纵截面)位于结构中。

在两种情况下,由向下流动引起的上游结构附近

形成的垂直涡与计算结果非常相似。然而,半透水排桩在近地表向主流道偏移的情况下流速更高,这比不透水丁坝情况更有效,因为上弯曲板可将近地表流引导到主流道,减小了对结构附近床层的影响。纵向截面清楚地显示了在两个不透水丁坝结构上游的向下水流,这导致在结构上游形成涡流。在每个结构的下游,通过低渗透部分的流速降低表现出类似的小幅度垂直涡,会增加那里的沉积过程。

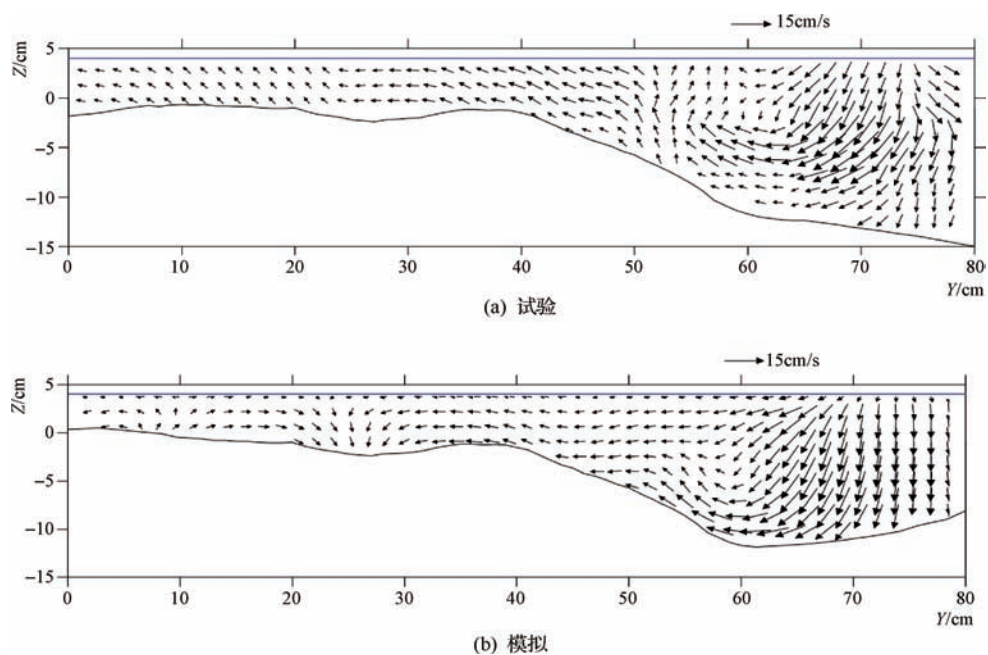


图 6 案例 1 中不透水丁坝在 $X = 62.0 \text{ cm}$ 处的流速

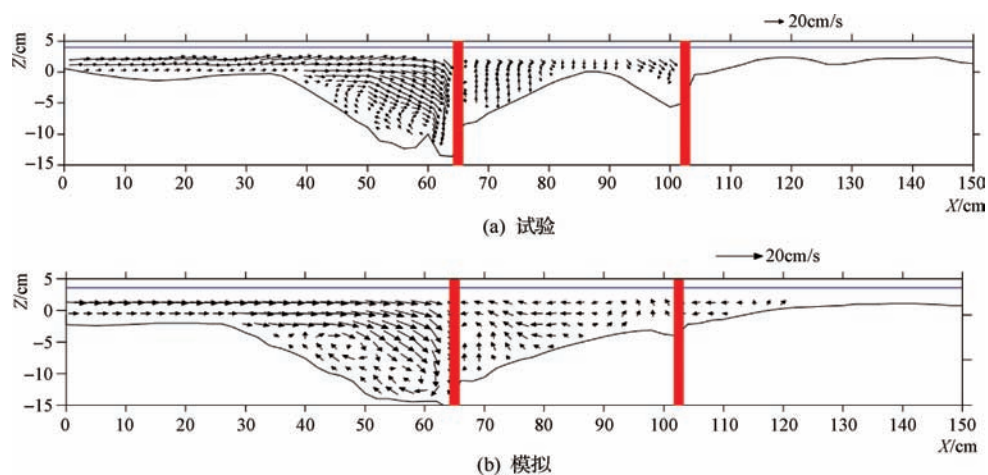


图 7 案例 1 中不透水丁坝在 $Y = 72.0 \text{ cm}$ 处的流速

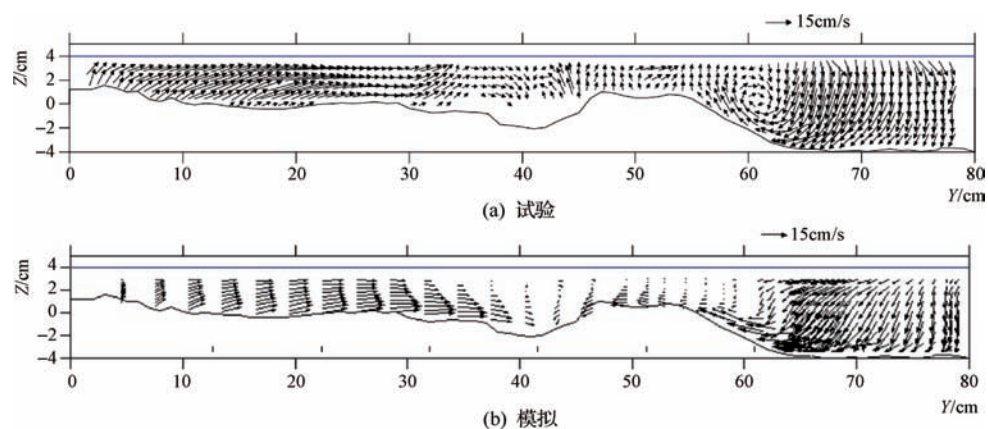


图 8 案例 3 中半透水排桩在 $X = 62.0 \text{ cm}$ 处的流速

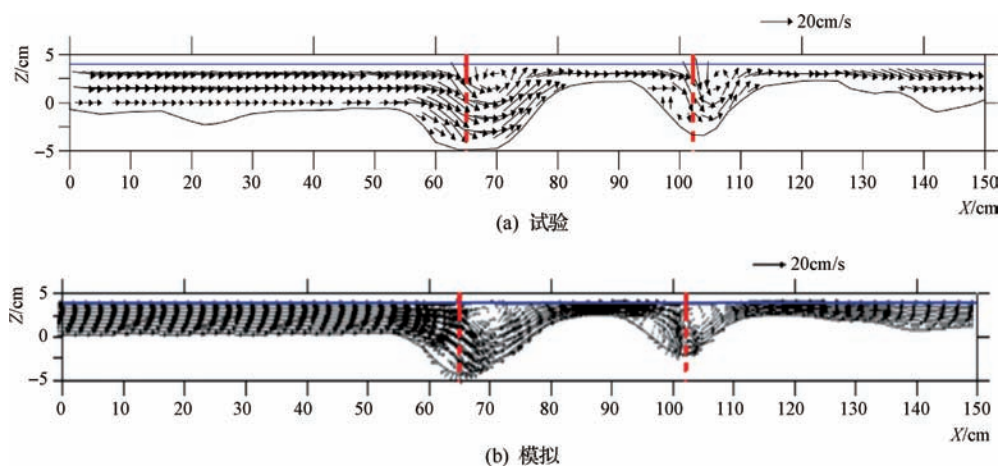


图9 案例3 中半透水排桩在 $Y = 72.0\text{cm}$ 处的流速

3.2 河床变形

图10和图11分别为案例1和案例2平衡条件下

河床等值线试验结果与模拟结果的对比, 半透水排桩 (案例3) 的试验结果见图12。

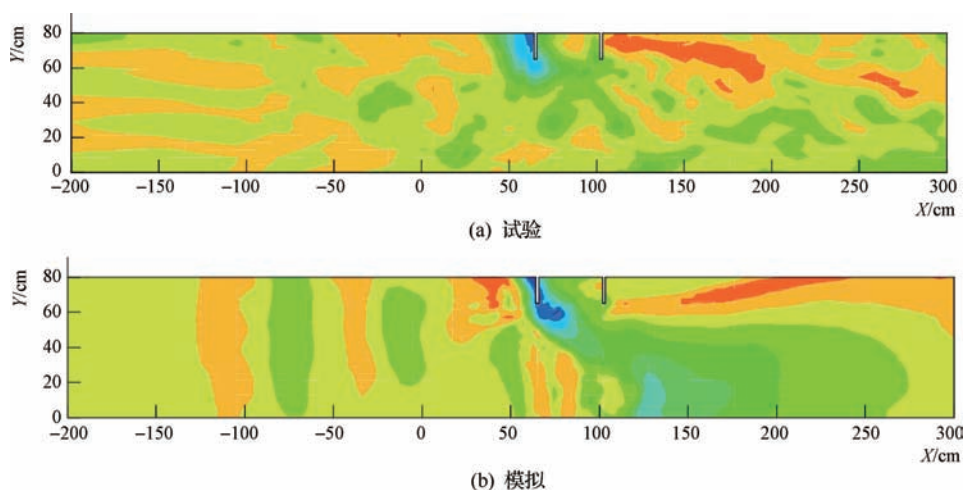


图10 案例1 中不透水丁坝床面等高线

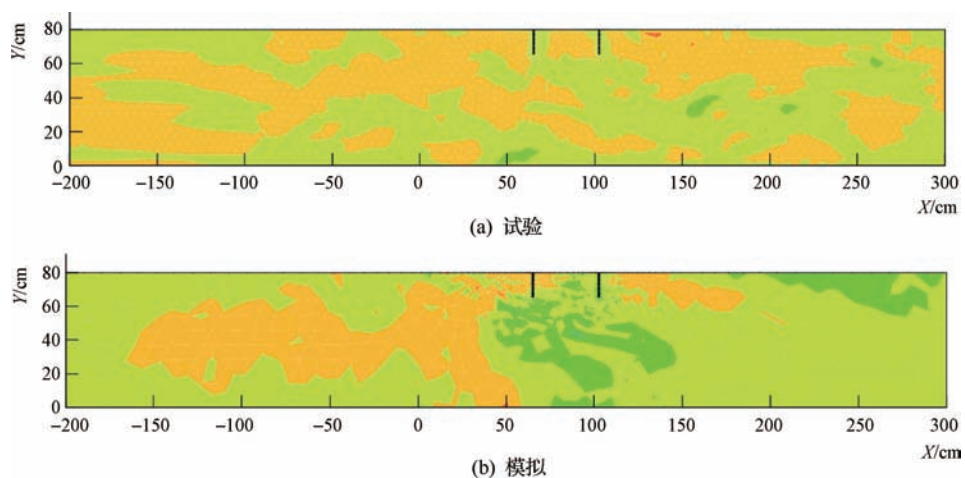


图11 案例2 中全透水排桩床面等高线

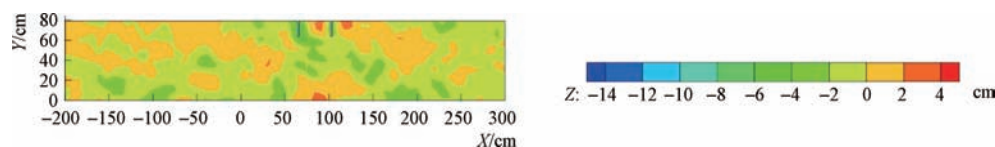


图 12 案例 3 中半透水排桩床面等高线

案例 1 中由于堵塞流而形成的向下通量是上游地区冲刷最深的主要原因，在模拟结果中可以验证这一特征 [见图 10(b)]。

案例 3 为半透水排桩，上部弯曲板向主河道方向的高速近地表流动和通过下部的流动，减小了下行流量的影响，在全透水排桩中也存在同样的影响。在试验和模拟中，由于与半透水排桩相比，流速减小幅度较小，因此导致的侵蚀比其他情况都小（见图 11）。

在案例 1 [见图 4(a)] 中可以看到流动分离，这是在排桩之间区域形成再循环流的原因，导致了图 10(a) 和图 10(b) 中观察到的河岸侵蚀。见图 10，在排桩下游，河岸附近的低速回流导致泥沙淤积。

类似的水流分离也发生在半透水排桩中（见图 5），由于表层水流受阻碍作用和底层水流经下部透水区，不能形成循环流，降低了河岸附近的侵蚀强度。因此，该结构可用作河岸防护。

4 结论与展望

本研究提供了非淹没条件下半透水排桩周围流型和河床变形的有关规律，在相同的水力条件下，考虑结构周围的流速分布和河床变形，对不透水和透水的结构进行了研究，以验证其与半透水排桩的异同，主要得到以下结论：

a. 分析了半透水排桩构造对泥沙输运过程的影响规律，结构体周围的水流形态变化和河岸附近的沉积可以保护主河道不受侵蚀，而主河道的侵蚀强度增加会导致河流中形成更深的沟。

b. 数值模型的计算结果对各种情况下的流型都有较好的一致性，特别是在全透水排桩和半透水排桩等复杂结构周围的流动。通过对泥沙沉积进行计算，可预测河床变形。

c. 半透水排桩作为一种有效的河道整治措施，可以替代传统的丁坝结构。

d. 在试验中观察到的结构附近的悬移质，需要在泥沙输运模型中加入悬浮泥沙计算进行研究，且需对相同的结构进行水下模拟。▲

参考文献

- [1] 杜瑞香. 浅谈透水桩坝设计[J]. 水利建设与管理, 2000, 20(1): 51-52.
- [2] 张旭东, 朱莉莉, 张治昊. 黄河下游河道整治现状与面临的新问题[J]. 水利建设与管理, 2017, 37(11): 77-79, 107.
- [3] 季婷婷, 宋玮玮, 孙猛. 河道常态化清理装置的探索与实践[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(3): 29-32.
- [4] 孙东迁. 透水桩坝在渭河上的应用与研究[J]. 陕西水利, 2015(4): 85-86.
- [5] 董继坤. 河道整治工程对水生态的影响及保护措施探讨[J]. 人民黄河, 2019, 41(S2): 46-47, 56.
- [6] 曹炳伟. 河道整治工程对水产种质资源保护区的环境影响评价研究[J]. 江西化工, 2013(4): 359-361.
- [7] 傅宝龙. 浅析新疆河道治理及防洪措施[J]. 陕西水利, 2017(S1): 262-263.
- [8] 黄春花. 长历时河床演变模型在河道整治工程中的应用[J]. 科技与创新, 2016(7): 109, 111.
- [9] 黄建权. 航道整治工程水流泥沙数值模拟[J]. 珠江水运, 2009(5): 54-56, 58.

