

## 《中国水能及电气化》征稿启事

《中国水能及电气化》是由中国水利工程协会等单位主办、面向国内外公开发行的科技类学术期刊(月刊),国际标准连续出版物号:ISSN 1673-8241,国内统一连续出版物号:CN 11-5543/TK。主要栏目包括:农村水电、绿色小水电、施工技术、建设管理、运行管理、水电站技术、科学研究及工程设计等。

为了更好地服务于水能资源管理和水电农村电气化领域,宣传党和国家的相关方针政策,传播科学管理理念,围绕行业改革与发展,报道行业内的新科研成果,交流行业内的建设与管理经验,传递行业信息,推广行业典型,倡导节能减排,促进我国水能资源管理及水电农村电气化事业蓬勃发展,现面向广大行业工作者、科研管理人员、高等院校师生、科研院所工作人员和关心水电行业发展的社会各界人士征集优秀稿件,稿件要求如下:

1. 来稿要求论点明确,问题集中,逻辑严密,文字精练,数据可靠,并须注明来稿系撰稿人原作且未曾在其他公开出版物上发表过。**文章字数要求在3500字以上。**标题简明扼要,字数限于20字以内。文章应有150~200字的摘要和3~5个关键词,置于标题和作者之后、正文之前。**摘要不能仅是背景介绍、重要性、意义等,而必须是对文章研究目的、研究方法、研究结论以及内容的概括。摘要及关键词编写的具体要求请见杂志网站“投稿须知”栏目**(<http://zgsn.cweun.org/tgxz.php?id=2>)。

2. 来稿请将作者姓名、工作单位全称、所在市县和邮政编码写在文章标题之下,文章作者人数不超过3人。在文末注明主要作者的姓名、性别、职务,并留下联系电话、传真、E-mail和联系地址。

3. 来稿一律采用法定计量单位和规范的书写符号,并遵循国家的相关规定。例如:单位符号一律用正体;物理量的符号一律用斜体;物理量如有下角标,下角标用斜体,等等。来稿如有附图,图中线条、文字、数据必须清晰无误,图片及照片最好为彩色,以便于排印,凡有数据的附图一定注明计量单位。图表中项目名称与单位之间用斜杠(/)分隔。

4. 根据《著作权法》,文稿引用他人作品,请在“参考文献”中注明原作者姓名、原作名称及来源,并在文中引用处用上角标注明,否则有关责任由来稿人自负。**参考文献采用顺序编码制,按正文中引用文献出现的先后顺序用阿拉伯数字连续编号,将序号置于方括号中,并视具体情况将序号作为上角标,或作为语句的组成部分,并与文末参考文献序号对应一致。**参考文献必须经细致查核方可引入,尚未公开发表的资料不要列入参考文献中,只可在出现页加脚注。参考文献著录格式如下:

**普通图书** 作者(多作者时作者名用逗号分开).书名[M].版次(第一版不标注).出版地:出版单位,出版年份:章节或起止页码。

**期刊中析出的文献** 作者(多作者时作者名用逗号分开).题名[J].刊名,出版年份,卷号(期号):起止页码。

**论文集中析出的文献** 析出作者(多作者时作者名用逗号分开).析出题目[C]//原论文集作者.原论文集名.出版地:出版单位,出版年份:起止页码。

5. 文稿正文编排格式一律采用阿拉伯数字,即第一层次用1, 2, 3, ... (顶格排,数字后无点);第二层次用1.1, 1.2, 1.3, ... (顶格排);第三层次用1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, ... (顶格排)。分项一律用英语字母,即a., b., c., ... (空两格排,字母后用下角点)。文内有分项,则用①②③...表示。

6. 来稿尽量通过E-mail发送,切勿一稿两投。本刊不负责退稿,请作者自留底稿。如果作者在投稿后两个月内未收到回复,可将稿件自行处理。

### 与作者的约定

◎为适应我国信息化建设,扩展知识信息交流渠道,本刊已被《中国学术期刊网络出版总库》《中文科技期刊数据库》《中国学术期刊综合评价数据库》和中邮阅读网全文收录。

◎本刊刊出的内容,未经本刊许可,不得转载。所有在本刊刊发的文字、图片,本刊拥有网络电子版权。如果作者有异议,请在来稿时向本刊声明。

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

联系人:牟佳 鲍娜 电话:010-63305281

邮政编码:100055

电子邮箱:wateree6346@163.com

[ 期刊基本参数 ] CN 11-5543/TK\*2005\*m\*A4\*70\*zh\*P\*¥16.00\*15200\*14\*2022-5



中国水能及电气化

CHINA WATER POWER & ELECTRIFICATION

2022年第5期(总第206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

05

2022.5  
月刊 总第206期



欢迎订阅! 欢迎投稿! 欢迎刊登广告!

## 《水利建设与管理》征订启事

(月刊 CN 11-4446/TV)

主管单位: 水利部

主办单位: 中国水利工程协会

编辑出版单位: 《水利建设与管理》杂志社有限公司

主要栏目设置: 本期特稿、172 项节水供水重大水利工程专题、建设管理、运行管理、科研设计、工程施工、水力学、水文泥沙、水环境与生态、水利信息化等。

本刊大 16 开全彩印刷, 全年 12 期, 每期定价 20 元, 全年订价 240 元, 每月 23 日出刊。

国内邮发代号: 2-781

国外发行代号: M03713

当地邮局或联系本社订阅, 电话: 010-63305220

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

投稿咨询电话: 010-63305239

刊登广告电话: 010-63305258

汇款账户户名: 《水利建设与管理》杂志社有限公司

开户行: 工行北京广安门支行营业部

账 号: 0200001919200186803

欢迎订阅! 欢迎投稿! 欢迎刊登广告!

## 《水资源开发与管理》征订启事

(月刊, ISSN 2096-0131  
CN 10-1326/TV)

主管单位: 水利部

主办单位: 中国水利工程协会

编辑出版单位: 《水利建设与管理》杂志社有限公司

主要栏目设置: 本期特稿、水资源管理、水生态保护、水文、河湖长制专栏、水利信息化、水利风景区建设与发展、防洪减灾、水文化、水市场、经验交流等。

本刊大 16 开全彩印刷, 全年 12 期, 每期定价 20 元, 全年订价 240 元, 每月 25 日出刊。

国内邮发代号: 82-389

国外发行代号: M09525

当地邮局或联系本社订阅, 电话: 010-63305220

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

投稿咨询电话: 010-63305233

刊登广告电话: 010-63305258

汇款账户户名: 《水利建设与管理》杂志社有限公司

开户行: 工行北京广安门支行营业部

账 号: 0200001919200186803

2022 5  
总第 206 期 月刊

## 中国水能及电气化

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

主 管 中华人民共和国水利部

主 办 水利部水电局

中国水利工程协会

中国大坝工程学会

四川省地方电力局

主 编 安中仁

编辑部主任 牟 佳

责任编辑 侯博丹

编辑出版 《中国水能及电气化》杂志社有限公司

通信地址 北京市西城区南滨河路 27 号

贵都国际中心 B 座 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.cweun.org>

电子信箱 [wateree6346@163.com](mailto: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号  
二维码, 欢迎扫描加关注, 随时检索  
协会会刊论文发表情况。

## 目 录

### 施工技术

- 1 输元河黑臭水体河段河道清淤处理方案分析 何先进
- 6 基于 BIM 的水利隧道综合施工数字化建造技术 张瑞申
- 12 永圣渡槽组合止水安装施工工法研究  
张红霞 刘 剑 陈崇德
- 17 丙烯酸盐灌注与表面聚脲封堵工艺在南水北调工程中的  
应用 杨 林 刘存辉 闫翠秋

### 科学研究

- 21 密云水库调蓄工程泵站技术供水系统改造研究  
王鑫鑫 王超飞 褚霄杨
- 25 牛都水电站狭窄河谷拱坝泄洪消能建筑体型优化试验  
研究 申洪波
- 32 铜川市水库清淤扩容技术可行性研究浅析  
由 灿 郭登成
- 37 引绰济辽工程平原区土壤对 PCCP 管道腐蚀性评价研  
究 于明鑫 武学毅 邵 杨
- 43 多水库条件下中泥河设计洪水组合分析  
陈 玮 李 凯

### 运行管理

- 50 比例式减压阀在山区农村供水中的有效应用 王旭峰
- 53 云计算 SaaS 模式在安全监测平台建设中的应用探索  
边 超 贺 虎 易广军
- 59 仕阳水库电站升级改造后管理人员“四个转变”岗位创  
新成效分析 王德明 李召阳

### 经验交流

- 62 “纳米胶”在黄坛口电站闸墩防碳化处理中的应用  
琚海荣 朱银秋 李彦波
- 67 聚羧酸高性能减水剂中氯离子含量测定方法对比分析  
张玉东

# Contents

## Construction Technology

- 1
- Analysis on Dredging Treatment Scheme for Black and Odorous Water Body Reaches in Shuyuan River
- HE Xianjin
- 6
- Digital Construction Technology of Water Conservancy Tunnel Comprehensive Construction based on BIM
- ZHANG Ruishen
- 12
- Study on Installation and Construction Method of Combined Water Stop in Yongsheng Aqueduct
- ZHANG Hongxia, LIU Jian, CHEN Chongde
- 17
- Application of Acrylate Grouting and Surface Polyurea Plugging Technology in South-to-North Water Diversion Project
- YANG Lin, LIU Cunhui, YAN Cuiqiu

## Scientific Research

- 21
- Research on Technical Water Supply System Transformation of Pump Station in Miyun Reservoir Storage Regulation Project
- WANG Xinxin, WANG Chaofei, CHU Xiaoyang
- 25
- Optimization Test Study of Narrow Valley Arch Dam Flood Discharge and Energy Dissipation Building Structure in Niudu Hydropower Station
- SHEN Hongbo
- 32
- Analysis on Feasibility Study of Dredging and Expansion Technology in Tongchuan Reservoir
- YOU Can, WU Dengcheng
- 37
- Study on Soil Corrosiveness Evaluation of PCCP Pipeline in Plain Terrain of Chao-to-Liao Water Diversion Project
- YU Mingxin, WU Xueyi, SHAO Yang
- 43
- Analysis on Design Flood Combination of Zhongni River under Multi-reservoir Condition
- CHEN Wei, LI Kai

## Operation Management

- 50
- Effective Application of Proportional Pressure Reducing Valve in Rural Water Supply in Mountainous Area
- WANG Xufeng
- 53
- Application Exploration of Cloud Computing Saas Model in Construction of Security Monitoring Platform
- BIAN Chao, HE Hu, YI Guangjun
- 59
- Analysis on Innovation Effect of “Four-change” Post of Management Personnel after Upgrading and Reconstruction of Shiyang Reservoir Power Station
- WANG Deming, LI Zhaoyang

## Engineering Design

- 62
- Application of “Nano-glue” in Anti-carbonization Treatment of Gate Pier of Huangtankou Power Station
- JU Hairong, ZHU Yinqiu, LI Yanbo
- 67
- Comparative Analysis on Determination Methods of Chloride Ion in Polycarboxylic Acid High-Performance Water Reducing Agent
- ZHANG Yudong

# 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

裘江海

## 秘书长

夏海霞

廖文根

## 编委会成员(按姓氏笔画排列)

王凤翔

王东胜

王丽平

王福岭

卢平

邝明勇

冯顺新

吉生元

毕振令

回士光

刘启华

刘改元

刘肃

刘德有

许德志

孙道成

李铭芳

吴克昭

吴新黔

邱小庄

张从银

张忠孝

张桂龙

张翾

陈洪(女)

陈德亮

禹雪中

夏海霞

徐祥利

唐山松

黄文宝

阎有勇

隋欣

葛捍东

程夏蕾

傅云光

鲁锡海

廖文根

樊新中

潘晓光

## 施工技术

# 输元河黑臭水体河段河道清淤 处理方案分析

何先进

(邯郸市水利水电勘测设计研究院, 河北 邯郸 056000)

**【摘要】** 为降低输元河淤积河段黑臭水体的内源污染负荷, 增强水体自净能力, 改善水质、美化生态环境, 文章针对设计河段确定清淤控制标准, 在现状调查、采样及底泥污染分析的基础上, 因地制宜制定可行的河道清淤处理方案, 从而提高河道水环境质量, 为城市河道黑臭水体治理发挥重要作用。

**【关键词】** 黑臭水体; 河道底泥淤积; 清淤处理

中图分类号: TV147

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-001-05

## Analysis on Dredging Treatment Scheme for Black and Odorous Water Body Reaches in Shuyuan River

HE Xianjin

(Handan Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, Handan 056000, China)

**Abstract:** The dredging control standards are determined aiming at the design river reaches in the paper to reduce the endogenous pollution load of black odorous water body in Shuyuan River alluvial river reaches, strengthen water self-purification ability, improve water quality, and beautify the ecological environment. The feasible channel dredging treatment scheme is formulated according to local conditions on the basis of present situation investigation, sampling and bottom mud pollution analysis, thereby improving the quality of river water environment. It plays an important role in the treatment of black and smelly water in urban rivers.

**Key words:** black and odorous water; sedimentation of river sediment; dredging treatment

相对于城市的快速建设和经济发展, 河道内源污染负荷加重, 河道水体污染控制与黑臭水体治理滞后, 很多城市出现了季节性和常年性水体黑臭现象, 给群众带来了极差的感官体验, 严重影响了居民的生产生活和城市生态环境安全, 黑臭水体治理已成为地方政府水环境治理重点, 备受社会关注<sup>[1-4]</sup>。为降低

收稿日期: 2022-04-13

作者简介: 何先进 (1976—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利水电规划设计工作。



## 1 工程概况

197.1km<sup>2</sup>，两堤间内坡脚相距200m，堤顶宽3~5m，主河槽宽5~15m。本文涉及工程分为两段：沁河改道入输元河汇入口段、复兴区与丛台区交界至彩虹桥段，总长5.75km（见图1）。河道淤积严重，局部低水主河槽已经淤平，现状河道过水能力严重不足，河道内有少量垃圾堆积，农业农村面源污染物未得到有效控制，部分河段由于生态基流较小，水环境恶化，水生态系统健康受到威胁（见图2）。



图1 工程位置



图 2 河道清淤段现状

## 2 现状调查

调查采样点位与布设按块状水域 100 ~ 200m 网格或交错梅花状布置。治理河段共布设 38 个采样点位 (见图 3)。

根据污染程度，底泥在垂直方向一般分为污染底泥层（A 层）、污染过渡层（B 层）和正常河泥层（C 层）。一般情况下，底泥污染程度由上至下逐渐减轻，因此，本次调查最大取样深度为正常河泥层 50cm。根据场地实际情况，输元河 A 层平均厚度为

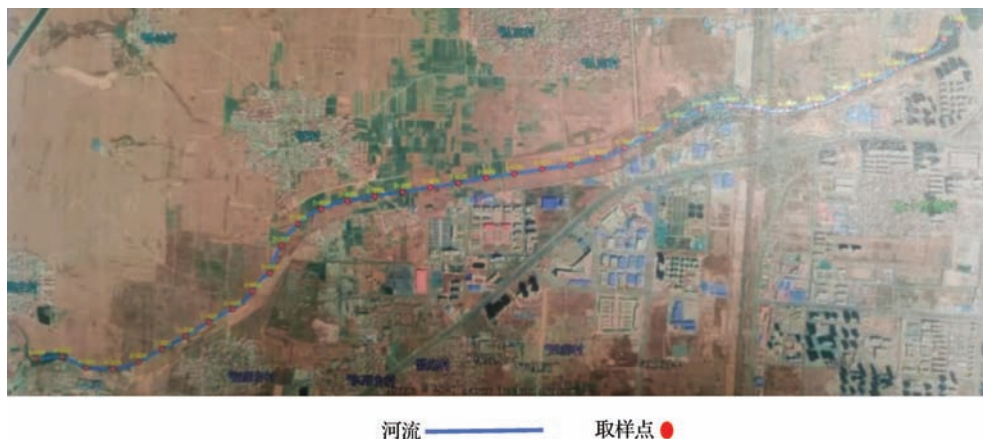


图3 调查底泥采样点位图

0.8m, B层平均厚度为1.2m, 调查过程中每一层均采集样品, 设置采样深度为0.5m (A层)、1.0m (B层)、1.5m (B层)、2.5m (C层)。

### 2.3 检测因子

按照《湖泊河流环保疏浚工程技术指南》<sup>[5]</sup>并结合实际情况确定检测指标如下: 重金属和无机物 Ph、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铜(Cu)、镍(Ni)、锌(Zn)、铬(Cr)、镉(Cd) 10项指标; 挥发性有机物氯甲烷、氯乙烯等 27项指标; 半挥发性有机物硝基苯、苯胺、2-氯酚等 11项指标。

### 2.4 底泥污染分析

根据初步检测结果, 调查河段河流桩号7+000深度0.5m处, 砷和锌含量超标。对宽阔河面区域进行详细调查, 设置21个采样点, 采样勘探点间距50m, 最大采样深度至正常河泥层50cm, 经检测, 其中三个采样点0.5m深度处砷和锌含量超标, 1.0m深度未发现超标。

## 3 河道清淤设计

### 3.1 清淤底高程

根据现场勘察, 输元河底泥淤积深度约为0.3~2.5m, 本次清淤底高程根据淤泥厚度、污染情况、河道现有纵坡及河道现有水利工程的设计底高程来合理确定<sup>[6]</sup>。

沁河汇入口河底高程采用溢洪道末端底高程70.00m, 107国道桥处河底高程以桥下设计河底高程51.75m、彩虹桥处以北湖湖底高程48.50m进行控制, 祝村控制断面结合河道天然断面及上下游河底, 确定河底高程为53.19m。

### 3.2 边坡稳定计算

对正常蓄水期和正常蓄水期并考虑地震两种情况, 根据地形、地质资料及不同边坡情况, 选择典型断面进行边坡稳定计算, 设计边坡坡比1:3, 边坡稳定最小安全系数不小于允许值, 满足规范要求。

### 3.3 清淤断面设计

本次清淤范围<sup>[7-8]</sup>根据原河道治理时河槽开挖情况及河道内现状水域分布, 并结合本次工程占地以及河道实际情况确定, 严重淤积断流河段按主槽口宽不小于20m开挖, 开挖坡比为1:3, 清淤深度按清淤底高程进行控制, 一般为0.3~2.5m。

## 4 河道清淤方案

### 4.1 常用河道清淤方法

常用的河道清淤方法有干式清淤法和湿式清淤法<sup>[9-10]</sup>。

干式清淤法主要针对区间来水量较小的河道, 清淤时首先对河道进行导流, 并进行排水, 将清淤河段积水排干, 然后以机械或人工的方法对河道进行清

淤。干式清淤法的优点是易于控制清淤设计断面高程和边坡，工作效率高，便于掌握清淤后的河底状况，不留盲区；缺点是设备投入较高，主要以挖掘机、铲运式清淤机、运输车辆为主。

湿式清淤主要用于带水清淤，采用挖泥船和清淤船，将河道的淤泥抓到或吹填到驳船上、拖船上或岸上堆泥区，不破坏沿河设施或岸坡护砌，不影响市政交通或卫生，清淤效率较高，可避免二次污染，但需要临时堆存场地或处理设备，技术要求高，清淤单价高，清淤不彻底。

4.2 本次采用的清淤方案

根据实地调查，该流域非汛期几乎无天然降水产生，考虑实施的可行性和投资情况，本工程采用干式清淤方案，即采用分段围堰填筑配合堰内排水施工的

方法，进行干式清淤。

5 污染底泥处理方案

5.1 底泥修复方式

重金属污染场地修复<sup>[9]</sup>主要包括物理化学修复（电动修复和电热修复）、化学修复（稳定化/固化修复、土壤淋洗、干法解毒和湿法解毒）、生物和生态修复（植物修复、微生物修复和组合人工湿地修复）等。各类修复技术的优缺点见表 1。

污染土壤修复是一项系统工程，在方案选择中应充分考虑修复的目的、技术可行性、社会经济状况等因素。因此，在设计清淤处理方案时应根据以上原则，并结合具体河段污染状况、技术可行性和实施难度明确治理方案（见表 1）。

表 1 技术方案比选

技术类型	优 点	缺 点	比选结果
电动修复	适用于低渗透性的污染土壤。修复周期短、不会引入其他污染物、能将重金属从土壤中较彻底的移除	阴极区易产生重金属沉淀、电流效率低、工程应用不成熟	不采用
电热修复	适用于挥发性污染土壤。能够将重金属从土壤中较彻底地移除	设备要求和运行成本高	不采用
稳定化/固化	工艺简单可操作性强，经济可行，处理周期短，处理后的土壤可作用于建设或绿化，国内外有大规模的工程应用实例	经稳定化/固化处置后的土壤环境对其重金属活度及稳定性有影响	建议采用
土壤淋洗	污染物去除彻底，治理后土壤可用于原址回填，适用于污染严重、面积较小的土壤修复	淋洗后废水的处理增加成本。淋洗后土壤结构和肥力破坏严重	不采用
干法解毒	去除率高、稳定性较好	设备投入大，处理规模小，需要加热至高温，能耗大，处理成本高	不采用
湿法解毒	工艺简单、较为成熟，设备选型容易，解毒彻底以及原料廉价，不受铬渣类型、规模和场地限制，应用较为广泛	工艺路线较长、酸消耗量大	不采用
植物修复	成本低，对土壤结构、肥力及生态环境影响小	修复周期长，修复深度浅，污染物可能会进入食物链	不采用
组合人工湿地	成本较低、低能耗，构筑生态防污带，为动植物提供栖息地，适合于远离废物处理中心的区域	不能直接用于重金属污染土壤的修复，仅可以作为辅助系统用以处理土壤的渗滤液和地表径流	不采用
微生物修复	成本低，对土壤及周边环境无破坏，不需要特殊场地建设，可同时处理土壤和地下水	最自然的修复方法，无二次污染，对周围环境、土壤、水、动植物都有益	建议采用

5.2 底泥治理方案

本工程的底泥处理采用微生物修复 + 稳定化/固化技术。

利用功能性微生物群，在适宜条件下促进和强化微生物代谢功能，降解土壤中有有机污染物，降低或消除有毒污染物活性，使之成为无毒无害可资源化利用



的土壤。

重金属污染修复,通过添加稳定化药剂,将重金属转变为无毒无害无迁移能力、稳定性强的螯合物,降低重金属对环境的威胁,安全处置重金属污染底泥。

由于河道两岸场地及周边条件有限,无晾晒场地,本次采取多套修复设备,结合原位修复技术进行施工,在河道旁边建长40m、宽25m、占地1000m<sup>2</sup>的临时处理车间,对底泥进行原位固化,降低含水率,使其达到回填及利用要求。

### 5.3 底泥处理工艺流程

底泥经清淤后,集中收集到指定地点,首先加入重金属螯合剂,使重金属稳定化、固定化;再加入功能微生物制剂,利用功能性微生物菌群降解污染物,降低有毒污染物活性或降解成无毒物质。将搅拌均匀的底泥堆放发酵,在堆酵过程中完成重金属的螯合以及为微生物的富集、降解以及转化,使处理后的底泥达到《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)<sup>[11]</sup>的要求。底泥处理工艺流程见图4。

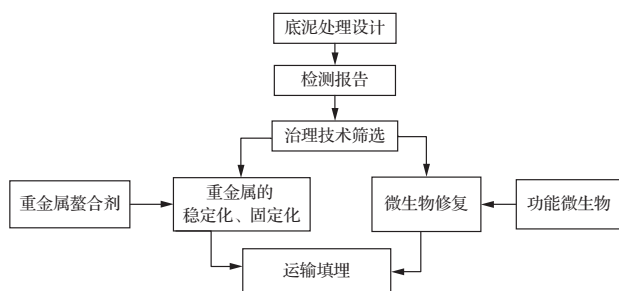


图4 底泥处理工艺流程

## 6 结 语

在明确受污染底泥的位置与深度基础上,通过污

染物特性分析,获取污染特征和污染物性质,并将其作为污染治理的重要基础,提出本文治理方案。工程实施后,多年沉积的底泥被挖走,进行无害化处理,使河道加深、变宽,水流顺畅,河道的过流能力得到提高,水体的自净能力得到增强,可对河道水环境质量改善产生积极影响。▲

### 参考文献

- [1] 张明辉,王琳.青岛市楼山河黑臭水体整治阶段性研究[J].人民长江,2020,51(10):54-61.
- [2] 高大方.水利工程清淤疏浚技术[J].河南水利与南水北调,2021,50(10):43-44.
- [3] 王旭,王永刚,孙长虹,等.城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J].应用生态学报,2016,27(4):1331-1340.
- [4] 宁梓洁,王鑫.黑臭水体治理技术研究进展[J].环境工程,2018,36(8):26-29,73.
- [5] 金相灿,李进军,张靖波.湖泊河流环保疏浚工程技术指南[M].北京:科学出版社,2014.
- [6] 中华人民共和国水利部.疏浚与吹填工程技术规范:SL 17—2014[S].北京:水利水电出版社,2014.
- [7] 胡玉,周涛.城市河道清淤疏浚施工技术[J].河南水利与南水北调,2020,49(2):44-45.
- [8] 黄伟,汪贵成.城市江河湖泊生态清淤及泥沙固化施工关键技术研究与应用[J].中国水能及电气化,2021(12):38-40,45.
- [9] 左晓君.河湖污染淤泥的现状与处理——浅析《河湖污染底泥处理技术》之要点[J].中国水能及电气化,2020(8):64-69.
- [10] 王晓东,孙承福.城市河道生态清淤技术探讨[J].中国水能及电气化,2017(4):68-70.
- [11] GB 5085.3—2007 危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别[S].北京:中国标准出版社,2007.

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK. 2022.05.02

# 基于 BIM 的水利隧道综合施工数字化建造技术

张瑞申

(中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

**【摘要】** 广州北江引水工程(水源工程)项目,是为推进粤港澳大湾区建设的跨清远、广州两市的大型提质引水水利系统工程。文章针对隧道断面小、岩性高、有较大断裂带,且位于森林公园内,TBM选型及优化、施工风险防控、施工组织、钢管拼接精度、绿色环保要求高等特点,叙述了TBM法、钻爆法、埋管段、钢管段等综合施工方法,利用BIM技术对TBM的选型、优化改造及全方位的施工组织进行数字化仿真分析、虚拟建造,实现了施工周期“数字、生态、智慧”。

**【关键词】** 隧道; BIM技术; TBM; 数字建造

中图分类号: TU992

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-006-06

## Digital Construction Technology of Water Conservancy Tunnel Comprehensive Construction based on BIM

ZHANG Ruishen

(China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Guangzhou Beijiang Water Diversion Project (water source project) is a large-scale upgrading water diversion water conservancy system project across Qingyuan and Guangzhou to promote the construction of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. This paper describes comprehensive construction methods such as TBM method, drilling and blasting method, buried pipe section, steel pipe section, etc. aiming at the characteristics of small tunnel section, high lithology, large fault zone, located in forest park, high requirements on TBM selection and optimization, construction risk prevention and control, construction organization, steel pipe splicing accuracy, green environmental protection, etc. BIM technology is used for carrying out digital simulation analysis and virtual construction on the selection, optimization and transformation of TBM and all-round construction organization, thereby realizing the “digital, ecological and intelligent” construction cycle.

**Key words:** tunnel; BIM technology; TBM; digital construction

隧洞掘进机 (Tunnel Boring Machine) 以其高效、安全、环保的优势<sup>[1]</sup>, 具有协调性、快速性和密集型

收稿日期: 2021-09-23

作者简介: 张瑞申 (1986—), 男, 本科, 工程师, 从事工程管理、BIM 技术研发与应用。



的特点<sup>[2]</sup>，近年来在我国铁路、水利水电、城市地铁、综合管廊等领域均取得了重大的进步，应用类型呈现多元化的趋势，尤其在水利水电领域的应用日趋广泛。随着综合国力的显著提升和水利水电事业的飞速发展，我国引水工程建造水平不断进步，尤其是近年来，随着新工艺、新材料、新装备、新技术的不断涌现<sup>[3]</sup>，我国引水工程的 TBM 建造技术得到了全方位的提升<sup>[4]</sup>。但是，我国地域广阔、地质情况复杂多样，TBM 的适应性、优化性、智能性亟待提高。本文基于广州北江引水工程，开展基于 BIM 的水利隧道综合施工方面数字化建造技术的探索，以 BIM + GIS + 信息化的手段对施工前期、中期、交付的全施工阶段数字化应用，助力我国水利隧道信息化、智能化施工技术的发展<sup>[4]</sup>。

## 1 工程概况及重难点分析

### 1.1 工程概况

广州北江引水工程第四标段，输水主线路长约 15.7km，占总线路长的 60%，其中引水隧洞长约 11.4km，属于特长隧洞，最大埋深 369m，掘进断面 4.53m<sup>2</sup>。2 号、3 号、5 号隧洞钻爆法施工，长度 3.15km；4 号隧洞 TBM 施工，长度 10.2km；埋管段钢管外包混凝土施工，长度 2.3km（见图 1）。



图 1 北江引水概况

### 1.2 重难点分析

#### 1.2.1 施工总平布置及安全风险高

项目地处广州，夏季雨季降水较多，且易受台风影响，易发生山体滑坡河水倒灌，冲刷严重；项目地

处连绵山丘，且毗邻森林公园自然保护区，可用征地面积有限，现场可利用场地狭小，TBM 运输、吊装、组装需要转换场地，且后期需要 TBM 车间厂房。

#### 1.2.2 施工任务重

本标段为总工期关键标段、地质岩性强，TBM 选型及特长隧洞硬岩掘进控制要求高，单独采用常规三种 TBM 型式，掘进效率及安全性均有不可控风险。

#### 1.2.3 施工难度大

隧洞断面小，TBM 结构设计与设备布局困难，且隧洞发育多条较大断层极易发生突涌水，TBM 施工风险高、难度大。

#### 1.2.4 环境保护要求高

邻近森林公园及自然保护区，要严格把控用地规划、临建布置，对环保、绿色施工要求高。

## 2 BIM 应用策划

### 2.1 BIM 应用目标

#### 2.1.1 辅助 TBM 选型及优化

针对项目特点、重难点，对 TBM 型式、构造、布局进行可视化建模、分析、优化，实现基于 BIM 的 TBM 适应性改造。

#### 2.1.2 全过程 BIM 指导施工<sup>[4]</sup>

针对 TBM 段、钻爆段、埋管段等进行施工工艺的模拟、优化、比选，实现 BIM 模拟全覆盖。

#### 2.1.3 探索基于 BIM 的水利隧道综合实施技术路线及解决方案

将模型应用全方位贯穿于施工现场管理全流程，实现三维现场指导、现场校验和实时现场追踪，减少现场施工人员错误施工，提高质量控制、减少安全风险<sup>[5]</sup>。

### 2.2 管理模式

立足企业发展，提出了以企业数字化转型、项目的数字化建造为中心进行顶层设计规划；制定规章制度、建模标准、实施指南、验收评价细则、专项人才培养计划，达到统一数据、统一文件、统一过程；实现工程主体、数字孪生两个维度的实施、管控

与交付；打造覆盖全专业、全业务、全过程的“标准化、规范化、精细化、信息化”的“一三二三”生态数字建造管理模式。

### 2.3 管理体系

针对项目施工重、难点，编制 BIM 实施专项方案，明确 BIM 应用点、实施标准、BIM 解决方案。通过建立标准，创建隧道管廊、引水隧洞标准化族库，实行 BIM 例会、BIM 工作联系单、多方专业协调会等制度，保障 BIM 运行管理体系。

### 2.4 组织体系

依托集团公司数字建造中心，由 TBM 专家组、隧道地质专家组、分公司 BIM 中心策划，将项目技术应用组、BIM 实施组、IT 技术组组成自上而下多层次、多方面的管理架构，确保项目 BIM 应用的落地实施。

### 2.5 技术体系

集 Bentley、Solidworks、Autodesk 等强大的设计生产线满足隧道、地质、机械、GIS 等不同专业设计需求，配有工作站、无人机等各类实施应用硬件，保证项目 BIM 技术应用顺利实施。

## 3 BIM 模型创建

### 3.1 BIM + GIS 一体化应用方案

项目属特长距离线性工程，编制 BIM + GIS 一体化实施方案及细则，明确建模范围、模型精度、构件命名规则、编码体系等。

### 3.2 标准化临建族库

根据企业《项目建家建线规范手册》，并融合当地人文特色，构建具有项目特色的标准化临建模型库（见图2）。“因地制宜，经济适用”，对各板块进行优化。



图2 标准临建族库

### 3.3 隧道模型拆分及编码

针对施工阶段 BIM 技术应用需求，对隧洞结构单元进行划分，包含标准化参数化的隧洞结构模型、输水管道模型、输水附属模型、安全监测模型及机械设备族库。并创建方案级、工艺级、可视化技术交底层级等不同精度的模型库（见图3、图4）。