浅谈大型分洪工程 EPC 总承包优势

项宏敏¹ 张友录²

- (1. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002;
2. 浙江省第一水电建设集团股份有限公司, 浙江 杭州 310052)

【摘要】平阳县南湖分洪工程开挖断面大, 分洪隧洞线路长且断面类型变化, 建设难度大。文章以该项目为例, 具体阐述了大型分洪隧洞采用 EPC 总承包模式的优势, 可为类似大型水利工程施工提供参考。
【关键词】大型分洪隧洞; EPC 总承包; 优势

中图分类号: TV872

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-044-03

Brief Discussion on Advantages of EPC General Contracting Mode of Large-Scale Flood Diversion Project

XIANG Hongmin¹, ZHANG Youlu²

- (1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydro-Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310002, China;
2. Zhejiang First Hydro and Power Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310052, China)

Abstract: Pingyang Nanhu Flood Diversion Project has large excavation section. The long line of the flood diversion tunnel and the change of section type result to the great difficulty in construction. Taking this project as an example, this paper concretely expounds the advantages of EPC general contracting mode for large-scale flood diversion tunnel, which can provide reference for similar large-scale water conservancy project construction.

Key words: large-scale flood diversion tunnel; EPC general contracting mode; advantage

1 工程概况

1.1 项目简介

平阳县南湖分洪工程位于平阳县水头镇, 分洪隧洞包括 2 条, 从南向北分别为南线隧洞和北线隧洞, 其中南线隧洞长 6538m, 北线隧洞长 6563m, 单洞衬后洞宽 14m, 单洞设计流量 $410\text{m}^3/\text{s}$ 。隧洞断面采用

城门洞形, 根据不同的围岩类别, 最大开挖断面尺寸 $15.50\text{m} \times 15.25\text{m}$ (宽 \times 高), 最小开挖断面尺寸 $14.90\text{m} \times 14.45\text{m}$ (宽 \times 高)。分洪规模为 $820\text{m}^3/\text{s}$ 。主要建筑物级别为 4 级, 次要建筑物级别为 4 级, 分洪工程为 III 等。

1.2 工程难点分析

平阳县南湖分洪工程单洞开挖最长 2000m; 分洪

收稿日期: 2022-07-27

作者简介: 项宏敏 (1974—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程施工管理工作。

隧洞从进口段无压隧洞渐变到有压隧洞，分别下穿白岩寨公路隧洞、国安引供水隧洞后再渐变到隧洞出口无压段。平阳县南湖分洪工程分洪隧洞线路长且断面类型变化加大了建设难度。

隧洞下穿白岩寨公路隧洞时，分洪隧洞洞顶距公路隧洞洞底只有 14m，且白岩寨隧洞已经通车，作为萧江镇到水头镇的交通要道，车流量繁多。建设过程中如何避免隧洞开挖爆破振动对白岩寨隧洞工程本身安全和洞内行车行人安全造成不利影响是项目设计和施工的一大难点。

项目建设涉及施工、水工结构、金属结构、机电设备、房屋建筑、交通桥梁、景观绿化、智慧工地等较多专业的设计，且在建设过程中要将设计意图通过采购、安装、现场施工等环节实现，为此，建设前期通过多方调研、考察，形成专题报告向县委、县政府汇报项目采取 EPC 总包模式的必要性，并最终获得县政府批准。

2 建设过程

2019 年 4 月，平阳县水利投资发展有限公司通过招投标确定浙江省水利水电勘测设计院为 EPC 总承包单位，合同总价 12.31 亿元，合同工期 30 个月。浙江省水利水电勘测设计院通过内部小平台招标确定施工分包单位为浙江省第一水电建设集团股份有限公司。两家单位迅速组建总承包项目部和施工项目部，于 6 月底进场开展前期准备工作。通过参建各方的共同努力，工程于 2020 年 1 月 10 日开工，顺利完成“2020 年底隧洞贯通”和“2021 年主汛期前具备应急通水条件”这两个节点工期目标，并于 2022 年 5 月 27 日顺利通过完工验收。施工期间未发生一起安全生产事故，质量优良、投资可控、工期提前。各项目目标均完整实现。

3 EPC 总承包优势分析

3.1 有利于简化合同关系

采用 EPC 工程总承包模式后，施工标、设备标、

监测标、信息化标等各招标工作全部纳入总承包招标，建设单位只需与总承包单位签订承包合同，合同关系简单，责任明确，大大减少了建设单位的风险和招标工作量。根据合同，建设方只需要在工程完工验收时严格把关，其余工作均由总承包单位统一协调管理。由一个承包商全权负责项目的设计、采购、施工工作，全面负责工程项目费用、质量、安全及进度，有效避免了平行发包后各分包单位相互推诿责任的不利现象。

3.2 有利于减轻管理压力

采用 EPC 工程总承包模式后，建设单位主要承担项目整体实施方向和完工验收把控工作，对建设过程的具体细节不过多干预，相关专业协调、招采、催交等工作均由总承包商负责，大幅减轻了建设单位在工程实施阶段的协调工作量及繁杂事务，在项目施工过程中建设单位管理人员投入 5 名，有效缓解了建设单位专业技术管理人力资源较为紧张的状况。同时，通过合同约定将设计、采购、施工等大部分风险，合法、合理地转移至总承包单位，减轻了建设单位管理风险，也有利于承包单位发挥能动性。

3.3 有利于安全生产管理

采用工程总承包模式后，总承包单位利用自身管理力量结合施工项目部的安全生产管理制度，做到制度先行、方案先行。使安全生产管理合理有度，事事可对照规范和方案进行全方位的巡查，发现问题后通过智慧管理平台将问题分发给相关责任人。责任人收到信息后及时开展整改工作，第一时间将整改结果发送到智慧管理平台。相关责任单位和责任人通过复查将问题销号，形成行之有效的闭环管理。

采用工程总承包模式后，总承包单位利用自身设计优势，将生产区和生活区进行全面视频监控，有效地全面掌控现场安全生产情况和违章作业现象；总承包单位将施工超前预报、封闭作业环境安全监测、隧洞安全监测、施工地质服务覆盖施工全方位、全过程，使隧洞围岩发生变化时，通过施工超前预报成果

及时调整施工方案和进行超前初期支护；通过封闭作业环境安全监测，发现空气中含氧量不足、有毒有害气体含量超标、粉尘超标等情况时可第一时间停止现场作业，有效避免安全生产事故的发生。

3.4 有利于控制工程投资

本项目 EPC 总承包合同采取固定总价，经招标充分竞争后选择了总承包单位，中标合同额 12.31 亿元，在发包阶段即进行了理想的投资控制。工程结算时，除政策性因素或建设单位要求变更引起的费用调整外，其他一般情况不调整合同额，避免了“投资无底洞”现象。

项目实施过程中，总承包单位依据合同要求，慎重分析项目成本、收益及风险，把设计、采购、施工作为整体考虑，从深化工程初步设计、优化施工方案和组织等方面提高工程建设效率，使工程造价控制在合同范围内。同时，采用固定总价后，总承包商将尽可能避免不必要的设计变更，有利于控制工程造价，杜绝“低标高结”等项目顽疾。

3.5 有利于保障工程质量

EPC 工程总承包模式下，总承包单位可依法直接挑选信誉好、实力强的分包单位和设备厂家，通过邀请招标方式，完成分包，规避实力较弱的企业中标，从源头强化工程质量。本项目中，浙江省水利水电勘测设计院作为工程总承包单位，通过邀请招标择优选取了浙江省第一水电建设集团股份有限公司（特级企业）作为施工承包单位，通过资源整合和资源调配，为项目的顺利推进奠定基础。项目过程管理形成了总承包单位对项目进行整体调控，施工单位严格执行的管理构架，深入融合设计、施工、采购三方，消除质量不稳定因素，最大限度地质量、安全、进度、费用结合在一起，更为严格地保障质量安全，使项目质量、安全、进度、费用控制在既定的目标值范围内。

3.6 有利于缩短建设工期

EPC 工程总承包模式下，总承包单位充分把握项

目全过程、全方位的进展情况，统一管理设计、施工、采购三方，形成利益统一体，有效克服以往三方分立、相互制约、脱节的矛盾，优化交叉设计、采购、施工、试运行等各阶段工作，进行科学合理的深度融合，在关键路径上狠下功夫，形成最优的工期计划，减少工程建设的总时差。本项目在初步设计阶段，即组织进场开始施工准备工作，实现了主体工程开工与初步设计批复同步。对项目实施过程中发生的可能影响工期因素，迅速做出判断与处理，杜绝相互扯皮、推诿，减少协调时间，保障项目高效建设。

3.7 有利于实现工程增值

对于具有技术复杂、施工难度大、建设周期长、管理难度大等特征的项目，EPC 总承包单位可发挥自身技术实力和集成优势，充分实现创新管理和工程增值。本项目中总承包单位充分利用物联感知、BIM、信息化等新信息技术，积极探索和推进“智慧生态工地”建设，全力打造水利工程标化工地升级版。“智慧工地”实现了以物联感知技术为手段，重要指标全面管控；以 BIM 数字模型为载体，推动工程建设精细化管理；以统一信息平台为导引，全面提升建设管理效率。“生态工地”实现了办公现代高效、生活方便人性、生产智能生态。

4 工程效果

工程自 2020 年 1 月 10 日开工建设，于 2022 年 5 月 27 日完工验收，中间克服政策调整、疫情防控、限电等不利因素影响，比合同工期 30 个月提前完工，超期实现工期目标。

工程实际施工月 28 个月，克服了大断面开挖隧洞爆破、支护等环节各种不利因素，及时排查了安全生产隐患，中间未发生一起安全生产责任事故。实现了工程施工安全。

工程采用 EPC 总包模式，未有新增项目和额外增加投资的设计变更，实现了投资可控。

工程顺利通过完工验收，项目 （下转第 21 页）

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.10.09

东庄水利枢纽工程智慧工地建设探析

王 普

(陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710000)

【摘 要】 随着物联网、大数据、云计算、人工智能、通信、计算机网络及无人机等技术的发展, 智慧化的时代已经到来, 智慧园区、智慧小区、智慧城市、智慧水利等已经开始尝试建设。采用先进的信息化技术建设智慧水利水电工程工地, 实现水利枢纽施工现场的安全监控、智慧化管理是很有必要的。文章以实际工程为例, 就大型水利工程智慧工地建设进行探讨。

【关键词】 智慧工地; 东庄水利枢纽; 施工工地

中图分类号: TV61

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-047-05

Analysis on Smart Site Construction of Dongzhuang Water Conservancy Project

WANG Pu

(Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an 710000, China)

Abstract: The era of wisdom has arrived with the development of Internet of things, big data, cloud computing, artificial intelligence, communications, computer networks and unmanned aerial vehicles, etc. People are trying to construct smart park, smart community, smart city, smart water conservancy. It is necessary to use advanced information technology to construct smart water conservancy and hydropower project sites and realize the safety monitoring and smart management of water conservancy project construction sites. The actual project is adopted as an example to discuss the smart site construction of large-scale water conservancy project in the paper.

Key words: smart construction site; Dongzhuang Water Conservancy Project; construction site

1 概 述

陕西省东庄水利枢纽工程坝址位于泾河干流最后一个峡谷段出口(张家山水文站)以上29km,距西安市约90km,工程任务以防洪减淤为主,兼顾供水、发电及改善生态等综合利用。枢纽由混凝土双曲拱

坝、坝下消能防冲水垫塘和二道坝、左岸发电引水系统、供水洞、排沙洞、库区防渗工程及码头等组成,规模为大(1)型。

利用物联感知、人工智能、通信网络、无人机等技术,实现东庄水利枢纽施工现场的安全监控、智慧化管理。智慧工地监控建设内容主要包括无线自组通

收稿日期: 2022-07-13

作者简介: 王普(1987—),男,本科,工程师,主要从事水利信息化设计工作。

信网、智能视频监控、施工车辆人员监控及施工工地安全管控等。

2 无线自组通信网

建设智慧工地，就需要实时感知施工现场的各种数据，因此需要解决好通信问题。东庄水利枢纽沟壑较多，地形复杂，无线公网信号覆盖不足，且施工隧洞较多，隧洞内基本没有信号覆盖，东庄水利枢纽2021年已建成施工区域光纤通信链路。根据以上情况，并考虑建设成本等因素，东庄水利枢纽智慧工地通信网络建设采用基于无线公网延伸覆盖和已建设的光纤通信传输网，采用无线自组网覆盖基站、无线自

组网定位基站建设覆盖东庄水利枢纽施工区域的无线通信自组网络，实现物联感知数据实时传输、车辆人员精准定位、监控中心与施工车辆人员可视化信息交互等功能。

以工程建设管理中心、110kV 施工变电站、右坝肩缆机平台交换机、电站及混凝土拌和系统2为主干通信节点，利用已建主干通信节点三层千兆工业以太网交换机组成的光纤环网，在枢纽施工各区域配置两层工业以太网交换机，通过光纤串接至就近主干通信节点，满足无线自组网覆盖基站、无线自组网定位基站的网络接入，见图1。

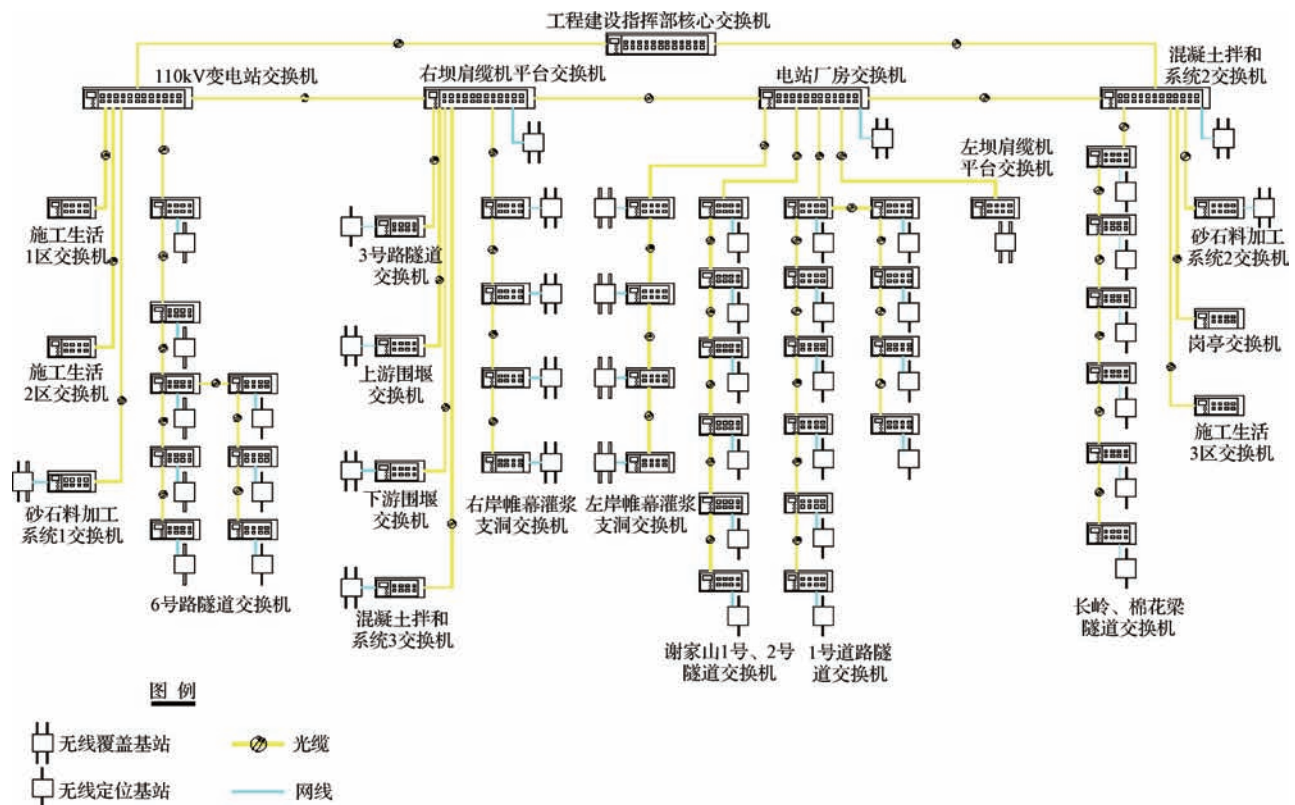


图1 无线自组通信网结构

3 智能视频监控系统

为满足对施工场地的安全和管理需求，建立东庄水利枢纽工程施工智能视频监控系统。在大坝主体施工区域、电站厂房施工区域、水垫塘施工区域、混凝土拌和系统、砂石料加工系统、施工区域道路、大坝

左右肩等区域，按照永临结合的方案，选择智能高清摄像机，构建集约化视频监控、智能分析、预警发布软硬件系统平台，实现施工人员、施工车辆、施工机械、危险源等安全管控功能。

视频监视系统基于无线自组通信网组网，采用IP网络架构，共布设智能枪机31台，黑光智能分析球

机 59 台，智能警戒摄像球机 8 台，全景球机 6 台，实现人员可疑行为自动识别、工地安全隐患自动识别、重要或危险区域入侵报警等智能监控功能。

4 施工车辆人员监控

4.1 施工车辆人员跟踪定位管理系统

4.1.1 功能及结构

通过对施工人员及车辆轨迹的实时获知、违章时段和具体人员的实时分析、施工考勤的自动统计和信息智能发布的精准管控，做到对施工人员和施工车辆的实时信息及安全作业情况进行跟踪。

施工区车辆跟踪及人员定位系统功能包括施工区导航图展示、车辆及人员定位、施工考勤自动统计、施工人员及车辆轨迹追查、违章时段和具体人员实时分析、统计报表分析等。

施工区车辆跟踪及人员定位系统采用北斗与 UWB 定位结合技术，在大坝主体施工区域、水垫塘施工区域、场区道路等室外区域采用北斗定位技术，在交通隧洞、施工支洞等室内区域采用 UWB 定位技术，当车辆或人员由室外区域进入室内区域时实现北斗定位与 UWB 定位自动切换。具体结构见图 2。

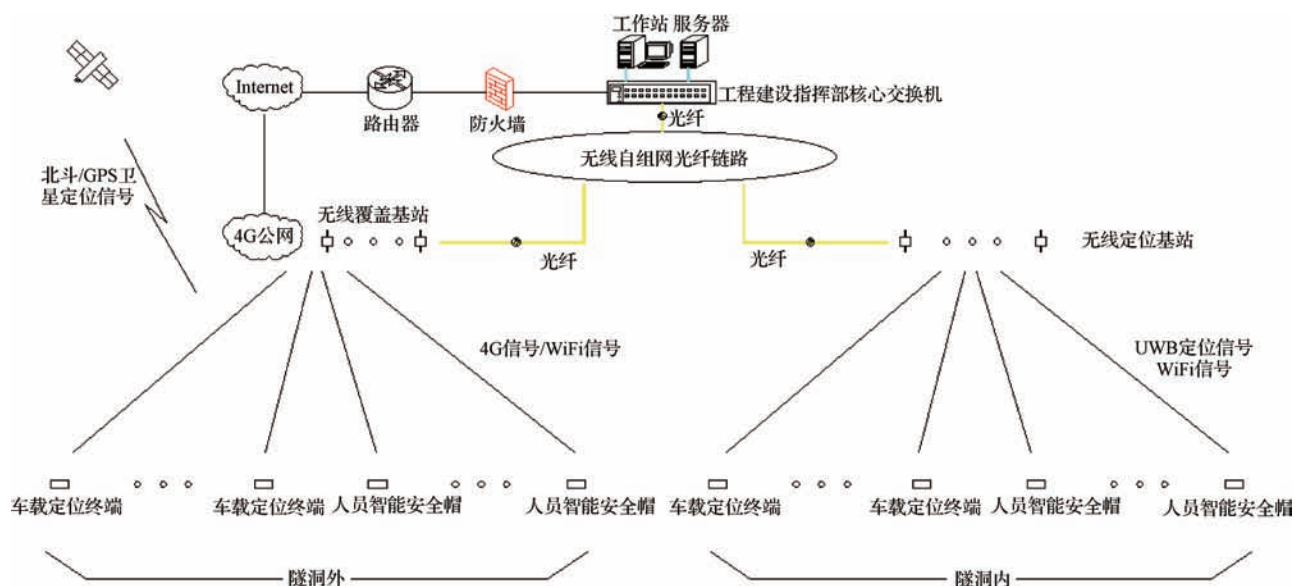


图 2 车辆人员定位系统结构

4.1.2 室外定位

大坝主体施工区域、水垫塘施工区域、场区道路等室外区域采用北斗定位技术，在大坝右岸附近安装 RTK 移动基准站，覆盖半径为 30km，可覆盖整个东庄水利枢纽施工区域，为施工车辆配置北斗定位终端，为施工人员配置含北斗定位功能的智能安全帽，定位精度小于 5m。

4.1.3 洞室内定位

在交通隧洞、施工支洞等室内区域采用 UWB 定位技术，沿隧洞每 400m 布置一套 UWB 定位基站。施工车辆配置的北斗定位终端及施工人员配置的智能

安全帽同时支持 UWB 定位功能，当车辆由室外区域进入室内区域或由室内区域进入室外区域时实现北斗定位与 UWB 定位自动切换。

4.2 施工交通车辆测速监控

在 2 号道路、长岭隧道口、1 号道路及 6 号道路等处布置道路监控系统 4 处，用于监视施工区域车辆超速，实现施工区域的交通安全管理。系统由窄带测速雷达、高清智能摄像机、测速终端服务器等设备组成。

主要实现功能包括车辆捕获、车辆测速、车辆及驾驶人员面部特征高清拍照、车辆牌照自动识别、车

身颜色自动识别、车辆型号判别、全景数字录像、记录及图像存储、前段设备管理维护、远程自动更新等功能。数据自动上传至车辆人员安全监管平台，同时利用施工车辆配置的行驶轨迹定位、预警信息接收、语音交互等车载智能终端，测速点位 LED 显示屏，自动向驾驶员发出预警信息，提醒司乘人员安全行驶。

4.3 车辆人员安全监管平台

基于 GIS 地信基础平台，具备接收、存储、处理、展示车辆人员定位轨迹信息功能；具备按施工车辆类型、施工企业人员、施工人员工种、施工区域等分类及条件组合查询、展示、统计、分析功能；具备车辆超速、超载、偏离道路，施工人员进入危险区、主要监控对象异常等报警功能，并自动向相应的司乘人员或施工人员发出警示信号或提醒指令功能；具备驾驶员或施工人员应急呼叫应答、上传图片或录像存储与查询、某车或某人实时/历史行进轨迹查询回放展示、多维度（油耗，物料运输次数、里程、吨位等）统计功能；具备与视频智能监控摄像机关联、异常联动与同步展示功能；具备大屏展示、桌面服务、

智能手机等移动终端查询服务功能和高性能处理能力。系统部署在东庄监控中心，服务器等设施由东庄监控中心云平台提供。

实现施工车辆、施工人员、施工区域门禁闸机实时数据与 BIM + GIS 平台接口的对接；提供车辆、人员登记、注册数据库及管理功能，提供车牌识别、人脸识别、电磁感应识别功能，配合施工现场智能门禁前端视频监视、电磁感应等实时信息，实现智能化管控。系统部署在东庄监控中心云平台。

5 施工工地安全管控

5.1 施工工地智能门禁

在东庄水利枢纽施工区主出入口、次出入口、3号路及1号路等处设置人员通道和车牌识别系统，共计4处。对进出施工区域以及往返施工区域与施工生活区之间的人员及车辆进行视频抓拍，通过监控平台管理软件记录、统计施工区域人员及车辆的相关信息。

系统由出入口线圈、出入口控制机、车牌识别模块及出入口雷达组成（见图3）。

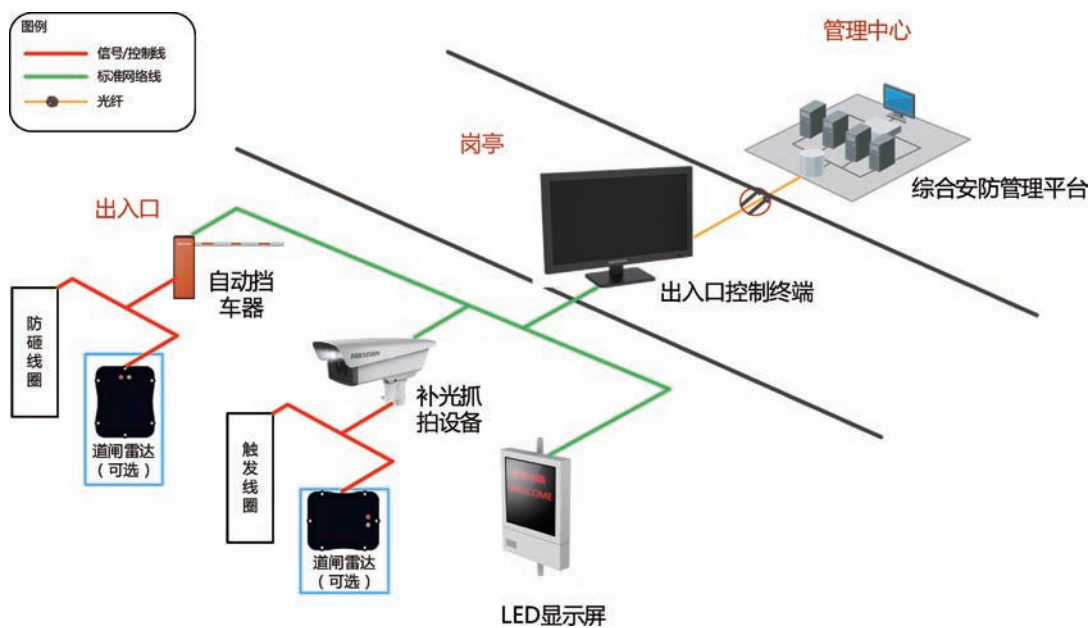


图3 智能门禁系统结构

5.2 施工安全预警设施

在施工区域重点位置共布设 14 处预警广播站、5 处室外 LED 预警大屏，用于安全文明宣传、安全预警及通知通报。采用基于 IP 网络架构的数字广播预警系统，利用无线自组网通信网络与监控中心通信。

施工安全预警设施布置见表 1。

表 1 施工安全预警设施布置

序号	安 装 位 置	设 施 类 型	单位	数量
1	左坝肩缆机平台	广播预警站、LED 大屏	套	1
2	右坝肩缆机平台	广播预警站、LED 大屏	套	1
3	上游围堰	广播预警站	套	1
4	下游围堰	广播预警站	套	1
5	电站厂房	广播预警站	套	1
6	混凝土拌和系统 2	广播预警站、LED 大屏	套	1
7	混凝土拌和系统 3	广播预警站、LED 大屏	套	1
8	砂石料加工系统 1	广播预警站	套	1
9	砂石料加工系统 2	广播预警站	套	1
10	施工生活 1 区	广播预警站	套	1
11	施工生活 2 区	广播预警站	套	1
12	施工生活 3 区	广播预警站	套	1
13	龙源基地	广播预警站、LED 大屏	套	1
14	110kV 施工变	广播预警站	套	1