图3 模型拆分

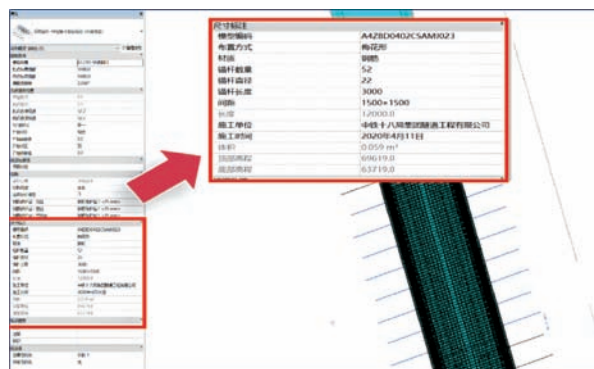


图4 模型编码

## 4 基于 BIM + GIS 的场地规划、布置

项目地处广州市花都区至清远区，区间内山丘连绵，雨季降水较多，且易受台风等恶劣天气影响，山坡冲刷严重。因此，项目的选址、场地规划、安全风险防控极为重要。

### 4.1 降水路径分析

项目前期，采用无人机倾斜摄影技术，对整个现场地表数据进行整体精度 5cm、局部 3cm 的分等级采集，获取地形精准等高线，导入 Civil3D 软件，对降水路径及流域进行分析，在保护生态、安全施工的前提下进行场地选址（见图5）。

### 4.2 边坡防护策划

4号隧道出口边坡为残垣断壁型式，陡峭异常，



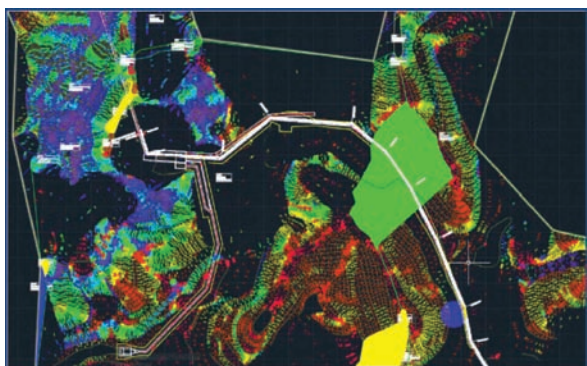


图5 降水路径分析

高程及坡度等数据现实测量困难,防护措施实施风险高。通过三维实景建模获取洞口边坡视野盲区信息的同时,快速准确地获取场地高程、坡度等数据,标注安全风险点,进行有效边坡防护,提高了防护针对性(见图6)。

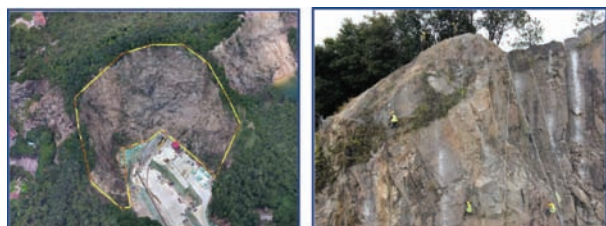


图6 边坡防护策划

### 4.3 场地规划、布置

基于真实的周边环境及地形高程信息模型进行场布临建规划,建立仿真的三维场布模型,有针对性地开展各阶段的功能区、道路运输路线、临时排水等规划及布置,进行方案比选、优化,提高土地利用率、合理划分功能区,实现工程的动态优化配置,可视化管理(见图7)。



图7 场地规划

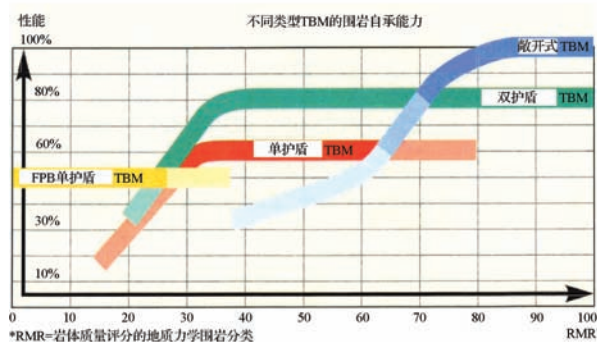
## 5 TBM 选型及改造优化

### 5.1 TBM 型式分析

常规TBM有敞开式、单护盾、双护盾三种型式(见图8)。敞开式:依靠撑靴撑紧洞壁,为破岩提供反力,附带的辅助设备可进行洞壁支护,适用于岩体较完整,有较好稳定性环境;单护盾:依靠推进油缸顶推预制管片进行掘进,支护方式为管片支护,适用于软弱围岩、地质环境较差地层<sup>[6]</sup>;双护盾:既有与敞开式TBM类似的撑靴,且兼有单护盾TBM的所有功能,适用于复杂岩层,岩石软硬兼有、断层及破碎带的环境<sup>[7]</sup>。



(a) 常规TBM型式



(b) TBM岩性分析

图8 常规TBM型式及岩性分析

### 5.2 工程地质及特点分析

本工程隧洞埋深36~440m。岩性:燕山期中粗粒黑云母花岗岩;围岩条件:Ⅱ、Ⅲ类围岩占比99.46%,最高饱和单轴抗压强度203.00MPa,平均137MPa;蚀变带:ZKB12(19+100附近)有明显蚀变现象,易风化崩裂;断层:主要有27组(条),23+100(ZKB18附近)可能存在较大断层。

针对该环境因素,重点进行TBM的选型及优化,包括TBM的主机、支护、空间布局等。

### 5.3 基于BIM的TBM优化改造

根据本项目场地大小、地质特点,采用BIM技术

对 TBM 前期选型、适应性优化改造及设备空间布局优化进行可视化建模,优化方案,与设备厂家进行方案校核及可行性分析联动会,共完成 6 项改造优化,有效攻克了相关技术和施工难点。

#### 5.3.1 型式及主机优化

综合考虑地质条件和隧洞设计,借鉴双护盾 TBM 的结构,进行“敞开式+双护盾”的新型敞开式 TBM 的尝试,扬长避短,赋予最佳的破岩和出渣功能,同时主机长度由原来的 25m 缩短至 8m,采用短距离水平运输主机皮带,出渣效率高(见图 9)。



图 9 型式及主机优化

#### 5.3.2 支护区优化

支护作业区采用滑车机构,降低了整体平台高度,解决了小断面敞开式 TBM 初期支护作业空间狭小问题,提高了支护工作效率(见图 10)。



图 10 支护区优化

#### 5.3.3 钢拱架拼装器优化

传统钢拱架拼装器采用的是旋转机构,优化后取消旋转机构,简化设计,采用钢丝绳液压绞车,操作更加简便,提高了拱架安装效率(见图 11)。

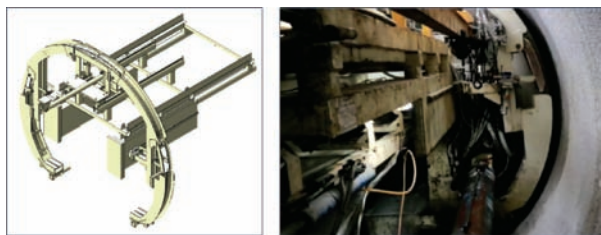


图 11 钢拱架拼装器优化

#### 5.3.4 锚杆钻机优化

设计法向锚杆机构,增大了其活动范围,实现了法向入岩,解决了 TBM 只能打短锚杆和入岩角度过大的历史难题(见图 12)。

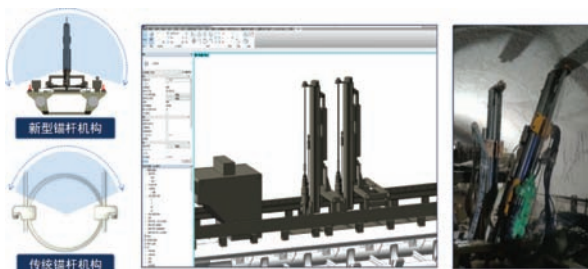


图 12 锚杆钻机优化

#### 5.3.5 喷混系统优化

设计前置式喷混系统,TBM 喷混位置到掌子面的距离,从原来的 70m 缩短为 40m,大大提升了喷射混凝土的及时性(见图 13)。

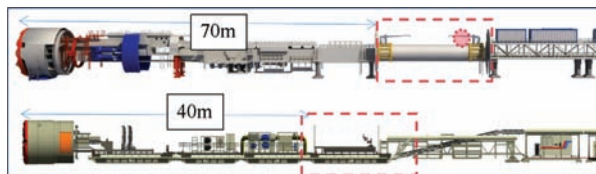


图 13 喷混系统优化

### 6 钢管优化

本工程钢制弯头均为预制定制化加工,对钢弯头的精度要求极高,从而对标准长度钢管的切割精度也要求极高。采用 BIM 技术对钢管、钢制弯头进行精细化、参数化建模,对钢管、钢制弯头进行虚拟预拼装、碰撞校核,然后进行钢制弯头的优化,明确具体加工参数,提交业主及加工厂确认,最终对各段标准钢管(6m)进行精细化切割,明确切割参数,从而保证钢管与钢制弯头的精准衔接(见图 14)。

### 7 BIM + GIS + TBM 管理平台

项目制约因素繁杂;施工种类多,工种多,施工工序穿插交接,组织协调难度大;项目线路长,各工区间隔远,各单位、各工区工作协同难度大,亟须进行综合性的统筹管理。



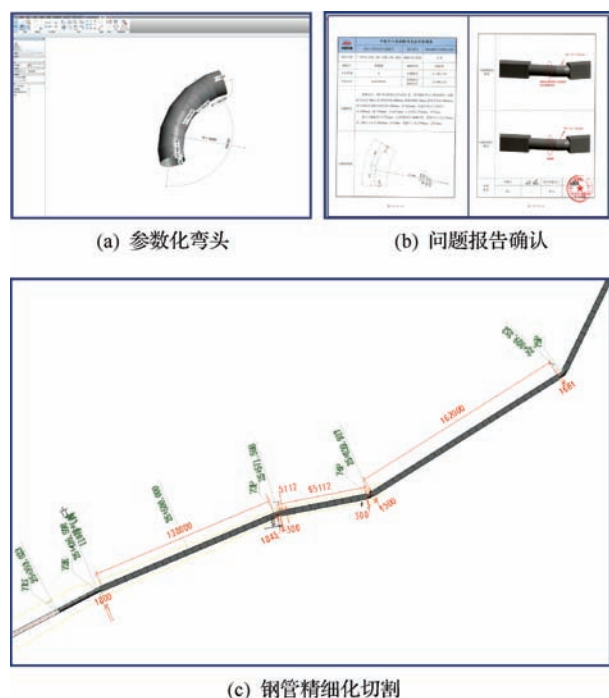


图 14 钢管优化

借助信息协同管理手段、BIM 轻量化技术,本项目通过建设 BIM + GIS + TBM 信息化管理平台,集成了指标看板、三维电子沙盘信息、进度管理、安质管理、投资成本管理、资料管理、BIM 模型管理、可视化交底等功能模块,形成了多维度、多终端的数字化、智慧化建造管理体系,实现对项目施工数据采集、分析、展示,为管理层提供不同维度的工程信息,辅助进行项目决策,实现管理的降本增效,为工程建设保驾护航(见图 15)。

## 8 结 语

广州北江引水工程作为粤港澳大湾区内建设的重点项目,通过利用 BIM 技术可视化、参数化的特点,对施工前期的临建方案、场地布置, TBM 的选型及优化改造,施工中的方案、工艺优化等进行全方位的指导,并建设 BIM + GIS + TBM 的信息化管理平台进行全专业、全业务、全过程的进度、质量、安全管控,有效解决了施工组织难、协调难的问题,提高工作、施工效率,形成了基于 BIM 的水利隧道数字化施工技术解决方案。



图 15 BIM + GIS + TBM 管理平台

本项目 BIM 技术的应用迎合了“数字中国、智慧社会”发展要求, BIM、GIS 的应用精度及深度,将作为水利工程运维阶段的基础数据,推动“广清一体化”数字水利建设。后续将进一步深度开发 BIM + GIS + TBM 大数据平台,基于 5G 技术实现洞内 TBM 数据实时转化,加强人机工程模拟,模拟人员在隧洞不同断面,不同环境下的劳动消耗、工作空间,为 TBM 的适应性改造提供有力的数据支撑。▲

## 参考文献

- [1] 钱七虎,李朝甫.全断面掘进机在中国地下工程中的应用现状及前景展望[J].建筑机械,2002(5):2837.
- [2] 孙洪凯,祁海燕,潘旭,等. TBM 在隧洞不良地质条件下的施工技术[J].水利规划与设计,2015(6):78-79,82.
- [3] 张为和.基于 BIM 的夜郎河双线特大桥施工应用方案研究[J].铁道标准设计,2015,59:82-86.
- [4] 袁帅,黄欣,李海松.基于 BIM 的大跨度钢桁架桥数字建造技术[J].施工技术,2020(6):14-17,91.
- [5] 刘晏斌.工程数字化建造技术在隧道机械化快速施工中的应用探索[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2021(23):5-10.
- [6] 冉贤厚.浅议全断面隧洞掘进机在引水隧洞施工中的应用[J].水利水电技术,2009,40(8):99-102.
- [7] 袁光胤. TBM 技术在输水隧洞工程中的应用[D].西安:西安理工大学.

# 永圣渡槽组合止水安装施工工法研究

张红霞 刘 剑 陈崇德

(湖北省漳河工程管理局, 湖北 荆门 448156)

**【摘 要】** 文章根据湖北省漳河水库灌区永圣等渡槽拆除重建工期紧、任务重的实际情况,研究了渡槽组合止水安装施工工法。并对该工法的工艺原理,施工工艺流程,施工过程及操作要点,工法特点等进行了阐述,对应用实例中质量、安全、环境保护措施和应用效益进行了分析,对于指导同类型渡槽施工,具有一定的借鉴作用。

**【关键词】** 组合止水; 安装; 工法研究; 永圣渡槽

中图分类号: TV672.3

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-012-05

## Study on Installation and Construction Method of Combined Water Stop in Yongsheng Aqueduct

ZHANG Hongxia, LIU Jian, CHEN Chongde

(Hubei Zhanghe Engineering Administration Bureau, Jingmen 448156, China)

**Abstract:** The installation and construction method of aqueduct combined water stop is studied in the paper in accordance with the actual situation of tight construction period and heavy task of Yongsheng Aqueduct removal and reconstruction in Zhanghe Reservoir Irrigation Area, Hubei Province. The process principle, construction technology process, operation keys, method characteristics and other aspects of the method are described. The quality, safety, environmental protection measures and application benefits of the application examples are analyzed, which can be used for reference to guide the construction of similar aqueducts.

**Key words:** combined water stop; installation; construction method research; Yongsheng Aqueduct

### 1 概 述

渡槽是跨越河流、渠道、公(铁)路、山凹等地形的输水建筑物,是水利工程渠系建筑物中应用较广的立交建筑物。除用于农田灌溉、城镇生活用水、工业用水、跨流域引水外,还可做排水和导流之用。

随着渡槽在工程中的应用日益增多,构件间的接头、接缝渗漏问题也随之增加。

在湖北省漳河水库灌区续建配套与节水改造工程施工中,永圣、南桥、盐池等渡槽为拆除重建工程,通过对预制槽身构件止水结构及施工工艺进行认真细致的研究,解决了预制渡槽止水渗漏问题,并形成了

收稿日期: 2022-04-18

作者简介: 张红霞(1984—),女,本科,高级工程师,主要从事水利水电工程。

本工法。

## 2 施工工艺流程及操作要点

### 2.1 工艺原理

a. 将铜片以及 U 形 GB 复合橡胶止水带通过环氧胶泥、丙乳砂浆、螺栓压铁等与构件紧密贴合，达到止水防渗效果，与单一橡胶止水相比提高了可靠性、耐久性。

b. 铜片止水由加工厂成型，现场焊接。螺栓用锚固剂固定，精准确定孔位。之后对止水铜片和橡胶止水带现场钻孔，保证止水铜片和橡胶止水带安装简便快捷。

c. 铜片止水与构件间的黏合采用环氧胶泥，保证贴合面结合牢固、无空腔；过流面采用倒梯形剖口填入丙乳砂浆整形，在伸缩缝位置填充双组分聚硫密封胶防止橡胶止水带老化，适应伸缩缝变形，也保证了过水顺畅（见图 1）。

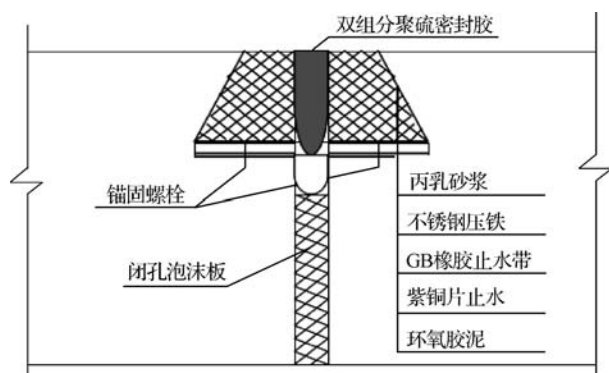


图 1 组合止水安装结构示意图

### 2.2 施工工艺流程

预制渡槽采用止水铜片及 U 形 GB 复合橡胶止水带，安装顺序为先铜片止水、再橡胶止水带，通过不锈钢压板将铜片、橡胶止水带与环氧胶泥等压实贴合密闭，最后采用丙乳砂浆、双组分聚硫密封胶整形封闭<sup>[1]</sup>。

止水后安装施工工艺流程见图 2。

### 2.3 施工过程及操作要点

a. 施工准备。现场清理干净，施工用水、用电、

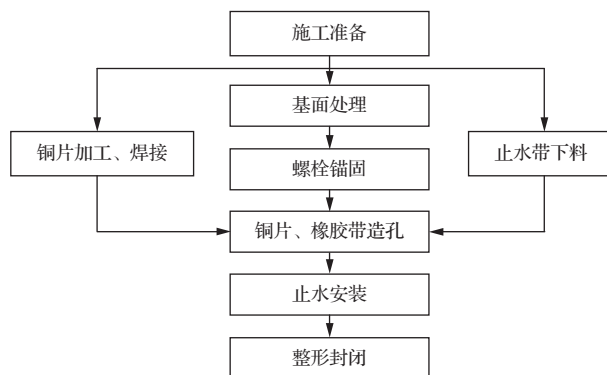


图 2 止水后安装施工工艺流程

道路等布置符合设计要求，冲击钻、麻花钻、称重设备、辅助用具扶梯、运输小车设备等准备齐全。

b. 铜片加工、止水带下料：①采购的铜片报送监理单位检测合格后，根据构件型式、尺寸下料，采用冲压设备按设计规格尺寸将铜片加工成型；②U 形构件的铜片在反弧段应是整段，接头尽量布置在侧壁；③矩形构件的铜片在底部和倒角处应是整段，倒角处加工尺寸必须精准；④止水铜片加工焊接均采用双面焊，搭接长度不小于 20mm，焊拼成型后的止水铜片端部位置不得低于设计高度；⑤橡胶止水带按设计尺寸并结合现场量测长度下料，所有橡胶止水带均为通条无搭接形式。

c. 基础面处理：①先用钢丝刷和砂轮打磨预留凹槽表面，除去表面的浮渣、污渍，再用高压水枪冲洗预留凹槽，自然风干；②对于矩形断面构件，其倒角折角处应修整得圆润自然，便于铜片安装时贴合紧密。

d. 螺栓锚固：①孔位确定：根据止水带的设计尺寸，确定止水铜片和橡胶止水带安装边线，在构件两端预留凹槽的中间位置精确定位并标记，在钢筋空当部位按设计要求  $(20 \pm 2)$  cm 的间距调整螺栓锚固孔位置，并做出明显的孔位标记；②钻孔：采用  $\phi 8$  钻头的冲击钻在选定的位置垂直钻出深度约 6cm 的螺栓固定孔；若在钻孔过程中出现个别钻头触碰到钢筋情况，应立即停止，观察孔位内钢筋位置，并比较孔位与相邻孔位的间距后作出适当调整，再按上述要求



钻孔；钻孔必须采用干钻，孔位垂直度和孔深达到设计要求后用风枪将钻孔过程中产生的碎屑和浮尘清除，孔内用毛刷清理干净；③锚固：逐个清洗不锈钢螺栓，确保锚固端无油污；按说明书要求配制专用锚固剂并灌入孔洞，灌注剂量以螺栓插入后有少许锚固剂被挤出为宜；随后将螺栓逐个插入锚固孔，并用木锤轻轻敲击，使螺栓就位，并在孔口部位填入少许细颗粒石子，固定螺栓使之垂直于构件表面；锚固剂固化完成后约 1h 采用锚杆拉拔仪检查螺栓锚固情况，检查合格后报监理审核，进入下一道工序。

e. 铜片、止水带造孔：①按照设计图要求，将孔洞位置逐一画在铜片表面，然后用  $\phi 8$  的麻花钻头在孔洞位置钻出规格一致的固定孔，锉除与构件接触侧的毛刺后备用；②在不锈钢压铁上确定孔位后用钻床钻孔，锉除外露侧钻孔后的毛刺，编号标注备用；③在橡胶止水带上确定孔洞标记，采用空心冲子在橡胶带上冲出  $\phi 8$  的孔洞；④所有孔洞位置偏差均应小于 2mm。

f. 止水安装：①试安装：铜片、橡胶止水带、压铁按顺序逐一试安装，对于孔位安装偏差在 2mm 以内的用锉刀等工具修整，直到安装顺畅无卡滞，孔位偏差超过 2mm 的一律不得用于后期安装；②环氧胶泥打底：双组分环氧胶泥按环氧树脂：增塑剂：固化剂 = 1:0.1:0.05~0.1（重量比）配制，固化时间控制在 30~60min；确定双组分环氧胶泥 A、B 组分掺量后，根据每条止水带所需胶泥量配制，要求随配制随使用，每条止水铜片所需 A 组分约为 2kg，B 组分约为 1kg；将环氧胶泥 A、B 组分分别倒入铁桶内，充分搅拌均匀，以胶泥涂抹在侧墙上不向下流动为宜，将调制好的环氧胶泥均匀涂抹在构件和铜片两边，确保构件表面黏结料均匀饱满；③止水带安装：将铜片、橡胶止水带、压铁按顺序逐一安装，加装垫片、螺帽固定；压铁固定实施两步紧固，第一步按从底部中间向两侧的顺序逐步紧固施压，先紧固至螺栓空出长度约 2/3，同时将受压后挤出的环氧胶泥涂抹整形；再从底部中间紧固至螺栓将压铁稳固，橡胶止

水带有一定压缩时即可；所有止水片、带等不得有拉扯、压缩现象，保证各部位贴压紧密，止水带与原构件缝隙间的环氧胶泥要抹平压实。

g. 整形封闭：①止水带安装完毕，环氧胶泥固化后，按设计要求对构件两端采用丙乳砂浆填补修平；丙乳砂浆填补前，应将处理部位冲洗干净，混凝土保持饱和面干状态；先在混凝土表面涂刷一层丙乳净浆，之后填补丙乳砂浆；②丙乳净浆配合比为水泥：丙乳 = 1:0.5（重量比）；③丙乳砂浆配合比为水泥：丙乳：中粗砂：水 = 1:0.3:2：适量（重量比）；④待丙乳砂浆终凝且湿水保养达到设计要求后，取出伸缩缝隔离模板，填充双组分聚硫密封胶，精细修整使缝面平整顺畅。

## 2.4 工法特点

a. 伸缩缝口采用倒梯形断面，防止丙乳砂浆保护体脱落。

b. 将铜片和 U 形 GB 复合橡胶止水带通过环氧胶泥、丙乳砂浆、螺栓压铁等与构件紧密贴合，达到止水防渗效果。

c. 采用后装法施工相比先装法施工简单快捷，缩短了工期，后期维护施工简便。

d. 本工法适用于水利水电工程混凝土结构伸缩缝止水后安装施工。

## 3 工程应用

### 3.1 应用实例

#### 3.1.1 湖北省漳河水库灌区四千渠永圣渡槽拆除重建工程

永圣渡槽全长 600m，为钢筋混凝土矩形简支结构，单跨槽身长 14.97m，外围断面尺寸为 4.15m × 3.10m，槽身内部断面尺寸为 3.25m × 2.50m，设计流量 11.24m<sup>3</sup>/s。渡槽预制槽身 38 跨共 39 条止水。自 2017 年 4 月 5 日开始安装止水带，22 天完成。

#### 3.1.2 湖北省漳河水库灌区四千渠南桥渡槽拆除重建工程

漳河灌区四千渠南桥渡槽全长 470m，为钢筋混

凝土矩形简支结构,单跨槽身长 14.97m,外围断面尺寸为 4.15m×3.10m,槽身内部断面尺寸为 3.25m×2.50m,设计流量 12.97m<sup>3</sup>/s,渡槽预制槽身 32 跨共 33 条止水。采用此工法施工,人工和机械台时有较大节省,工期与传统方法的 45 天相比提前 11 天,节约工期 25%。该工程已完工运行 8 年,所有伸缩缝无渗水,效果十分显著。

### 3.1.3 湖北省漳河水库灌区四千渠盐池渡槽拆除重建工程

漳河灌区四千渠盐池渡槽全长 210m,为钢筋混凝土 U 形简支结构,单跨槽身长 14.97m,外围断面尺寸为 4.15m×3.10m,槽身内部上开口净宽 3.00m,高 2.50m,下部为半径 1.5m 的半圆形,设计流量 10.61m<sup>3</sup>/s。渡槽预制槽身 15 跨共 16 条止水。自 2020 年 3 月 5 日开始安装止水带,18 天完成。

## 3.2 保证措施

### 3.2.1 质量保证措施

a. 建立健全质量保证体系,实行采购、加工、制作、安装防护、检测全过程的质量控制与检查,质检人员对接缝止水施工全程旁站<sup>[2]</sup>。

b. 每道工序和各单元工程施工完毕后严格按质量标准进行“三级”检查验收,合格后方可进行下道工序<sup>[3]</sup>。

c. 建立技术档案,及时准确记录工序、成品、半成品、单元质量情况并整理归档,以便指导和改进技术措施,不断提高施工质量<sup>[4]</sup>。

d. 止水铜片的焊接人员应经岗位培训考试合格后方可上岗,橡胶止水带在每条伸缩缝中要求是通长,不得有接头<sup>[5]</sup>。

e. 柔性填料外止水材料不得露天存放。在施工现场临时存放时应及时覆盖,避免阳光直接暴晒。

### 3.2.2 安全措施

止水安装施工属于临空作业,必须严格落实安全措施。

a. 建立健全岗位责任制,落实岗位安全责任。

b. 要求全体施工人员牢固树立“安全第一”思想,对聘用的民工,分工种进行安全法规、法纪和安全知识教育,并将安全操作规程发放到每位民工手中,分班组组织学习。

c. 贯彻施工前安全技术性交底制度,提高施工人员安全意识和自我防护意识<sup>[6]</sup>。

d. 实行交接班制度,贯彻交接班安全检查和事前、事中、事后安全检查,及时发现和排除事故隐患,确保施工安全<sup>[7]</sup>。

e. 做好劳动保护工作,对现场工作人员,按照国家劳动保护法规定配备相应的劳保用品,包括安全帽、水鞋、绝缘体、雨衣、手套、安全绳(带)等。

f. 施工现场的临时用电严格按照施工现场临时用电安全有关规定执行,特别是配电柜、配电箱前要有绝缘垫,并安装漏电保护装置<sup>[8]</sup>。

### 3.2.3 环保措施

a. 成立由项目经理直接领导的环境保护领导小组,制定针对临时道路及施工场地扬尘,道路及施工场地照明、警示牌、防护、供水管线、路基及路面排水等的环保方案,遵守国家有关环境保护的法律法规和规章,做好施工区的环境保护工作,防止由于工程施工造成施工区附近地区的环境污染和破坏<sup>[9]</sup>。

b. 为防止施工区养护用水直接或间接进入河道、水源地保护范围内,在渡槽出口端设置污水、废水收集处理池,施工用水达到排放标准后方可排放,并对污水处理池及时清理。

c. 施工中使用的化学用品包装和废弃的用具必须统一收集,集中处理。

d. 施工结束后,及时清除施工区域内及附近的施工遗弃废物,遵守“工完、料尽、场地净”的原则<sup>[10]</sup>。

## 3.3 效益分析

### 3.3.1 经济效益

与传统现浇渡槽单层止水先装法施工工艺相比,采用本工法施工大幅提高了止水安装的可靠性、耐久性,施工简单快捷。经测算,成本节约率为 25.0%~

26.0%，经济效果较好。

### 3.3.2 社会效益

a. 缩短了工期。以南桥渡槽拆除重建工程为例，与传统方法相比，节约工期25%。

b. 减少了水量损失。以上述三座渡槽为例，运行以来均无渗漏损失。

c. 提高了灌溉水有效利用系数。以三座渡槽所在的渠道测算，灌溉水有效利用系数提高了7.2%左右。

d. 提高了灌溉服务效率。由于渠道水量损失减少，水流速度加快，促进了灌溉服务向及时、足量的转变。

e. 环境优美。由于渗漏严重，部分槽身、槽墩水流痕迹明显以及槽墩周边地面沼泽化，对环境的影响较大。目前这一现象消失，工程与周边的环境得到美化。

f. 节能和环保效果显著：采用该工法，渡槽止水后期维护简便、易更换，节省了大量的机械设备和人工、材料。

## 4 结 语

实践证明，湖北省漳河水库灌区永圣、南桥、盐池等渡槽组合止水安装施工工法，除具有较强的止水

(上接第20页)

## 5 结 语

实践表明，南水北调东干渠输水隧洞工程抢修项目针对渗水伸缩缝封堵施工的工艺流程具有工艺先进、技术创新的特点。施工完成后工程具有质量高、通水安全性高以及封堵止水效果好的优点。丙烯酸盐衬砌伸缩缝灌注与聚脲表面封堵联合施工工艺对于大型输水隧洞及混凝土渗水裂缝的封堵效果较好，具备较高的推广价值。▲

### 参考文献

[1] 周立霞,王昱之,王起才.隧道衬砌施工缝、变形缝防水技术现状[J].兰州铁道学院学报,2003,22(4):101-104.

效果外,人工和机械台时费用也有较大节省,施工工期比传统方法缩短,其经济效益、社会效益十分明显。本工法适用于水利水电工程混凝土结构伸缩缝止水后安装施工。▲

### 参考文献

[1] 刘波,郑斌.南桥渡槽拆除重建施工技术[J].水科学与工程学报,2017(2):88-90.  
[2] 程国栋,刘明忠,王丽,等.永圣渡槽预制矩形槽身吊装施工实践[J].工程技术研究,2018(4):9-11.  
[3] 张士菊,郑国,陈崇德.永圣渡槽矩形槽身混凝土预制施工方法[J].水电与新能源,2018(1):10-13.  
[4] 向阳.普溪河渡槽槽身施工质量控制方法研究[D].宜昌:三峡大学,2017.  
[5] 中华人民共和国水利部.水工混凝土施工规范:SL 677—2014[S].北京:中国水利水电出版社,2014.  
[6] 唐保铭.水工建筑物止水施工存在问题分析与控制[J].工程管理,2015(17):135-136.  
[7] 郭强,王建华,邓松柏.大跨度小截面渡槽混凝土浇筑工艺研究[J].水利建设与管理,2018,38(8):1-5.  
[8] 孟凡军,宋志国,马其康.浅析提高止水螺杆施工质量措施[J].水利建设与管理,2019,39(3):44-48.  
[9] 刘熠,朱蓉.大型水池防水、止水施工技术研究[J].工程技术,2016(10):47-48.  
[10] 王知晓,王琦凯,陈崇德.关门岩水库大坝坝体软硬岩填筑技术研究[J].水利建设与管理,2020,40(5):13-16.

[2] 中华人民共和国工业和信息化部.丙烯酸盐灌浆材料:JC/T 2037—2010[S].北京:建材工业出版社,2011.  
[3] 国家能源局.水利水电工程聚脲涂层施工技术规范:DL/T 5317—2014[S].北京:中国电力出版社,2014,8.  
[4] 国家能源局.水工混凝土建筑物修补加固技术规范:DL/T 5315—2014[S].北京:中国电力出版社,2014-03-18:10-14.  
[5] 孙志恒,张会文.聚脲材料的特性、分类及其应用范围[J].水利规划与设计,2013(10):36-38.  
[6] 孙志恒,李萌,倪燕,等.SK柔性防护涂料在伸缩缝及裂缝快速修复中的应用[J].大坝与安全,2011,(1):48-51.  
[7] 陈德金.弹性水泥防水砂浆[J].中国建筑防水,1997(4):32-34,37.  
[8] 吕康成.隧道防排水工程指南[M].北京:人民交通出版社,2005:77-82.



# 丙烯酸盐灌注与表面聚脲封堵工艺在南水北调工程中的应用

杨 林<sup>1,2</sup> 刘存辉<sup>2</sup> 闫翠秋<sup>2</sup>

- (1. 北京金河水务建设集团有限公司, 北京 102206;  
2. 北京金河生态科技有限公司, 北京 102206)

**【摘 要】** 混凝土衬砌仓间伸缩缝漏水是普遍性问题。在北京市南水北调东干渠工程输水隧洞中, 首次使用丙烯酸盐浆液灌注衬砌伸缩缝和聚脲封堵表面施工方法和工艺, 对其二衬间漏水伸缩缝进行封堵止水。结果表明: 封堵效果较好, 具备较高的推广价值, 可为同类工艺在水利工程施工提供借鉴。

**【关键词】** 南水北调; 丙烯酸盐灌注; SK 聚脲涂刷; 高弹性砂浆

中图分类号: TV44

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-017-04

## Application of Acrylate Grouting and Surface Polyurea Plugging Technology in South-to-North Water Diversion Project

YANG Lin<sup>1,2</sup>, LIU Cunhui<sup>2</sup>, YAN Cuiqiu<sup>2</sup>

- (1. Beijing Jinhe Water Construction Group Co., Ltd., Beijing 102206, China;  
2. Beijing Jinhe Ecological Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China)

**Abstract:** Expansion joint leakage between concrete lining compartments is a common problem. The construction method and technology of the lining expansion joint with acrylate slurry and polyurea sealing surface are used for the first time to seal the water in the expansion joint between the second linings in the tunnel of the East Main Channel Project of Beijing South-to-North Water Diversion Project. The results show that the sealing effect is excellent, and it has high promotion value, which can provide reference for similar technology in water conservancy project construction.

**Key words:** South-to-North Water Diversion; acrylate grouting; SK polyurea coating; high elastic mortar

混凝土缝内灌注丙烯酸盐浆液后会形成一种柔性的憎水止水材料, 其在密闭空间内具有高抗压性和高渗透性。当混凝土出现裂缝渗水时, 利用丙烯酸盐的这种特点, 对裂缝进行丙烯酸盐浆液灌浆并在表层使

用聚脲材料防水, 其会形成一种从内至外防水效果较好的屏障。此工艺具有在裂缝处同时抵御内外两侧水压力的作用并不出现渗水情况, 适合于大型隧洞内混凝土渗水封堵。

收稿日期: 2022-02-25

作者简介: 杨林 (1987—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水资源及水环境保护、河水质监测与评价工作。

## 1 工程概况

南水北调东干渠输水隧洞工程,隧洞总长 44.7km,内径 4.6m,主体采用盾构法施工,复合式衬砌结构,其中一衬为预制钢筋混凝土盾构管片,厚度为 300mm,二衬采用现浇钢筋混凝土,厚度为 400mm。本工程此段地下承压水水深约 28~29m 左右,地表高程约 32m,隧洞内洞顶高程最高点为 20m,最低点为 6m,地下水丰富。在停水检修期间发现部分衬砌伸缩缝<sup>[1]</sup>和衬砌混凝土表面裂缝<sup>[2]</sup>存在漏水现象。

## 2 技术原理

根据现场探勘发现的漏水伸缩缝情况,漏水的主要原因是二衬施工时的聚硫密封膏和闭孔泡沫板止水效果欠佳。针对此种情况,本工程采用的处理方式是:剔除原有聚硫密封膏和闭孔泡沫板,拓宽原有伸缩缝,在伸缩缝内砸填油麻形成密实靠背,同时对预埋注浆管采用堵漏灵进行油麻表面封堵处理,在内部紫铜止水与表层堵漏灵之间注丙烯酸盐<sup>[3]</sup>柔性止水材料形成止水屏障,采用高弹砂浆填平伸缩缝沟槽形成隧洞表层平整基面,最后使用 SK 手刮聚脲材料封堵表面形成表层防水屏障。

## 3 施工工艺

施工准备→清除缝内材料→伸缩缝扩宽切割、缝面打磨、界面清洁、干燥→缝内填充油麻→预埋注浆管→堵漏灵封堵→丙烯酸盐胶凝注浆<sup>[4]</sup>、打压→伸缩缝内两侧打磨→涂刷界面剂和 SK 手刮聚脲<sup>[5]</sup>→凹槽高弹砂浆找平→第二次涂刷界面剂和 SK 手刮聚脲→外黏胎基布→最后一层 SK 手刮聚脲。

## 4 施工方法

### 4.1 伸缩缝内缝面打磨

使用扁铲、铁钩等工具将缝内聚硫密封胶及闭孔泡沫板钩出,深度 170cm。保证缝内混凝土表面干净

无残留。用手持式角磨机将缝切割成 4cm×3cm 槽,并对槽内侧磨平;宽度每侧不小于 20cm,并在每侧 13cm 位置设置一道深 0.3cm 的槽,将打磨完成的混凝土表面进行清洗、干燥。

### 4.2 伸缩缝内油麻填充

伸缩缝内使用冲击钻砸填油麻,砸填时将油麻分股分别砸填,每段砸填长度 5cm,砸填厚度 10cm,预留 3cm 用于使用堵漏灵进行表面封堵,堵漏灵封堵前将油麻表面杂丝清除干净;在砸入油麻过程中分别在 5 点、10 点、12 点、2 点、7 点位置预埋丙烯酸盐注浆管,注浆管长度 17cm。

### 4.3 伸缩缝内壁堵漏灵填充

砸填油麻和注浆管都完成后,伸缩缝内壁填充堵漏灵,填充堵漏灵应采取分段、分人同时填充,保证堵漏灵之间结合质量,堵漏灵填充时用刮铲少量多次填进缝内,最终形成平整表面。

### 4.4 丙烯酸盐注浆

#### 4.4.1 灌浆工艺

调试丙烯酸盐浆液→灌注 7 点注浆孔→灌注 5 点注浆孔→灌注 2 点、10 点注浆孔→补灌 7 点、5 点注浆孔→灌注 12 点注浆孔并测压→补灌 10 点、2 点注浆孔→12 点注浆孔测压→1 封孔。

#### 4.4.2 止水原理

双组分丙烯酸盐材料是一种新型堵漏防渗材料<sup>[6]</sup>,它可以灌入细小混凝土裂缝中,形成高柔性的止水胶体,受压后可以变形填充至细微裂缝中达到阻断渗水通道的效果(见表 1、表 2)。双组分丙烯酸盐材料可以通过改变 A(丙烯酸盐)、B[丙烯酸盐(引发剂)和促进剂]材料及外加剂用量来调节终凝时间,控制扩散半径。

表 1 丙烯酸盐灌浆液物理性能

序号	项 目	技 术 要 求	备 注
1	外 观	不含颗粒的均质液体	
2	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	在生产厂控制值 ±0.05 之内	

续表

序号	项 目	技 术 要 求	备 注
3	黏度/(MPa·s)	≤10	
4	pH 值	6.0~9.0	
5	胶凝时间	可调	
6	毒性	实际无毒	按我国食品安全性毒理学评价程序和方法为无毒

表 2 丙烯酸盐灌浆液凝胶后的性能

序号	项 目 名 称	技 术 要 求	
		I 型	II 型
1	渗透系数/(cm/s)	$<1 \times 10^{-6}$	$<1 \times 10^{-7}$
2	固沙体抗压强度/kPa	≥200	≥400
3	抗挤出破坏比降	≥300	≥600
4	遇水膨胀率/%	≥30	

双组分丙烯酸盐材料采用双液灌浆泵施工,当三种材料相遇后经过一段时间形成一种可压缩的柔性凝胶体,主要适用于有密实支撑的密闭空间内的封堵渗漏水处理。

#### 4.4.3 注浆施工

在缝内填注的堵漏灵达到可施工强度后,采用高压双液灌浆泵对原预留的注浆孔进行丙烯酸盐高压注浆施工。注浆采用分段注浆方式。

首先将 5 点位置的预留注浆孔作为 I 序孔进行高压灌浆,7 点位置的预留注浆孔作为 II 序孔进行高压灌浆,12 点位置的预留注浆孔作为 III 序注浆孔和检查孔,10 点位置和 2 点位置的预留注浆孔作为加密孔或检查孔布置,在 5 点位置孔注浆时,注意观察,浆液从 2 点位置预留孔自然流出时,停止 5 点注浆孔注浆施工,至此 5 点至 2 点位置间缝内注浆密实完成。

在 7 点位置孔注浆时,注意观察,浆液从 10 点位置预留孔自然流出时,停止 7 点注浆孔注浆施工,至此 7 点至 10 点位置间缝内注浆密实完成。

同时对 7 点和 2 点位置预留的注浆孔高压注浆,注意观察,浆液从 12 点位置预留孔自然流出时,停

止该两位置注浆孔注浆施工,至此 10 点至 12 点位置和 2 点至 12 点间缝内注浆密实完成。

然后对 5 点和 7 点两个注浆孔进行补灌,保证 5 点至 2 点段和 7 点至 10 点段灌浆密实;对 10 点和 2 点位置两个注浆孔进行补灌,保证 10 点至 12 点和 2 点至 12 点段灌浆密实。最后对 12 点位置的注浆孔进行补灌并测定伸缩缝内灌浆压力,伸缩缝内灌浆压力不小于 0.45MPa 时则该注浆符合设计要求,对该段 5 个预留注浆孔进行封孔。

### 4.5 SK 手刮聚脲施工

#### 4.5.1 SK 手刮聚脲施工方法

待衬砌伸缩缝内填充的堵漏灵强度达到设计要求后,即可进行后续的 SK 手刮聚脲<sup>[7]</sup>施工。先对伸缩缝内填充的堵漏灵表面进行磨光、吹扫、清洗、擦干以及烘干。

将伸缩缝内混凝土表面擦干、烘干后即可开始进行第一层 SK 手刮聚脲施工。涂刷第一层 SK 手刮聚脲之前需先在混凝土表面涂刷 2 层潮湿型界面剂<sup>[8]</sup>。潮湿型界面剂为双组分材料,均现场称重现场混合搅拌,对潮湿型 A 组分界面剂和潮湿型 B 组分界面剂两种材料,称重后采用电动搅拌器充分搅拌,搅拌时间不得小于 3min,使两种材料充分混合,搅拌料颜色无色差,上下统一。涂刷料制拌完成后应在 30min 内使用完毕。潮湿型界面剂直接涂刷在混凝土表面上,第一层界面剂会渗透到混凝土细小空隙中去,为保证后期 SK 手刮聚脲黏结强度,界面剂需涂刷两次。第一次涂刷完成 4h 后即可进行第二次界面剂施工。涂刷界面剂时先用硬质涂刷将界面剂均匀涂刷在伸缩缝内和伸缩缝两侧指定范围,然后用刮板用力将涂刷均匀的界面剂进行涂刷,使界面剂形成既透明又薄且均匀的一层。待第一层界面剂涂刷完成后 4h 左右用手触摸第一层,呈“沾手不拉丝”状态时可进行第二道界面剂施工。

#### 4.5.2 SK 手刮聚脲界面剂涂刷注意事项

界面剂表面略干时,检查涂刷表面是否有凝结水,如有,需要用洁净的干布擦拭干净才可以进行后



续施工。

潮湿型界面剂涂刷时需用力均匀一致，使涂刷表面平顺无凸起，遇到混凝土表面不顺位置要反复多次涂刷。

伸缩缝槽内涂刷时必须使所有混凝土表面都刷匀，槽内厚度要均匀，不得出现薄厚不均、局部小疙瘩等现象。涂刷厚度不得太薄也不得太厚，太薄经混凝土表面吸渗容易出现空鼓，太厚黏结强度增长慢，影响后续施工进度，且与混凝土黏结强度下降，影响质量。所以涂刷完界面剂后必须采用硬质刮板进行刮薄。

#### 4.5.3 SK 手刮聚脲界面质量控制要点

混凝土表面磨光范围要足够宽且露出新鲜混凝土骨料才行。在指定位置切割出一条倒三角形加劲槽，加劲槽整环应平顺，深度统一，方向一致，界面剂和后期 SK 手刮聚脲涂刷范围应超出加劲槽。

涂刷界面剂重点控制伸缩缝两侧涂刷范围和加劲槽部位涂刷质量，以及两次界面剂涂刷间隔和 SK 手刮聚脲与第二次界面剂完成后的时间，过早和过晚均不能保证黏结质量。

#### 4.6 高弹性砂浆施工

第一遍 SK 手刮聚脲施工完后约 4h，用手触摸若呈“沾手不拉丝”状态时，立即进行伸缩缝槽内回填高弹性砂浆施工。

高弹性砂浆因施工后砂浆会出现大幅度回弹现象，隧洞顶部位置的砂浆容易掉落，因此在隧洞顶部施工时应分多次施工，每次回填 1cm 厚左右，最终达到用高弹性砂浆充分填充伸缩缝，使伸缩缝与混凝土衬砌表面形成平顺接触面。

高弹性砂浆是由特殊砂和特制的胶凝状液体混合而成的，高弹性砂浆配合比为胶凝材料：砂 = 1：3，采用精准电子秤控制配比。因为胶凝状液体黏稠度较大，人工手动搅拌较为吃力，所以二者按照比例混合后采用电动搅拌装置进行搅拌，每次搅拌时间不低于 5min，搅拌成品的材料色泽均匀统一。

高弹性砂浆填充施工采用金属扁头铲分层将砂浆

塞进伸缩缝内，严格控制单次塞填厚度，太厚容易掉落造成浪费，太薄施工次数增多，影响整体施工进度。第一次施工完成约 2h 后即可进行第二次塞填施工，整环伸缩缝高弹性砂浆施工至少分 3 次进行。最终达到填充密实，饱满、表面平整。

#### 4.7 表层聚脲、胎基布施工

高弹性砂浆表层强度达到设计强度后，对整环伸缩缝进行 SK 手刮聚脲施工和胎基布粘贴施工，在高弹性砂浆表面涂刷潮湿型界面剂 2 层（施工方法同上）。首层聚脲表面涂刷表层活化剂，然后全环进行 1 层 SK 手刮聚脲施工，施工完成后即可粘贴抗拉伸型胎基布 1 层。粘贴完抗拉伸型胎基布后需等待 4h，待胎基布与聚脲充分粘牢且表层强度达到规范要求后再进行后续手刮聚脲封闭，最终达到肉眼看不出胎基布痕迹。

SK 手刮聚脲（单组分）开盖后应在 3h 内用尽，如未用尽，应及时封盖。聚脲施工过程中，混凝土表面或上层作业面不得有水、尘土、杂物。

高弹性砂浆填充成型后即可施工后续手刮聚脲，同时粘贴一层 200mm 宽的抗拉伸胎基布，胎基布原则上应整环无断接，不可避免必须搭接时，胎基布搭接长度大于 15cm。胎基布粘贴要平整无褶皱，褶皱无法避免处可剪开豁口进行重叠粘贴处理。

如果前一层表面有凝结水，在下一遍施工前用干布拭去表面的凝结水，并用层间处理剂涂刷表面，10min 后尽快施工，以保证聚脲层与层之间黏结牢固。聚脲刮层厚度要均匀，向单一方向用力涂刷，一次成型。

聚脲涂刷完成后应为厚度均匀、平整、无流挂、无漏涂、无针孔、无起泡、无异物混入。伸缩缝两侧的手刮聚脲层厚度不小于 4mm，检测的最小厚度应不小于设计厚度的 90%，即 3.6mm，且小于设计厚度的面积比例需在 5% 以内。

伸缩缝两侧施工范围为：潮湿型界面剂涂刷宽度 > 第一层聚脲宽度 > 第二层聚脲宽度 = 第三、四层聚脲宽度 > 胎基布宽度。

（下转第 16 页）

科学研究

## 密云水库调蓄工程泵站技术供水系统 改造研究

王鑫鑫<sup>1</sup> 王超飞<sup>2</sup> 褚霄杨<sup>1</sup>

- (1. 北京市南水北调团城湖管理处, 北京 100095;  
2. 北京京水建设集团有限公司, 北京 101400)

**【摘要】** 泵站技术供水系统可有效解决水泵机组运行温度过高的问题,起到润滑和降温的作用,是保障机组正常工作的重要辅助系统。文章通过对南水北调团城湖调蓄工程泵站取水口和补水装置的改造,实现了技术供水水质清洁、水温恒定、水位自动调节,提高了系统的稳定性和可靠性,降低了维护和运行成本,为同类泵站技术供水系统改造提供了经验。

**【关键词】** 技术供水; 热交换; 自动调节; 稳定性; 可靠性

中图分类号: TV674

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-021-04

## Research on Technical Water Supply System Transformation of Pump Station in Miyun Reservoir Storage Regulation Project

WANG Xinxin<sup>1</sup>, WANG Chaoifei<sup>2</sup>, CHU Xiaoyang<sup>1</sup>

- (1. Beijing South-to-North Water Diversion Project Tuancheng Lake Management Office, Beijing 100095, China;  
2. Beijing Jingshui Construction Group Co., Ltd., Beijing 101400, China)

**Abstract:** The pump station technology water supply system can effectively take away the high temperature generated everywhere during pump unit operation. It plays the role of lubrication and cooling. It is an important auxiliary system to ensure normal work of the unit. Clean water quality of technical water supply, constant water temperature, and water level automatic adjustment are realized, the stability and reliability of the system are improved, the maintenance and operation cost is reduced, and the experience is provided for the transformation of similar pumping station technical water supply system through the transformation of water intake and water refill device of Tuancheng Lake Storage Regulation Project of South-to-North Water Diversion Project in the paper.

**Key words:** technical water supply; heat exchange; automatic adjustment; stability; reliability

收稿日期: 2022-04-16

作者简介: 王鑫鑫 (1987—), 男, 本科, 工程师, 主要从事泵站技术管理工作。

在工程调度运行过程中，管理单位根据工程运行情况，进行了多项技术改造，其中对技术供水系统的成功改造保证了泵站机组在调水期安全平稳地运行。

## 1 技术供水系统

泵站机组叶片调节结构运行设备由技术供水系统进行冷却。叶片调节结构的轴承箱中由于小轴跟随大轴不停转动产生摩擦力，将能量转换为热量传递至润滑油中引起油温升高，如不能将这些热量及时排出，到达一定温度后，将引起油质变化，降低润滑作用，影响轴承寿命甚至烧毁轴承，造成事故停机。同理，上下油盆内的推力瓦与镜板、导轴瓦与轴颈的摩擦也会出现这种情况。而上导轴承和下导轴承中则主要由技术供水流经轴和橡胶轴瓦之间形成水膜，维护轴承和轴之间相互运动的液体摩擦状态，然后由轴承下端流出，带走因摩擦产生的热量。

在水泵机组运行中若技术供水中断 5min，水泵的橡胶轴承就会干磨损坏，使主轴偏心，产生强烈抖动。断水时间延长，水泵的推力轴瓦因失去外部冷却温度升高而造成轴瓦镜面耐磨材料损坏。因此，技术供水系统的正常运行能够保障整个机组的正常运转，如果技术供水发生中断，则会引起机组各处转动部分温度升高，严重时还会造成机组部件损坏甚至停机事故。

## 2 研究分析

本调蓄工程泵站技术供水系统使用前池渠道内的河水作为水源，在入水口拦污栅后设置取水口，并安装有滤网，渠道水经过管道由水泵加压后通过过滤器，直接连通叶调轴承箱，上、下油缸的冷却器，以及填料函，降温后的水排入水泵层集水廊道，集水廊道到达设定水位后，再由排水泵通过管道排入后池出水口。技术供水系统见图 1。

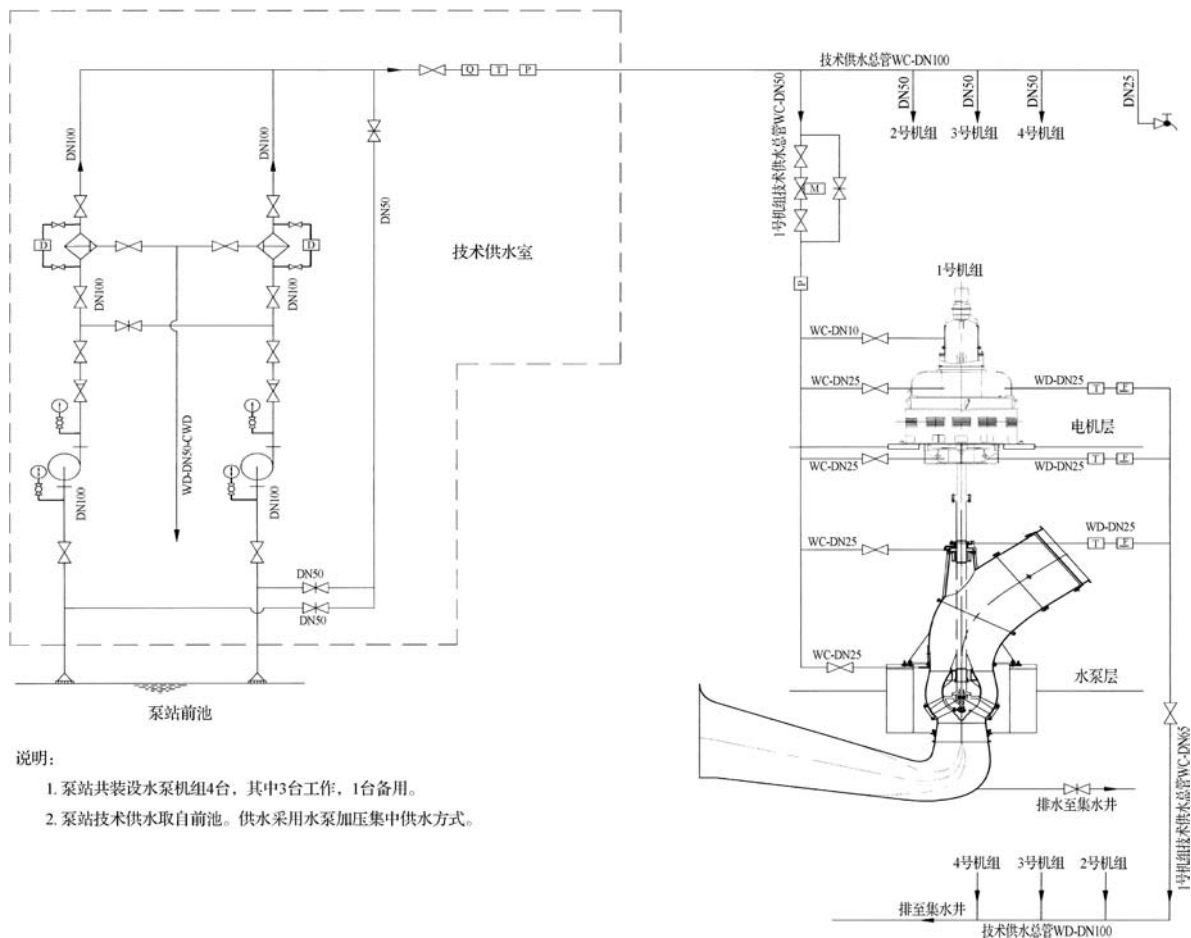


图 1 泵站技术供水系统



由于各站使用的输水渠道为明渠，且各站之间距离均较长。渠道两旁以多年生杨树、柳等枝叶茂盛树木为主，每年夏季、秋季受恶劣天气、降温等自然因素影响，大量树叶、树枝、柳絮、杨树吊等杂物落入渠道内，加之渠道内水草、浮游生物多，微生物等菌类繁殖快，容易造成取水口和管道拥堵，长期在此种环境下运行，经常造成水泵机组散热器管路堵塞。尤其在泵站大流量开机运行时，技术供水因取水口或管路堵塞会造成全站机组停机。出现这些问题难以在短时间内进行修复，不但会给机组安全运行带来较大隐患，也会给整个工程调度运行造成困难。因此需要改变取水方式，保证水源纯净，以此保证技术供水系统运行稳定。

### 3 改造实施

#### 3.1 取水口改造

原技术供水取水口为前池，1号、2号供水泵互为备用，泵前各有一路管路从前池取水。考虑到集水廊道距地面约11.6m，容积约1064m<sup>3</sup>，夏季室温在25℃，冬季室温在10℃，为了保障技术供水水质和水温，在两台泵前加装两条管道接入集水廊道，并在管道上加装相应阀门，使之能够实现前池取水和集水廊道取水的互相切换（见图2）。取水口和排水口分别在集水廊道两侧，保证水循环过程中水温能够有足够的时间自然下降。日常运行中技术供水母管温度为



图2 改造后技术供水取水线路

29℃，技术供水流量约为55m<sup>3</sup>/h，机组各部位温度维持在40~45℃，满足机组日常运行需求。

#### 3.2 自动补水系统

在技术供水循环过程中，填料函填料流失和水汽蒸发会产生水的损失，导致集水廊道的水位在运行过程中逐渐下降，需要及时补水。考虑水质和水温问题，利用技术排水管引用后池水，采用自流水的方式补水，通过补水管的电动阀门，调节补水量的大小，保持集水廊道的液位，这样既能满足补水需求，又不需要消耗过多电能。

技术排水管的出水口在后池出水口运行水位线以下，且在技术供水改造为内循环模式下，不需要技术排水系统工作，因此在技术排水管道上引出一根管道直通集水廊道井口，排水管道的一个手动蝶阀更换成电动蝶阀（具有手动开关阀的功能），将电动蝶阀的电源线沿着现有的电缆桥架和电缆夹层引入舌瓣阀控制柜内，接在新引入的UPS电源上，保证在泵站停电时，电动调节阀能正常工作。从技术供水控制柜内引出控制线，该控制线沿着现有电缆桥架和电缆夹层，引入舌瓣阀控制柜，来控制电动蝶阀，利用两台泵技术供水的运行信号来控制电动蝶阀的全开全关。即其中一台技术供水运行，电动蝶阀在全开位置，两台技术供水泵均不运行时，电动蝶阀在全关位置。在集水廊道补水入口处，安装投入式液位计一个，其量程为0~5m，输出信号为4~20mA，安装浮球液位开关两个，一个用于高水位保护，一个用于低水位保护，其作用是将水位信号传给PLC，PLC根据水位信号，输出4~20mA信号给电动调节阀，电动调节阀根据PLC的信号来调节阀门的开度，从而实现水位的PID调节，让水位保持在设定水位，而设定水位的值，可根据站内人员要求，任意设定。改造后的技术供水系统见图3。

系统中使用液位变送器输送标准4~20mA电流信号，对应PLC输入离散数字量5540~27648，本系统液位变送器量程0~5m。高水位设定值为1.45m，低水位设定值为1.10m，目标水位设定值为1.20m。

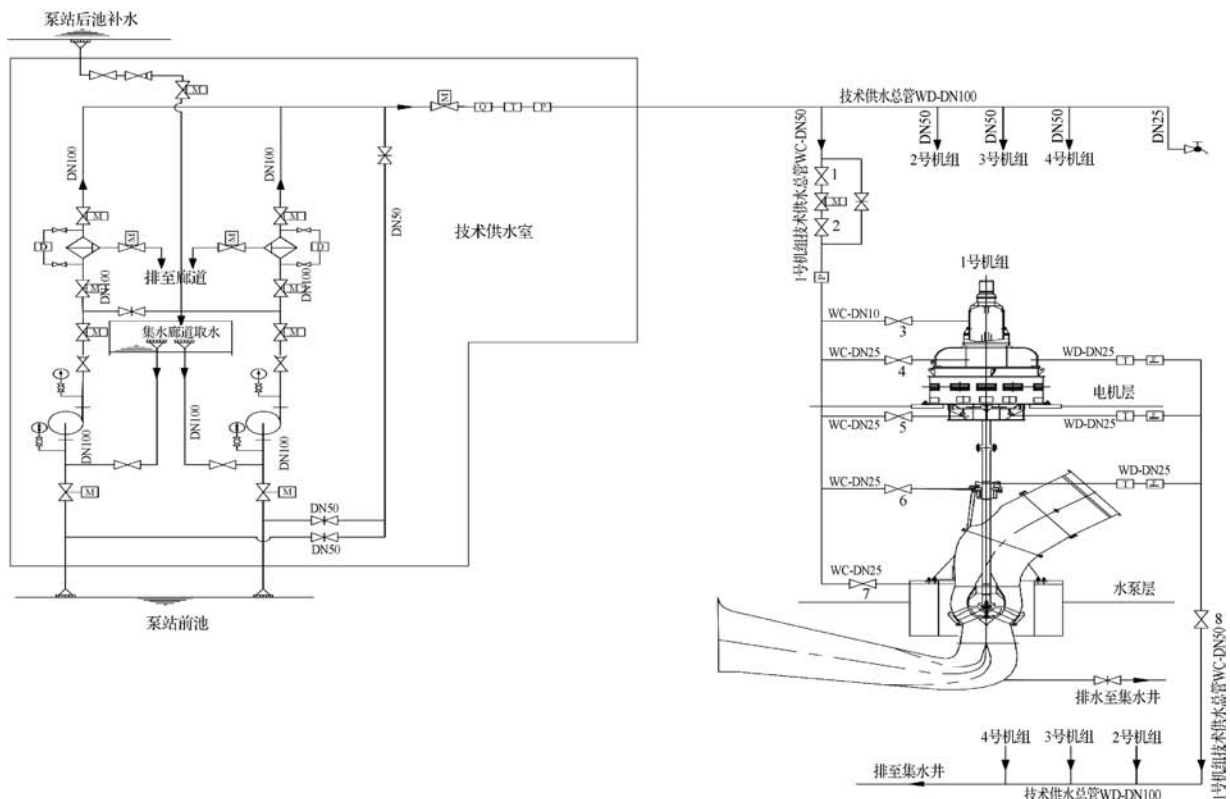


图3 内循环自动补水改造示意图

模拟量输入的程序编写（输入信号为4~20mA）可通过公式 $Y = (X - 5540) / (22108 \times 5)$ 进行。式中，Y为推算出的实际值，该值的数据类型为实型，存储到变量寄存器V区中。X为输入值，即为模拟量输入通道的值，该值存储在模拟量输入地址中，本例为AIW64，该值的数据类型为整型。根据西门子S7-200PLC编程软件中指令的使用规范，在一条指令中参与运算的操作数之间的数据类型必须一致，并且和指令本身的数据类型也要保持一致，若不一致，必须进行相应数据类型的转换。模拟量输入采集程序见图4。

为了便于中控室值班人员使用水位自动调节程序，在现有的工控机控制界面上，设计了水位自动控制监控界面。上位机监视界面中显示电动蝶阀开度，水位控制目标，集水廊道水位，高低水位设置、报警复位信息，以及各设备的工作状态，方便运行值班人员更直观了解自动调节程序运行状态。

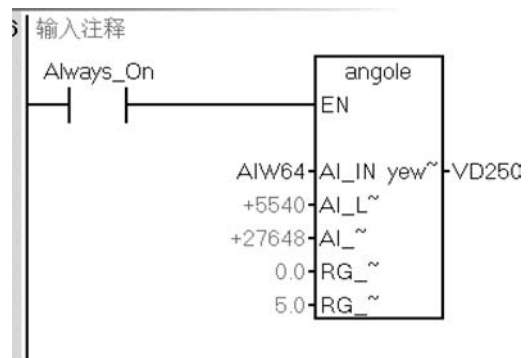


图4 模拟量输入采集程序



图5 水位自动调节监控界面

(下转第31页)

# 牛都水电站狭窄河谷拱坝泄洪消能建筑体型 优化试验研究

申洪波

(遵义市水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 贵州 遵义 563002)

**【摘要】** 针对牛都水电站工程洪峰流量大、坝体单薄、河道狭窄冲刷破坏严重等问题, 文章结合水库水位流量特性, 按 1:60 模型比尺整体水工模型, 对大坝优选的坝身 3 个表孔方案的泄洪消能性能进行试验。分析结果表明, 原泄洪方案 3 孔水舌空中较分散、冲坑深度大且靠近坝轴线。优化调整后的“坝顶泄洪+滑雪道式小挑坎”消能方案, 泄洪水流横向扩散、纵向拉开充分, 空中对冲碰撞明显; 同时水流出溢流堰后, 均以明确的面流状态与下游河道衔接, 两岸及河底冲刷较轻且远离坝轴线, 泄洪消能效果好。运行观测证明优化调整后的泄洪消能建筑安全可靠、工程适宜性强。

**【关键词】** 牛都水电站; 狭窄河谷; 拱坝; 泄洪消能; 水工试验

中图分类号: TV653

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-025-07

## Optimization Test Study of Narrow Valley Arch Dam Flood Discharge and Energy Dissipation Building Structure in Niudu Hydropower Station

SHEN Hongbo

(Zunyi Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower Co., LTD., Zunyi 563002, China)

**Abstract:** The characteristics of reservoir water level and discharge are combined in the paper in view of the problems in Niudu Hydropower Station, such as large peak discharge, thin dam body and serious erosion damage caused by narrow river channel, etc. The flood discharge and energy dissipation performance of three selected surface holes plan in the dam body is tested according to 1:60 model scale overall hydraulic model. The analysis results show that the 3 holes water tongue in the original flood discharge scheme is scattered in the air, and the depth of the erosion pit is large and close to the dam axis. The energy dissipation scheme of “flood discharge at the dam crest + ski slope type small flip bucket” shows that the flood discharge water flow is concentrated horizontally and fully opened longitudinally, and the air collision is obvious after optimization and adjustment. Meanwhile, after the water flows out of the overflow weir, it is connected with the downstream river channel in a clear surface flow state. The scouring on both banks and bottom of the river is light and far away from the axis of the dam, so the effect of flood discharge and energy dissipation is excellent. The operation observation proves that

收稿日期: 2022-02-23

基金项目: 贵州省水利科技项目 (KT201905)。

作者简介: 申洪波 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利水电工程水工结构设计工作。



the optimized flood discharge and energy dissipation structure is safe and reliable with strong engineering suitability.