6 施工工地智能巡检

东庄水利枢纽工程采用无人机实现施工工地的智能巡检，共配置 2 套无人机巡视系统，1 套无人机机舱。无人机能在指定场景稳定拍摄图像和录像，并将前端图像经由地面站传输至后端平台中心，接入视频监视系统。无人机巡视系统主要由飞行器、挂载、地面站三大部件组成，飞行器可以通过遥控器手动操控，也可以通过地面站设置航迹路径和其他飞行任务，支持前后、左右、升降和旋转等飞行动作。飞行器可将位置信息、飞行数据及云台采集到的视频发送至地面站，地面站通过有线或无线 WiFi 通信方式将位置信息、飞行数据及云台采集到的视频发送至后端平台。

6.1 系统功能

a. 无人机智能巡检系统具备基于二、三维 GIS 地图选择目标地点、巡逻区域和工作区域的功能，具备自动规划无人机飞行航线、目标航点自动飞行巡检任务功能；可一键起飞，实现零基础人员安全操作，并完成高质量数据采集。

b. 无人机巡检系统具备全自动高频次常态化施工人员监视、工程进度查看、施工安全巡查、工程进度形象航拍、作业工区人员数量检测、施工车辆行进路线、施工设施摆放等工地巡检基本功能。

c. 无人机智能巡检系统能够定时定点自动巡检，利用 AI 技术自动识别危险作业等异常情况；对危险区域实行重点监控拍摄，并实时传回至东庄监控中心。

d. 具备无人机视角和地面监控视角融合共享、地空联动、对比分析、异常发现、自动预警功能，为应急事件决策会商、调度指挥提供全方位技术支撑。

e. 具备 7×24h 待命、3min 快速响应能力，实现日常巡检常态化作业。

6.2 数据采集与处理

无人机飞行平台具备用高倍变焦热红外相机采集照片、视频等影像资料的能力。

无人机搭载的倾斜摄影传感器、机载雷达传感器应具备影像、点云数据的采集功能；基于三维建模软件，实现无人机航拍影像 DRG、DLG、DEM、DOM 等 4D 成果和三维模型数据导出及展示功能；为工程测量、地形测绘、施工进度管理、施工质量检测、土方量计算、多期数据对比分析提供数据资源。

6.3 视频监视与报警

具有无人机航拍视频、照片数据自动分析、违规作业人员及危险行为自动识别，通过智慧工地安管平台实现声光报警、语音提醒功能。

无人机具备搭载数字语音广播、高亮探照灯、声光报警器、物品抛投器四合一功能组件的能力，实现空中巡查和施工违规行为预警功能。（下转第 57 页）

工程设计

水库闸门泄洪远程控制系统设计

郎 涛

(安宁市水务局, 云南 安宁 650300)

【摘 要】 针对水库闸门远程控制系统设计中通信延迟高导致的控制协调性差的问题, 文章提出了水库闸门远程控制系统, 设计了现场硬件控制单元, 测量闸门开度并纠偏处理, 在通信协议的支持下计算闸门开度控制量。实验结果表明: 提出的远程控制系统远程通信延迟低, 闸门开度相对误差小, 该系统的控制协调性得到了增强。

【关键词】 水库; 闸门系统; 自动控制; 远程通信; 协调性

中图分类号: TV663

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-052-06

Design of Discharge Remote Control System for Reservoir Sluice

LANG Tao

(Anning Water Bureau, Anning 650300, China)

Abstract: A remote control system of the reservoir gate is proposed in the paper aiming at the problem of poor control coordination caused by high communication delay in the design and study of reservoir gate remote control system. A field hardware control unit is designed to measure the gate opening and correct the deviation. The control quantity of gate opening is calculated with the support of the communication protocol. Experimental results show that the remote communication delay of the proposed remote-control system is low. The relative error of the gate opening is small. The control coordination of the system is enhanced.

Key words: reservoir; gate system; automatic control; telecommunication; coordination

水利工程中, 通常会在关键进出口等要道设置各类闸门, 用于保障水库顺利完成防洪等任务, 维护水库的安全和效益^[1-3]。随着技术的革新和发展, 对于闸门的控制逐渐从手动转变为自动, 利用计算机技术监控闸门的启闭, 经过不断发展, 逐渐实现了闸门的

实时监控和自动控制^[4]。但是, 随着水情水调的变化和流域经济的发展, 对水库闸门的控制要求越来越高, 以往的控制手段越来越难以满足实际的控制需求^[5]。

近年来, 水资源短缺问题愈加明显, 水资源的合

收稿日期: 2022-06-23

作者简介: 郎涛 (1978—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程项目管理工作。

理管理和发展受到越来越多人的重视，闸门的精确控制是科学管理水资源的重要保障^[6]。国外在闸门控制上的研究有很多经验，如美国的某自动化控制系统，能够同时控制大量闸门的运行，其他一些国家在闸门自动化方面集成度较高，有很多成功的案例，有很多成功的经验值得借鉴^[7]。在国内，水库闸门的控制研究与发展不是很完善，一些常规的闸门控制系统控制精确度较低，距离理想的智能化控制还有一些距离。如文献[8]提到的基于无线智能节点的远程控制系统，该系统在开发设计时，在内部模块布置了多个智能节点，实现了节点组网和综合态势显示，能够在闸门控制中通过节点回传目标状态信息，以便及时发出合理的控制指令，在实际应用上，受到通信距离的影响，控制指令的传输存在较高的延迟，系统的整体协调性需要进一步提高。文献[9]中提到的基于物联网和PLC的闸门系统也存在类似的问题，该系统借助物联网技术和PLC实现控制器的设计和远程无线通信，进而实现闸门的远程控制，系统在运行上十分稳定，但是对于远程通信延迟的问题并没有很好地解决，系统的协调性同样存在不足。因此，本文提出自动泄洪的水库闸门远程控制系统设计，以解决上述常规的控制系统中存在的问题。

1 自动泄洪的水库闸门远程控制系统硬件设计

在水库闸门远程控制系统的硬件设计上，借鉴以往使用的控制系统的总体结构（见图1），针对其中的部分环境展开设计研发。

考虑到在闸门远程控制系统中，实现良好的控制效果离不开控制模块的支持，因此针对图1中显示的控制模块展开设计。

1.1 现场控制单元设计

对于控制模块，分两部分进行设计，一部分是现场控制单元设计，另一部分是传感器的安装设计。对于现场控制单元设计，选用限位开关、触摸屏、步进电机等硬件组成控制单元^[10]（见图2）。

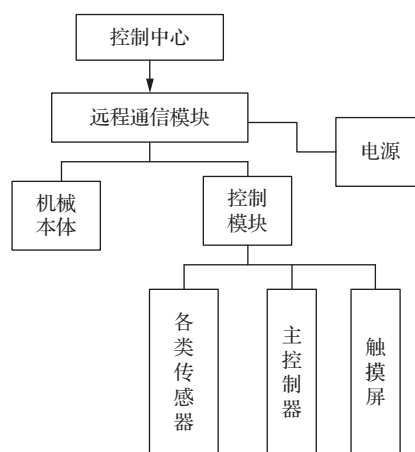


图1 闸门控制系统总体结构示意图

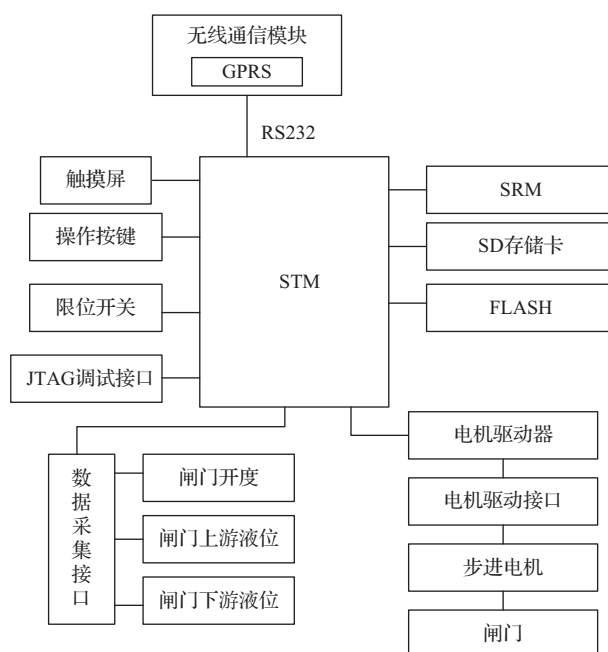


图2 闸门现场控制单元硬件结构

图2中使用的PLC型号为CPU315-2DP/PN，方便构建容错系统；每一个控制柜均采用PROFIBUS通信，通过电缆将其与触摸屏连接在一起，形成通信网络，各控制柜采用星型拓扑结构组网，以满足多种宽频需求。在上述设计的基础上，安装闸门开度传感器。

1.2 安装传感器设计

水库闸门开度的自动控制中，开度的大小是重要参数之一，只有获得准确的闸门开度，才能实现闸门开度的有效控制。为保证闸门开度自动控制的安全运行，使用灵敏度高、抗干扰性能强的传感器测量闸门

开度。具体的设计内容如下:

在硬件设计中,采用两种传感器监测闸门远程控制信号,分别是绝对式传感器和增量式传感器(见图3)。

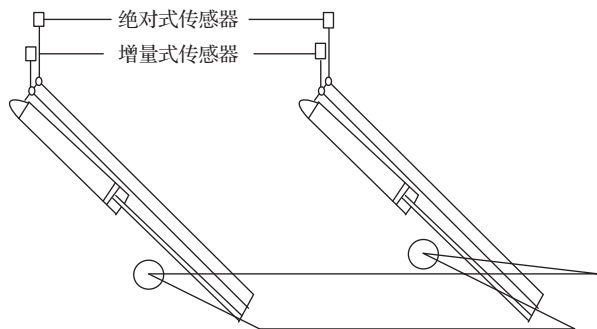


图3 传感器安装示意图

图3中显示了两种不同的传感器在两侧油缸上的安装情况,两种传感器的安装分别实现了控制同步信号的传输和监测数据到现场控制单元的可靠传输。当闸门运动时,卷筒转轴就会带动两个旋转编码器转动,以拉线伸缩的位移作为依据,通过系统软件部分可以计算出闸门开度,进而控制闸门。同时,为了避免闸门出现损耗,将限位开关安装在闸门运行的最高点和最低点,当闸门启闭过程中达到限位时,提示报警,保证闸门和系统的安全。在上述硬件设计的基础上,展开水库闸门控制系统软件部分的设计。

2 自动泄洪的水库闸门远程控制系统软件设计

2.1 闸门开度测量及同步纠偏

当水库闸门两边运行不同步时会导致闸门无法开启,为了避免这种错误发生,在闸门远程控制系统设计中测量闸门开度并对其进行同步纠偏处理。

以控制精度为依据,将闸门有效行程内的开度曲线划分为多个直线段,这样处理后可以有限基点区间内的曲线当作基点之间连接的直线,从而建立闸门开度 W 的计算模型。公式如下:

$$W = \frac{(Q_n - Q_{n-1})(X - X_{n-1})}{X_n - X_{n-1}} Q_{n-1} \quad (1)$$

式中 X ——读取的液压缸实际数值;

X_n ——理论上的液压缸位移数值;

Q_n ——各个区间开度的计算值, $Q_0 = 0$, Q_n 表示最大行程开度;

n ——区间分段数量。

由闸门开度的计算模型可知,液压缸的初始位移读数能够在闸门全关闭情况下确定,根据上述计算公式即可实现实时监控闸门开度的效果。

针对可能出现的闸门不同步的情况,采用同步控制原理,利用位置测量传感器监测两端油缸的行程,通过产生的监测信号判断行程是否存在差异。如果两端存在差异,通过软件程序的逻辑判断发出控制指令,消除油缸两侧的行程误差,使其同步工作。另外,当系统开始纠偏时,自启门开始,判断两侧油缸行程,出现行程偏差,则给定修正电压,直到达到同步要求。确定闸门开度后,在远程通信模块和通信协议的支持下,实现闸门的自动控制。

2.2 闸门远程控制设计

在闸门控制系统的远程通信设计上,利用 Modbus 协议定义一个能够被控制器识别的消息结构;在 Modbus 协议的支持下,每个控制柜都可以通过此协议找到目标设备地址,根据地址的不同产生不同的行为;如果需要回应,控制柜也是通过 Modbus 协议发出,实现控制柜与其他设备的数据交换。

Modbus 在数据传输上有两种模式,根据实际需求选择 RTU 模式或 ASCII 模式,在配置每一个控制柜时,用户需要选择合适的通信模式和通信参数,实现最佳的数据交换。

在远程通信协议的支持下,计算闸门开度控制量,用于控制闸门启闭。相关计算公式如下:

$$u = T_d \frac{dw_c}{dt} + w_c \quad (2)$$

$$\frac{dw_c}{dt} = \frac{1}{T_d}(u - w_c) \quad (3)$$

式中 u ——闸门开度控制变量;

T_d ——控制回路的输出;

w_c ——闸门开度。

式 (2) 的作用是防止闸门频繁上升或下降造成闸门损耗, 能够使闸门升降更加科学, 式 (3) 为整理后的计算公式, 通过式 (3) 即可计算出最佳闸门开度控制量。至此, 自动泄洪的水库闸门远程控制系统设计完成。