**Key words:** Niudu Hydropower Station; narrow river valley; arch dam; flood discharge and energy dissipation; hydraulic test

随着水资源开发的进一步深入,在强喀斯特狭窄河谷修建拱坝蓄水发电已成为西南山区水资源开发利用的重要途径。狭窄河谷拱坝其泄洪建筑物布置和消能工选型常受到泄流量大、落差高、易受冲刷等因素影响,泄洪消能问题较为突出<sup>[1-2]</sup>。针对高拱坝的特殊性,大量水利科研机构开展了较为全面的研究,常见的高拱坝泄洪消能基本形成较为完善的解决体系和工程措施。但对于狭窄河谷坝高只有几十米的中、低拱坝而言,其通常存在坝身较低、泄洪功率大、消能水体有限等不利因素,当泄洪量或单宽流量较大时,泄洪消能仍较难解决<sup>[3-4]</sup>。牛都水电站是一座采用坝身表孔泄流的中型拱坝,针对其建坝河谷狭窄、坝身单薄、百万千瓦级泄洪功率等特点,开展表孔大单宽流量泄洪消能型式及体型模型试验研究<sup>[5-6]</sup>,以解决好泄洪建筑物的安全泄洪、充分消能和减轻下游冲刷等问题,提高工程消能防冲效果,为工程安全稳定运行提供强有力的技术保障。

## 1 工程概况

牛都水电站位于乌江水系一级支流的芙蓉江干流上游,地处贵州省正安县土坪镇境内。坝址以上河长 87.4km,流域面积 1650km<sup>2</sup>,多年平均流量 34.2m<sup>3</sup>/s,设计洪水流量 3710m<sup>3</sup>/s,校核洪水流量 5580m<sup>3</sup>/s;水库校核洪水位( $P=0.2\%$ ) 612.69m,设计洪水位( $P=2\%$ ) 608.89m,正常蓄水位 608.40m,水库总库容 3720 万 m<sup>3</sup>。枢纽建筑物由混凝土拱坝、坝顶中部表孔溢洪道、右岸引水系统、右岸地面厂房及 GIS 楼等组成,最大坝高 53.5m。工程等别为Ⅲ等,工程规模为中型。坝址岩体风化程度受岩性、构造破坏程度及地形影响较大,非可溶岩风化程度较可溶岩强烈,可溶性岩层致密坚硬,其风化特征主要表现为沿节理裂隙、层面、溶蚀夹泥风化,对其岩体的整体性

及强度有所削弱,岩体强风化深河床为 2~3m、左右岸坡一般 4~8m。大坝下游冲刷范围内为灰色薄至中厚层为主夹厚层灰岩及瘤状结核灰岩,岩体质量为 BⅢ2 类,抗风化及抗冲能力中等,坝址河床狭窄,表孔泄洪单宽流量大,下泄水流冲刷河床及两岸坡,对坝基、坝肩稳定有一定影响,应做好消能防冲措施。冲刷系数 1.1~1.3,抗冲刷流速 6~8m/s。

为确保泄洪消能建筑物体型在各种设计洪水标准下,均满足泄洪及坝身结构安全要求,且下游冲刷对坝基、坝肩的影响较小,通过水力学模型试验对泄洪建筑物的布置形式及结构尺寸进行优化调整,提出工程适宜性强的泄洪消能方案<sup>[7-8]</sup>。

## 2 水库特征数据及试验模型

### 2.1 水库水位流量特性

为了验证枢纽布置及体型设计的合理性、优化枢纽布置和泄水建筑物体型,对牛都水电站进行水工模型实验研究。根据水库调洪演算,计算水库水位流量特性(见表 1)。

表 1 水库水位流量特性

洪水频率	洪水流量/ (m <sup>3</sup> /s)	下泄流量/ (m <sup>3</sup> /s)	水库水位/ m	下游水位/ m
$P=3.33\%$ (消能防冲工况)	3500	3310	608.40	584.53
$P=2\%$ (设计工况)	3950	3710	608.89	585.54
$P=1\%$ (厂房校核工况)	4580	4280	610.06	586.89
$P=0.2\%$ (校核工况)	6040	5580	612.69	589.67

### 2.2 试验模型

枢纽模型按重力相似准则设计,模型比尺 1:60,

为正态模型。长度比尺： $\lambda_L = 60$ ，流量比尺： $\lambda_Q = \lambda_L^{2.5} = 60^{2.5} = 27885$ ，速度比尺： $\lambda_v = \lambda_L^{0.5} = 60^{0.5} = 7.75$ ，糙率比尺： $\lambda_n = \lambda_L^{1/6} = 60^{1/6} = 1.98$ 。模拟范围为：坝轴线上游长度约 100m，模拟地形高程 620.00m 以下，坝轴线下游长度约 300m，模拟地形高程 600m 以下。下游动床模拟范围为坝轴线下游约 15 ~ 120m，下游水位控制断面约在坝轴线下游约 200m 处。试验模型由量水堰、库区、大坝、溢流堰、电站进水口、厂房尾水渠及下游河道组成。溢流堰采用有机玻璃制作，地面采用水泥砂浆抹面并加糙。

根据提供的下游河床地质资料，在河床冲刷范围，覆盖层很薄，河床强风化层厚 3 ~ 5m，弱风化层底高程约为 562.00m 左右，其抗冲流速约为 5 ~ 7m/s。基岩冲刷主要部位在弱风化层，试验中，冲积层和强风化层被全部去掉，只模拟弱风化层。下游基岩的冲刷采用散粒体模拟，选用粒径为 1 ~ 2cm 的碎石模拟下游基岩的冲刷。模型流量由上游量水堰控制，量水堰内水流平顺（模型全景见图 1）。为了便于计算有关水力参数，如空化数等，水深测点与压力测点相同（具体位置见图 2、表 2）。



图 1 水工模型全景

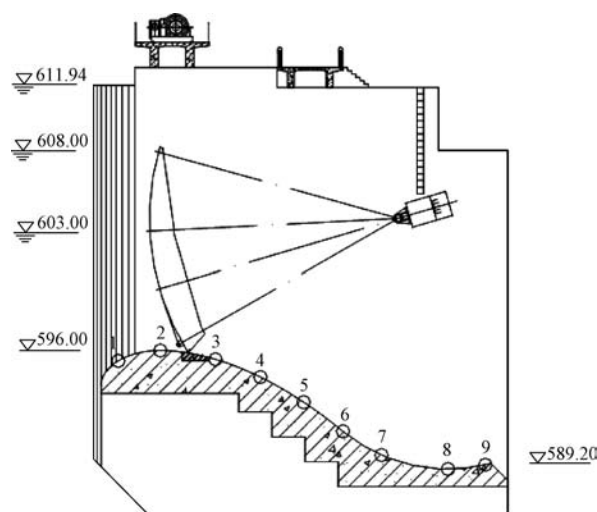


图 2 压力（水深）测点布置

表 2 压力测点位置（以溢流堰顶作为零桩号）

编 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
桩号/m	-2.54	0	3.33	6.04	8.65	11.02	13.35	17.37	19.61
高程/m	595.38	596.00	595.47	594.40	592.89	591.13	589.70	588.93	589.11

### 3 原泄水消能体型校验

原设计方案经与“坝身 5 个表孔（投资约 1218.90 万元）”和“坝身 3 个表孔 + 1 个泄洪洞（投资约 1382.07 万元）”比较，坝身 3 个表孔（投资约 945.28 万元）方案虽表孔泄洪孔口尺寸偏大、下泄洪水能量较集中，冲坑较深，但其坝身结构简单，水库运行管理方便。调度运行过程中，通过洪水时先开中部孔口泄洪，当下游形成一定厚的水垫后，再开 2 个边孔的运行调度方式，减小对下游岸坡脚冲刷，

且下游两岸基岩多裸露，横向河谷，对岸坡岩体稳定不会产生大的影响。从投资省、施工干扰小方面考虑，优选坝身 3 个表孔方案。

原设计方案泄洪消能体型校验结果表明：①所有工况条件下，过流能力满足设计要求；②消能防冲工况，闸室水面线、堰面压力及空化数等也满足设计要求；③下游消能防冲工况下，最深冲坑高程为 541.2m，从河床底高程 570.00m 起算的冲坑深度约为 28.8m，且冲坑最深点出现在距溢流堰出口 60m 左右的位置，

而坝的建基面高程为 560.00m，冲坑最深点与此点的坡度为 1:3，校核工况的冲坑会更深，冲坑最深点与建基面末端的坡度更陡，不利于大坝安全（见图 3、图 4）。

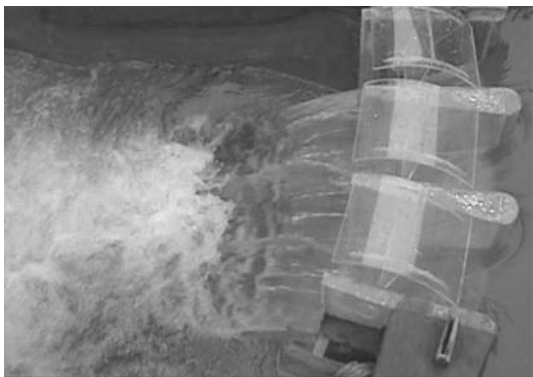


图 3 消能防冲工况水舌入水



图 4 消能防冲工况下游冲坑现状

由图 3 和图 4 可知，三孔水舌空中较分散，水舌空中碰撞消能效果差；水舌入水方向靠近坝轴线且偏向右岸，入水后汇聚为大流量水流导致右岸冲坑深而陡。分析其原因是泄洪表孔堰形设计不合理，导致水舌挑射高度和挑距不够。因此，泄洪消能建筑物体型优化主要是减小冲坑深度，或者让冲坑远离大坝。

## 4 泄水消能优化调整

### 4.1 优化调整方案

要同时解决牛都水电站原泄洪消能方案中冲坑深度大和靠近坝轴线这两方面的问题，最好采用面流消能的方式，让大多数能量在水面被消耗掉<sup>[9-10]</sup>。虽然

这样将造成水面波动较剧烈，但由于水电站下游两岸均为较陡的岩壁，无须特别保护的厂矿、企业等，洪水期短时的水面波动也不会影响发电。但由于电站枢纽大坝为拱坝，很难保证在所有泄洪工况下，下游均保持为面流衔接。因此，泄洪消能建筑物体型优化的目标是：在大洪水情况下，保证下游形成面流；在小洪水时，由于下泄流量较小，产生的冲刷也相对较轻，可以采用挑流的形式衔接，但要争取使冲坑尽可能远离坝轴线<sup>[11-12]</sup>。

经过大量的优化试验后，在原设计体型的基础上，对于溢流堰采用负压设计，只要负压不是很大，可保证不出现空蚀破坏，即将下游面曲线方程由  $y = 0.06776x^2$  修改为  $y = 0.0657x^2$ 。同时，将堰顶高程抬高 0.4m，由原来的 596.00m 变为 596.40m；溢流堰延长 5m；将溢流堰的位置整体向左岸平移 3m，然后绕中孔溢流堰出口顺时针旋转 9°；将溢流堰出口沿其挑角方向采用直线延长，在水平方向上延长了 3m。经优化调整后溢洪道结构体型为：溢洪道仍采用 3 表孔布置，单孔宽 14m，总溢流净宽 42m，每孔进口设一扇孔口尺寸 14m × 12m（宽 × 高）的弧形工作钢闸门，堰顶高程 596.40m。溢流堰型采用 WES 实用堰，曲线方程为  $y = 0.0657x^2$ ，闸墩纵向长度 25.10m。溢洪表孔出口采用挑流消能，消能段反弧半径为 10m，挑射角为 15°，挑流鼻坎顶高程 576.00m。

### 4.2 优化调整后试验分析

经试验分析，各工况条件下优化调整后的溢流堰过流能力、闸室水面线、堰面压力及空化数等均满足设计要求。不同工况下，形成水流进入下游河道的流态见图 5。

由图 5 可知，在各种工况下，水流出溢流堰后，均以比较明确的面流状态与下游河道衔接，水流没有下潜直冲河底，因此可以判断下游的冲刷不会太严重，但是面流的存在，使得下游河道较长范围内的水面波动较为剧烈，鉴于本工程下游河岸较陡，岸边没有限制面流形式的建筑物，水面存在较大波浪也是可以接受的。



不同工况下，水流进入下游河道形成的冲坑形态 见图6。

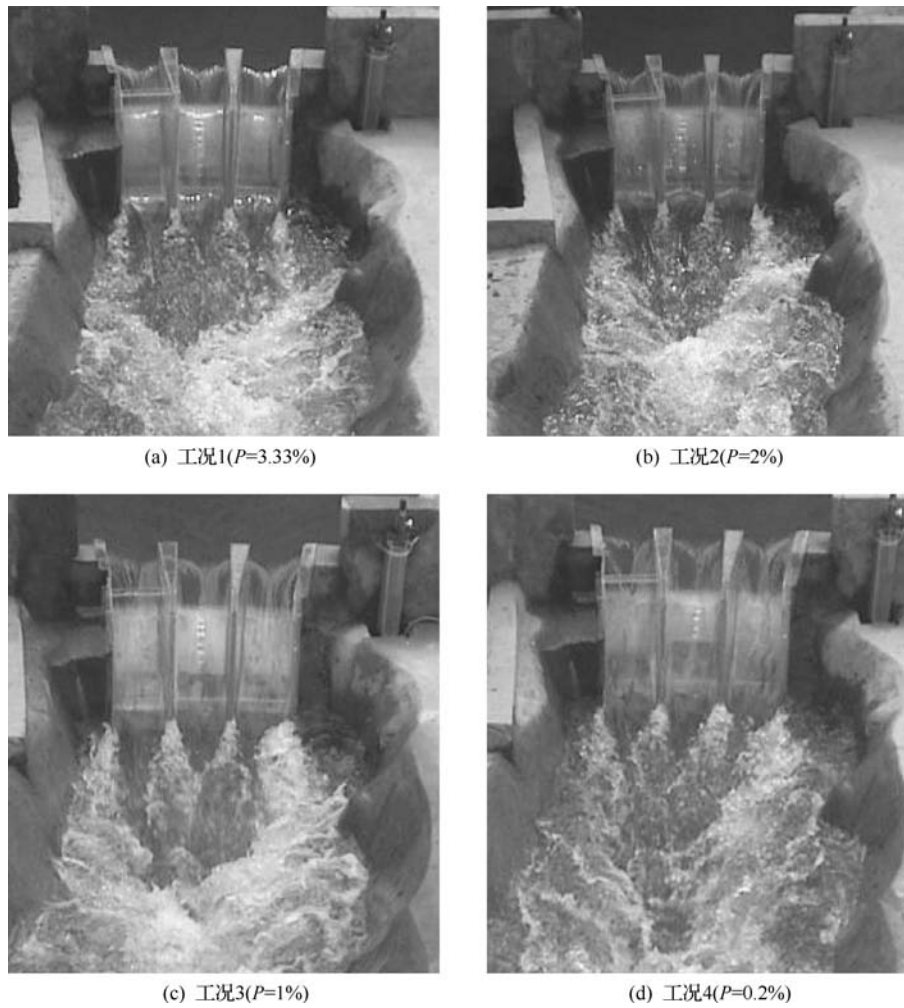
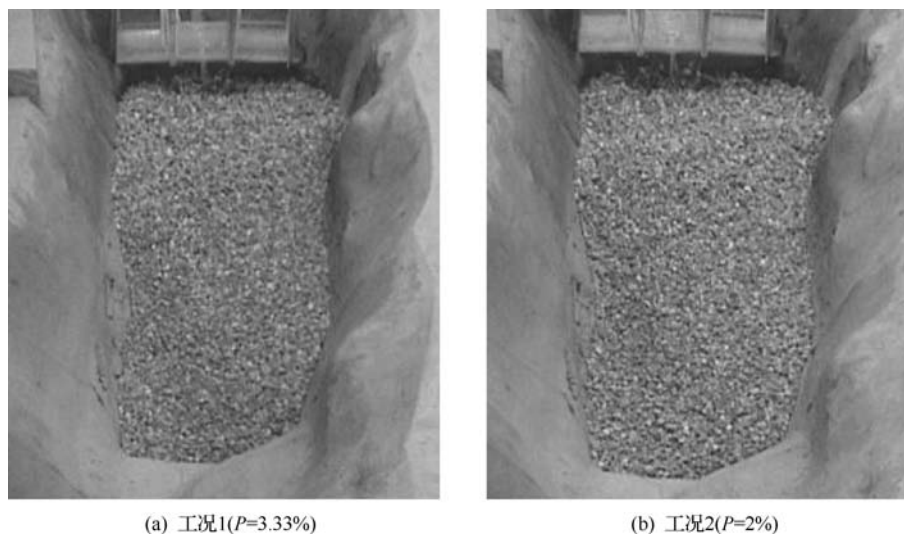


图5 水流进入下游河道的流态



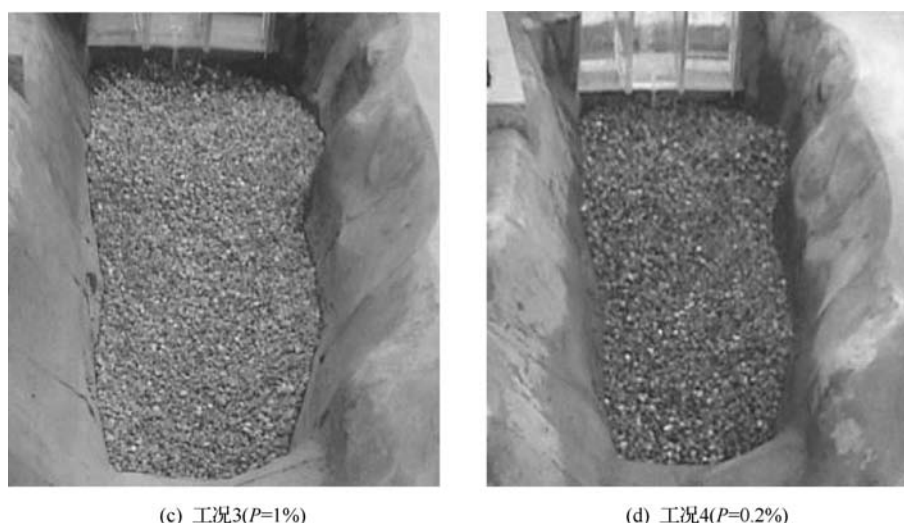


图6 下游河道冲坑形态

由测量可知, 工况1~工况4的冲坑最深点高程分别为552.60m、553.20m、553.48m、554.88m, 且冲坑最深点基本都位于溢流堰脚后80~100m范围内。校核工况的冲坑在所试验的四个工况中是最小的, 30年一遇时的冲坑深度反而最大, 这主要是由于采用面流衔接后, 随着下游水位的抬高, 高速水流逐渐远离河床底部, 因此, 冲刷反而减小。试验的30年一遇洪水冲坑最深点与大坝建基面高程563.00m之差为10.4m, 冲坑最深点距坝趾的距离约为80~100m, 由此可算得冲坑最深点与坝址连线的坡度约为1:8~1:10, 而由地质资料可知, 此区的岩层倾角远远大于此坡, 由此可判断优化调整后的泄洪消能体型方案, 其在下游河道冲刷形成的冲坑基本不会影响大坝安全运行。

### 4.3 实施效果评价

牛都水电站泄洪消能建筑物设计采用坝顶泄洪+滑雪道式小挑坎消能方案, 满足水库大坝在各设计工况下的泄洪消能要求, 泄洪建筑物结构与挡水建筑物拱坝衔接好, 使得坝体得到优化。牛都水电站建成后, 历经数次大流量泄洪考验, 泄洪期间库区水面平静, 闸室内水面平顺, 下游水流衔接方式都保持为面流, 雾化程度很小(见图7、图8)。

在泄洪后对下游的冲刷情况进行了检查, 最大冲坑在大坝下游约92m处, 冲坑底部高程为552.80m, 下游冲坑较浅并且远离大坝, 各项监测数据与模型试



图7 溢洪道泄洪水流流态



图8 下游河道水流流态

验成果基本一致, 消能防冲效果好。

## 5 结 语

a. 通过对原3个表孔设计方案试验研究发现, 表孔水舌空中较分散、水舌挑射高度和挑距不够, 空

中碰撞消能效果差；下泄水流的中心线交汇点偏于右岸，右岸冲坑深而陡，对右岸岸坡稳定有较大影响。

**b. 经溢流堰下游堰面曲线调整、堰顶高程抬高 0.4m、堰体位置整体向左岸平移 3m、堰长延长 5m 等体型调整后，**试验分析表明：优化方案的泄洪规模、闸室水面线、堰面压力及空化数等指标均满足设计要求。水流出溢流堰后，均以明确的面流状态与下游河道衔接，水流没有下潜直冲河底，下游冲刷破坏较轻且远离坝轴线，消能防洪效果较好。

**c. 试验推荐的“坝顶泄洪+滑雪道式小挑坎消能”方案，**具有“纵向拉开、横向扩散、空中消能”等优势，确保水舌落地沿河道纵向拉开，对于狭窄河谷适宜性好，能很好解决中低大泄量拱坝表孔的泄洪消能问题，可为类似工程提供一定参考。▲

#### 参考文献

- [1] 张公平,周钟,唐忠敏.窄河谷高拱坝收缩式表孔体型研究[J].水利水电技术,2018,49(9):71-79.
- [2] 高甜,陈和春,王伟.中型拱坝表孔大单宽流量泄洪消能形式的研究[J].水电能源科学,2013,31(2):126-128.
- [3] 熊建宁.透水底板消能在高拱坝中的运用分析[J].水利规划与设计,2016(12):76-78,95,127.
- [4] 蒲云娟,王一飞,吕海艳,等.大单宽、中水头水流挑流消能试验研究[J].四川水力发电,2017,36(1):69-71.
- [5] 孙益松,叶柏阳,周松松.某水电站泄洪闸消力池水力特性模型试验与数值仿真分析研究[J].水利技术监督,2020(5):28-33.
- [6] 许王峰.泽城水电站导流泄洪洞流态模拟试验及应用[J].水利建设与管理,2018,38(7):40-43,48.
- [7] 卞旭.导流洞改建泄洪洞梯级内消能工模型试验研究[J].水利技术监督,2020(5):20-22,48.
- [8] 丁浩铨,牛争鸣,杨健,等.大坡降复合式水平旋流内消能泄洪洞阻塞扩散段试验研究[J].中国水能及电气化,2011(9):4-11,46.
- [9] 王康柱.国内外泄洪消能建筑物设计综述[J].水力发电,2020,46(9):1-4,68.
- [10] 陈清松,苏艳菲.芙蓉江牛都水电站工程泄洪消能设计[J].红水河,2020,39(5):28-31.
- [11] 贾红娟.某水库工程泄洪排沙洞出口消能防冲方案模型验证及优化设计[J].水利规划与设计,2020(7):96-101.
- [12] 虞佳颖,陈菊芬,陈振华,等.挑流消能预留冲刷坑的数值模拟研究[J].水利规划与设计,2018(8):93-96.

(上接第 24 页)

## 4 改造后效果分析

**a. 降低了人工成本。**原设备每年设备故障率约 8 次，每年需专门投入应急捞草、安排反冲洗人员。改造完成后，设备故障率降低 80%，节约人工成本约 90%，每年可节约维修成本约 0.6 万元，降低人工成本约 9 万元。

**b. 降低了工程能耗。**原取水方式需定期排出集水廊道内的水，运行人员需要随时关注水位，防止发生满溢情况。改造完成后，无须进行排水，也无须人工控制水位。按照供水量  $55\text{m}^3/\text{h}$ 、排水量  $160\text{m}^3/\text{h}$ 、功率  $15\text{kW}$  计算，每天节约电量为  $123.75\text{kW}\cdot\text{h}$ ，每年运行按 9 个月计算，可节约电费约 1.6 万元。

## 5 结 论

通过对密云水库泵站调蓄工程技术供水系统的改

造，实现了水源清洁、水温恒定、水位自动调节的目的，同时，也给泵站维护人员和运行人员减少了工作量，消除了原有技术供水系统的安全隐患，提高了系统的稳定性，降低了维护成本和运行成本。目前，本套改造方案经过一年多的使用已经完全实现相应功能，为同类泵站技术供水系统改造提供了经验，并向其他各级泵站进行了推广和应用，效果良好。▲

#### 参考文献

- [1] 伍良常.磁致伸缩式液位传感器[J].仪表技术与传感器,2007(12):9-10.
- [2] 李长军,刘福祥,王明礼,等.西门子 S7-200PLC 应用实例解说[M].北京:电子工业出版社,2011.
- [3] 张平余.阀门流量特性试验研究[D].成都:成都飞机设计研究所,2008.
- [4] 李海晖.泵站技术供水系统改造方案及应用[J].人民珠江,2014(2):63-65.
- [5] 欧远.立轴冲击式水轮发电机组技术供水系统优化[J].云南水力发电,2021,37(3):170-172.



DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK. 2022.05.07

# 铜川市水库清淤扩容技术可行性研究浅析

由 灿 鄢登成

(中交水利水电建设有限公司, 浙江 宁波 315200)

**【摘 要】** 为了解决铜川市境内水库淤积的问题, 采用实地踏勘和无人机无人船测绘相结合的方式调研铜川市境内各水库淤积现状和周边地形环境, 结合历史资料分析, 提出铜川市境内水库清淤扩容的整体规划和技术可行性, 最终选择合适的清淤技术和底泥处理方法, 恢复现有水库库容, 使现有水库能够发挥其本来的防洪调蓄等功能效益, 以利于铜川市当地的生态和经济的可持续发展。

**【关键词】** 淤积现状; 整体规划; 水下清淤; 环保疏浚

中图分类号: TV697.3

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-032-05

## Analysis on Feasibility Study of Dredging and Expansion Technology in Tongchuan Reservoir

YOU Can, WU Dengcheng

(CCCC Water Resources and Hydropower Construction Co., Ltd., Ningbo 315200, China)

**Abstract:** The field reconnaissance and unmanned aerial vehicle (UAV) unmanned ship are combined for surveying the present situation of reservoir siltation and the surrounding terrain environment in Tongchuan in order to fundamentally solve the problems left over by history about reservoir sedimentation in Tongchuan. The historical data analysis is combined to propose the overall plan and technical feasibility of reservoir dredging and expansion in Tongchuan. Finally, appropriate dredging technology and sediment treatment methods are selected to restore the capacity of the existing reservoir so that the existing reservoir can play its original flood control, storage regulation and other function benefits, thereby benefiting the sustainable development of the local ecology and economy of Tongchuan.

**Key words:** siltation status; overall plan; underwater dredging; environmental protection dredging

铜川市地处关中平原向陕北黄土高原过渡地带, 境内河流皆属黄河流域, 由东北部的北洛河水系和西南部的石川河水系组成, 流域总面积 3882km<sup>2</sup>。全市水资源总量小, 2017 年水资源总量为 2.09 亿 m<sup>3</sup>, 人均占有量仅为全国人均的 1/8, 属严重的资源型缺水

地区。为拦洪蓄水充分开发利用水资源, 铜川市在二十世纪六七十年代兴建了大量的水库。截至目前铜川市直接管辖的水库有 29 座, 总库容 4084.3 万 m<sup>3</sup>, 但是由于当时施工技术落后且对河流泥沙特性和运动规律缺乏研究和认识, 致使水库建设质量先天不足, 缺

收稿日期: 2022-04-18

作者简介: 由灿 (1988—), 男, 本科, 工程师, 主要从事工程管理和市场开发工作。

乏有效的排沙设计，隐患较多。即使后期有除险加固、增设排沙设施的举措，也无法从根本上解决目前水库大量泥沙淤积的现状。到目前为止，全市境内水库普遍出现严重的泥沙淤积现象，最大淤积厚度普遍在 10~20m，淤损库容普遍在 60% 以上，水库淤积不仅造成库容损失，不利于大坝结构稳定，危害水库运行安全，还会降低库区水环境质量，从而影响水库防洪、灌溉、供水、生态环保等功能效益的正常发挥。因此进行水库清淤，扩大水库有效库容，以保证铜川市供水安全，维持大坝安全稳定，提高城乡居民用水

质量就显得十分必要和迫切。

1 水库淤积现状

铜川市境内属市里直接管辖的水库共 29 座，其中耀州区（含新区）、王益区各分布 5 座和 4 座，以小（1）型水库居多，印台区、宜君县各分布 9 座和 11 座，以小（2）型水库居多。

根据实地踏勘和无人机无人船测量结合历史资料调研分析，铜川市水库淤积的现状见表 1。

表 1 铜川市水库淤积现状汇总 (单位: 万 m³)

序 号	名 称	水库规模	总库容	淤积库容	蓄水量	功 能 现 状	溢流情况
1	高尔塬水库	小（1）	437.0	250.0	45.1	饮用水源地	频繁溢流
2	涧沟水库	小（1）	154.0	110.0	干涸	耕地	无
3	豹村水库	小（1）	138.1	70.4	5.0	饮水、灌溉、养殖	汛期溢流
4	友谊水库	小（2）	97.4	50.0	2.0	饮水、灌溉	汛期溢流
5	沟西水库	小（2）	40.5	30.0	1.0	灌溉、养殖	无
6	七一水库	小（1）	142.0	90.0	干涸	无	无
7	北雷水库	小（2）	69.7	35.0	2.5	承包养殖	无
8	韩塬水库	小（2）	20.8	14.0	0.5	饮水、灌溉	频繁溢出
9	红星水库	小（2）	50.0	35.0	1.5	自来水公司蓄水池	—
10	五一水库	小（1）	312.0	200.0	9.7	承包养殖、临时应急饮水和灌溉	—
11	支架沟水库	小（2）	18.0	13.0	1.5	承包养殖	—
12	枣园水库	小（2）	20.0	12.0	6.7	承包养殖	—
13	扬庄子水库	小（2）	12.0	7.0	2.5	承包养殖	—
14	瓦窑沟水库	小（2）	19.0	13.0	干涸	耕地	—
15	松林塔水库	小（2）	22.5	16.0	干涸	耕地	—
16	团结水库	小（2）	72.5	51.0	干涸	耕地	—
17	洞子沟水库	小（2）	10.0	7.0	干涸	计划报废	—
18	楼子沟水库	小（2）	14.0	10.0	干涸	计划报废	—
19	福地水库	中型	1050.0	650.0	63.0	旅游为主，临时应急饮水、灌溉	频繁溢流
20	西河水库	小（1）	785.2	210.0	89.5	饮用水源地	汛期溢流
21	李家河水库	小（1）	268.0	190.0	干涸	计划报废	无
22	党沟水库	小（1）	125.0	90.0	10.5	承包养殖	无
23	马沟水库	小（2）	25.0	14.0	5.0	承包养殖	无
24	西舍水库	小（2）	35.4	—	干涸	无	无
25	东舍水库	小（2）	27.9	—	干涸	无	无
26	梁塬水库	小（2）	33.8	—	干涸	无	无
27	桐塬水库	小（2）	20.0	—	干涸	无	无
28	塬树水库	小（2）	14.5	—	干涸	无	无
29	南寨水库	小（2）	64.0	—	干涸	无	无

铜川市 29 座水库总库容 4098.3 万  $\text{m}^3$ ，坝前淤积厚度基本在 10 ~ 30m，淤积总库容 2303.4 万  $\text{m}^3$ ，总体库容淤损率高达 56.2%（见表 2）。库内现状水深普遍不超过 1m，蓄水量普遍不超过 10 万  $\text{m}^3$ 。境内水库以小型居多，多具有防洪、饮水、灌溉等功能。但从目前库区淤积状态来看，小型水库淤积最为严重，防洪功能均已基本丧失，有 14 个水库呈干涸状态，其中李家河水库、洞子沟水库、楼子沟水库已计划报废。水库库内现存水量及水质已不能满足居民饮水要求，灌溉面积也受到很大限制。目前，较多水库因功能缺失，已被承包用作渔业养殖、旅游开发等。

表 2 铜川市水库淤积统计汇总

统计分类		水库数量	总库容/ 万 $\text{m}^3$	淤积库容/ 万 $\text{m}^3$	淤积占比/ %
水库规模	中 型	1	1050.0	650.0	61.9
	小（1）	8	2361.3	1210.4	51.3
	小（2）	20	687.0	443.0	64.5
行政区域	耀州区 （含新区）	5	867.0	510.4	58.9
	王益区	4	282.5	174.0	61.6
	印台区	9	500.0	329.0	65.8
	宜君县	11	2448.8	1290.0	52.7
合 计		29	4098.3	2303.4	56.2

## 2 水库清淤扩容总体规划

规划涉及的 29 座水库在功能定位、淤积现状、蓄水能力、外部施工条件等方面均存在较大差异，根据各水库功能需求、淤积现状、库内水深条件、进库道路条件、上游来水情况、周边工程影响等综合考量，按以下原则制定本次水库清淤扩容总体规划。

a. 把保障最基本的民生用水需求放在首位，做到万无一失。高尔塬水库目前承担着耀州区小丘镇 5.6 万人用水及灌区 3.8 万亩农田的灌溉任务，西河水库是宜君县 1.4 万人用水的唯一水源地。因此，水库清淤必须确保该 2 个水库的供水能力和水质安全，保障最基本的民生需求。在实施清淤前，需做好应急备用水源地方案。

b. 先行清淤饮水、灌溉等供水需求不突出的水库。采用水力输送方式进行水下清淤在沿海航道、内河湖库区已普遍采用，施工经济高效，但在铜川市境内尚无先例，当地主管部门对境内库区实施水下清淤工作会有所顾虑。因此，建议针对饮水、灌溉等供水需求不突出的水库先行清淤，视清淤效果再开展其余水库的清淤工作。另外，先行清淤的水库还可作为西河水库和高尔塬水库等供水任务重的水库的备用水源地。

c. 先行清淤库容较大的水库。水库清淤后，水库库容得到释放，特别对于大库容水库，可以获得更大蓄水能力，利于水资源的集中调配，方便管理。另外，大库容水库现存蓄水量相对较大，而采用水力输送方式进行水下清淤需要消耗水量，且蓄水量越多清淤效果越好，清淤方量越大。因此，先行清淤库容较大的水库。

d. 多年无水溢出的水库暂无清淤必要，继续以水位监测为主。如宜君县的党沟水库、印台区的支架沟水库、王益区的北雷水库等，因汇水范围内来水量不足，水库淤积后的剩余库容仍能存蓄汇水且未从溢洪道溢出。该类水库尚能蓄水不流失，暂时没有清淤的必要，以继续开展水位监测为主。

e. 干涸水库基本维持现状，部分大库容水库再论证。境内超过半数水库已维持多年干涸状态，水下清淤不具备条件；且通往库区的道路条件也严重缺失，陆上开挖需开辟临时道路，作业条件差。另外，干涸水库以小库容居多，开挖后蓄水量增加有限。因此，对于小库容的干涸水库以维持现状为主，对涧沟水库、七一水库等较大库容水库建议开展来水监测，进一步论证清淤必要性。

根据上述原则，提出如下分阶段扩容规划。

### 2.1 第一阶段：清淤试点工程（五一水库）

五一水库总库容 312 万  $\text{m}^3$ ，淤积总量约 200 万  $\text{m}^3$ ，若实施水库清淤可释放较大的蓄水空间。该水库现被承包养殖，无持续供水需求，不涉及最基本的民生问题。因此，五一水库清淤可作为铜川市水库清淤的试点工程先行实施。



## 2.2 第二阶段：备用水源地清淤（福地水库、豹村水库、友谊水库）

福地水库总库容 1050 万  $\text{m}^3$ ，淤积总量约 650 万  $\text{m}^3$ ，是本次规划方案中唯一一座中型水库，目前水库功能以旅游为主，无持续供水需求。清淤后将逐步恢复水库饮水、灌溉功能，缓解当地供水压力，并为后续西河水库清淤提供备用水源地。

豹村水库和友谊水库均位于耀州区，总库容分别为 138.06 万  $\text{m}^3$  和 94.7 万  $\text{m}^3$ ，淤积总量分别约 70.4 万  $\text{m}^3$  和 45 万  $\text{m}^3$ 。清淤后将逐步恢复水库饮水、灌溉功能，并通过统筹耀州区内其余水资源，为后续高尔塬水库清淤提供备用水源。

## 2.3 第三阶段：饮用水源地清淤（西河水库、高尔塬水库）

西河水库是宜君县 1.4 万人用水的唯一水源地，总库容 785.2 万  $\text{m}^3$ ，目前淤积总量约 210 万  $\text{m}^3$ ，蓄水量仅 90 万  $\text{m}^3$ ，且溢洪道频繁溢出。根据 2017 年铜川市水资源公报，西河水库的水质类别为Ⅲ类，营养化状况评价为中营养，未达到饮用水源地标准。

高尔塬水库承担着耀州区小丘镇 5.6 万人用水任务，现正在进行大坝加高和取水口移位施工，完工后水库总库容将达到 701.5 万  $\text{m}^3$ 。目前淤积总量约 250 万  $\text{m}^3$ ，蓄水量约为 45.2 万  $\text{m}^3$ ，且溢洪道频繁溢出，水质尚可。

因此，无论从扩大库容还是改善水质方面，上述饮用水源地均有清淤需求。考虑到饮用水供给水库涉及民生问题，必须待备用水源地落实后方可开展上述水库清淤，做到万无一失。

## 2.4 第四阶段：剩余水库择机实施清淤，提高居民生活质量

在实施第三阶段后确保居民基本用水需求的基础上，通过水位及汇水监测分析，针对剩余各水库具体情况择机开展清淤，进一步提高城乡居民生活质量。

## 2.5 暂不列入本次扩容规划的水库

计划报废的水库：李家河水库、洞子沟水库、楼子沟水库。

另作他用的水库：红星水库。

## 3 技术可行性研究

对于水库淤积物的清除，水上部分常采用陆上开挖工艺，水下部分则常采用通过水力管道输送的水下清淤。

### 3.1 陆上开挖工艺

陆上开挖即采用陆上机械挖泥，泥土装车外运至堆土区。该工艺需要干地施工，对于干涸水库采用陆上开挖是合适的。根据现场调研，大部分干涸水库道路条件差，需修建临时道路满足泥土装车出运要求。

### 3.2 水下清淤工艺

水下清淤即采用可拆卸的小型环保绞吸船陆运到场拼装后进入库区挖泥，泥土经排泥管线通过水力输送至堆土区，吹填尾水经沉淀处理后用抽水泵回抽至库区内。管线直接输送距离可达 2 ~ 2.5km，超出排距可采用封闭式接力泵站进行接力，具有长距离水力输送能力。该方案清淤效率高，是沿海航道、内河湖泊清除淤积物最常用的工艺。具体工艺流程见图 1。

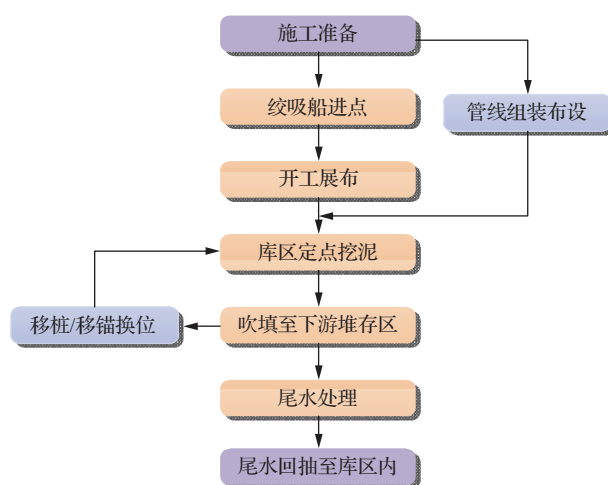


图 1 水下清淤工艺流程

对于铜川市境内水库清淤的适应性，主要考虑道路条件、清淤深度、清淤土质、环保要求、底泥堆存条件等方面。

道路条件决定设备能否进场施工。铜川境内水库属典型的山区水库，道路条件相对较差，其中福地水库、高尔塬水库等道路条件较好，可采用拼装式清淤

船，分拆经集装箱车运输后进场拼装；部分水库道路条件较差，可采用水下泵现场直接清淤。

清淤深度要求：清淤船最大挖深一般不超过15m，最大挖深可达30m。铜川境内水库淤积严重，现状蓄水水深基本不超过2m，现有清淤设备均可满足水库挖深要求。

水库淤积物主要来源于两岸冲沟和洪水搬运物，以黄土状粉质黏土为主，上层较松软，下层较密实。对于表层软土，可采用水下泵直接实施吸泥作业；对于下层硬土，可采用绞刀或高压冲水装置破土，土质适应性强。

常规的水下清淤施工是将底泥通过水力输送吹填至堆存区，尾水直接排放至下游河道。清淤底泥通过水力输送需消耗较大水量，一般体积浓度不超过20%，即清淤1m<sup>3</sup>底泥需消耗5m<sup>3</sup>水量。而铜川境内水库淤积普遍严重，水深基本不足2m，其中西河水库的蓄水量最大，也仅90万m<sup>3</sup>，可清淤量仅18万m<sup>3</sup>，不仅清淤量有限，且宝贵的水资源全部浪费。因此，为充分利用库内存水，考虑将吹填尾水收集并回抽库内循环利用，从而增加清淤量。另外，考虑在底泥堆存区增加防淤措施，尽可能减少水量损耗。

西河水库、高尔塬水库等均为饮用水源地，福地水库为旅游风景区，对水质均有要求，在疏浚设备的选择和施工工艺的设计方面需综合考虑，以满足环保疏浚的要求。采用水下泵直接吸泥或带环保罩壳的绞刀头进行绞吸作业，可有效控制底泥扩散，确保施工期水库水质不受影响。

同时，在清淤施工中，需进行仔细规划和控制，还可结合现场水面情况、水深条件、水流流速和流向、淤积物粒径、疏浚设备移动情况等，在取水口及其附近增设防淤帘等物理屏障防止悬浮疏浚物扩散影响取水水质（见图2）。

底泥堆放场地选取：铜川市地处关中平原向陕北黄土高原过渡地带，境内山峦纵横，沟谷发育，可充分利用下游河道及其两岸缓坡地和沟道设置底泥堆存区。以不影响行洪安全为前提，清淤土可采用水力输

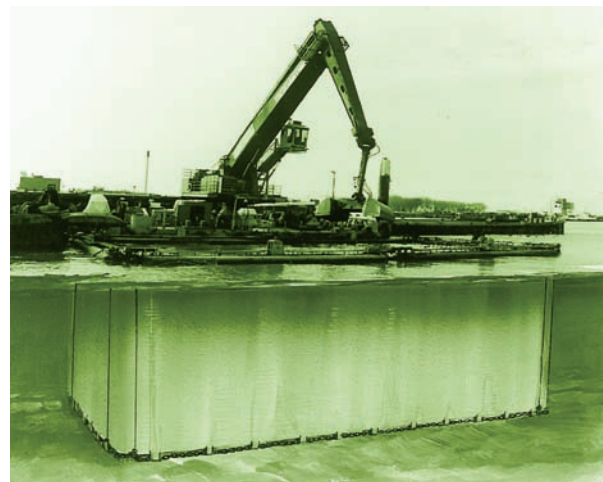


图2 防淤帘示意图

送直接排放至下游河道，洪水季节利用自然冲刷，将泥沙补充至下游。

下游河道承接淤积物的能力有限，对库容改善效果甚微。若采用分阶段清淤排放，大量泥沙放淤下游河道，可能会导致河道的堵塞而引起洪涝等次生灾害，需要重新论证河道堆淤后的行洪安全；河道泥沙大量的淤积，还将导致河道疏浚工作量的大幅增加，额外增加工作量。因此，不建议直接排泥至下游河道。

利用下游河道附近的山谷、沟道或低洼区域作为泥土的堆存区域，设置永久性拦沙围堰，进行清淤土的堆存，经自然干化后可作为农田、林业用地使用。或者利用下游河道两岸缓坡地或平地设置泥土堆存区，泥土经自然干化后堆存区可作为农田、林业用地使用。挡土围堰沿河布置，并可逐级加高，形成梯级挡土，逐步扩大纳泥库容，见图3。

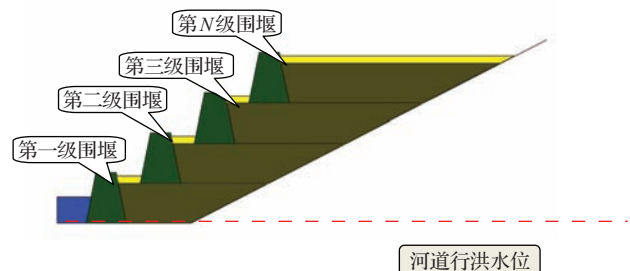


图3 堆存区围堰断面示意图

水库清淤底泥堆存区基本布置在下游河道两岸缓坡地及下游沟道内，距库区均需满（下转第42页）

# 引绰济辽工程平原区土壤对 PCCP 管道 腐蚀性评价研究

于明鑫<sup>1</sup> 武学毅<sup>2,3</sup> 邵 杨<sup>1</sup>

- (1. 内蒙古引绰济辽供水有限责任公司, 内蒙古 乌兰浩特 137400;
2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044;
3. 北京中水科工程集团有限公司, 北京 100044)

**【摘 要】** PCCP 管道耐久性是 PCCP 管道安全运行的核心内容之一, 周围土壤对 PCCP 管道的腐蚀性是影响 PCCP 管道耐久性的主要影响因素。针对不同工程选取合适的土壤腐蚀性评价指标, 构建土壤腐蚀性评价模型, 是土壤对 PCCP 管道腐蚀性评价的重点。文章以引绰济辽工程平原区土壤对 PCCP 管道腐蚀性评价为研究对象, 讨论了引绰济辽工程平原区土壤腐蚀性评价指标组成及应用的问题。研究发现, 可采用土壤电阻率、氧化还原电位、管道自然腐蚀电位、土壤 pH 值、杂散电流作为引绰济辽工程平原区 PCCP 管道土壤腐蚀性评价指标。评价结果显示, 研究线路土壤腐蚀等级为中等, 且存在杂散电流, 建议为 PCCP 管道布置牺牲阳极装置。

**【关键词】** 土壤腐蚀性; 指标; PCCP 管道; 引绰济辽工程

中图分类号: TV48

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-037-06

## Study on Soil Corrosiveness Evaluation of PCCP Pipeline in Plain Terrain of Chao-to-Liao Water Diversion Project

YU Mingxin<sup>1</sup>, WU Xueyi<sup>2,3</sup>, SHAO Yang<sup>1</sup>

- (1. Inner Mongolia Chao-to-Liao Water Supply Co., Ltd., Ulanhot 137400, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;
3. Beijing IWHR Corporation, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The durability of PCCP pipeline is one of the core contents of the safe operation of PCCP pipeline. The corrosion of surrounding soil on PCCP pipeline is the main factor influencing the durability of PCCP pipeline. It is the focus of soil corrosiveness evaluation on PCCP pipeline to select appropriate soil corrosiveness evaluation index and construct soil corrosiveness evaluation model aiming at different projects. The soil corrosiveness evaluation on PCCP pipeline in the plain terrain of Chao-to-Liao Water Diversion Project is studied in the paper. The composition and application of soil corrosiveness evaluation indexes in Chao-to-Liao Water Diversion Project plain terrain are discussed. It is found that the soil resistivity, redox potential, pipeline natural corrosion potential, soil pH value and stray current can be used as evaluation

收稿日期: 2022-04-03

作者简介: 于明鑫 (1971—), 男, 本科, 高级工程师, 从事水利工程建设管理工作。



indexes for soil corrosion of PCCP pipeline in the plain terrain of Chao-to-Liao Water Diversion Project. The evaluation results show that the soil corrosion level of the study line is medium, and there is stray current. It is recommended to arrange sacrificial anode device for PCCP pipelines.

**Key words:** soil corrosiveness; index; PCCP pipeline; Chao-to-Liao Water Diversion Project

长距离调水项目的实施是地区间水资源配置的重要手段,也是实现国家水网战略的重要工程措施。在输水建筑物选取方面,预应力钢筒混凝土管(PCCP管, Prestressed Concrete Cylinder Pipe)由于其自身将高强度钢丝的抗拉、混凝土的抗压和钢板的防渗性能结合,充分利用了材料各自的物理力学特性,成为国内外广泛应用于城市输配水、火电站供水、水利工程、雨污水、工业供水及废水等管线干管管材的选择<sup>[1-2]</sup>。然而,PCCP管道长年埋置于土壤内,土壤对PCCP管道的腐蚀对管道安全运行影响很大<sup>[3]</sup>。据ACPPA有关统计资料,美国和加拿大的9家公司,1943—1990年PCCP管道发生事故的时间比例占总运行期的0.3%,其中82.1%的管道事故由各种腐蚀造成。国内个别PCCP供水工程试运行及投运期间<sup>[4]</sup>,也出现过PCCP因钢丝锈蚀等而引发的事故<sup>[5]</sup>。因此除PCCP管自身质量外,查明管道沿线土壤对PCCP管的腐蚀性至关重要。

引绰济辽工程是国家“十三五”时期实施的172项节水供水重大工程之一,该工程从嫩江支流绰尔河引水到西辽河,向沿线城市及工业园区供水,设计最大年调水量为4.88亿m<sup>3</sup>,为大(2)型工程<sup>[6]</sup>。工程由文得根水利枢纽和输水工程组成,输水工程由山区输水隧洞和平原区PCCP输水管线组成。本文通过研究选取土壤腐蚀性评价指标、构建评价模型,对引绰济辽工程平原区土壤对PCCP管道的腐蚀性进行评价。

## 1 腐蚀性评价指标

PCCP管道是一种特殊的钢结构,表层为水泥砂浆,钢结构不与涂层直接接触,但又区别于混凝土中的钢筋。已有资料显示,目前已知影响土壤腐蚀性的环境因素多达23种,针对不同地区实施的工程,如何选取适应本工程的土壤腐蚀性评价指标,将对土壤腐蚀性评价产生较大影响。此前,国内学者针对不同

工程,采用了不同的土壤腐蚀性评价指标,徐华新等选择了土壤电阻率、氧化还原电位、pH值作为土壤腐蚀性评价指标<sup>[7]</sup>,朱璐选择了土壤电阻率、土壤氧化还原电位、土壤湿度、pH值、土壤氯离子含量作为土壤腐蚀性评价指标,但其工程应用的输水管线为钢管<sup>[8]</sup>,钱朝阳选择视电阻率、极化电流密度、pH值作为土壤腐蚀性评价指标<sup>[9]</sup>,杨正春等采用土壤的pH值、氧化还原电位、视电阻率、极化电流密度、质量损失等作为土壤腐蚀性评价指标<sup>[10]</sup>,王晓丹等通过多元线性回归分析,对土壤理化性质对土壤腐蚀性的影响及理化性质的相互关系进行相关分析,对土壤腐蚀性进行预测和评价<sup>[11]</sup>。

这些评价指标中,土壤电阻率是土壤导电性指标,土壤腐蚀性和土壤电阻率呈负相关性。土壤电阻率和土壤的质地,松紧程度,有机质含量,土壤温度,含水量、含盐量等有密切关系。它是反映土壤理化性质的综合指标,电阻率越小,土壤含电解质越多,土壤腐蚀性越强。氧化还原电位作为微生物腐蚀的一个指标,反映土壤通气状况、水分、有机质、含盐量等,一般认为200mV(SHE)以下的厌氧环境中土壤腐蚀性剧烈,易受到硫酸盐还原菌的作用,故在低氧化还原条件下,要注意厌氧微生物导致金属的土壤微生物腐蚀。土壤中氧化还原电位( $E_{h7}$ )可视为土壤微生物腐蚀的指标。通常腐蚀电位越负,此处管道腐蚀越快。pH值表示土壤的酸碱性,酸性土壤腐蚀性强。

除了上述这些相对稳定的指标外,杂散电流的作用也不可忽视。杂散电流是在大地中漫流的一种大小、方向都不固定的电流,这种电流对金属的腐蚀称为杂散电流腐蚀,属于电解腐蚀范畴。它是由使用直流电的电气化铁路、电镀、电解、电焊、电信电缆、发电站、变电站等电力设备接地装置或供电设备接地

及相邻阴极保护管道等泄漏到大地中的电流。这种电流对地下管道产生严重的破坏作用，不断产生极不规则的杂散电流，杂散电流在管道涂层破损处流出，导致发生电解腐蚀。相关文献显示，杂散电流腐蚀程度，对钢铁而言，1A 电流每年可腐蚀 9~10kg 钢铁。

在综合分析土壤腐蚀性评价指标的基础上，结合工程实际，引绰济辽工程采用土壤电阻率、氧化还原电位、管道腐蚀电位、土壤 pH 值、杂散电流作为土壤腐蚀性评价指标，构建腐蚀性评价模型。

## 2 腐蚀性评价模型及方法

通过查阅资料，已建调水工程中，PCCP 管道土壤腐蚀性评价相关成果较少，故对引绰济辽工程 PC-CP 管道土壤腐蚀性进行综合评价时，采用单项指标评价法，即不同指标对土壤腐蚀性评价等级不同时，从偏安全角度出发，综合评价结论采用最高腐蚀等级进行评定。引绰济辽工程平原区土壤对 PCCP 管道腐蚀性评价指标见表 1。

表 1 引绰济辽工程平原区土壤腐蚀性评价指标

评级等级	土 壤 腐 蚀 性 评 价 指 标				
	土壤电阻率 $\rho$ / ( $\Omega \cdot m$ )	氧化还原电位 VS. SHE/mV	管道自然腐蚀电位 VS. CSE/mV	土壤 pH 值	土壤表面电位梯度/ (mV/m)
特强	—	—	—	<4.5	—
强	<20	<100	<-550	$\geq 4.5 \sim 5.5$	$\geq 5.0$
中	20~50	$\geq 100 \sim 200$	$\geq -550 \sim -450$	$> 5.5 \sim 7.0$	$\geq 0.5 \sim < 5.0$
弱	>50	>200~400	$> -450 \sim -300$	$> 7.0 \sim 8.5$	<0.5
无	—	>400	>-300	>8.5	—

注 表中“—”表示该指标无对应评价等级。杂散电流用土壤表面电位梯度进行表示。

### 2.1 土壤电阻率

土壤电阻率测定采用 ZC-8 接地电阻测试仪，采用交流四极法测定。土壤电阻仪测出的数据代入式 1 进行计算，可得出土壤电阻率：

$$\rho = 2\pi aR \quad (1)$$

式中  $\rho$ ——土壤电阻率， $\Omega \cdot m$ ；

$\pi$ ——圆周率，取 3.14；

$a$ ——探针间距，m；

$R$ ——接地电阻测试仪测值， $\Omega$ 。

相关研究成果显示，土壤温度对电阻率影响较为明显，温度每相差 1℃，土壤电阻率约变化 2%。冬季时，土壤电阻率增大，电阻率增加可能受土壤中水分结冰影响。考虑温度对土壤电阻率的影响，需对式 1 进行校正，修正后的公式为

$$\rho_{15} = \rho[1 + \alpha(T - 15)] \quad (2)$$

式中  $\rho_{15}$ ——土壤温度为 15℃ 时的电阻率， $\Omega$ ；

$\alpha$ ——温度系数，取 2%；

$T$ ——测量时的土壤温度，取 0.5m 深土壤温度，℃。

### 2.2 氧化还原电位

采用电压表正极接铂电极、负极接饱和甘汞电极的方法测定土壤氧化还原电位。需要说明的是，当土壤 pH 值在 5.5~8.5 之间（尤其 pH 值为 7.0），盐分小于 2%，土壤湿润，有机质（如树叶、树根、木质纤维）较多时，土壤中微生物较活跃，并有硫酸盐存在，易产生微生物腐蚀。土壤微生物活动产生大量酸性物质，致使管道局部 pH 值很低，使金属遭受腐蚀。因此应将测定所得的电位差换算成相对标准氢电极电位，公式如下：

$$E_{h7} = E_{测} + E_{甘汞} + 59(pH_{测} - 7) \quad (3)$$

式中  $E_{测}$ ——现场测值；

$pH_{测}$ ——现场测值；

$E_{甘汞}$ ——取 244mV。

2.3 管道自然腐蚀电位

自然腐蚀电位测定的方法有两种，一是将相同材质钢铁片埋入土壤中，测定钢铁片相对于饱和  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  参比电极的电位；二是直接测量 PCCP 管地电位，即 PCCP 管相对于饱和  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  参比电极的电位。工程中通常采用方法二进行管道自然腐蚀电位的测定。但应用该方法时，管道应处于未接入牺牲阳极保护装置的情形下。

2.4 土壤 pH 值

土壤 pH 值测定的方法有两种，一是现场采取地下水试样用 pH 值试纸进行测定得到近似 pH 值；二是采用 20g 风干土、20ml 蒸馏水制成土壤溶液用 pH 值试纸测量。工程中通常采用方法一进行土壤 pH 值测定。

2.5 杂散电流

杂散电流指不按规定途径移动的电流，土壤中宏观电池作用的电位差一般在 0.2 ~ 0.4V，即测点地电位梯度较小时，可判断杂散电流较弱。而人工直流电

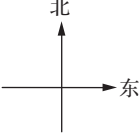
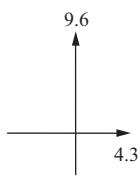
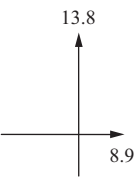
源所引起的电位差一般可达几伏至几十伏。在工程应用中，对于管道沿线与高压架空电缆平行或交叉部位，应作为杂散电流测定的重点部位。

相关研究成果显示，杂散电流对管地电位变化的影响是通过土壤电位梯度的变化施加的，因此可采用直接测定土壤电位梯度的方法判定土壤对管道腐蚀性的影响，即杂散电流对管道腐蚀性的影响。工程应用中，用 2 支  $\text{CuSO}_4$  参比电极，相距 1m 测其电位差，依次在东西、南北两个方向及不同距离进行测量，做出地电位梯度分布图，判断大地中流动电流的大小和方向及漏电情况。

3 腐蚀性评价结果

引绰济辽工程平原区管线段长约 206km，选取工程改线段桩号 G(1)0 + 070.5 ~ G(1)0 + 443.5 线路为工程应用案例，对该范围内土壤进行腐蚀性评价。评价结果显示，改线段上述线路范围内土壤腐蚀性介于弱腐蚀到中腐蚀之间，各指标评价汇总见表 2。

表 2 引绰济辽工程改线段土壤对 PCCP 管道腐蚀性评价汇总

指 标	G(1)0 + 070.5	G(1)0 + 094.5	G(1)0 + 118.5	G(1)0 + 310.5	G(1)0 + 443.5
土壤电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}$ )	52.75 (地表)	64.06 (地表)	75.36 (地表)	38.94 (地表)	48.98 (地表)
	55.26 (槽底)	61.54 (槽底)	66.57 (槽底)	37.68 (槽底)	59.03 (槽底)
氧化还原电位/mV	269.4	260.6	237.1	257.3	262.9
管道自然腐蚀电位/V	-0.350	-0.340	-0.342	-0.342	-0.324
pH 值	7.9	8.2	7.8	7.9	7.3
杂散电流/(mV/m) 	—	—	—		
两侧 100m 内地上金属构筑物输电线、电铁	无	无	无	无	高压线 220kV

注 表中“—”表示此项无值。

对土壤腐蚀性指标进一步分析，地表土壤电阻率在 38.94 ~ 75.36 $\Omega \cdot \text{m}$  之间，槽底土壤电阻率在 37.68 ~ 66.57 $\Omega \cdot \text{m}$  之间，土壤腐蚀等级为弱—中腐蚀，电阻率较低部位集中在桩号 G(1)0 + 118.5 ~ G(1)0 + 443.5 之间，随桩号增加，地表土壤和槽底

土壤电阻率总体呈减小变化（见图 1）；上述范围内土壤氧化还原电位在 237.1 ~ 269.4mV 之间，显示土壤腐蚀等级为弱腐蚀（见图 2）；管道自然腐蚀地位在 -0.350 ~ -0.324V 之间，显示土壤腐蚀等级为弱腐蚀（见图 3）；pH 值在 7.8 ~ 8.2 之间，显示土壤



腐蚀等级为弱腐蚀（见图 4）。此外，上述线路中有  
见 表 2），对 PCCP 管道的安全生产不利影响。按单  
项指标评价法，该范围土壤腐蚀性评价为中腐蚀。

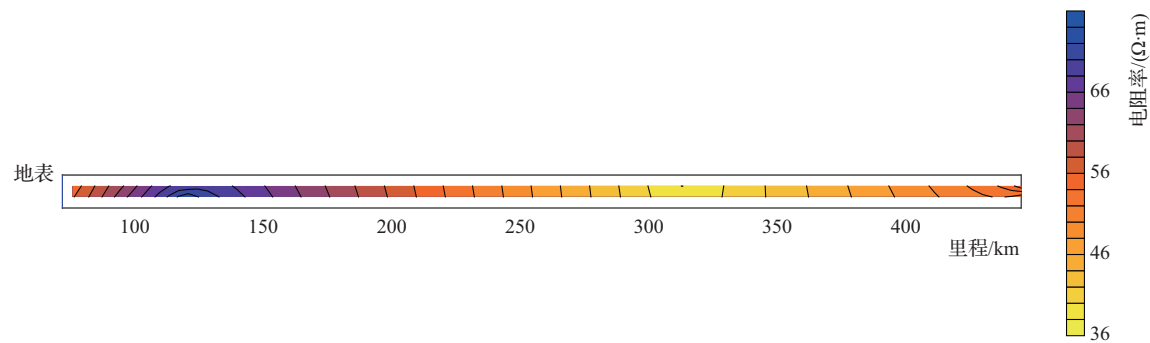


图 1 改线段土壤电阻率沿线分布

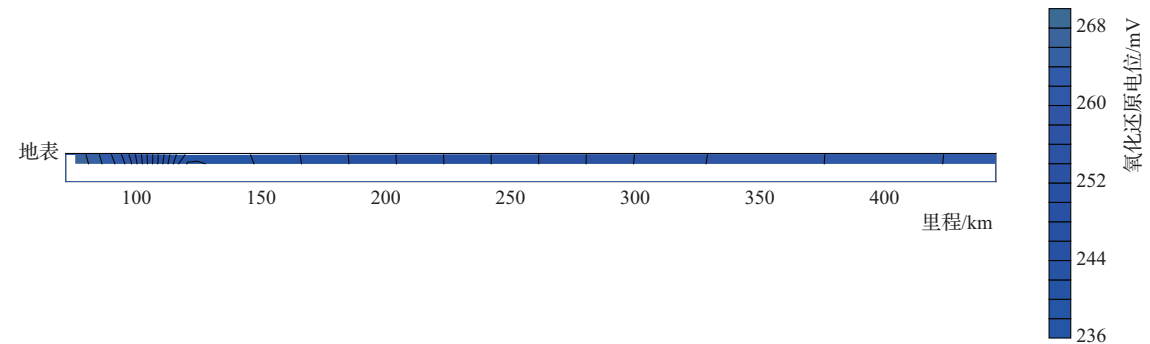


图 2 氧化还原电位沿线分布

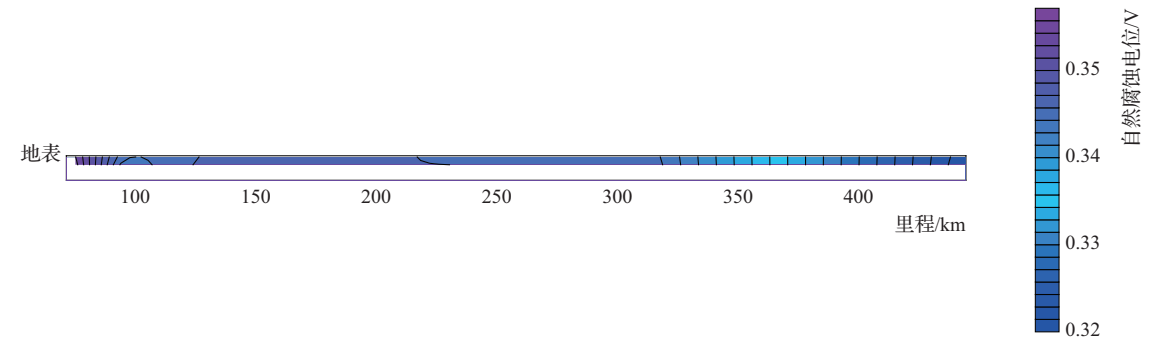


图 3 管道自然腐蚀电位沿线分布

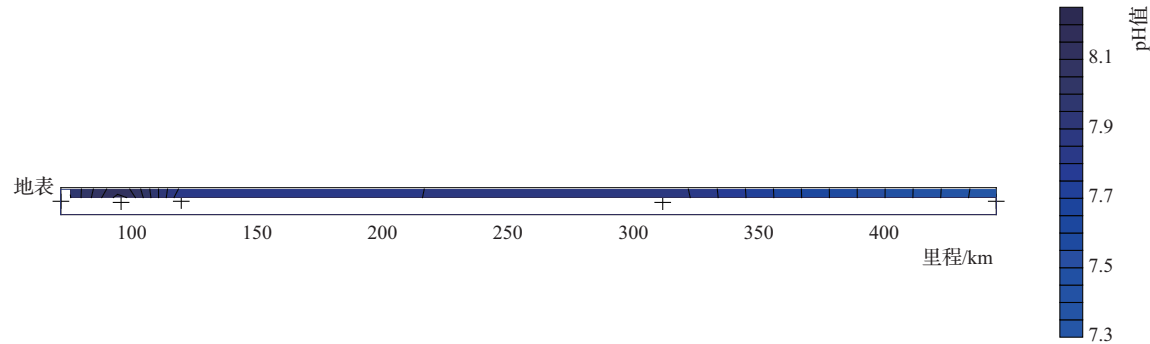


图 4 pH 值沿线分布

## 4 结 论

针对引绰济辽工程平原区 PCCP 管线沿线土壤,采用土壤电阻率、氧化还原电位、管道自然腐蚀电位、土壤 pH 值、杂散电流作为土壤腐蚀性评价指标,构建土壤腐蚀性评价模型,采用单项指标评价法,对土壤腐蚀性进行评价。评价结果显示,桩号 G(1)0+070.5~G(1)0+443.5 之间土壤腐蚀等级为弱腐蚀至中腐蚀,其中桩号 G(1)0+443.5 附近存在杂散电流干扰。对评价为中腐蚀或存在杂散电流干扰的线路,建议实施 PCCP 管道牺牲阳极保护。

本文采用单项指标法评价了土壤对 PCCP 管的腐蚀性,该方法对土壤腐蚀性评价结论偏保守,如何进一步优化评价模型,在保障土壤腐蚀性评价结论全面、准确的基础上提高评价成果的精确性,还有待进一步研究。▲

### 参考文献

- [1] 沈之基. 在役 PCCP 管线的风险评估——设计工压 0.8MPa 管线处于高风险[J]. 城镇供水,2017(5):50-53.