3 自动泄洪的水库闸门远程控制系统实验研究

3.1 实验准备

在水库闸门远程控制系统设计完成后, 针对整个系统设计结果进行实验研究, 验证系统的控制协调性, 同时根据实验分析证明系统在实际应用上各项功能正常。

以水库闸门作为实验案例, 在实验前, 检查现场控制柜线路电源是否正常, 在保证电源供给正常后, 设计水库闸门控流, 用于后续实验研究 (见图 4)。

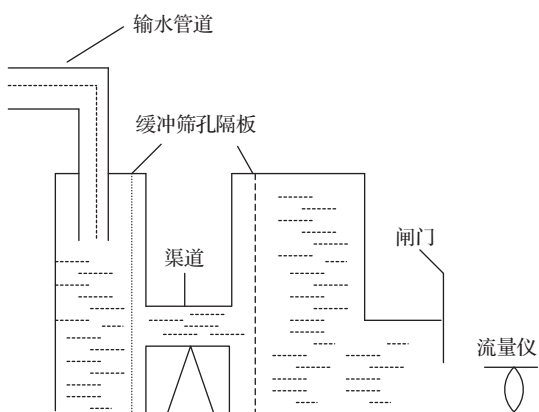


图 4 闸门控流示意图

为了保证实验中闸门流态势自由出流的状态, 在图中显示的闸门位置设计堰体结构, 避免流量变化影响实验结果 (见图 5)。

考虑到实验中需要调整不同的流量, 需要远程通信技术支持控制指令的传输。因此, 在实验中对远程控制系统的通信部分进行实验。综上所述, 在水库闸门远程控制系统实验研究中, 设计远程通信同步实验和闸门开度精确度实验, 通过这两组实验分析控制系统的控制协调性。

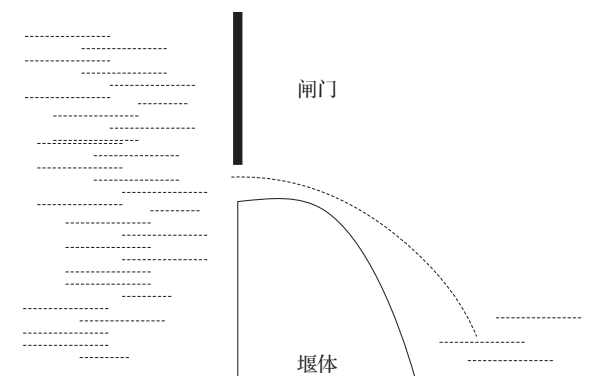


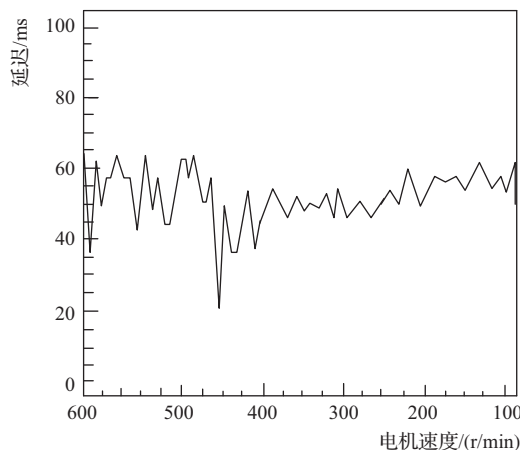
图 5 堰体结构示意图

3.2 远程通信同步实验结果及分析

在远程通信同步实验中, 将水库闸门远程控制系统布置在闸门和计算机上, 连接同一个路由器, 在各个控制系统中的数据采集模块设置相同的 IP 地址。借助网络调试助手设置本地端口和本地 IP。设置完成后, 利用计算机的命令控制台测试系统的网络连接情况, 在保证连接正常的情况下进行各个控制系统的远程通信同步实验。

控制系统远程通信同步实验以闸门电机接收的控制信号延迟作为实验指标, 延迟越高, 说明控制系统远程通信同步效果越差, 延迟越低, 说明控制系统远程通信同步效果越好。实验结果见图 6。

上述实验设定目标为 100cm, 控制电机以较高的速度向期望值运行, 达到期望值后输出实验结果。观察图 6 中显示的结果可知, 三组实验结果中, 基于无



(a) 基于无线智能节点的控制系统实验结果

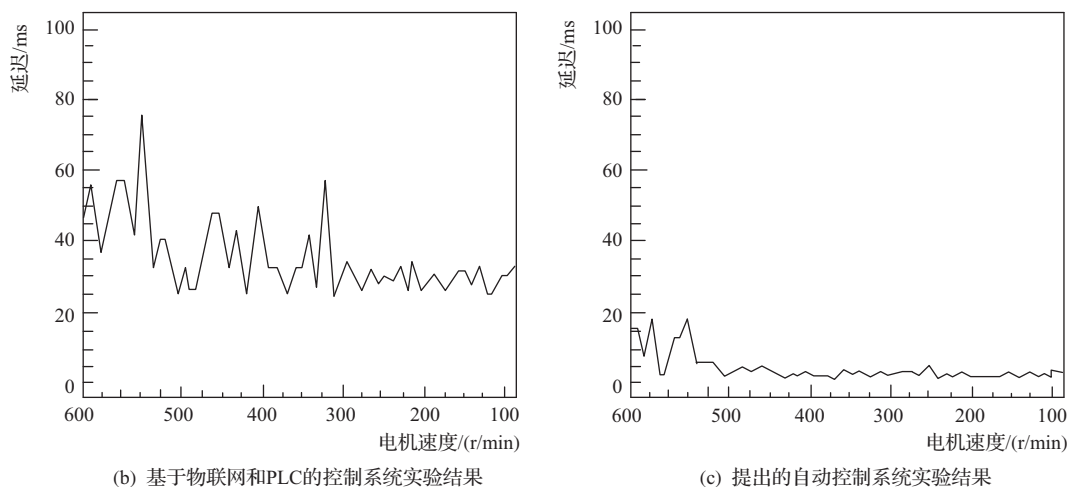


图6 不同控制系统远程通信同步实验结果

线智能节点的控制系统和基于物联网的控制系统延迟较高，在电机向期望值运行的过程中延迟波动比较大，非常不稳定，控制效果极差。相比之下，提出的自动控制系统在经过短时间的波动后逐渐稳定，并且延迟远远小于另外两种控制系统。综上所述，提出的水库闸门远程控制系统远程通信同步更明显，在闸门控制上具有更好的控制效果。

3.3 闸门开度精确度实验结果及分析

在闸门开度精确度实验中，设置不同流量，使用不同的控制系统执行不同流量控制指令并求解最优闸门开度，同时得到不同条件下的系统计算流量，将其与给定流量进行相对误差的计算，根据相对误差计算结果，分析各个控制系统的闸门开度精确度（见表1）。

表1 闸门开度精确度实验结果

系统类别	实验指标	给定流量/(m ³ /s)				
		0.05	0.08	0.10	0.12	0.15
基于无线智能节点的控制系统	最优闸门开度/m	83	125	145	149	181
	流量相对误差/%	5.61	6.48	4.64	5.92	3.19
基于物联网和PLC的控制系统	最优闸门开度/m	79	117	147	155	176
	流量相对误差/%	4.39	3.98	3.51	5.85	6.09
提出的自动控制系统	最优闸门开度/m	81	120	142	151	178
	流量相对误差/%	0.21	0.35	0.19	0.14	0.09

从最优闸门开度结果和流量相对误差两方面分析各个控制系统的性能，随着给定流量的增加，最优闸门开度在不断变大，三组结果相差并不大，理论上对自动泄洪工作影响较小；但是在流量相对误差实验结果中，基于无线智能节点的控制系统和基于物联网的控制系统数值比较大，远远高于提出的自动控制系统

实验结果。再结合最优闸门开度实验结果综合分析可知，三组实验结果中，只有提出的自动控制系统能够满足对闸门开度精确度的需求，相对误差低，闸门开度最佳，并且在远程通信方面也更加稳定，提出的水库闸门远程控制系统在实际应用中协调性优于常规的控制

4 结 语

本文以自动泄洪的水库闸门控制作为主要研究内容,为了满足闸门的实际控制需求,提出了自动泄洪水库闸门远程控制系统设计。在系统设计上,从硬件和软件两方面展开研究与分析,设计系统整体结构和功能。在系统开发设计完成后,以常规的控制系统作为参考对象,通过远程通信同步实验和闸门开度精确性实验,证明了提出的控制系统应用性能更好。但是,在实际工作中很容易受到外界天气的影响,因此,在后续研究中,重点研究天气因素对控制效果的影响,尽可能使控制系统更加完善。▲

参考文献

[1] 廖晓梅,申晟,余亿坤. 水电阀门液压系统无线远程智能控制的研究[J]. 机床与液压,2020,48(14):91-95.
[2] 李如忠,何瑞亮,刘超,等. 水库泄洪闸下溪流深潭氮磷营养盐

滞留特征及动力学模拟[J]. 环境科学学报,2021,41(11):4606-4614.

[3] 刘孟凯,关惠,郭辉,等. 南水北调中线工程封冻期闸门群开度控制器改进设计[J]. 农业工程学报,2020,36(17):90-97.
[4] 涂承义,黄维,马旭东,等. 沙坪二级水电站泄洪消能及闸门运行调度方式研究[J]. 水电能源科学,2022,40(1):82-85,93.
[5] 杨秋贵,王永好,姜新煜,等. 前坪水库泄洪洞明挖爆破试验与数值模拟[J]. 人民黄河,2021,43(1):137-140,151.
[6] 白旭峰. 基于分布式光纤的网络化远程控制系统[J]. 激光杂志,2021,42(3):110-114.
[7] 周建方,郑鼎聪,冷伟,等. 我国水库水位和闸门水头统计特性研究[J]. 水力发电,2021,47(9):87-93.
[8] 李明,刘若愚,姜春兰,等. 基于无线智能节点的远程控制系统设计与实现[J]. 北京理工大学学报,2020,40(8):849-855.
[9] 姜明梁,王坤鹏. 基于物联网和 PLC 的灌区测控一体化闸门系统设计[J]. 灌溉排水学报,2020,39(S2):82-86.
[10] 严根华,董家,孙云茜. 上翻式拱形闸门的流激振动控制及原型观测验证[J]. 水利水电科技进展,2020,40(5):55-61.

(上接第 51 页)

6.4 数据通信

无人机具备搭载 4G/5G/微波通信终端和无人机图传的能力,实现视频信息压缩、编码和实时高速回传功能。

6.5 与其他系统集成

基于智慧工地安管平台,集成无人机库管理、无人机运行状态、图传网络通信状态、视频图像数据回传展示功能,实现一张图管理。

7 结 语

智慧工地建设应以工程建设实际需求为导向,以提高工地管理水平为核心,以施工现场安全管理为重点,建设平安工地、高效工地、文明工地、规范工地。陕西省东庄水利枢纽工程智慧工地监控建设实现了施工管理、安全管理、质量管理的规范化和智能化,提高了管理水平和工作效率。为水利水电工程智慧工地监控建设积累了经验,提供了借鉴的技术方法。▲

大口径顶管穿越不明地质高速公路的设计探究

张新宇

(深圳市广汇源环境水务有限公司, 广东 深圳 518000)

【摘要】 随着顶管技术在国内普及及快速应用发展,大口径顶管在水利工程建设中越来越普遍,但大口径、穿越不明地质且地下水丰富的高速公路却应用极少。文章针对深圳市宝安区 DN2400 初雨转输管穿越未知地层且地下水丰富的设计关键技术进行分析探讨,从非开挖顶管工法可行性、水平超前注浆工艺及延伸顶管设计的教训思考三个方面开展论述,为类似工程提供借鉴参考。

【关键词】 大口径;地层不明;超前注浆;顶管工法

中图分类号: TU992.23

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-058-04

Study on the Design of Large Diameter Pipe Jacking Through Unknown Geological Highway

ZHANG Xinyu

(Shenzhen Guanghuiyuan Environmental Water Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: With the popularization and rapid application development of pipe jacking technology in China, large diameter pipe jacking is becoming more and more common in water conservancy project construction. However, it is rarely used in highways with large diameter, unknown geology and abundant underground water. This paper analyzes and discusses the key design technologies of DN2400 initial rain transfer pipe in Bao'an District, Shenzhen, which passes through unknown strata and has abundant groundwater. The feasibility of trenchless pipe jacking method, horizontal advanced grouting technology and the lessons of extended pipe jacking design are discussed, so as to provide reference for similar projects.