(上接第 36 页) 足一定距离,以保证清淤不影响库区及大坝安全。底泥堆存区因涉及底泥堆载,对区内原地质有一定要求,应选择地质较为稳定、无潜在滑坡体的区域。鉴于目前拟选堆存区无地勘资料,在具体实施阶段应先行开展地质勘察,视地质稳定情况合理调整堆存范围及堆存高度,确保堆存区长期稳定,为后期场地复耕提供有利条件。

## 4 结 语

本文基于对铜川市全境水库的踏勘调研,进行整体规划,提出分段实施计划和科学可行的技术实施方案,对其他地区类似境况有一定的参考价值。后续实施阶段可开展详细的测量和地勘工作,根据地质情况,确定堆土区范围和堆土高度,确保堆存区长期稳定,为后期场地复耕提供有利条件。▲

### 参考文献

- [1] 张士辰,盛金保,李子阳,等. 关于推进水库清淤工作的研究与

- [2] 张许平. 引黄工程北干线土壤对 PCCP 管的腐蚀性测试评价[J]. 资源环境与工程,2010,24(5):548-550.
- [3] 刘军朋. 埋地管道土壤腐蚀性防护研究[C]//中国燃气运营与安全研讨会(第九届)暨中国土木工程学会燃气分会 2018 年学术年会论文集,2018:274-284.
- [4] 蒋锐. 引汉济渭二期工程北干线土壤对 PCCP 管道腐蚀性评价[J]. 陕西水利,2019(3):154-156.
- [5] 张其军. PCCP 腐蚀与防护浅析[J]. 水利建设与管理,2015,35(6):73-75.
- [6] 王家相,张棚. 引绰济辽沿线土壤对输水管道腐蚀性分析[J]. 水利规划与设计,2019(6):136-140.
- [7] 徐华新,高岳,刘杨. 大伙房水库输水入连工程沿线土壤腐蚀性评价[J]. 东北水利水电,2012(2):6-7.
- [8] 朱璐. 广东省某大型输水管道工程土壤腐蚀性测试与评价[J]. 西部探矿工程,2013(2):18-20.
- [9] 钱朝阳. 淮水北调某输水管线土壤腐蚀性评价研究[J]. 城市勘测,2015(4):169-172.
- [10] 杨正春,张忠和,卢平. 引江济淮工程阜阳供水管道土壤腐蚀性测试与评价[J]. 治淮,2019(1):11-13.
- [11] 王晓丹,何友祥,郝昊宇,等. 基于回归分析的土壤腐蚀性评价研究[J]. 内蒙古石油化工,2014(16):3-4.

建议[J]. 中国水利,2017(16):45-48.

- [2] 赵勇宏. 铜川市水资源保护利用分析及对策研究[J]. 环境科学导刊,2017,36(2):66-69.
- [3] 蔡苏晋. “水王”挖泥船在浅水河湖疏浚工程中的应用[J]. 水利建设与管理,2018,38(9):16-19.
- [4] 王凯博. 库区淤积物对大坝渗流安全的影响评价分析[J]. 水利建设与管理,2017,37(12):20-24.
- [5] 王予匀,顾青. 六垛南闸下游引河减淤措施探讨与研究[J]. 水利建设与管理,2021,41(3):9-14.
- [6] 徐晓敏,王俊广. 城市河道清淤疏浚环境保护技术措施探索与实践[J]. 水利建设与管理,2021,41(3):51-53,59,64.
- [7] 李巍. 水库调度方式对水库泥沙淤积的影响[J]. 水利建设与管理,2017,37(9):65-67.
- [8] 盛金保,杨妙帆,江超. 基于工程安全和效益的水库清淤决策方法[J]. 中国科学:技术科学. 2017,47(12):1304-1312.
- [9] 陈国柱,刘毅. 浅析长诏水库生态清淤的范围和深度[J]. 浙江水利科技,2019,47(3):8-11.
- [10] 杜晓虎. 河道淤泥固化技术研究[J]. 水资源开发与管理,2018(4):41-43.

# 多水库条件下中泥河设计洪水组合分析

陈 玮<sup>1</sup> 李 凯<sup>2</sup>

- (1. 云南秀川水利水电勘察设计院有限公司, 云南 昆明 650000;  
2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650000)

【摘 要】 文章以该工程治理末端断面(1号)为例,对该断面各频率洪水组合进行多方法分析计算,得出1号断面洪水组合成果,并通过历史洪水调查对其进行验证。结果表明:采用“末控与区间同频、水库相应”的组合分析方法,能够较好地反映河段的水文情势变化。

【关键词】 中泥河; 洪峰流量; 洪水组合

中图分类号: TV122.3

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-043-07

## Analysis on Design Flood Combination of Zhongni River under Multi-reservoir Condition

CHEN Wei<sup>1</sup>, LI Kai<sup>2</sup>

- (1. Yunnan Xiuchuan Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Co., Ltd., Kunming 650000, China;  
2. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650000, China)

**Abstract:** The governance terminal section of the project (No. 1) is adopted as an example in the paper, which is verified through historical flood investigation. The result shows that the combined analysis method of “terminal control and interval same frequency as well as reservoir corresponding” is adopted to reflect the hydrological regime change of the reach well.

**Key words:** Zhongni River; peak discharge; flood combination

中泥河为五郎河左岸一级支流,发源于下岔河村周边山脉,河源海拔3060m,集水面积491km<sup>2</sup>,河长43.4km,平均比降0.21%,流域内建有白草坪、马厂坪和盐塘3座小(1)型水库和羊坪中型水库,其中,马场坪水库与白草坪水库为串联式水库,该串联水库群又与盐塘河水库、羊坪水库为并联水库。此种情况在云南省河道治理中极为罕见,加之4座水库径

流面积占各治理断面(1~8号)的27%~69%,影响较大,科学分析论证水库对下游河道设计洪水的影响程度至关重要。

## 1 概 况

### 1.1 水库调度及历年泄流调查

盐塘河水库来沙量较大,现状已淤至正常蓄水位

收稿日期: 2022-03-29

作者简介: 陈玮(1992—),男,本科,工程师,主要从事水文计算分析工作。



附近,故不再考虑其对下游河道洪水拦蓄的影响。马厂坪水库、白草坪水库和羊坪水库均能正常发挥效益,查看历年记录中得知:3座水库历年来汛期多余水量多由涵洞均匀下泄,涵洞泄流后才由溢洪道正常

泄流;羊坪水库溢洪道平均每10年泄流一次,泄流量不超过 $10\text{m}^3/\text{s}$ ;因上游白草坪水库的调蓄,下游马场坪水库溢洪道泄流时间不定,历年泄流量 $2\sim 6\text{m}^3/\text{s}$ 。各水库位置分布见图1。

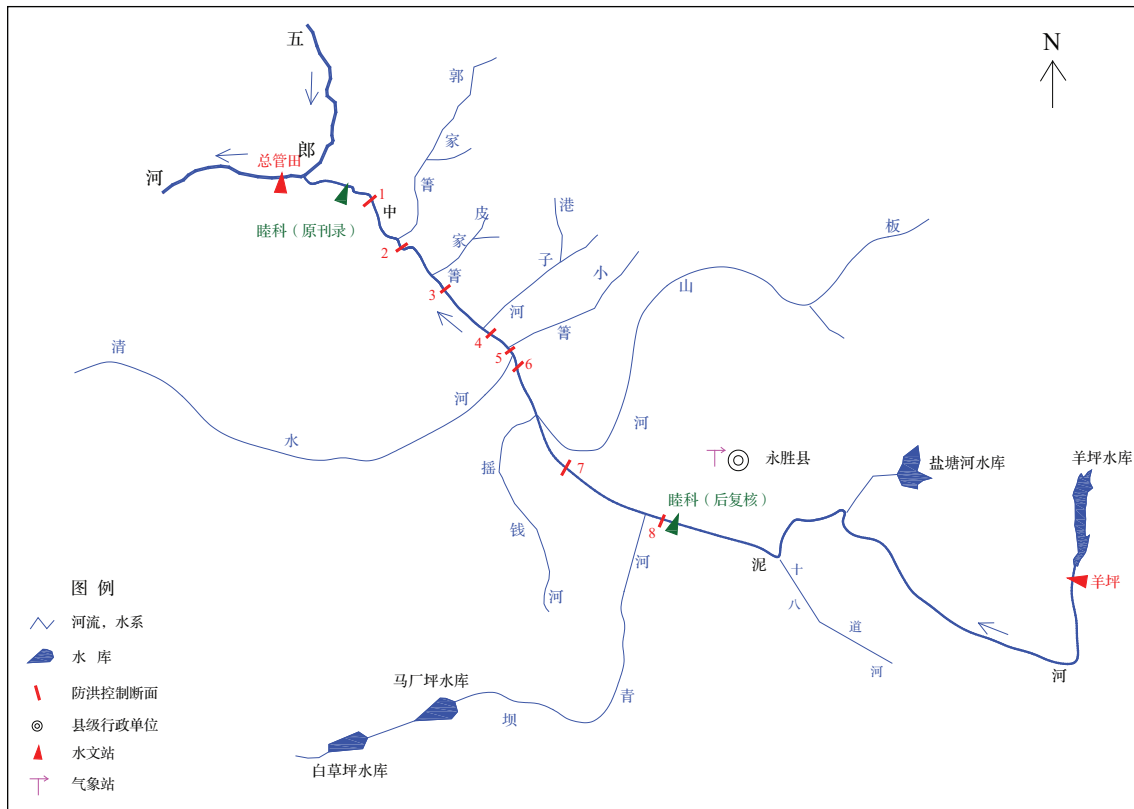


图1 中泥河水系、水库分布及流域站点分布情况

## 1.2 水文测站

中泥河流域内共设立过两处水文站,分别为羊坪站(1955年10月—1956年12月)、睦科站(1966—1969年),流域周边还设有总管田(1959—2019年)、仁里(1967—2019年)、庄房(1960—2019年)、石龙坝(1977—2019年)、务坪(1973—2001年)、中河街(1967—2019年)、普淜(1964—1981年)、地索(1963—2019年)水文站。

## 1.3 暴雨洪水特性

本地区暴雨洪水主要受延伸的西南和东南暖湿气流影响,多集中于6—10月,洪水由暴雨形成,区域大洪水多发生在7—9月,发生概率分别为37%、33%和25%,年洪水峰量同次发生概率在80%左右,

中泥河全流域径流面积为 $491\text{km}^2$ ,统计治理段及周边流域径流面积在 $500\text{km}^2$ 及以下的站点(普淜、中河街、睦科)并挑选各站“峰高量大”的典型洪水过程,该类型的站点一次洪水过程通常历时为1天,洪峰多出现在 $5\sim 8\text{h}$ 内,洪峰所在时段的洪量占整个24h洪量的6%~8%,本文选择睦科站1966年8月2日22:00—8月3日20:00的洪水过程作为区域的典型洪水。

## 2 控制断面天然洪水推算

### 2.1 洪水资料的还原及插补延长

为尽可能利用水库观测资料,本文还收集了羊坪水库2013年、2014年和2016年和盐塘河水库2012—2019年观测资料,分别将其还原至各月1日洪量,建

立其与总管田站的相关关系，可插补得到历年 1 日洪量系列，以羊坪站实测 15 个月的“峰量”关系为依据转化得到羊坪水库洪峰系列；睦科站与总管田站有同期观测资料，挑选两站的同次洪水并建立关系，再利用自身“峰量”关系可分别得到站点年洪峰及 1 日洪量系列。

2.2 站点频率分析计算

地索（二）站 2000 年后下垫面条件发生改变<sup>[5]</sup>，

故在适线时仅采用 1963—1999 年，该段资料系列长度超过 30 年，对推求 10 年一遇洪水具有一定代表性，故不再新增历史洪水；普溯站资料系列不足 30 年，需加入历史洪水资料；其余站点实测（及插补）资料系列超过 30 年，不再新增历史洪水，原由与地索（二）站一致。

用矩法公式初算洪峰和各时段洪量的均值及  $C_v$  值，各站年最大洪水统计参数成果见表 1 ~ 表 2。

表 1 各站各频率洪峰流量成果

站 点	均值/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}$ )	$C_v$	$C_s/C_v$	$P = 10\% / (\text{m}^3 \cdot \text{s})$	$P = 20\% / (\text{m}^3 \cdot \text{s})$	$P = 50\% / (\text{m}^3 \cdot \text{s})$
务 坪	57.9	0.78	4	110	75.8	39.8
总管田	427	0.45		680	550	373
仁 里	282	0.42		439	361	251
石龙坝	316	0.57		515	403	240
庄 房	170	0.64		305	225	130
中河街	133	0.86		316	205	103
羊 坪	51.4	0.44		81.3	66.1	45.2
睦 科	56.4	0.40		86.4	71.6	50.7
地索（二）	298	0.56		512	393	242
普 溯	106	0.61		187	140	83.1

表 2 各站各频率 1 日洪量成果

站 点	均值/万 $\text{m}^3$	$C_v$	$C_s/C_v$	$P = 10\% / \text{万 } \text{m}^3$	$P = 20\% / \text{万 } \text{m}^3$	$P = 50\% / \text{万 } \text{m}^3$
务 坪	300	0.65	3.5	549	409	234
总管田	2440	0.47		3961	3206	2141
仁 里	992	0.36		1470	1251	919
石龙坝	1453	0.78		2836	1990	1024
庄 房	920	0.65		1683	1280	725
中河街	668	0.86		1345	908	440
羊 坪	140	0.43		220	182	126
睦 科	358	0.50		594	475	309
地索（二）	1306	0.73		2490	1790	958
普 溯	281	0.82		557	384	192
盐塘河水库	106	0.66		195	145	82.1

2.3 洪峰、1 日洪量地区分布特性

建立各频率下洪峰流量、1 日洪量与径流面积相关关系（见图 2）。

a. 洪峰流量：2 年一遇： $Q_{50\%} = 5.3354F^{0.5306}$ ；5 年一遇： $Q_{20\%} = 7.3902F^{0.5535}$ ；10 年一遇： $Q_{10\%} =$

11.191 $F^{0.526}$ 。

b. 1 日洪量：2 年一遇： $W_{50\%} = 11.127F^{0.6448}$ ；5 年一遇： $W_{20\%} = 22.275F^{0.6184}$ ；10 年一遇： $W_{10\%} = 24.111F^{0.6475}$ 。

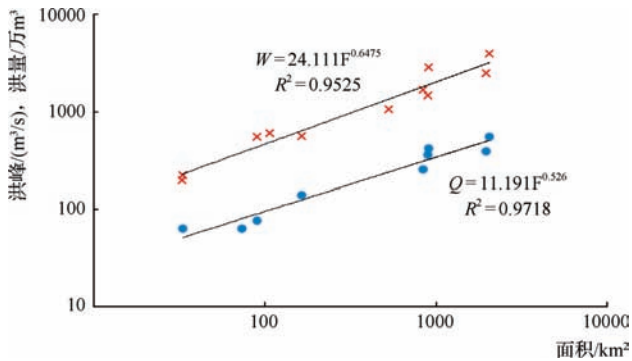


图2 区域洪峰流量、一日洪量与面积相关关系  
( $P=10\%$ )

根据各频率下的设计洪峰与面积相关关系, 推求得到1号断面各频率下的天然洪峰流量(见表3)。

表3 1号断面各频率下天然洪峰成果

断面编号	面积/ $\text{km}^2$	$P=10\%$ / ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$P=20\%$ / ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$P=50\%$ / ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
1号	486	289	227	142

### 3 河流控制断面设计洪水组合分析

#### 3.1 洪水组合方案拟定

以1号断面(径流面积 $486\text{km}^2$ )为例, 对受水库调蓄下的设计洪峰、1日洪量进行推求, 推求方法采用同频率洪水组合法, 该方法的关键是: 各分区具有“同一场典型洪水”, 按一般经验, 组合方法又划分如下:

末控断面与上游水库(群)同频, 区间发生相应洪水, 计算公式为

$$W_{\text{区间}} = W_{\text{末端}} - W_{\text{上游}}$$

末控断面与区间同频, 上游水库(群)发生相

应洪水, 计算公式为

$$W_{\text{上游}} = W_{\text{末端}} - W_{\text{区间}}$$

#### 3.2 白草坪和马场坪水库洪水组合分析

两水库为上、下游“串联”式水库, 首先应对其进行洪水组合分析, 按设计洪量与面积相关关系推求白草坪水库、“白—马”区间和马场坪水库10%、20%和50%的1日洪量, 由此得到“白—马”区间和白草坪水库相应洪量, 以各自频率下的洪量为控制条件放大典型洪水, 得到各断面的洪水过程线, 按水量平衡原理, 可推求得到白草坪水库(相应及设计)泄流过程线, 上下游洪水传播速度取 $2.5\text{km/h}$ , 按上述方法可组合推求得到马场坪水库入库、出库洪水过程。两种方法下的水库出入库特性见表4。

表4 两种组合方法下马场坪水库入库及出库洪峰特性

组合方法	频率/%	入库洪峰/ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	峰现时刻	出库洪峰/ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	峰现时刻
①	10	43.0	第13小时	32.6	第24小时
②		42.3	第12小时	32.7	第24小时
①	20	34.6	第14小时	26.4	第24小时
②		33.8	第12小时	26.7	第24小时
①	50	18.0	第15小时	13.5	第24小时
②		17.8	第12小时	13.6	第24小时

在典型洪水过程线中, 峰现时刻为第5小时, 但经白草坪水库和马场坪水库联合错峰后, 其峰现时刻为第24小时, 对比两种组合方式下马场坪水库的出库洪峰, 按不利计, 本文推荐组合②的成果, 以此对各频率下马场坪水库出库和入库洪水成果进行整理(见表5和图3)。

表5 不同频率下末控断面“天然峰、量”与“出库峰、量”对比

频率/%	天然洪峰/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	出库洪峰/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	削峰率/%	天然洪量/万 $\text{m}^3$	出库洪量/万 $\text{m}^3$	削弱率/%
10	86.4	32.7	62.2	380	175	53.9
20	70.5	26.7	62.1	310	139	55.2
50	39.4	13.6	65.5	173	68.2	60.6

#### 3.3 1号断面洪水组合分析

1号断面以上需要分析的拦蓄水库有羊坪水库、马场坪水库和白草坪水库, 其中, 白草坪水库与马场

坪水库的洪水组合情况在前面已进行过分析, 将两个水库作为一个整体, 以下简称“白马组合”, 首先推求“白马组合”“羊坪水库”“区间(末端—马场坪—



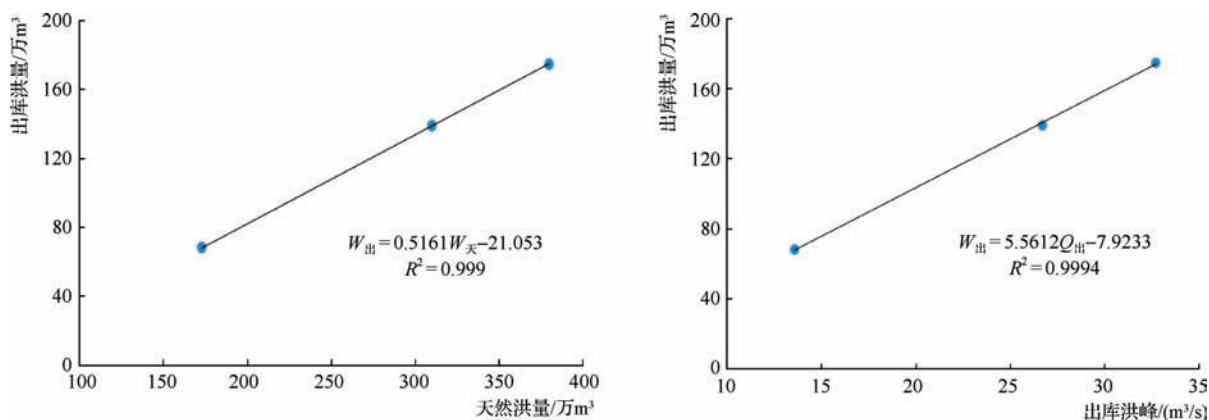


图3 断面出库洪量与天然洪量、出库洪峰相关关系

羊坪，下同)”和“1号断面”的各频率下1日洪量，按以下两种组合方式推求1号断面洪水组合情况。

方法一：1号断面与“白马组合”“羊坪水库”同频，“区间”发生相应洪水，则区间相应洪量由1号断面扣减其余2个分区的同频洪量得到，羊坪水库及区间的洪水过程由典型洪水过程线缩放得到，白马组合为一个整体，由图3中的公式可推求白马组合的出库洪量，按表5中相近出库洪量对应频率的泄流过程线作典型缩放，进而求得其泄流过程线；羊坪水库泄流过程按水量平衡公式推求得到，上下游洪水传播

速度取2.5km/h，各分区洪水过程线错峰叠加（成果见表6）。

方法二：1号断面与“区间”同频，“白马组合”“羊坪水库”发生相应洪水，则1号断面与“区间”同频洪量相减便可得到白马组合和羊坪水库相应洪量之和，按面积占比分摊至2个分区中，区间和羊坪水库洪水过程线采用典型洪水缩放，白马组合泄流过程线按经验法求得，将各分区洪水过程线错峰叠加（成果见表6）。

表6 两种组合方法下各分区洪峰成果

组合方法	频率/%	羊坪水库下泄洪峰/(m³/s)	白马组合下泄洪峰/(m³/s)	区间洪峰/(m³/s)	组合洪峰/(m³/s)	峰现时刻
①	10	14.4	36.3	161.7	161.7	第5小时
②		7.30	8.48	257.7	257.7	第5小时
①	20	13.5	29.2	117.6	117.6	第5小时
②		5.20	5.70	200.2	200.2	第5小时
①	50	11.1	15.5	73.0	73.0	第5小时
②		3.00	1.85	129.2	129.2	第5小时

无论哪种组合方法下，1号断面洪峰流量均等于区间洪峰流量，说明了上游中型水库、“串联”水库群错峰效果明显，本文推荐组合②成果。按本文2.1中给出的洪峰与面积经验公式对各频率下区间洪峰流量进行推求，并将两种成果做对比（成果见表7），成果差异小于5%，说明洪水组合法推求的各频率下洪峰流量精度较高，符合地区分布规律。

表7 1号断面洪峰流量成果推求（组合后）

频率/%	典型洪水缩放/(m³/s)	Q-F公式/(m³/s)	差异，取绝对值/%
10	257.7	255.4	0.90
20	200.2	198.6	0.81
50	129.2	125.1	3.18

## 2.4 1号断面洪水组合前后设计洪峰对比

对比1号断面洪水组合前后各频率下的设计洪峰流量，并推求其差异（成果见表8）。

表8 1号断面洪水组合前后设计洪峰差异

差异/%	$P=10\%$	$P=20\%$	$P=50\%$
	11.1	11.7	9.10

## 4 由历史洪水调查推求设计洪水

2021年1月，对中泥河两岸进行了走访调查，得知：中泥河下段（坝箐河汇口后）曾于20世纪80年代初期进行过系统的治理，但淤积较为严重，在末端断面附近有人指认说：“原来才开始治理的时候，这个桥下还有一个桥墩（现状已被泥沙淹没），桥墩差不多有成人那么高（约1.7m）。”在1983年发生了一场全流域大洪水，多数人回忆为至今最大洪水，当时洪水淹到了“第伍桥”桥面以上30cm左右。

“2019·9·8”洪水调查并收集了整个流域2019年9月6—8日（3天）的各雨量监测站的降水过程，实测了“2019·9·8”洪水整条河道的洪水淹没水位。

### 4.1 调查洪水洪峰值推求

“2019·9·8”洪水：“2019·9·8”洪水主要由永北镇发生暴雨所引起，下游梁官镇并未发生大暴雨，因此，为避开局部暴雨带来的影响，调查范围选择7~1号断面，共调查到8处洪水痕迹（见图4），按曼宁公式（糙率取0.045）反推出各断面的洪峰流

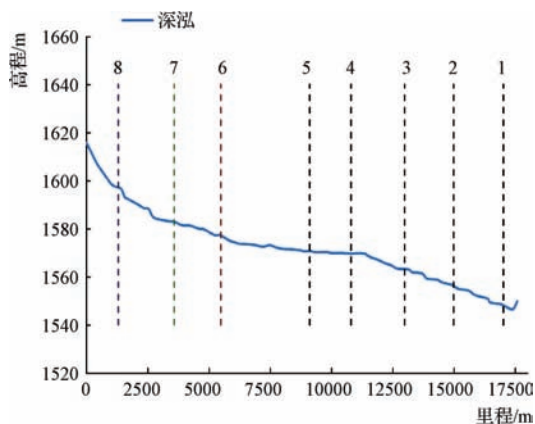


图4 “2019·9·8”洪水洪痕分布

量，在“2019·9·8”洪水期间，羊坪水库未泄流，马场坪水库泄流不足 $3\text{m}^3/\text{s}$ ，故建立各调查断面区间径流面积与洪峰流量相关关系（见图5），由图5可见，各点距呈带状分布，说明下游河道各断面洪水基本同频，与前述所说该范围内未发生局部大暴雨的结论一致。

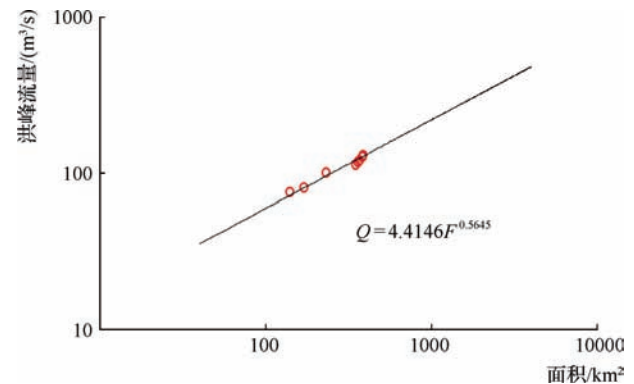


图5 各断面（区间面积）与洪峰关系

“83”洪水：选取“第伍桥”断面为该年洪水的计算断面，由于河道河床淤积严重，因此，需要对该断面进行订正还原，“第伍桥”断面自20世纪80年代至今共淤积近1.7m，考虑到河道治理后为较规整的“矩形”断面，故将该桥梁的实测断面底部往下拉伸1.7m作为原河床断面，后根据曼宁公式反推该年洪峰流量，成果为 $340\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 4.2 调查洪水重现期论证

“2019·9·8”洪水：根据收集到中泥河流域的各雨量监测资料，计算2019年9月6—8日每天的面平均降水量，后根据《云南省水文手册》等相关成果验证该年洪水重现期在2~3年。

“83”洪水：该年洪水的重现期按访问者年龄确定，根据洪痕指认者所述，他当年刚满10年，那场洪水是他出生至今见到的最大洪水，故可将时间往前延伸至1973年，洪水重现期为48年。

### 4.3 设计洪峰推求

中泥河周边的仁里、总管田、睦科和羊坪站的洪峰 $C_v$ 值较为接近，介于0.40~0.45之间，与面积无明显关系，故中泥河洪峰 $C_v$ 值取该范围的中间值，

根据末端控制断面两场调查洪水的洪峰成果及重现期,  $C_s/C_v$  取 4.0, 可反推得到多年平均洪峰流量为  $160\text{m}^3/\text{s}$ , 据此得到 10% 和 20% 的设计洪峰流量分别为  $250\text{m}^3/\text{s}$  和  $204\text{m}^3/\text{s}$ 。

#### 4.4 1 号断面设计洪峰流量成果比较

将洪水组合法与洪水调查法下推求得到的各频率的设计洪峰成果做对比 (见表 9), 由表 9 可见, 两种方法下 1 号断面各频率的设计洪峰流量相差不超过 5%, 说明本文采用的“末控与区间同频、水库相应”的组合分析方法计算得到的设计洪水精度较高。

表 9 不同方法下 1 号断面设计洪峰流量成果

单位:  $\text{m}^3/\text{s}$

频 率	地区综合法	洪水调查法
10%	257.7	250
20%	200.2	204
50%	129.2	135

## 5 结 论

对于水文工作者而言, 历史洪水调查对掌握该区域洪水规律至关重要, 在无资料地区, 历史洪水调查也可作为检验洪水组合的一种方法。本文基本摸清了

(上接第 52 页) 维修时卸下减压阀并打开阀体, 清除锈蚀, 更换 O 形圈和密封垫; 修理拆装减压元件时, 要谨慎小心, 不要用金属棒或坚硬的工具硬撬阀的活动部位, 使用木榔头和木柄敲击震动, 慢慢拆卸阀内部件; 修理完毕后, 重新安装时, 一定要和阀门上的流向指示保持一致。维修通水后若减压效能下降, 应交回供应商进行检修或由供货方技术人员现场指导维修。

## 5 结 语

山区农村供水区域地势变化大, 配水管道和村级管网相应起伏变化较大, 比例式减压阀的有效应用从根本上解决了农村供水高压差比的问题, 延长了管道使用寿命, 具有有效性和稳定性, 在农村供水中发挥

区域洪峰、1 日洪量的地区分布规律, 在洪水组合前后, 各频率下设计洪峰相差 9.10% ~ 11.7%, 基本与区间洪峰流量相同, 说明上游 3 座水库滞洪效果明显, 特别是白草坪和马场坪两座串联水库, 经两座水库调算后, 洪峰出现时刻位于第 24 小时, 该成果与云南省内相关工程的普遍规律相符合, 对以后该片区相关项目具有一定的借鉴意义。▲

## 参考文献

- [1] 李炳穆. 云南省南汀河流域洪水综合公式研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(S1): 1-4.
- [2] 蒋丽娟. 龙川江楚雄城区防洪工程洪水分析研究[J]. 水利水电技术, 2001, 32(6): 51-53.
- [3] 张永胜. 丰满重建工程设计洪水复核研究[J]. 水利水电技术, 2021, 52(S1): 159-164.
- [4] 蒙海泳. 野马川河下游河道治理工程设计洪水组合分析[J]. 中国水能及电气化, 2020(9): 19-22.
- [5] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范: SL 44—2006[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [6] 中华人民共和国水利部. 水文调查规范: SL 195—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [7] 水利部, 长江水利委员会水文局, 水利部南京水文水资源研究所. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2006.

了不可替代的作用, 值得山区和丘陵地区农村供水推广应用。▲

## 参考文献

- [1] 傅星韩. 给水减压阀在工程中应用探讨[J]. 福建建筑, 2018(6): 127-131.
- [2] 贺金川, 李红. 比例式减压阀的应用[J]. 基建优化, 1999(1): 50-52.
- [3] 杨琦, 季能平. 可调式减压阀设定压力与流量的测试分析[J]. 中国给水排水, 2015(3): 46-49.
- [4] 欧震. 玉州区农村饮水安全集中供水工程设计方案探讨[J]. 水利规划与设计, 2013(10): 61-65.
- [5] 牛晓勇. 浅析农村供水管道中的减压措施[J]. 农业科技与信息, 2020(16): 98-99.
- [6] 王学勇. 脱贫攻坚农村饮水安全的思路与对策[J]. 水利技术监督, 2020(4): 68-71.