Key words: large diameter; unknown strata; advanced grouting; pipe jacking method

1 工程复杂性论述

DN2400 初雨转输管,是为有效解决深圳市宝安区九围河沿河初雨进入铁岗水库的关键工程,能最大

限度地缓解雨季时过度沉积污染的底泥和九围河流域范围内面源污染带入铁岗水库问题。

该工程设计规模为 100% 的旱流漏排污水 (0.85 万 m³/d) 和九围河流域范围内建成区 7mm/h 内的初

收稿日期: 2022-07-05

作者简介: 张新宇 (1988—), 女, 本科, 工程师, 主要从事给排水设计工作。

雨水全部截排。本次 DN2400 初雨管，原施工图设计为初雨转输隧洞，尺寸为 $1.8\text{m} \times 1.8\text{m}$ ，采用新奥法施工，断面形式为马蹄形。因该段补勘存在砂层，且西边为洲石公路，东边为机荷高速，为保证九围河工程的顺利施工，该段调整为 DN2400 III 级钢筋混凝土专用顶管加水平超前深孔注浆施工。该段横穿机荷高速长度约 96m，管道埋深为 8.72 ~ 14.2m，根据两端井位钻孔勘察成果，本段顶管管位处于中粗砂层和砂质黏性土，稳定地下水水位约为 30.71m（地面高程为 33.11m），地下水丰富。且机荷高速约 96m 的管段中间无法进行地质勘察钻孔，机荷高速段地质情况不明。但该管段所处位置的东北侧方向约 200m 处原为大型弃渣场，存在大量孤石（直径 20 ~ 300cm 不等），经机构检测，孤石饱和单轴抗压强度在 70 ~ 100MPa。机荷高速公路下管位所处地层遇孤石的风险极大。

2 工程设计方案研究论证

针对上述 DN2400 初雨管横穿机荷高速地层不明、地下水丰富，管位处于砂层且存在孤石概率极大的不利边界条件下，选择投资可控、施工安全且保证机荷高速正常运行最优设计方案难度极大。本次针对 DN2400 初雨管横穿机荷高速的设计可行方案开展研究论述。

2.1 非开挖工法可行性论证

2.1.1 气压平衡式工法

气压平衡式顶管通过作用于临时掘进工作面上的气体压力来阻止地下水。此工法特别适用于流砂层且地下水丰富的土层，对砂层有很好的适应性。气压平衡工法在顶管机头中部设置两道气压密封门，把掘进机分为前后舱，在遇到地下障碍物时可打开舱门进入挖掘面人工清障，特别适用于既有地下水，又有不可预见的不明地下障碍物的地段的顶进。且气压平衡式工法适用于大直径顶管工程，通过调节供给的压缩空气的压力大小，实时调节舱内压力的高低，可精确到 0.1kPa，平衡比较彻底，施工后地面沉降极小。

本次 DN2400 初雨转输管非开挖工艺最关键的是要考虑到机荷高速公路下可能存在未知的障碍物，不排除饱和单轴抗压强度大于 50MPa 的块石存在，同时，结合两端井位钻孔地勘成果资料，管段管位处于含砂层且有丰富地下水，故气压平衡工法适用于本工程。

2.1.2 泥水平衡式工法

泥水平衡式顶管主要是利用泥水压力来平衡地层和地下水压力的一种顶管工法，以泥浆平衡装置自动控制。通过调节进泥和吸泥的泵量，使工作仓内泥水压力和地下水压力保持平衡状态。整个顶进过程中，控制好顶进与出泥速度尤其关键。其施工安全快速，特别是适用渗透系数大于 10cm/s，有严重流砂时。但遇到微风化及中风化岩层时，如强度大于 50MPa，顶进比较困难。考虑到机荷高速路段下地层不明，存在孤石的概率极大，若遇孤石顶进困难机头无法拿出，为保证机荷高速正常运行不可能明挖，故本项目不推荐此工法。

2.1.3 泥水平衡岩石顶管工法

与泥水平衡式工法区别在于采用能掘进硬岩的破岩顶管工法，机头适应的岩石强度在 70 ~ 100MPa。顶管顶进前需超前注浆改善不良地质，固化顶管断面的松散土质，便于岩石顶管安全施工。

破岩顶管工法关键之处在于机头，其刀盘正面布置的滚轮刀具，根据岩石的硬度确定，对其质量及破碎岩石硬度需充分评估，确保对岩层可剪切破碎，同时滚轮刀具的安装及在线更换需专业技术人员进行。岩石顶进时不能操作过急，整个顶进过程需缓慢循序渐进。

对于易崩坏的砾石地层，采用泥水式机头最理想，送水压力平衡地下水可以防止喷发和流失，控制地面下沉至最小。本工法同样适用于该工程，施工周期短，但每延米费用接近 2 万元，因本项目非前期施工图设计，变更费用受限。

综合分析上述三种非开挖顶管工法适用性及特点，考虑到气压平衡式工法可开舱门，若遇到不明地层可

进入挖掘面人工清障，且综合单价较破岩顶管工法经济，故本工程采取气压平衡式工法较合适。

2.2 水平超前深孔注浆参数及工艺确定

针对 DN2400 初雨管横穿机荷高速地层不明、地下水丰富，除常规的气压平衡式工法顶进之外，为确保顶管顶进过程中遇到障碍物不得不开舱作业，在机荷高速又无法进行地面加固的边界条件下，对顶管段周边进行水平超前全断面深孔注浆改善不良地质，固化顶管断面的松散土质是非常有必要的，便于顶管顺利安全施工。

2.2.1 注浆布置形式

结合本项目工程特点，无法采取地面垂直或倾斜注浆，只能在工作井内采取放射性超前预注浆工艺。注浆前，掌子面挂网喷射 200mm 厚混凝土，做为止浆墙，钢筋网采用 $\phi 25$ 锚杆固定在掌子面上。全断面注浆孔在掌子面基本成环形布置，分 2 环，第一环 6 孔，孔深 6.264m，外插角 17° ；第二环 3 孔，孔深 6.021m，外插角 5° ；注浆孔孔口管采用 $\phi 89$ 焊接钢管，孔口管长 2.5m，孔口管外露长度 20~30cm，孔口管壁与钻孔之间采用麻丝填塞并注浆固结严实，孔口管起着导向作用，钻孔安装时，须牢固且严格控制外插角度（见图 1、图 2）。

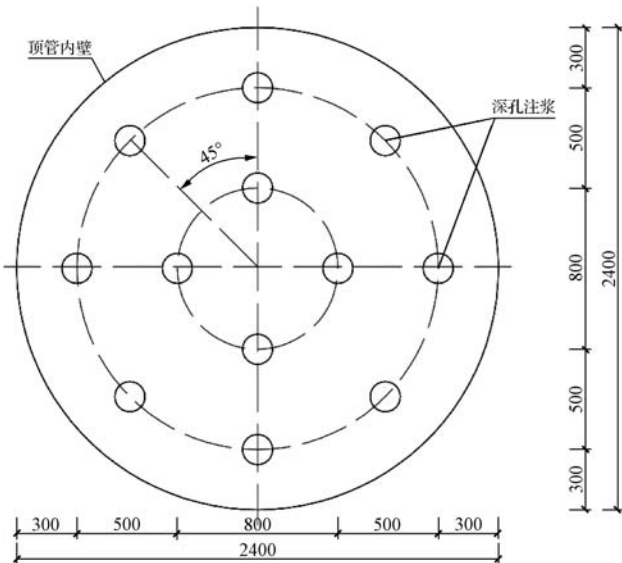


图 1 全断面深孔注浆布置（单位：mm）

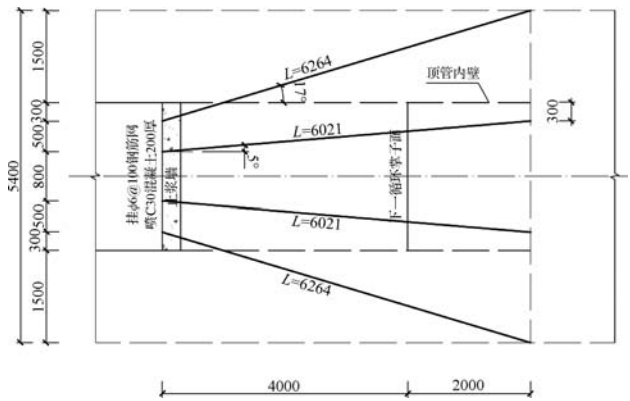


图 2 全断面深孔注浆纵断面（单位：mm）

2.2.2 注浆材料及注浆压力

本次注浆材料采用水泥-水玻璃双液浆，它具有速凝且凝固时间可控的特点，初定 $C:S$ （体积比）= $1:(0.6 \sim 1.0)$ ，水玻璃浓度为 35~40 波美度，模数 2.6~2.8，水泥浆水灰比 $0.8:1.0 \sim 1.0:1.0$ 。初定注浆压力为 0.5~2.0 MPa；其他工程设计具体参数可通过现场注浆实验确定。

2.2.3 注浆结束标准

注浆管路连接后，应通过压水试验检查注浆管路的密封性，并疏通注浆管路，冲洗围岩裂隙，利于浆液扩散，提高注浆效果。当注浆压力达到设计终压，并持续保持 10min 以上，且注浆量大于设计注浆量的 80% 以上时，即可结束本孔注浆。

2.2.4 注浆效果评判

掌子面一个循环的所有注浆孔完成注浆后，在开挖前，需要对注浆堵水、加固的效果进行检查，检查的方法是在掌子面主要破碎处、主要出水点附近设置 3~5 个检查孔，抽取岩芯观察并测定渗漏水量，当测孔内涌水量大于 $0.2 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m})$ ，或有一处涌水量为 $10 \text{ L}/\text{min}$ 以上时，应追加注浆钻孔；或者进行压水试验，在 0.75 MPa 的压力下，吸水量大于 $2 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m})$ 时，应追加注浆钻孔，直至小于上述指标为止。

2.3 工作井与接收井外围的止水设计

本项目工作井靠近机荷高速及洲石公路，有丰富地下水，考虑到地下水过高会导致沉井下沉过程中破

坏洲石公路和机荷高速公路结构的问题,为保证沉井施工安全,对其工作井外围设计高压旋喷桩止水,桩径中心距工作井外壁 0.5m,桩径 550mm,咬合 150mm,桩长 16m。注浆材料选用强度等级为 32.5 级的普通硅酸盐水泥,水灰比暂定为 1.0,每延米桩身水泥用量不小于 300kg,注浆压力应大于 20MPa,提升速度宜控制在 7~12cm/min,旋转速度为 10r/min。其具体参数可根据现场试验段确定的相应数据进行调整。

3 本工程延伸顶管设计经验

3.1 顶管工艺前期勘察成果质量的把关

顶管前期设计工艺选择最核心的依据是顶管管位所处地层地质情况,故地质勘察布孔的合理性及勘察成果的准确度非常关键,很多工程前期设计工期短,勘察时限更短,且设计人员和勘察人员沟通不紧密,往往勘察布孔与设计管位偏差较大,且大部分项目勘察并未严格按照顶管设计规范要求按不同勘察阶段的探孔间距布孔,导致实际施工管位所处地层与提供的勘察成果有偏差,特别是遇到特殊地层,会直接导致重大变更,对项目投资及工期都有较大影响。

3.2 大口径顶管长距离顶进减少推力的设计

顶管顶进过程中需要克服管道与四周土体的侧向摩阻力及前方的土体压力,顶管顶进时的推力,主要是克服管外壁与地层间的摩擦力。而管材的轴向耐荷力有一定限度,为有效解决这一矛盾,措施一是在顶管机后部和各管段内通过注浆孔向管外壁和地层间的空隙注入润滑剂,形成浆套,可大大减小管壁摩阻力,其效率在 25%~60% (视地层不同而不同);措施二是根据工程具体情况确定顶力,对中长距离顶管应根据现场实际情况在管段间按一定间隔设置“中继间”的千斤顶组,采用接力方式顶进。整个顶进结束

后,撤去千斤顶组,使中继间闭合形成一个标准管节。中继间的止水密封圈,考虑采用可在线更换的密封圈;措施三是刀具(特别是滚轮刀具)的在线更换设计,这也是有效延长长距离顶进减少推力的有效方法之一。

4 砂砾地层和岩盘地层兼用顶管机应用思考

由于砂砾地层和岩盘地层掘进设备的刀盘面板构造(有法兰盘式、小倒角式和大倒角式等)和刀具的配置结构有较大的不同,后者须具耐磨特性和主要靠刀盘剪切破碎岩石,而前者须具挤压破碎防止砾石地层倒坏的机能,同时两者都须在遭遇黏土时要防止进泥口堵塞和刀具嵌泥的故障,故面对砂砾地层和岩盘地层兼用顶管机是今后顶管设计针对复杂地层的研究方向之一。

5 结 语

顶管施工是一种对环境影响很小的非开挖工法,特别是在深圳这个国际化大都市,穿越市政主干道、铁路、高速公路及重要建(构)筑物时,顶管工艺是首选。但大口径顶管在实施过程中仍然会遇到很多突发事件,如顶管掘进时发生路面沉降、塌陷,涌水、涌沙等,故顶管前期设计结合地质勘察成果一定要充分论证其方案可行性,在顶管工艺的选择论证及地层复杂与否选择土体注浆加固等均需充分研究探讨,保证项目投资可控,并对可能发生的突发事故做好应急预案,确保顶管工程顺利实施。▲

参考文献

- [1] 杜传宝. 顶管穿越复杂挡土墙下桩基的技术措施[J]. 上海建设科技, 2016(5):50-52.
- [2] 王春晓. 顶管技术在污水管道工程中应用研究[J]. 科技创新导报, 2009(16):56.

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.10.12

经验交流

风力发电基础冬季全过程温度控制

张 庚 郭延芳

(中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 海南 810007)

【摘 要】 风电工程在未来一段时间将成为国内施工建设的重要组成部分, 冬季施工将成为一种常态。为保证冬季风机基础混凝土浇筑质量, 文章以青海省高寒地区为例, 研究了高寒地区冬季施工期间, 采用的施工仓面保温棚、拌和楼岩棉棚保温、锅炉及相关供热管路保温、设备保温措施及锥坡面刮轨、人员全面监控测温等一系列温控措施, 推进了该施工方法在风力发电项目冬季施工的应用, 确保了风机基础冬季施工混凝土浇筑质量, 具有一定的推广意义。

【关键词】 暖棚法; 风机基础; 冬季施工; 保温

中图分类号: TM614

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-062-06

Temperature Control of Wind Power Generation in Whole Winter Process

ZHANG Geng, GUO Yanfang

(Sinohydro Engineering Bureau 4 Co., Ltd., Hainan 810007, China)

Abstract: Wind power projects will become an important part of domestic construction in the coming period of time, and winter season construction will become a normal state. Taking the alpine area of Qinghai Province as an example, in order to ensure the concrete pouring quality of fan foundation in winter, this paper studies a series of temperature control measures adopted during the winter season construction in the alpine area, such as the insulation shed of construction surface, rock wool insulation shed of mixing plant, boiler and heating pipelines insulation, equipment insulation measures and conical slope finish, comprehensive temperature monitoring measurement, which promotes the application of this construction method in winter season construction of wind power generation projects, ensures the concrete pouring quality of fan foundation in winter season construction, and has certain promotion significance.