运行管理

# 比例式减压阀在山区农村供水中的有效应用

王旭峰

(张家川县农村供水工程管理站, 甘肃 张家川 741500)

**【摘要】** 山区农村供水区域地势变化大, 配水管道和村级管网相应起伏变化较大。文章以张家川回族自治县农村饮水工程为背景, 简述了比例式减压阀工作原理及特点, 分析了实际应用效果。实践证明: 该阀从根本上解决了农村供水高压差比的问题, 延长了管道使用寿命, 具有有效性和稳定性, 在农村供水中发挥了不可替代的作用, 值得在山区和丘陵地区农村供水中推广应用。

**【关键词】** 比例式减压阀; 农村供水; 效果

中图分类号: S277.7

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-050-03

## Effective Application of Proportional Pressure Reducing Valve in Rural Water Supply in Mountainous Area

WANG Xufeng

(Zhangjiachuan County Rural Water Supply Engineering Management Station, Zhangjiachuan 741500, China)

**Abstract:** The terrain of rural water supply area in mountainous area is changed greatly. Corresponding fluctuation of water distribution pipeline and village-level pipe network is changed greatly. The working principle and characteristics of the proportional pressure reducing valve are described briefly, and the practical application effect is analyzed based on the background of rural drinking water project of Zhangjiachuan Hui Autonomous County. Practice shows that the valve can be used for fundamentally solving the problem of high-pressure difference ratio in rural water supply, and prolongating the service life of pipelines. It has effectiveness and stability, which plays an irreplaceable role in rural water supply. It is worthy of popularization and application in rural water supply in mountainous and hilly areas.

**Key words:** proportional pressure reducing valve; rural water supply; effect

张家川回族自治县位于甘肃省东南部的天水市东 县域面积分属土石山林区和黄土丘陵沟壑区, 具有北部, 地处六盘山地槽与陇西黄土高原的过渡地带, 梁、峁、坡、沟相间地貌特征, 境内山峦起伏, 沟壑

收稿日期: 2022-01-24

作者简介: 王旭峰 (1972—), 男, 大专, 高级工程师, 主要从事农村饮水安全建设管理工作。

纵横,海拔最高 2659m,最低 1486m,相对高差 1173m,人均水资源量不足  $500\text{m}^3$ ,属极度缺水地区。饮水难、饮水不安全在极大程度上限制和制约了农村经济社会的全面发展。为了从根本上解决山区农民群众饮水难和饮水不稳定的问题,经过 10 多年不懈的努力,按照自然地貌特点和水资源的分布特征,坚持“以水源定规模,按地势建工程,规划一次到位,分年组织实施”的建设思路,以东峡、石峡两座水库和马鹿河为 3 处水源,建成了 6 大跨乡镇、跨流域的集中供水工程,其工程规模在均千吨万人以上,全县实现了农村自来水全覆盖。自来水入户率达到 98%。由于工程建设和运行管理责任体系健全落实,供水保证率连续多年稳定在 95% 以上,成为全省乃至全国农村饮水安全工作的先进典型。但也曾经走过水费回收率低、工程管理效率不高的曲折之路,其根本原因是供水保证率得不到有效稳定的提高,挫伤了管理者和农民群众的积极性。通过不断探索和实践,在强化运行管理各项举措的同时,有效采用和改进适宜于山区农村供水的先进产品,不但节约了建设资金,而且降低了运行成本,相应提高了管理效率。

## 1 山区农村供水的特点

农村供水工程由水源通过潜水泵输送至水厂,经过水处理后存储于清水池,再经泵站扬水至高位蓄水池,通过高位蓄水池配水干支管供水到户,配水管线长,输水落差大,是利用地形落差进行重力输水的管道工程。

山区农村供水,其主要特点是地形地貌特征多样复杂,同一人口集中区域,海拔高度相差较大;同一行政村或自然村庄相对高差明显不同,相对高差最大 600m,最小 90m;在距离上,同一供水管网与高位蓄水池的距离最大达到 35km;主干管网和村级管网随供水覆盖区域地形地貌和距离的不同供水压力相应不同,当水压较小时,流量不能同时满足用水需求,当水压较大时,不同时段和区域会出现爆管等各类安全故障。为满足压力要求,早期建成的工程,采用调蓄

池和活塞式减压阀相结合的减压方式供水,调蓄池由于工作频率较高,自动控制浮球阀会时常失灵,不同程度地出现调蓄池水溢冲毁农田和道路的现象,加大了维修难度,供水时续时断。活塞式减压阀因控制流量而作用有压力,也就是水在动态状况下有减压作用,当夜间停止用水,在静态时进水与出水压力相等,没有减压效果,根据不同的用水量需经常人工调节,相应增加了管理难度和工作量,出现村级与户用管道在夜间发生爆管现象。从山区农村供水现实需要出发,提高供水保障要同时满足流量和压力两个基本条件。

## 2 比例式减压阀概述

比例式减压阀有效弥补了减压调蓄池和活塞式减压阀两者的不足,具有减静压及动压的功能和作用。通过在张家川县农村供水工程中的应用,为提高供水保障率发挥了非常显著的作用,适用于不同海拔和距离差异的农村供水,还可直接取代农村供水的减压调蓄池,节约建造调蓄池的费用。

### 2.1 比例式减压阀工作原理

比例式减压阀主要由阀体、进口与出口压盖、活塞、O 形圈和密封垫等组成,减压比有 2:1、3:1、4:1、5:1、3:2、4:3、5:2 几种,亦可根据要求设计特殊比,阀体材料采用全铜或不锈钢,适用于生活用水,不怕结垢和锈蚀,也不会对水质造成影响,适用于生活用水。

比例式减压阀主要是运用液压原理使阀后与阀前压力呈一定的比例关系,其重要部件活塞,在阀体内做直线运动,后端受水面积是前端受水面积的整倍数,当出现阀后管网没有用水时,阀门处于关闭状态,形成阀前与阀后压力比成定值;当阀后管网正常用水时,阀前就会产生压力,因阀前压力大于阀后压力,在进口压力的作用下,水流介质通过,由于活塞两端截面积不同而造成的压力差改变了阀后的压力,正常供水管路有压力情况下,活塞两端的面积比构成了阀前与阀后的压力比,在实测阀前压力数据的基础

上，阀后静压及动压可按比例减至管路或设施能够承受的压力值。

## 2.2 比例式减压阀的作用

比例式减压阀能够使管道中介质出口压力低于进口压力，并保持出口压力近似于恒定的压力控制阀，利用阀内浮动活塞两端不同的截面积压力差，从而改变进水与出水的压力，使管网不突破压力限制，达到安全、稳定、正常供水的目的。

## 2.3 比例式减压阀性能特点

运用水压原理控制和调节压力，构造简单；能达到理想的减压比例和流量；动态、静态都有减压作用；阀门工作状态时无噪声和振动，消减水锤，保护管网；不受安装角度限制；重量轻、阀门体积小、使用寿命长；具有固定减压比，减压值不需人工调整；野外安装非专业人员不能随意操作，具有安全保障。

# 3 比例式减压阀的应用及效果分析

## 3.1 比例式减压阀安装

减压阀设置的条件：一般在需要减压的位置配备减压阀专用井，减压阀必须在水平管路上直立安装，严禁装反，安装注意管路介质的流向与阀体箭头所示方向一致。

安装之前必须清洗清理管道系统，防止焊渣或其他脏物留存或进入阀内，影响阀门正常工作。减压阀前应安装过滤器，以便于维修停水和防止杂质进入阀体。安装减压阀前后应安装一段直管，阀前阀后直管长度视安装环境不少于 20cm。减压阀进口还要安装闸阀，应保持一定距离，操作时缓慢开启，不能因为压力幅度太大，造成减压阀减压功能失常，缩短其使用寿命。

减压阀上方不宜放置重物，尽可能避免剧烈扭转和震动减压阀，把故障发生的可能降至最低。为便于维修维护减压阀，在减压阀上下均预留足够的操作空间。

## 3.2 比例式减压阀使用效果分析

比例式减压阀一般口径选用与管道的公称通径相同，不采取放大或缩小口径的方法。比例式减压阀进

口压力与出口压力形成相对固定的比例关系，一个比例式减压阀只能确定一种减压比，比如 2:1 或 3:1 等，其出口压力应当符合以下要求：当减压比为 4:1 时，出口压力应当大于 0.13MPa，为 3:1 时应大于 0.15MPa，为 2.5:1 时应大于 0.18MPa，为 2:1 时应大于 0.2MPa。张家川县农村供水配水管网压力不大于 1.6MPa，实际使用中，主干管网在管道用压力表实测压力数据，当压力大于 1.6MPa 时，一般配置 2:1 减压阀分区分段减压，使主干管道压力控制在 1.6MPa 之内，管道安全系数有保障。村级与入户管网出口压力一般控制在 0.3~0.8MPa 之间，按实测压力数据分层分区减压，一般安装 3:1 减压阀，确保到户水压在管道和水龙头承受的范围内。主干管网通常配置安装 2:1 或 2.5:1 的减压阀，村级管网多用 3:1 或 2:1 的减压阀，倒虹吸等压力较大的区段适用于 4:1 的减压阀，压力控制稳定。实践证明，比例式减压阀动静减压效果明显，既能保证压力要求，又同时满足流量需要，经济耐用，使用效率高，从而确保供水运行平稳，本工程自 2011 年使用以来，10 年间没有发生因水压不稳定造成爆管或供水流量不足的问题。

# 4 比例式减压阀维修保养

比例式减压阀不能随便拆卸，否则可能影响减压阀的正常使用效果。由于农村人口流动量大，如存在阀后用户长期不使用水的状况，由于平时管网内水体处于静止状态，管网污垢杂质沉积在阀前过滤器，阀后用户用水时要及时清理过滤器，避免杂质进入减压阀，影响减压阀使用效果。日常工作中，加强减压阀的管理巡视，注意观察减压阀本身的工作状态，阀前与阀后经测试压力数值接近，表明减压阀本身存在故障，如出现阀体滴漏不止，表明 O 形密封圈已经磨损，需要更换密封件。

比例式减压阀要定期清理阀前过滤器，一般每半年进行一次例行维修保养，以防砂石或杂物进入阀内。连续稳定供水时，减压阀一般正常工作，发生故障的概率极低，当反复出现供水中断或连续停水 3 天以上时，极易造成减压阀功能失常，（下转第 49 页）

# 云计算 SaaS 模式在安全监测平台 建设中的应用探索

边超<sup>1</sup> 贺虎<sup>2</sup> 易广军<sup>3</sup>

- (1. 南水北调中线信息科技有限公司, 北京 100038;  
2. 北京中水科工程总公司, 北京 100048;  
3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司工程实验监测院, 陕西 西安 710065)

**【摘要】** 基于 SaaS 模式的软件已成功应用于各行各业, 而在工程安全监测领域的应用尚在起步研究阶段。文章对比分析了工程安全监测系统中常用的模式, 从工程安全监测信息化发展的需要出发, 结合 SaaS 的多租户、可配置、可定制、可伸缩架构特性, 分析了 SaaS 模式的优势及工程安全监测平台在设计实现中将要面对的问题, 为工程安全监测平台的建设提供了有价值的参考。

**【关键词】** SaaS 模式; 工程安全监测; 云平台

中图分类号: TP31

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-053-06

## Application Exploration of Cloud Computing SaaS Model in Construction of Security Monitoring Platform

BIAN Chao<sup>1</sup>, HE Hu<sup>2</sup>, YI Guangjun<sup>3</sup>

- (1. South-to-North Water Diversion Project Middle Line Information Technology Co., Ltd., Beijing 100038, China;  
2. Beijing IWHR Corporation, Beijing 100048, China;  
3. Engineering Experimental Monitoring Institute of Power China Northwest Engineering Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Software based on SaaS model has been successfully applied in all walks of life. However, the application thereof in the field of engineering safety monitoring is still in the initial research stage. The commonly models in engineering safety monitoring system are compared and analyzed in the paper. The paper starts with the needs of the engineering safety monitoring information development. The multi-tenant, configurable, customizable and scalable architecture characteristics of SaaS are combined to analyze the advantages of SaaS model and the problems to be faced in the design and implementation of engineering safety monitoring platform. It provides valuable reference for the construction of engineering safety monitoring platform.

收稿日期: 2022-03-31

基金项目: 北京中水科工程集团有限公司技术研发项目 (JC220001YF)

作者简介: 边超 (1989—), 男, 本科, 工程师, 主要从事工程安全监测自动化系统研究工作。



**Key words:** SaaS model; engineering safety monitoring; cloud platform

随着云计算生态圈的逐步完善,云计算产业链不断壮大推动了 SaaS 服务的快速发展。企业应用软件的服务商为了吸引更多的客户,在不断提升产品质量、拓展产品功能的同时,纷纷开启了企业应用的 SaaS 服务模式。在国外, Salesforce. com 的产品和服务为全球企业用户提供云端软件应用及开放平台,最终使得企业与消费者、企业员工之间的信息交流、分享和软件开发变得更加社会化、移动化和开放化,仅 2015 年第一季度收入就达到 10 亿美元; 2008 年成立的 Zendesk, 提供基于互联网的 SaaS 客户服务/支持管理软件, 2013 年客户数即达 4 万, 次年即在纽约交易所上市。在国内, 用友软件从“全面人力资源管理”角度出发, 应用 SaaS 技术为 HR 管理搭建个性化、规范化、网络化、动态化的工作平台, 为客户提供人力资源全产业链的产品和服务; “管家婆”抓住 SaaS 平台发展契机, 推出了特有的电子商务平台软件, 实现了电商与传统型 ERP 的完美结合。

工程安全监测领域, 传统的数据管理和应用模式仍占主要地位。近年来, 云计算和大数据等信息技术逐渐成为发展趋势, 各单位积极开展了相关研究和实践活动, 但与其他行业基于 SaaS 模式的应用还有一定差距, 如中国科技大学谢谟文教授提出了工程安全监测数据托管服务; Oficina 公司进行了库群管理研究; 大坝安全监察中心计划开发新一代基于云服务的可视化、专业化、智能化的全国水电站大坝安全远程在线监控和应急管理信息平台等。

综上所述, 基于 SaaS 的软件应用模式已经成功应用于客户管理、人力资源管理、电商平台, 而在工程安全监测领域的应用研究还比较滞后。在传统的监测系统技术不能有效实现大数据量的信息化管理、信息共享、风险管控和应急处理的现状下, SaaS 模式在该领域的应用研究将为工程安全监测的可视化、专业化和智能化提供有价值的参考。

## 1 SaaS 模式简介

SaaS<sup>[1]</sup> 全称为 Software-as-a-service, 意思是“软件即服务”。在业内, SaaS 被称为软件运营或简称软营。它与“on-demand software”(按需软件)、the application service provider (ASP, 应用服务提供商)、hosted software (托管软件) 具有相似的含义。

SaaS 是一种基于互联网提供软件服务的应用模式, 厂商将应用软件统一部署在自己的服务器上, 客户可以根据自己实际需求, 通过互联网向厂商定购所需的应用软件服务, 按定购的服务多少和时间长短向厂商支付费用, 并通过互联网获得厂商提供的服务。用户无须再购买软件, 而改用向提供商租用基于 Web 的软件, 来管理企业经营活动, 且无须对软件进行维护, 服务提供商会全权管理和维护软件。有些软件厂商在向客户提供互联网应用的同时, 也提供软件的离线操作和本地数据存储, 让用户随时随地都可以使用其定购的软件和服务。对于许多小型企业来说, SaaS 是采用先进技术的最好途径, 它免去了企业购买、构建和维护基础设施和应用程序的需要。SaaS 作为 21 世纪开始兴起的一种完全创新的软件应用模式, 为不同规模、不同类型的企业带来了很多好处。

a. 快速实现。随时随地, 只要连通互联网, 企业从任何计算机或移动设备上都可以获得 SaaS 应用程序。由于人们对互联网的使用越来越熟练, 借助互联网搜寻自己所需的软件服务也是人们所擅长的事情, 因此, 在 SaaS 平台上选择适用的应用程序比起传统的安装、设置、运行软件具有更加高效的优势<sup>[2]</sup>。而由于使用共享基础设备, 企业也无须额外花费时间对这些设备进行维护。

b. 使用成本低。SaaS 应用程序基于订阅收费、无须购买软件意味着初始成本比较低。而由 SaaS 提供商负责管理 IT 基础架构, 则意味着在硬件、软件和相关管理方面, 企业无须付出额外的维护成本。

c. 无痛升级。因为 SaaS 供应商负责管理所有的更新和升级，企业无须自行下载或安装补丁。同时，SaaS 供应商还负责应用程序的可用性管理，所以企业无须添加硬件和软件，也不必随着用户的增长而提高带宽。

d. 无缝整合。SaaS 厂商拥有真正的多租户架构，并且可以无限地扩展，以满足客户的需求。大多数 SaaS 供应商也提供定制功能，用以满足用户的特定需求。此外，许多供应商还提供应用程序接口，让您轻松整合现有的企业资源规划系统或其他企业的生产力系统。

## 2 模式对比分析

新兴的 SaaS 模式软件在用户使用角度来看，与一般基于 B/S 架构模式没什么不同，但从企业使用和技术角度来看，是不同于 B/S 的全新服务模式，是在线为企业提供服务，并让用户能按需获取的软件模式，使软件授权和分发更加灵活。所以，在深入研究 SaaS 模式前，有必要对传统软件系统结构的不同进行对比分析。

传统的软件系统结构有 C/S、B/S，其中 C/S 即客户机和服务器结构。服务器通常采用高性能的 PC、工作站或小型机，并采用大型数据库系统，如 Oracle、MySQL 或 SQL Server。客户端需要安装专用的客户端软件。该结构的系统可以充分利用两端硬件环境的优势，将任务合理分配到 Client 端和 Server 端来实现，降低了系统的通信开销。B/S 即浏览器和服务器结构。客户机上安装一个浏览器（Browser），服务器上安装数据库和专用软件。它是随着 Internet 技术的兴起，对 C/S 结构的一种改进。在这种结构下，用户界面完全通过浏览器实现。按分层设计思想开发的系统一般将业务逻辑放在服务器端实现，也有一些不是太复杂的系统会将一部分事务逻辑在前端实现，主要事务逻辑在服务器端实现。浏览器通过 Web Server 同数据库进行数据交互。这样就大大简化了客户端电脑

载荷，减轻了系统维护与升级的成本和工作量，降低了用户的总体成本。以目前的技术看，局域网建立 B/S 结构的网络应用，并通过 Internet/Intranet 模式下的数据库应用，相对易于把握，成本也是较低的。它是一次性到位的开发，能实现不同的人员，从不同的地点，以不同的接入方式访问和操作共同的数据库；它能有效地保护数据平台和管理访问权限，服务器数据库也很安全。在众多的工程安全监测系统中，C/S 与 B/S 的系统应用主要有 5 点不同。

a. 部署环境不同。C/S 一般部署在专用的网络上或局域网里，通过专门服务器提供数据存取服务。B/S 部署在网络环境中，可以是局域网也可以是广域网，比 C/S 的部署灵活，客户端通过浏览器可以直接访问。

b. 系统架构不同。C/S 系统可以更加注重流程，可以对权限多层次校验，对系统运行速度可以较少考虑。B/S 对安全以及访问速度有多重的考虑，建立在更加优化的基础之上，比 C/S 有更高的要求。

c. 系统维护不同。由于 C/S 系统部署环境，其升级较难，一般用户不易操作，不如 B/S 简单易行，B/S 可以非常便捷地实现在线的无缝升级。

d. 开发周期不同。C/S 多是建立在 Windows 平台上，界面展现方式有限，开源控件的选择有限，而 B/S 建立在浏览器上，有更加丰富和生动的表现方式与开发社区，减低了难度和开发成本。

e. 接口开放程度不同。C/S 系统一般是打包的程序模块，动态库的引用、接口的使用受系统环境的影响较大，而 B/S 模块化开发，有丰富的接口设计形式，可以非常方便地与其他系统进行对接。在工程安全监测领域，仪器厂商一般提供 C/S 的软件供用户使用，如北京基康的 BGK-Logger<sup>[3]</sup>（Access 数据库）和 BGK-Logger.NET（SQLServer 数据库）、南瑞的 DMIS<sup>[4]</sup>、南京水利水文自动化研究所的 DG-2010<sup>[5]</sup>（Access 数据库）、美国 Campbell 的 LoggerNet（Access 数据库）等；有些企业也提供 B/S 系统，通过 VPN

确保系统的安全性，一定程度上能满足日常工作的需要，但在数据共享、数据利用方面的工作不足，致使企业数据资产长期闲置，不能发挥必要的安全保障作用。

从以上介绍可以看出，C/S 与 B/S 系统有着明显

的不同，B/S 系统是发展的趋势。有鉴于此，SaaS 模式软件在充分汲取 B/S 结构优越特性的同时，创造性地发展出符合商业运营的软件解决方案（见图 1），在企业软硬件购置、专业人员培训、运营维护等方面表现出极大的优势。

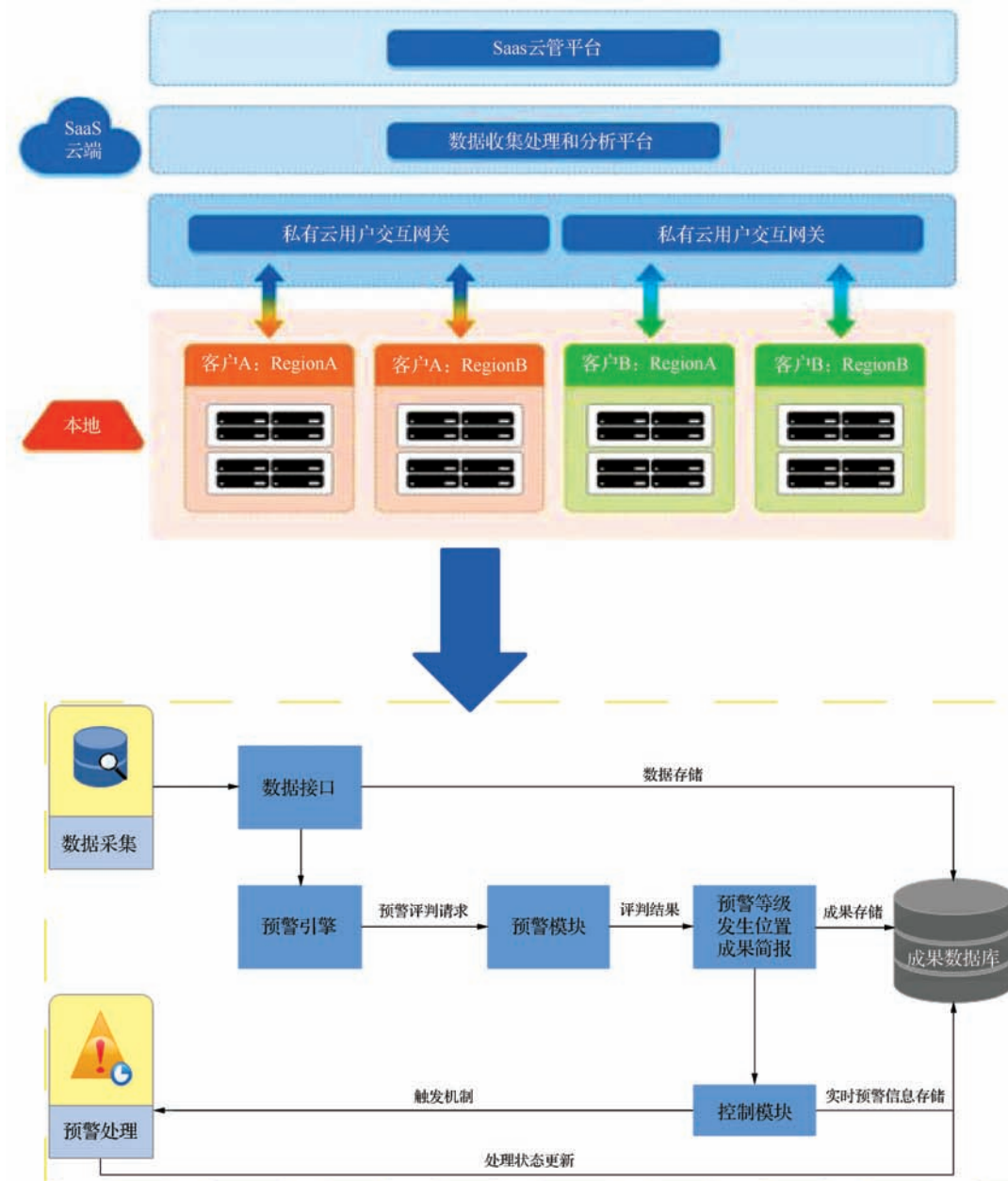


图 1 云计算 SaaS 模式的软件解决方案

### 3 应用前景及面临的问题

在工程安全监测领域，为了解决传统软件在集中

管理、数据共享、减少企业运行成本等方面的不足，各相关科研院和仪器厂商做了很多尝试，但总体来说，仅简单地将数据库及相关软件系统部署到一台服



务器供有限的人员使用,并未做出实质性的改进。随着互联网速度的提升,高速网络连接得以普及,基于Web的应用将SaaS应用推上了历史的舞台。围绕业务需要,将资料录入人员、专业技术人员、企业管理者和特聘专家均纳入平台,赋予相应的权限,实现流程化管理才能使系统发挥应有的作用,使运行管理处处于高效、可控状态。SaaS的多租户、按需取用、个性化定制让长期受资金不足、专业技术人员短缺、管理水平难以提高等众多问题困扰的工程安全监测管理迈

上新的台阶。

未来,基于SaaS模式开发的工程安全监测数据管理及分析云服务系统(见图2),将充分考虑水电、风电、火电、轨道交通等工程安全监测需要,设计开发可配置、可伸缩的架构,用户无须再购买软件以及部署软件所需的软硬件资源,只需使用浏览器或移动终端即可随时随地使用软件上的所有功能,能够让用户以低成本、低门槛和低风险的方式使用软件服务<sup>[6]</sup>。



图2 工程安全监测数据管理及分析云服务系统

在广阔的应用前景下,SaaS模式在工程安全监测领域不可避免地面临很多难题需要解决,切实做好以下针对性的研究工作将有利于该模式系统的成功应用。

**a. 设计通用性风险及数据集成风险的管控。**在需求上既要满足初始用户的需求,又要考虑其他通用性需求。对3个以上的项目进行应用场景的检查,确保通用性。提供专家知识预置、用户自定、偏好动态跟踪等,注重专业性的同时提高个性化、智能化程度。系统应对业已建成的自动化采集系统、技术体制

和数据库进行深入、细致的分析,采用多技术多手段尽可能降低数据集成的难度。

**b. 统一数据。**SaaS模式下的系统面临的数据源将比传统单一的应用系统复杂很多,数据来源多种多样,包括关系数据库、WebService、文件、数据立方体等,甚至还有一些通过程序运算得到的外部数据。这便要求SaaS系统有很强的数据访问和处理能力,并且从统一数据模型的角度,将这些异构数据源转换成一种统一的数据模型。

**c. 多租户多角色的权限管理。**多租户是SaaS模



式的基本特征,租户间数据有2种隔离方式,一种是每个租户使用独立的数据库,另一种是租户共享数据库,用租户身份标识区分。多角色权限管理的解决方案也很多,但在实现中应该为除系统管理员、专业技术人员以外的企业特聘专家、主管领导和公众角色赋予相应的权限,使各个角色能够在统一的平台上根据需要获取足够多的数据信息,并可通过上传、下载、订阅、推送的方式实现数据的利用和流通。

**d. 远程监控。**设计通用的命令收发模块,对不同厂商数据采集模块的通信协议进行深入研究,在系统中提供实时的数据采集、状态查询,减少对不同采集系统进行维护的复杂性,确保系统高度集成。

**e. 发布 API。**系统应充分考虑对外提供数据的便利性,在授权的状态下,为第三方应用的集成提供所需的接口,实现应用的扩展和数据的实时共享。

**f. 门户网站。**进行工程安全监测数据整编分析时有很多图形报表需要制作,SaaS系统有必要对图表模板的共享进行深入研究,让所有租户都可以便捷地获取有用的模板、上传自己制作的模板,“不重复造轮子”可以大幅提高用户的工作效率。同时,必要时可提供专家问答、规范资料、经验总结等板块,加快用户专业知识的积累。

**g. 智慧服务。**结合GIS、BIM、虚拟现实等技术,将数据信息在二维、三维实景中叠加展示,对异常报警信息进行动态定位与导航,引导工作人员完成管理工作。

**h. 预警预报及应急管理。**在现阶段的单一阈值报警的基础上,研究多物理量多尺度的分析模型,实

现预警发布与应急管理协同进行,提高安全处理能力。

## 4 结 语

SaaS模式经过诸多行业的实践,已经成为成熟的软件应用模式,工程安全监测系统不能继续停留在传统的C/S或B/S结构下,仅实现基本的数据管理、图形报表输出、离线分析和阈值预警,而应淘汰落后的数据获取和处理方式,融合虚拟现实、GIS、实时监控、应急管理、流程管理等技术方法,将人、物、数据信息资产全部纳入系统,对SaaS模式充分研究,切实解决其在工程安全监测中应用的问题,助力工程安全监测平台建设和实现规范化管理、智慧化决策的目标。▲

## 参考文献

- [1] 李响,李彤,谢仲文,等.一种面向SaaS多租户的多层模型[J].计算机科学,2017,44(11):56-63.
- [2] 尚海松,申志军.宜万铁路复杂岩溶隧道结构安全性监测技术[J].铁道标准设计,2010(8):78-80.
- [3] 刘观标.南瑞大坝安全监测智能分布式工程安全自动监测系统[J].中国水利,2006(6):66.
- [4] 方卫华.南京达捷大坝安全监测DG型分布式大坝安全监测系统[J].中国水利,2006(6):67.
- [5] 毛索颖.2017年全国大坝安全监测技术与应用学术交流会议文集[C].武汉:长江科学院院报,2018.
- [6] TSAI,WT,BAI X Y, HUANG Y. Software-as-a-service (SaaS): perspectives and challenges Science in China. Series F:Information Sciences [J]. 2014,57(5):1-15.

# 仕阳水库电站升级改造后管理人员 “四个转变” 岗位创新成效分析

王德明 李召阳

(莒县仕阳水库管理服务中心, 山东 莒县 276526)

**【摘要】** 建于20世纪的水库电站,设备老旧、管理理念落后,一定程度上影响了电站安全运行。文章从山东省莒县仕阳水库电站升级改造前后管理人员岗位创新角度出发,论述了电站升级改造的初衷及升级改造前后出现的问题和采取的措施、对策,分析了实现管理岗位“四个转变”创新后取得的成效和成功经验,旨在为其他类似电站运行管理工作提供借鉴。

**【关键词】** 升级改造; 运行管理; 岗位创新

中图分类号: TV697.1

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-059-03

## Analysis on Innovation Effect of “Four-change” Post of Management Personnel after Upgrading and Reconstruction of Shiyang Reservoir Power Station

WANG Deming, LI Zhaoyang

(Juxian Shiyang Reservoir Management and Service Center, Juxian 276526, China)

**Abstract:** The reservoir power station built in the last century is characterized by old equipment and backward management concept, thereby affecting the safe operation of the power station to a certain extent. The original intention of power station upgrading and reconstruction, the problem before and after upgrading and reconstruction, as well as adopted measures and countermeasures are discussed from the perspective of management personnel post innovation before and after upgrading and reconstruction of Shandong Juxian Shiyang Reservoir Power Station. The results and the successful experience after management post ‘four-change’ innovation are analyzed, thereby providing reference for other similar power plant in operation and management.