Key words: warm shed method; fan foundation; winter season construction; insulation

1 研究背景

风力发电目前在国内已大范围施工及应用, 风力

发电工程属于“短平快”项目。近年来, 风力发电项目在施工过程中已面临冬季施工, 而在极限温度下保证风机基础混凝土浇筑质量成为施工重点控制对

收稿日期: 2022-07-29

作者简介: 张庚 (1992—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水利水电及新能源工程建设工作。

象，为此，需要研究可以在冬季对风机基础全过程进行保温的施工工法，以保证施工各项指标满足各类标准要求。

2 研究区域概况

青海省海南州特高压外送基地电源配置项目海南州切吉乡一标段 1000MW 风电场（550MW）风机基础及场内道路工程，工程规划装机规模 550MW，共布置 209 台风机机组，包含 2 号、3 号两个地块，具体布置为：2 号地块（500MW）安装 189 台 2.65MW 的风机机组，3 号地块（50MW）安装 20 台 2.5MW 风机机组。每台风机设置 1 座箱式变压器。2 号地块（500MW）中 400MW 采用 35kV 架空线路通过 16 回线路将电力输送至北侧切吉西 330kV 升压站，2 号地块（500MW）剩余 100MW 与 3 号地块（50MW）采用 35kV 架空线路通过 6 回线路将电力输送至 2 号风电场南侧新建切吉西 1 号 110kV 升压站，再通过 1 回 110kV 线路送至切吉西 330kV 升压站。本标段冬季混凝土施工共 80 个风机基础，共计混凝土 50560m³，首台风机基础于 2019 年 12 月 25 日开始浇筑，2020 年 3 月 31 日完成首批 80 台风机基础混凝土浇筑。

3 施工特点

相对以前风力发电工程施工，本工程施工有以下特点：本项目属于冬季施工，且地处高海拔位置，常年温度较低，年平均温度 1.9℃，冬季施工质量控制难度大；高寒高海拔冬季施工大跨度保温棚，底面为长方形，直径约 26m，高度不低于 2m，采用装配式钢结构，方便拆装；保温棚采用钢桁架支撑，顶部采用三防保温篷布覆盖，内部采用暖风机供热，保证棚内温度满足施工要求；保温棚棚面合理设置可揭开窗口，进料孔位置方便易调节，混凝土及锚笼环入料便捷；暖棚仓面供电采用离网型移动车载光伏车进行仓面保温和供暖，自混凝土浇筑开始，暖棚保温及供暖时间不得小于 48h；同时混凝土浇筑成型以后，需采用两层厚度 8cm 的保温被覆盖进行全冬季保温。在基

础周围进行覆土保温，保证风机基础冬季施工质量。施工工艺流程见图 1。

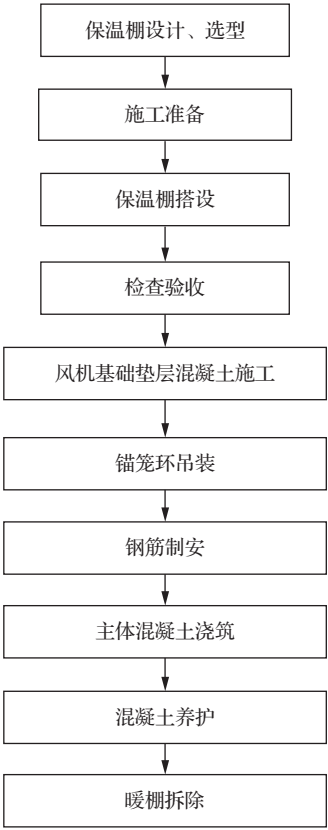


图 1 工艺流程

4 施工工艺操作要点

4.1 保温棚规格选择

单套保温棚采用两榀横向支撑桁架支撑，单榀长度为 25.2m，主骨架采用 $\phi 50$ 、 $\delta = 3\text{mm}$ 壁厚钢管；其他支撑采用 $\phi 20$ 圆钢支撑，焊接成长方体，高度为 0.3m，宽度 0.4m，斜向对拉支撑长度为 0.65m。采用 8 榀圆弧桁架作为保温棚骨架，间隔 3.53m 均匀布设，单跨圆弧桁架通过两榀弧形桁架之间的连接板连接而成，单榀弧形桁架由 $\phi 50$ 、 $\delta = 3\text{mm}$ 壁厚钢管及 $\phi 20$ 圆钢焊接而成，焊接完成后成三棱锥状，搭接在底部横向桁架之上，采用连接板连接。每榀桁架采用槽钢及钢管焊接件连接支撑，保证保温篷布受力均匀，连接件间隔 1m 布设（见图 2）。

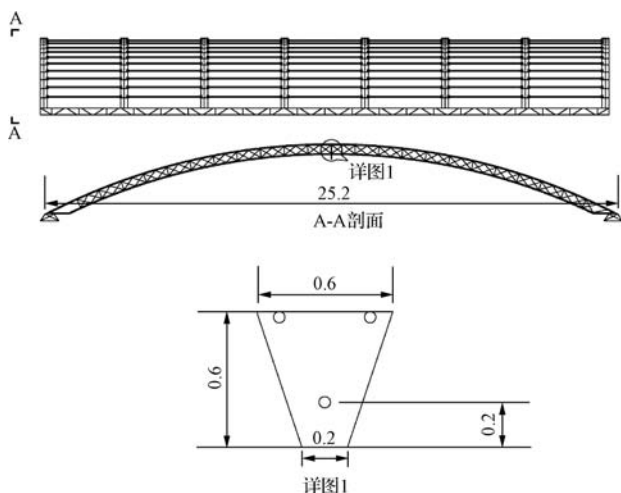


图2 保温棚图例 (单位: m)

4.2 保温棚搭建

a. 底层横向桁架安装。横向桁架共分为双侧, 四榀, 单榀长度 13m。安装时, 采用 25t 吊车或随车吊进行吊装, 人工在外侧进行辅助吊装就位, 吊装完成后在其外侧打安 $\phi 25$ 插筋, 插筋打入地下 50cm, 外露 20cm, 间隔 2m 布置, 保证底部基础稳定。

b. 弧形桁架安装。弧形桁架安装时, 采用吊车将桁架放平在平整的地面上, 将两块连接板拼接在一起, 上紧连接螺栓, 套装固定螺母, 再采用人工配合吊车将连接牢固的弧形桁架吊装就位, 将圆弧桁架底部连接板安装在横向桁架的连接板之上, 上紧连接螺栓, 套装固定螺母, 单榀依次循环安装完成。

c. 圆弧段横向支撑杆安装。支撑件采用 [8 槽钢及 $\phi 50$ 钢管焊接, 单个长度 3.63m, 间隔 1m 依次排在圆弧桁架上, 支撑件采用人工安装, 单个安装时, 必须将 [8 槽钢完全扣入圆弧桁架主管件之上, 保证支撑不会脱空伤人。支撑件安装时应自高至低依次进行, 便于操作人员施工时安全绳的使用。

d. 缆风绳安装。缆风绳采用塑料套管套装, 防止脱丝伤人, 缆风绳绑扎在两侧横向桁架之上, 沿弧形桁架方向布置, 将整个桁架缠绕一圈, 缠绕形式为双榀圆弧桁架对角拉紧, 再从圆弧桁架底部扎一根水平缆风绳, 根据设计, 共布置缆风绳 16 根, 现场将缆风绳采用花篮螺栓上紧后方可进行下一步作业。

e. 三防保温篷布搭设。待骨架工作全部施工完成, 再进行三方保温篷布的施工, 单块篷布尺寸为 $3\text{m} \times 15\text{m}$, 采用 25t 吊车将单侧绑扎钢管的三防保温篷布吊起, 自下向上铺设, 铺设沿一个方向进行, 搭接宽度不低于 30cm, 底部拖在地面上, 周边覆土, 保证其四周严密不漏风。

4.3 垫层混凝土浇筑

垫层浇筑时, 人员从弧形桁架攀爬至下料口位置, 采用钢筋加工成型的钩子将保温篷布揭开一个 1m 见方下料口, 根据需要, 共布置下料口 4 处, 人员在弧形桁架上开下料口时, 应该挂好安全带, 保证人员施工安全。

4.4 锚笼环吊装

锚笼环吊装时, 将中间两块保温被打开, 并将两侧的缆风绳稍做调整, 将中间部位横向支撑件中间 6m 位置全部拆除, 保证锚笼环吊装不受影响。

4.5 钢筋安装与基础混凝土浇筑

钢筋根据现场布置, 从在基坑边预留的马道口段, 将侧门保温篷布揭开, 人工抬入仓内即可。

基础混凝土浇筑时, 人工在保温棚顶部开一个 1.5m 见方的下料口, 人工开孔将两台泵车的泵管统一安放在同一个孔内。

4.6 养护期间保温措施

自混凝土浇筑开始, 暖棚保温及供暖时间不得小于 48h; 同时混凝土浇筑成型以后, 需采用两层厚度 8cm 的保温被覆盖进行全冬季保温。在基础周围进行覆土保温, 保证风机基础冬季施工质量。

4.7 保温棚拆除

风机基础混凝土养护到龄期覆土保温后进行保温棚拆除。

5 其他位置保温措施

5.1 骨料堆存棚保暖措施

骨料堆存棚可容纳 5000m^3 骨料, 主体结构采用彩钢结构, 顶棚采用彩钢板及透光材料交替布设, 料

堆区采用墙体隔离。骨料仓及受料仓占地面积为 $100\text{m} \times 40\text{m}$ ，保温棚外部搭设 $100\text{m} \times 45\text{m}$ 岩棉板 ($\delta = 10\text{cm}$) 保温棚进行全封闭式包裹，岩棉棚上预留骨料运输进出口两樘大门，大门尺寸为 $6\text{m} \times 8\text{m}$ ，采用卷帘门形式，车辆进出后及时进行关闭，保证料仓棚内温度。

骨料仓进行硬化处理，硬化面积为 1500m^2 ，厚度 30cm ，采用 C30 混凝土浇筑，在面层布设 $\phi 25 @ 25\text{cm} \times 25\text{cm}$ 钢筋，间隔 1.5m 布设 $\phi 50$ 暖气排管，保证仓内骨料温度。墙面采用暖气片供热，间隔 $40\text{cm} \times 2.5\text{m}$ 布置两排暖气片，保证室内温度。将供热管路尾端原本需要接引至冷凝器的管路接引至拌和楼水箱内，以给拌和用水加热。

5.2 拌和楼保暖措施

拌和楼内采用岩棉板全封闭包裹，拌和楼出机口采用岩棉板进行三面围挡，出口部位采用挂保温布进行保温，安装暖气片进行供热，保证楼内温度。下料口采用伴热带进行缠裹，保证下料口下料正常。

5.3 皮带机及水箱外部保暖措施

皮带机及水箱外部采用 10cm 厚岩棉进行全封闭式包裹，内部采用同路蒸汽管道进行加热，皮带机处采用钢管、水箱内采用花管（钢管），管道尺寸均为 $\phi 50$ 、 $\delta = 3\text{mm}$ 。皮带机棚尺寸为 $37\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ ，管路沿长度方向布置循环式管道，中间部位增加一条并联管路通向水池内，转用花管进行水箱内水的加热，形成一套回路，保证骨料及水的温度。现场水温测量为 1 次/h，若水温高出 60°C 时，拌和时先将水与粗细骨料进行拌制，完成后再加入水泥、粉煤灰及外加剂再次拌制，保证混凝土性能满足要求。

5.4 外加剂池保暖措施

外加剂的质量和应用技术符合国家现行标准的相关规定。外加剂附有产品说明书、出厂检验报告、性能检测报告及合格证，进场后取样复试，并检验外加剂与水泥的适应性。外加剂池采用钢结构箱体，外侧

安装伴热带，外层铺贴 2 层 3cm 厚橡塑保温海绵，同时用热水拌制外加剂溶液。

5.5 水泥罐保暖措施

工程冬季施工主要设置水泥罐 5 个，粉煤灰罐 2 个，水泥罐及粉煤灰罐出口采用伴热带加热，保证下料通畅。

5.6 受料斗及称量斗保暖措施

受料斗及称量斗基坑内布设暖气片，间隔 1.5m 均匀布设；架设两道暖气排管，布置在称量斗底部直皮带机上，暖气管道采用 $\phi 50$ 钢管；在受料斗顶部增加一排水平桁架，将暖风机固定在桁架上，单个受料斗内布置 2 台暖风机；受料斗内再采用 $\phi 50$ 管道沿内壁布设 2 排，保证受料斗内温度。

6 温度计算

根据合同文件，混凝土出机口温度不得低于 12°C ，入仓温度不得低于 8°C 。设置相关保温措施，对相关原材料进行保温，保证混凝土出机口及入仓温度。按照《水电水利工程混凝土预热系统设计导则》要求，采用加热拌和用水、加热砂石骨料等措施提高混凝土拌和温度，按照混凝土拌和温度计算公式计算混凝土拌和物温度。

6.1 拌制温度计算

a. 拌和用水温度为 60°C ，骨料温度为 3°C ，砂温度为 3°C （见表 1）。

$$\text{温度} = \frac{\sum (\text{实际重量} \times \text{比热} \times \text{材料温度})}{\sum (\text{实际重量} \times \text{比热})}$$

b. 拌和用水温度为 50°C ，粗骨料温度为 0°C ，砂温度为 0°C （见表 2）。

$$\text{温度} = \frac{\sum (\text{实际重量} \times \text{比热} \times \text{材料温度})}{\sum (\text{实际重量} \times \text{比热})}$$

在低温季节，混凝土拌和时因外界气温较低造成混凝土拌和物温度降低，在拌和站内部温度为 0°C 的

表 1 混凝土出机口温度计算

序号	材 料	理论重量/ (kg/m³)	实际重量 G/ (kg/m³)	比热 C/ [kJ/(kg·℃)]	温度 t/℃	GC = P/ [kJ/(m³·℃)]	GCt = Q/ (kJ/m³)
1	水 泥	407.00	407.00	0.92	0	374.4400	0
2	粉煤灰	85.00	85.00	0.92	3	78.2000	234.6000
3	砂 子	668.00	668.00	0.92	3	614.5600	1843.6800
4	中 石	990.00	990.00	0.92	3	910.8000	2732.4000
5	砂子含水（6%）		40.08	4.19	3	167.9352	503.8056
6	石子含水（2%）		19.80	4.19	3	82.9620	248.8860
7	拌和水	183.00	183.00	4.19	60	766.7700	46006.2000
合计						3108.7972	54151.9200
混凝土拌和温度			17.2147℃				

表 2 混凝土拌和温度计算

序号	材 料	理论重量/ (kg/m³)	实际重量 G/ (kg/m³)	比热 C/ [kJ/(kg·℃)]	温度 t/℃	GC = P/ [kJ/(m³·℃)]	GCt = Q/ (kJ/m³)
1	水 泥	407.00	407.00	0.92	0	374.4400	0
2	粉煤灰	85.00	85.00	0.92	0	78.2000	0
3	砂 子	668.00	668.00	0.92	0	614.5600	0
4	中 石	990.00	990.00	0.92	0	910.8000	0
5	砂子含水（6%）		40.08	4.19	0	167.9352	0
6	石子含水（2%）		19.80	4.19	0	124.4430	0
7	拌和水	183.00	183.00	4.19	50	766.7700	38338.5000
合计						3037.1482	38338.5000
混凝土拌和温度			12.7979℃				

条件下，根据《水电水利工程混凝土预热系统设计导则》，拌和过程中的温度降低值约为 3 ~ 3.5℃，因此，当拌和温度在 15 ~ 15.5℃时，能满足出机口温度不低于 12℃的要求。选用拌和用水温度为 60℃，骨料温度为 3℃，砂温度为 3℃，方可满足出机口温度 12℃的要求。

6.2 运输温度计算

拉运完成剩余温度（见表 3）= 出机口温度 - （温度损失系数 × 运输时间 + 0.032 × 转运次数） × （混凝土出机口温度 - 室外环境温度）。

表 3 拉运完成剩余温度计算

运输损失温度/℃	温度损失系数	运输时间/h	转运次数	混凝土出机温度/℃	室外环境温度/℃	现场棚内温度/℃
3.61	0.25	0.5	1	13.72	-20	6
拉运完成剩余温度/℃	10.11					

6.3 入仓温度计算

终温（见表4）= 拉运完成剩余温度 - 4 × 透风系数 × 3.6 ÷ （0.04 + 泵管外保温层厚度 ÷ 泵管外保温材料导热系数） × 泵管内混凝土与室外环境气温差 × 混凝土在泵管内输送时间 × 泵管外（含保温材料） ÷ 混凝土比热容 ÷ 混凝土质量密度 ÷ 泵管内径。

表4 入仓温度计算

到达现场温度/℃	10.11
透风系数	1.8
泵管外保温层厚度/m	0
泵管内混凝土与室外环境气温差/℃	4.11
泵管外保温材料导热系数	0.12
混凝土在泵管内输送时间/h	0.25
泵管外（含保温材料）/m	0.125
混凝土比热容	0.96
混凝土质量密度/（kg/m ³ ）	2440
泵管内径/m	0.139
温 降/℃	0.26
终 温/℃	8.78

根据上述温度计算，采取的措施可满足混凝土的温控要求。

7 结 语

风电工程在未来一段时间将成为国内施工建设的重要组成部分，冬季施工将成为一种常态，为保证冬季风机基础混凝土浇筑质量，青海省高寒地区冬季施工期间，采用的施工仓面保温棚、拌和楼岩棉棚保温，锅炉及相关供热管路保温，设备保温及锥坡面刮轨、人员全面监控测温等一系列温控措施，确保了风机基础冬季施工混凝土浇筑质量，具有一定的推广意义。▲

（上接第70页）

4 结 语

最高投标限价的编制工作是一项复杂的系统工程，往往涉及多个专业领域，要与施工方案密切相关，同时还应与已建、在建同类工程造价进行对比，分析成果的合理性。高质量的最高投标限价，能充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，提高国有资金使用效益，对预防惩治腐败具有重要意义。因此最高

投标限价编制的准确与否至关重要。▲

参考文献

[1] 穆秀英,吴新. 施工招投标阶段水利水电工程造价控制[J]. 水力发电,2010,36(2):4-7.

[2] 冉念. 水利水电工程招标控制价问题浅析[J]. 四川水力发电, 2014(S2):105-107.

[3] 蒯凤贤. 浅谈水利工程施工招标控制价的编制[J]. 河南水利与南水北调,2013(10):46-47.

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.10.13

浅谈水利水电工程最高投标限价编制的重点及方法

王勤学 李卓玉

(水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

【摘要】 为防止恶性投标竞争带来的投资风险, 提高投资效益, 合理确定和有效控制水利水电工程基本建设项目投资, 招标项目往往需要编制最高投标限价。文章分析了水利水电工程最高投标限价编制的重点, 总结归纳了编制原则、依据及方法, 以此提高最高投标限价编制的质量。只有客观、合理地确定最高投标限价, 才能有效管控工程投资, 真正发挥应有的作用, 提高发承包交易的成功率, 也有利于维护招标人和投标人的合法权益。

【关键词】 水利水电工程; 最高投标限价; 编制重点; 编制方法

中图分类号: TV512

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 10-068-03

Discussion on Key Point and Method of the Compilation of Maximum Bid Price of Water Conservancy and Hydropower Project

WANG Qinxue, LI Zhuoyu

(China Renewable Energy Engineering Institute, MWR, Beijing 100120, China)

Abstract: In order to prevent the investment risk caused by vicious bidding competition, improve the investment benefit, reasonably determine and effectively control the investment of water conservancy and hydropower project, the bidding project often needs to compile the maximum bid price. This paper analyzes the key points of the compilation of maximum bid price for water conservancy and hydropower project, summarizes the compilation principle, basis and method, so as to improve the quality of the compilation of maximum bid price. Only objective and reasonable determination of the maximum bid price can effectively control the project investment, really play its due role, improve the success rate of contract transaction, and be conducive to the maintenance of the legitimate rights and interests of tenderer and bidder.

Key words: water conservancy and hydropower project; maximum bid price; key point of compilation; compilation method

最高投标限价(也叫招标控制价)有效解决了设有标底招标存在的问题, 设有最高投标限价招标时, 最高投标限价或者最高投标限价的计算方法应当

在招标文件中明确。通常以所有通过初步评审的投标人经算术错误修正后的投标报价确定评标价基准值, 据此计算各投标人的投标报价得分。最高投标限价可

收稿日期: 2022-08-15

作者简介: 王勤学(1984—), 男, 研究生, 高级工程师, 主要从事水利水电工程造价工作。

以委托具有相应资质且经验丰富的咨询单位编制，也可以由招标人自行编制，高质量的最高投标限价可以提高招投标的成功率^[1]。

1 最高投标限价编制重点分析

a. 详细研读招标文件。水利水电工程规模大、地质条件复杂、建设周期长，往往将整个工程划分为若干标段。相邻标段难免存在交叉或者工序上的衔接关系，为控制施工质量，工程主要材料或部分关键施工机械设备可由发包人提供。因此，认真研读招标文件，弄清招标项目边界条件非常重要。条件允许的，应该去拟建项目所在地进行踏勘，调研当地材料价格、了解场内外交通情况、掌握项目建设的难易程度。

b. 编制依据的准确性。编制最高投标限价应依据国家或行业建设主管部门颁发的相关标准、计价规范、定额和计价办法，深入理解工程设计文件及相关资料，广泛搜集工程造价管理机构发布的工程造价信息和相关市场行情，支撑编制成果的可靠性和合理性。

c. 复核主要清单工程量。对影响工程造价的主要清单项目的工程量进行复核，通常土石方开挖、混凝土浇筑、钢筋制安等招标项目的金额占比较大。这些项目工程量的准确性，对工程造价的影响很大。虽然复核工程量的工作量很大，但这是保证工程造价准确合理的基础工作，应高度重视。

d. 科学分析主要工程单价。主要清单项目的工程单价，是各项主要工程造价和工程总价的决定因素。工程单价是由生产要素市场和生产力水平决定的，通过招投标竞争形成的生产要素市场和生产力水平更趋于市场水平。因此，必须深入调查和分析市场行情，通过与已招标类似工程进行同口径对比分析，结合招标条件尤其是技术条款，综合分析确定基本市场行情和平均生产力水平，计算工程单价。

e. 确定最高投标限价。专业的造价咨询机构，应充分体现咨询服务的质量、价值及特色。接受委托后，在认真研读招标文件的同时，须深入市场调查掌

握市场行情，广泛搜集已建、在建类似项目的造价信息，分析本项目招标面临的竞争态势，在充分理解和高度尊重招标人意见的基础上，推荐供招标人决策参考的最高投标限价。高质量的最高投标限价，应符合市场行情，贴近生产力水平相对较高的潜在投标人正当追求利润的期望，能为大多数合格的投标人竖起正当竞争标杆。也能对工程招标负责，能正确合理体现招标人的意愿，切实维护招投标双方的合法权益。

2 最高投标限价编制原则及主要依据

2.1 编制原则

①公平、公正、客观、求实；②最高投标限价的内容与招标文件的规定相一致；③维护招标人和投标人的合法权益；④结合工程实际，与当前水利水电建设市场相适应。

2.2 主要依据

①国家相关法律、行政法规及部委规章制度；②工程项目招标文件、招标设计图纸及补遗、答疑、澄清文件等；③相关计价依据以及权威部门发布的设备、材料价格信息等；④现场调研、搜集的资料；⑤造价咨询实施方案；⑥搜集的已完或在建类似工程项目的施工技术方案及相应报价资料；⑦其他相关资料。

3 最高投标限价编制方法

3.1 准备阶段

①接受招标人的委托，明确咨询服务相关事项；②由项目负责人主持编制咨询工作大纲，经公司技术负责人审定批准后实施；③配置咨询业务人员；④咨询资料的收集整理。

3.2 实施阶段

根据工程所处的地理位置，结合工程实际和水利水电建筑行业生产力水平，按照招标文件合同条件及技术条款的规定，参考现行行业定额、编制办法和费用标准，考虑当前国内建筑市场劳务价格和施工生产效率的实际水平，编制多方案进行投资对比分析后，

推荐工程最高投标限价。

采用工程量清单计价时，最高投标限价的编制内容包括分部分项工程费、措施项目费、其他项目费等。

3.2.1 分部分项工程费用的编制

分部分项工程费采用综合单价的方法编制。分部分项工程费由分部分项工程量乘以综合单价计算得出，采用的分部分项工程量应是招标文件中工程量清单提供的工程量；综合单价由基本直接费（人工费、材料费和施工机械使用费）、其他直接费、间接费、利润、税金和招标文件规定的其他费用组成，应根据招标文件中的分部分项工程量清单的特征描述及有关要求、行业建设主管部门发布的计价定额和计价办法等编制依据进行编制。

a. 清单定额子目的选用。根据清单的项目特征，所选定额的工作内容应涵盖清单项目的全部工作内容，做到不重不漏。

b. 人工预算单价。根据现行行业编制办法，合理确定人工预算单价。招标文件另有规定的，按招标文件规定计算。

c. 材料预算价格。发包人供应材料预算价格由供应原价、场内运杂费和采保费构成。承包人自行采购的材料预算价格主要通过市场询价和参考地方工程造价信息，经计取装卸费、运杂费和采保费后得出；对于砂石料价格、混凝土材料价格以及混凝土的温控措施及费用，均应根据招标文件要求和供应条件进行计算。

d. 施工机械台时费。计算方法和计取标准参考现行行业标准。

e. 工程单价取费。工程单价取费包含其他直接费、间接费、利润和税金。各项取费依据现行行业编制办法，参考市场报价水平进行调整。

f. 其他费用。根据招标文件中对风险责任的界定和费用的划分进行计算。最高投标限价与投标报价所含内容应一致，综合单价中应包括招标文件中招标人要求投标人承担的风险内容及其范围（幅度）内的风险费用。若招标文件提供了暂估单价的材料，应按

暂估单价计入综合单价。

3.2.2 措施项目费用的编制

措施项目费应依据招标文件中提供的措施项目清单、招标文件拟提供的施工边界条件和拟建工程项目的施工组织设计进行确定。可以计算工程量的措施项目，按分部分项工程量清单的方式采用综合单价计价；其余的措施项目可以以“项”为单位的方式计价。措施项目费中的安全文明施工费应当按照国家或地方行业建设主管部门的规定标准计价。

3.2.3 其他项目费用的编制

a. 暂列金额。通常，招标文件会约定计算方法或给定金额。应按招标文件要求进行计算。

b. 暂估价。暂估价包括材料暂估价和专业工程暂估价。暂估价中的材料单价应按照招标文件给定的价格计入工程单价中；暂估价中的专业工程暂估价应区分不同专业，通常招标文件会约定计算方法或给定金额。应按招标文件要求进行计算。

3.2.4 最高投标限价总价

将按照前述编制方法、编制依据、基础价格、工程单价取费费率及效率水平编制的分部分项工程费、措施项目费、其他项目费等费用进行汇总。在此基础上，综合考虑项目特点、投标竞争的激烈程度等因素，推荐供招标人决策参考的最高投标限价。

3.3 终结阶段

a. 编制形成初步成果，对初步成果实行三级校核。

b. 校核无误后，提交送审成果供委托方审查，并按审查意见修改后，提交经审查通过的最高投标限价成果。

c. 资料的整理与归档。资料由专人负责整理归档。并按内容分别归档，以便资料的存储、查阅、共享。

d. 对咨询服务进行回访、总结，对发现的问题，及时采取相应解决措施，并制定出针对性的业务培训与业务建设计划，持续完善、不断提高。

（下转第 67 页）