**Key words:** upgrading and reconstruction; operation management; post innovation

建于20世纪水库电站,其发电设备运行时间长,老化程度高,安全隐患较多。电站设备设施更新改造和现代化升级后,电站运行管理面临知识更新等一系

列问题。解决影响电站安全运行的瓶颈,使电站改造后能够安全平稳运行,势在必行。

收稿日期: 2022-01-12

作者简介: 王德明 (1971—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程管理工作。

## 1 工程概况

山东省莒县仕阳水库电站，始建于1990年5月，电站位于大坝后桩号0+248处的放水洞下游出口，原设计总装机900kW，其中2台250kW，2台200kW，均为自励恒压发电机，年设计发电量187万kW·h。该发电设备为山东水电设备厂60年代产品。水电站运行多年来，电站设备经过了多次大修，原设备生产厂家已不再生产，有关同型号器件在市场上难以买到配齐；配电设施也已老化，仪表均为老式型号，更换困难；控制保护及二次电气设备系统不符合新规范安全要求，运行操控全靠手动操作；机组出力仅能达到额定功率的70%左右，效率下降幅度大，年损失电量约55万kW·h。

2012年5月28日，山东省水利厅批复仕阳水库电站更新改造概算投资304万元。该项目于2012年10月30日开始实施，2013年6月19日建设完成并通过国电日照供电公司组织的并网验收，22日机组投入试运行。2014年11月18日，山东省水利厅组织专家组对电站进行了验收。电站经过升级改造后，由原来的总装机容量900kW扩容至1140kW，新机组基本实现自动化，运行效率提升较高，运行安全基本得到保障。

## 2 存在的主要问题

### 2.1 管理理念有待提升

电站改造后，一大批高科技现代化模块、模型应用于设备运行中，这些新装备与原老旧设备的管理方式方法存在较大差异，需要从思想、理念上重新认知新生事物，确保不会影响电站运行及电站实际操控问题。

### 2.2 管理知识需要尽快补充更新

电站更新改造完成后，原来的运行管理、操作方法多已不适应新设备管理，尤其是电子化、信息化的自动装备更是彻底改变了传统的操作方法，电站运行

管理人员应及时培训学习新知识、新操作方法，不断提升运行管理水平。

## 3 岗位创新内容

莒县仕阳水库电站实施升级改造前后，通过不断探索、实践、创新，运行管理从“四个转变”方面进行管理创新。

### 3.1 从手动到自动化技术转变创新

电站升级改造前，无论是水轮机调速器开关、蝶阀开启，还是发电机并网、加减负荷都是人工手动操作。针对这种情况，管理单位通过岗位培训或外出学习等途径，邀请电站设备生产、安装厂家进行现场指导，并开展了蝶阀开启、蜗壳充水、排气，水轮机导水叶调速器调试，发电机开启、关闭，发电控制系统操作流程、二次线路控制基本原理、发电输出高压端和低压端的转变、人为甩负荷应急处置等内容为期7天的实地操作技能培训，取得了良好效果。

### 3.2 从“机上”和“电上”人员分类转变创新

新装备经过一段时间运行，针对在开机并网、停机解列、机组甩负荷等情况中出现的急中忙乱现象。电站负责人牵头研究如何让大家有条不紊，各司其职，按照一定规程或指令，安全快捷地完成操作等方式方法。经过研究和实践，把管理人员按照年龄结构和操作技能熟练程度，划分出机械和电气两大类别，明确分工，严格执行“两票三制”工作制度，从蝶阀开启、倒闸操作、机组并网到停机解列，机、电人员严格按照分工及时完成操作，保证了在每个工序上都有专业责任人员，并在每个值班小组里选定1~2名技术较强的人员，指导发电机在甩负荷等特殊情况下具体处置实际问题，经过多次实践，实行“机”、“电”人员的分离管理，原需12人的运行人员现在只有8人就能保证机组的安全平稳运行，收到了预期效果。

### 3.3 从粗放安全生产到“双体系”建设转变创新

近年来，山东全省水利系统开始推行水利工程风险分级管控体系与隐患排查治理体系“双体系”建设，仕阳水库管理服务中心充分认识到“双体系”建设对小水电站运行管理的重要性，组织电站运行管理人员于2021年3月到电站管理先进单位——潍坊峡山水库和济南卧虎山水库，考察学习“双体系”建设先进典型管理经验。学习回来后，在电站建立健全隐患排查治理体系，并对电站进行全面排查、辨识、评估安全风险，落实风险管控责任，对重大安全风险采取有效措施进行重点控制；定期、及时地进行隐患排查和治理，实行闭环管理的隐患排查治理体系，确保电站安全生产形式持续稳定和电站安全生产标准化建设持续开展。安全决定效益，自2013年6月改造后电站运行至今，累计安全运行了635天，发电1198万千瓦时，创收443万元。

### 3.4 从粗放管理到高端标准化管理转变创新

电站升级改造后，为确保电站安全平稳运行，建立安全生产管控体系，杜绝安全生产事故的发生，成了电站人的头等大事。2014年5月水库管理服务中心负责人带领电站部分人员参加了全国农村小水电安全生产标准化培训班。学员开阔了视野，意识到达标创建的紧迫性，经过研究会商，仕阳水库电站成立了安全生产标准化创建工作领导小组，召开安全生产标准化创建工作启动会议，对安全生产标准化创建工作进行宣传，明确分工，要求全员参与、全程参与，全力投入安全生产标准化建设中，经过外出考察学习，多引博取，邀请专家亲临指导，对照达标创建标准指标，不断对存在问题进行整改，完善规章制度，提高管理水平。2016年12月，顺利通过了水利部“农村水电站安全生产标准化一级单位”达标验收。通过此次安全生产标准化创建，电站每个人的安全生产意识明显提高，业务水平、实际动手操作能力得到极大改

善，掌握了改造后的操作规程，具备了独立操作的能力。

## 4 创新成效启示

### 4.1 创新性启示

“四个转变”岗位创新，是在电站运行管理过程中，改进提高逐渐形成的适合本电站实际的创新项目。实现手动到自动化运行管理，是响应国家农村小水电电气化项目改造和有效利用清洁能源、节能减排政策，适应管理人员少，规避手动操作安全风险大的弊端，提高水电站设备安全运行的可靠性和自动化水平的重要途径；实现“机上”到“电上”人员分类，是明确分工，落实人员岗位职责制，调动工作积极性主动性，提高效率，消除分工不清、忙中出乱等安全隐患的重要法宝；实现从粗放的安全生产管理到安全生产“双体系”建设的转变，是确保电站安全平稳运行，杜绝一切安全生产事故的发生，落实风险管控责任，对重大安全风险进行重点管控，定期、及时地进行隐患排查和治理，把隐患消灭于萌芽之中的根本选择；从粗放管理到高端标准化管理转变，是实现运行管理人员知识不断增加，运行管理技能不断提高，逐步适应新时代科技进步和现代化建设的客观需要。

### 4.2 效益性启示

“四个转变”岗位创新实施以来，电站运行管理的安全可靠性得到大大提高，噪音明显降低，管理人员劳动强度显著减轻，生产条件得到明显改善，更好的保障了人民群众的生命财产安全；“四个转变”岗位创新实施以来，电费收入得到可靠保障，经济效益显著提高，实现设计年发电量为229万kW·h，发电收入可达84.73万元，比实施前增加发电量45万kW·h，按上网电价0.37元/kW·h计算，年新增效益为16.65万元。

### 4.3 推广性启示

仕阳水库电站运行管理“四个转（下转第66页）



经验交流

## “纳米胶”在黄坛口电站闸墩防碳化处理中的应用

琚海荣<sup>1</sup> 朱银秋<sup>2</sup> 李彦波<sup>2</sup>

- (1. 中国华电集团有限公司衢州乌溪江分公司, 浙江 衢州 324000;  
2. 北京易晟元环保工程有限公司, 北京 100020)

**【摘要】** 黄坛口水电站大坝运行已逾 60 年, 混凝土构筑物长期受干湿循环、冷暖交替及紫外线照射产生不同程度的碳化侵蚀、剥蚀、钢筋锈蚀等问题, 影响大坝安全使用寿命。文章分析阐述了无机水性渗透结晶型耐久防护材料——“纳米胶”在水电站大坝的作用机理及应用效果, 实际应用表明: “纳米胶”在水电站大坝防护修复中能够取得很好的防碳化和延寿效果。

**【关键词】** 水电站大坝; 碳化; 纳米无机水性渗透结晶材料; 混凝土防护修复

中图分类号: TV46

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-062-05

## Application of “Nano-glue” in Anti-carbonization Treatment of Gate Pier of Huangtankou Power Station

JU Hairong<sup>1</sup>, ZHU Yinqiu<sup>2</sup>, LI Yanbo<sup>2</sup>

- (1. China Huadian Group Quzhou Wuxijiang Branch, Quzhou 324000, China;  
2. Beijing Yishengyuan Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Beijing 100020, China)

**Abstract:** The dam of Huangtankou Hydropower Station has been operated for more than 60 years. The concrete structures have been subjected to various carbonization erosion, denudation, steel bar corrosion and other problems caused by drying and watering cycle, alternating warm and cold and ultraviolet radiation for a long time, thereby affecting the safe service life of the dam. The action mechanism and application effect of inorganic water-based permeable crystalline durable protective material “nano-glue” in the hydropower dam are analyzed and expounded. The practical application shows that “nano-glue” can achieve good anti-carbonization and life extension effect in hydropower dam protection and repair.

**Key words:** hydropower dam; carbonization; nano inorganic water-based permeable crystalline material; concrete protection and repair

收稿日期: 2022-04-03

作者简介: 琚海荣 (1974—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水电厂水工专业技术管理工作。

## 1 工程概况

黄坛口水力发电站是乌溪江流域两级开发的第二级电站，距上游湖南镇水电站约 29km。工程以发电为主，兼有防洪、灌溉、航运等综合利用效益。于 1951 年 10 月开工兴建，1958 年 4 月开始蓄水，1959 年 11 月竣工验收，至今已运行逾 60 年。闸墩混凝土长期受气温影响和紫外线照射产生了不同程度的碳化侵蚀，一定深度的碳化侵蚀造成混凝土内部碱性降低、表层微细裂隙增加，钢筋表层钝化膜破坏，钢筋发生锈蚀，进而导致混凝土保护层胀裂、疏松、脱落，混凝土结构劣化速度加快、综合耐久性能快速下降，影响混凝土结构强度和整体的稳定性，降低混凝土的使用寿命。近几年，黄坛口大坝对溢流坝面混凝土进行了碳化检测，结果显示：碳化深度为 30 ~ 50mm，局部甚至超过了 50mm，达到混凝土保护层厚度。



图 1 黄坛口电站现状

2021 年，对黄坛口大坝闸墩混凝土碳化深度进行检测，从结果（见表 1）可以看出，平均碳化深度已达 20 ~ 30mm，超过钢筋开始锈蚀的临界值，闸墩面细微裂缝较多，局部混凝土面剥落及钢筋锈蚀现象比较显，影响混凝土结构强度和运行安全，需要立即进行修复处理。

针对老旧混凝土的耐久性修复防护，应根据水电站闸墩混凝土结构服役环境、施工基面情况、防护材

表 1 黄坛口电站大坝混凝土碳化深度检测结果

序 号	检 测 位 置	平均碳化深度/mm
1	10 号闸墩下游侧上部	31.5
2	8 号闸墩下游侧中部	25.0
3	5 号闸墩下游侧中部	22.0
4	4 号闸墩下游侧上部	23.0
5	2 号闸墩下游侧上部	30.0

料特点等，选择经济合理的防护修复材料，需满足以下条件：

水电站闸墩处于潮湿酸雨、冻融循环及紫外线照射区域，防护材料应当满足耐候性要求；施工基面潮湿，内部碳化较严重，防护材料应能恢复混凝土内部碱性环境并可适应潮湿面施工。多项研究表明，混凝土微观结构对其耐久性的影响是微观结构中存在的空隙及微裂缝所造成的<sup>[1]</sup>，因此封闭既有混凝土中毛细孔及微细裂缝是保障混凝土免受劣化侵蚀的有效途径。

综上所述，选择无机水性渗透结晶型耐久防护材料——“纳米胶”作为本次水电站闸墩防护修复材料。

## 2 “纳米胶”的性能特点

“纳米胶”是一种无色、无味的低黏度水性溶液，有效成分粒径为 3 ~ 45nm，可迅速渗透至混凝土内部 50 ~ 70mm，与混凝土结合成密实的整体，阻滞水及其他有害物质的侵蚀<sup>[2]</sup>；“纳米胶”可稳定存在于混凝土内部，当有新裂缝产生时，继续封堵裂缝，起到长久性抗碳化、抗渗、耐腐蚀的作用。

针对老旧混凝土的防护修复，纳米胶系列 II 型产品的反应机理见图 2。

老旧混凝土服役过程中流失了大量钙离子，采用 II 型纳米胶 B 剂补充钙离子，恢复混凝土的碱性，再喷涂 II 型纳米胶 A 剂，使纳米胶粒子与钙离子发生反应，生成凝胶封堵毛细孔和细微裂缝，未反应“纳米胶”储存在混凝土内部，混凝土产生新裂缝时可快速迁移、反应，自动修复裂缝。

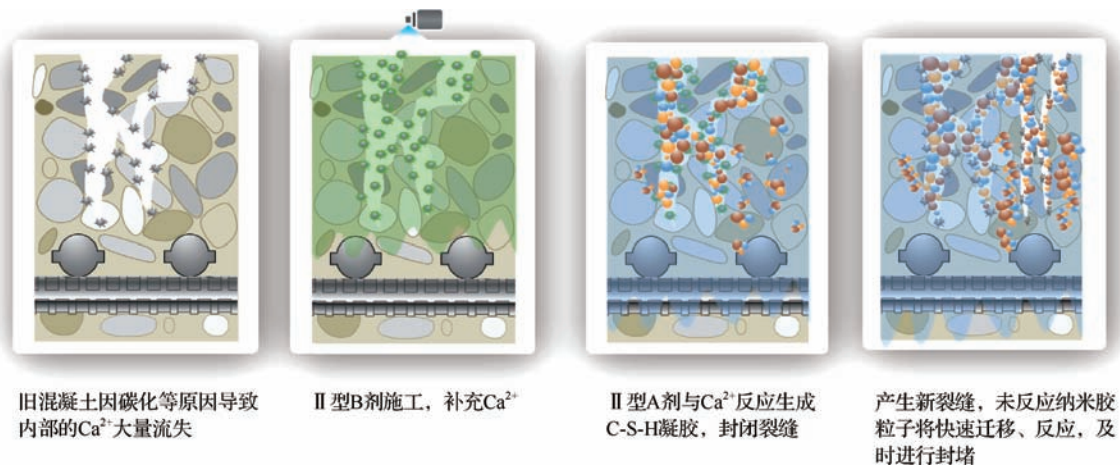


图2 II型纳米胶反应机理

### 2.1 “纳米胶”优势

a. 不改变混凝土原物理性质, 提高密实度。“纳米胶”可以快速从混凝土表面渗透至内部毛细孔隙内, 研究表明<sup>[3]</sup>: “纳米胶”的渗透深度可达70mm以上, 在不改变混凝土原物理性质的基础上, 提升混凝土的抗碳化、抗渗、抗冻融、抗化学腐蚀、防开裂、防菌藻附着性能, 延长混凝土使用寿命。

b. 自修复性。“纳米胶”具有持续的自修复能力, 每8~10年施工一次即可满足防护需求。

c. 绿色环保。材料绿色环保, 达到饮用水工程标准, 可应用于饮用水输送工程的混凝土修复。

d. 施工简单。施工方法简便, 速度快, 无须找平层与保护层, 干燥面和潮湿面皆可施工, 施工后即可投入使用, 大大缩短工期。

### 2.2 “纳米胶”与传统防护修复材料性能对比

“纳米胶”与传统防护材料的不同之处在于其渗透结晶后与混凝土融为一体, 形成整体防护, 永不脱落, 而传统防护材料在使用过程中易出现涂层破损、脱落, 与混凝土基面呈现出“两层皮”的状态<sup>[4]</sup>, 对混凝土造成二次伤害, 无法满足混凝土耐久性防护要求。

“纳米胶”具有高渗透性和高纳米活性, 快速迁移、渗透到混凝土内部, 封闭混凝土内部的毛细孔和微细裂缝, 达到持续自修复的效果, 使混凝土表面更加密实, 阻止外界劣化因子的侵入, 从而显著提高混凝土抗碳化性能, 延长混凝土的使用寿命。

市场上几种主要防护材料性能<sup>[5]</sup>对比见表2。

表2 防护材料性能对比

序号	对比项目	环氧厚浆涂料	氟碳涂层材料	水泥基渗透结晶材料	纳 米 胶
1	防护形式	“贴皮式”	“嵌入式”	“嵌入式”	“穿透筋骨式”
2	抗水冲刷性能	长时间冲刷易起皮脱落	长时间冲刷易起皮脱落	对外界震动敏感, 外界震动造成晶体断裂失去防水作用	可提升混凝土表层密实度, 提升强度, 抗冲刷能力强
3	耐候性	易老化, 2~3年开始起皮、脱落	2~3年出现裂缝、脱落	耐候性差, 3年左右使用寿命	效果持久, 不受紫外线影响
4	自修复功能	不具备	不具备	遇水后能在缺陷处二次结晶	当产生新的细微裂缝时, 可持续修复
5	环保性	低有机挥发物(VOC)含量	高VOC含量	无毒无味、可用于饮用水, 施工现场存在粉体	环保、无毒无害, 可达到饮用水的工程标准
6	施工间隔	喷涂2~3遍, 每遍时间间隔3~6h	喷涂2遍, 每遍时间间隔一般1~2h	分两次刮涂, 间隔6h	分两次喷涂, 每遍间隔30~60min

### 2.3 “纳米胶”抗碳化性能优异

“纳米胶”抗碳化能力已在实际应用项目中得到了验证，如北京潮白河向阳闸已运行 35 年，施工前水闸混凝土出现了各种老化病害现象，影响水闸的正常运行，在混凝土表面喷洒“纳米胶”28 天后，钻取芯样测定碳化深度，碳化深度明显降低；胜利油田项目中，选取 2003 年建成的挡浪墙迎水面进行“纳米胶”防护修复施工，完工 3 个月后钻取芯样进行指标测试。

两个项目的芯样由中国水利水电科学研究院工程检测中心检测，碳化深度检测结果见表 3。

表 3 碳化深度检测结果 单位：mm

项 目	检 测 项 目	未施工 芯样	已施工 芯样	抑制率/%
向阳闸项目	碳化深度（28d）	26.4	13.2	50.00
胜利油田项目	碳化深度（90d）	36.4	11.9	67.31

向阳闸项目采用“纳米胶”修复后，混凝土碳化深度降低了 13.2mm，碳化深度降低率为 50%。胜利油田项目中碳化深度降低了 24.5mm，碳化深度降低率为 67.31%。通过实际案例验证了“纳米胶”作为混凝土构筑物的防护修复材料对混凝土抗碳化性能优异的提升作用。

### 3 “纳米胶”在黄坛口电站闸墩防碳化中的应用

“纳米胶”相较于其他传统防护材料，抗碳化、抗渗性能优异的同时，还具有无毒无害、自修复性、施工耗时短等优点。结合黄坛口电站现场实际情况，“纳米胶”混凝土耐久性防护技术完全满足其技术要求。

本次黄坛口电站大坝闸墩混凝土整体抗碳化防护修复采用聚合物砂浆及环氧树脂进行表面缺陷修复，然后将混凝土表面清理干净，喷涂纳米胶对老化混凝土表面进行整体防护，增强混凝土表面抗渗及抗碳化

性能。具体施工工艺如下：

a. 混凝土基面预处理。采用高压水对混凝土表面进行冲洗，要求剥离松动骨料。将混凝土构件表面的尘土、苔藓、钢筋锈斑和油污去除。对于使用高压清洗机无法清除的脏污，可使用砂纸、打磨机等进行去除。

b. 表面缺陷修补。基面润湿后，用砂浆修补闸墩表面上的凹坑，磨光机清理闸墩表面上凸出的混凝土和砂浆块。

c. “纳米胶”施工。“纳米胶”施工温度范围在 5 ~ 35℃ 之间。黄坛口电站施工时温度在 5 ~ 35℃ 之间，温度适宜，可进行“纳米胶”喷涂施工。分两次进行喷涂；

第一遍：按规定用量进行Ⅱ型纳米胶 B 剂喷涂施工。间隔约 15 ~ 30min 后，再进行Ⅱ型纳米胶 A 剂施工。

第二遍喷涂施工：按规定用量进行施工，施工方法同上。

d. 施工后养护要求。在施工后 4h 内，如降雨应采取覆盖等方法进行遮蔽；如遇大雨冲刷需重新喷涂；施工完 24h 后即可通水使用。

### 4 “纳米胶”应用效果

施工 1 个月后现场钻取芯样，并把芯样送至中国水利水电科学研究院工程检测中心进行 28d 碳化深度检测。经测试，碳化深度减少了 50.21%，见表 4。

表 4 28d 碳化深度检测结果

检测项目	未处理芯样/ mm	喷涂“纳米胶” 芯样/mm	抑制率/%
28d 碳化深度	23.7	11.8	50.21

国内外大量碳化试验和调查结果表明混凝土碳化深度与碳化时间的平方根成正比，混凝土碳化过程遵循 Fick 第一扩散定律<sup>[6]</sup>：

$$X = k\sqrt{t} \quad (1)$$

式中 X——混凝土碳化深度，mm；



$k$ ——混凝土碳化系数,是反映碳化速度的参数,  $\text{mm}/\sqrt{a}$ ;

$t$ ——混凝土碳化时间,  $a$ 。

苏联学者阿列克谢耶夫给出的混凝土碳化系数如下:

$$k = \sqrt{2D_{\text{CO}_2}C_{\text{CO}_2}/M_{\text{CO}_2}} \quad (2)$$

$$M_{\text{CO}_2} = 8.22b \quad (3)$$

式中  $D_{\text{CO}_2}$ ——二氧化碳扩散系数,  $\text{mm}^2/a$ ;

$C_{\text{CO}_2}$ ——混凝土表面二氧化碳浓度,  $\text{mol}/\text{m}^3$ ;

$M_{\text{CO}_2}$ ——单位体积混凝土吸收二氧化碳的量,  $\text{mol}/\text{m}^3$ ;

$b$ ——胶凝剂用量,硅酸盐水泥配置的混凝土即为水泥用量,  $\text{kg}$ 。

查询相关文献和黄坛口相关记录数据,数值代入式(1)~式(3)可得:未经处理的试块碳化时间  $t_1 = 10.02$  年,经“纳米胶”处理后的碳化时  $t_2 = 22.89$  年。依据“纳米胶”施工后实际碳化深度数据与施工前数据推算,黄坛口电站混凝土碳化寿命至少可延长约 13 年。

## 5 结 语

目前,黄坛口大坝闸墩修复工程顺利通过竣工验

(上接第 61 页)变”岗位创新实施以来,电站实现了自动化运行,推行了安全生产标准化管理,成为全省首个被水利部授予“农村水电站安全生产标准化一级单位”荣誉称号的水电站,经济效益和社会效益取得了双丰收,成为全省小水电标准化管理的典范,先后有日照市、临沂市、潍坊市、济南市、淄博市、青岛市等、威海市等多个城市的二十多座水库管理人员前来参观学习,该创新理念和做法具有可操作性和可复制性。

收,并通过汛期过水考验,通过碳化数据监测,证明“纳米胶”可有效提升闸墩混凝土抗碳化性能,提高混凝土的耐久性,延长闸墩使用年限,从而确保大坝的安全运行,保障人民财产安全。从本工程的实践以及其他工程采用“纳米胶”施工的结果来看,“纳米胶”作为混凝土抗碳化防护修复材料,应用效果理想,有效提高了混凝土构筑物的耐久性,且施工工艺简单、操作安全,对环境和水无污染,符合绿色环保要求,具有广阔的应用前景,值得大力推广使用。▲

## 参考文献

- [1] 李剑,韩星煜.混凝土微观结构特性对耐久性的影响[J].兰州工业学院学报,2015,22(5),9-13.
- [2] 王庆霖,牛荻涛.碳化引起的钢筋锈蚀[C]//混凝土结构耐久性设计与施工论文集.北京:中国土木工程学会,2004:10.
- [3] 赵明辉.混凝土碳化处理的工程措施[J].吉林水利,2004(11):33-35.
- [4] 李建清,王秘学,杨光.水工混凝土防碳化处理方法及施工工艺[J].人民长江,2011,42(12):50-52,59.
- [5] 蔡杰龙,杨永民,张君禄.混凝土防护材料应用性能研究[J].广东水利水电,2016(9):35-38.
- [6] 牛荻涛.混凝土结构耐久性与寿命预测[M].北京:科学出版社,2003.

## 5 结 语

仕阳水库电站升级改造后,使原有落后低效的淘汰设备升级为高效安全的自动化设备。运行管理人员在传统电站运行操作规程和管理制度基础上,通过运行管理“四个转变”的创新,摆脱了经验不足、技术力量薄弱的束缚,实现了安全生产标准化管理,有效利用了水资源,收到了良好的经济效益和社会效益。▲

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK. 2022.05.14

# 聚羧酸高性能减水剂中氯离子含量 测定方法对比分析

张玉东

(辽宁省水利水电科学研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110003)

**【摘要】** 聚羧酸高性能减水剂中氯离子含量测定常采用电位滴定法和离子色谱法, 对2种试验方法的试验试剂、试验过程、试验结果等综合对比分析表明: 离子色谱法在试剂采购管理、测试效率、精密度等方面比电位滴定法优势明显, 适合在试验室推广应用。

**【关键词】** 聚羧酸高性能减水剂; 电位滴定; 离子色谱; 测定

中图分类号: TV42+4

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 05-067-04

## Comparative Analysis on Determination Methods of Chloride Ion in Polycarboxylic Acid High-Performance Water Reducing Agent

ZHANG Yudong

(Liaoning Water Conservancy and Hydropower Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110003, China)

**Abstract:** Potentiometric titration method and ion chromatography methods are usually adopted for determining chlorine ion content in polycarboxylic acid high-performance water reducing agent. The two test methods are comprehensively compared and analyzed in the aspects of test reagents, test process, experimental results, etc. The results show that the ion chromatography method has prominent advantages compared with Potentiometric titration method in the aspects of reagent purchasing management, test efficiency, precision, etc. It is suitable for wide application in the laboratory.

**Key words:** polycarboxylic acid high-performance water reducing agent; potentiometric titration; ion chromatography; determination

聚羧酸高性能减水剂是以聚羧酸盐为主体、经接枝共聚生成的多种高分子有机化合物, 与各种水泥的相容性好, 对混凝土的坍落度保持性好, 掺量低, 收缩小, 具有较强的减水性能。而氯离子作为聚羧酸高性能减水剂中的严重有害成分, 在拌和混凝土时如果

超过规定的含量将会对钢筋具有强烈的腐蚀性, 进而降低钢筋混凝土结构的耐久性, 甚至危及结构安全。

依据《混凝土外加剂均质性试验方法》(GB/T 8077—2012), 在聚羧酸高性能减水剂均质性试验中氯离子含量测定方法有电位滴定法和离子色谱法2

收稿日期: 2022-04-10

作者简介: 张玉东 (1980—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水利工程质量试验检测等工作。

种。其中,电位滴定法以银或氯电极为指示电极,银离子浓度变化将影响电势值,依据甘汞参比电极,用电位计或酸度计测定两极在溶液中组成的原电池的电动势。银离子与氯离子反应生成溶解度很小的氯化银白色沉淀。在等当点前滴入硝酸银生成氯化银沉淀,两电极间电势变化缓慢,等当点时氯离子全部生成氯化银沉淀,此时滴入少量硝酸银即引起电势急剧变化,从而指示出滴定终点并测出相应的氯离子含量。而离子色谱(IC)法是液相色谱分析方法的一种,试样溶液经阴离子色谱柱分离后,被电导池检测,然后测定溶液中氯离子峰面积或峰高,换算出氯离子含量。本文针对上述两种方法测定氯离子含量的精确、快捷、有效性进行综合对比分析。

## 1 试验准备

### 1.1 仪器选择

电位滴定法采用的试验仪器包括电位测定仪或酸度仪,银电极或氯电极,磁力加热搅拌器等。

离子色谱法采用的试验仪器包括 ICS-600 型离子色谱仪, IonPacAS23 型阴离子色谱柱, 25 $\mu$ L 定量环, 10mL 进样瓶, AS-DV50 位自动进样器等。

### 1.2 试剂条件

电位滴定法采用的试剂包括纯度为 95% 的硝酸与水按 1:1 配制成的溶液,又称为 (1+1) 硝酸溶液, AR 级硝酸银配制成浓度为 17g/L 的标准溶液,以及 GR 级氯化钠配制成浓度为 0.1000mol/L 的标准溶液。

离子色谱法采用的试剂包括 GR 级碳酸钠 0.477g, GR 级碳酸氢钠 0.067g, 纯度不小于 99.8% 的氮气, 实验室纯净水 (电导率小于 18M $\Omega$ ·m, 0.2 $\mu$ m 超滤膜过滤, 流速为 0.8mL/min)。

## 2 试验过程

### 2.1 溶液的配制

#### 2.1.1 电位滴定法

先吸取 10mL 氯化钠标准溶液滴入 200mL 烧杯中

并加水稀释,再加 4mL 硝酸 (1+1),一边滴入一边加热搅拌,以电位滴定仪测定终点,过了等当点时,再滴入 10mL 氯化钠标准溶液,直至滴入第二个终点出现,记录读数,用二次微商法计算出硝酸银溶液消耗的体积  $V_{01}$  和  $V_{02}$ 。体积  $V_0$  按下式计算:

$$V_0 = V_{02} - V_{01}$$

式中  $V_0$ ——所用氯化钠标准溶液消耗硝酸银溶液的体积, mL;

$V_{01}$ ——空白试验中,第一个终点时所消耗硝酸银溶液的体积, mL;

$V_{02}$ ——空白试验中,第二个终点时所消耗硝酸银溶液的体积, mL。

硝酸银溶液的浓度  $c$  按下式计算:

$$c = \frac{c'V'}{V_0}$$

式中  $c$ ——硝酸银溶液的浓度, mol/L;

$c'$ ——氯化钠标准溶液的浓度, mol/L;

$V'$ ——氯化钠标准溶液的体积, mL。

#### 2.1.2 离子色谱法

标准溶液的配制:精确称取 1.648g 事先经过约 550~600 $^{\circ}$ C 高温炉烘干并冷却至室温后的氯化钠标准试剂,盛入 1000mL 白色容量瓶中用纯净水稀释至标线刻度,摇匀。

配置 (0.1000mol/L) 氯离子标准溶液:用刻度吸管将 100mL 浓度为 1mg/mL 氯离子标准溶液滴入 1000mL 容量瓶中,用水稀释至标线刻度,摇匀。

### 2.2 方法步骤

#### 2.2.1 电位滴定法

称取聚羧酸高性能减水剂试样 3.0000g 左右,放入 400mL 的烧杯中,加 200mL 水和 4mL 硝酸 (1+1),使溶液呈酸性,搅拌至试样完全溶解。

用移液管加入 10mL 0.1000mol/L 氯化钠标准溶液,放在电磁搅拌器上搅拌,用硝酸银溶液缓慢滴定,记录电势和对应的滴定管读数。接近等当点时,缓慢加入 0.1mL 硝酸银溶液,直至电势趋向变化平缓。记录得到第一个终点时硝酸银溶液消耗的体

积  $V_1$ 。

再加入 10mL 0.1000mol/L 氯化钠标准溶液，继续滴定，直至第二个等当点出现，记录硝酸银溶液消耗的体积  $V_2$ 。

空白试验：不加试样，缓慢滴加硝酸银溶液，记录电势和对应的滴定管读数，直至第一个终点出现。过等当点后，继续滴定至第二个终点，计算硝酸银溶液消耗的体积  $V_1$  和  $V_2$ 。

### 2.2.2 离子色谱法

将试样加纯净水稀释，直接放入样瓶中压实，依次放入自动进样器中，经过抑制器、色谱柱分析，得到氯离子色谱峰的峰面积和峰高，计算试样溶液中的氯离子含量。

试样的配置：称取约 1g 左右试样放入 100mL 烧杯中，滴入 50mL 纯净水和 5 滴硝酸溶解搅拌至试样完全分散，经加热、煮沸、冷却、过滤收集到 100mL 容量瓶中摇匀。

绘制标准曲线：用吸管分别吸取 1mL、5mL、10mL、15mL、20mL、25mL 浓度为 1mg/mL 的氯离子标准溶液放入 6 个 100mL 容量瓶中，稀释摇匀。溶液浓度分别为 1 $\mu$ g/mL、5 $\mu$ g/mL、10 $\mu$ g/mL、15 $\mu$ g/mL、20 $\mu$ g/mL、25 $\mu$ g/mL。再各吸取 10mL 以上溶液放入试验瓶中压缩。依次放入自动进样器中走样分析得到氯离子标准溶液色谱图。

## 2.3 计算公式

### 2.3.1 电位滴定法

用二次微商法计算。

聚羧酸高性能减水剂中氯离子所消耗硝酸银体积  $V$  按下式计算：

$$V = \frac{(V_1 - V_{01}) + (V_2 - V_{02})}{2}$$

式中  $V_1$ ——空白试验中，第一个终点时所消耗硝酸银溶液的体积；

$V_2$ ——空白试验中，第二个终点时所消耗硝酸银溶液的体积。

试样中氯离子含量  $X_{Cl^-}$  按下面公式计算：

$$X_{Cl^-} = \frac{cV \times 35.45}{m \times 1000} \times 100$$

式中  $X_{Cl^-}$ ——试样中氯离子含量，%；

$V$ ——试样中氯离子所消耗硝酸银溶液体积，100mL；

$m$ ——试样质量，g。

### 2.3.2 离子色谱法

在自动进样器中同时放入离子标准溶液和试样溶液，经色谱柱分离，得到色谱图的峰面积和峰高。在工作曲线上查得氯离子浓度  $c_1$ ，则试样氯离子含量  $X_{Cl^-}$  为：

$$X_{Cl^-} = \frac{c_1 V_1 \times 10^{-6}}{m} \times 100$$

式中  $m$ ——聚羧酸高性能减水剂样品质量，g。

## 3 试验结果比对分析

采用电位滴定法和离子色谱法分别对 10 组 HP-WR-LS- I 型聚羧酸高性能减水剂样品进行精密度试验。

### 3.1 电位滴定法

通过上述试验步骤，电位滴定法测得的聚羧酸高性能减水剂试样中氯离子含量见表 1。

表 1 电位滴定法测定的聚羧酸高性能减水剂试样中氯离子含量

序号	试样质量/g	消耗硝酸银溶液体积 $V$ /mL	氯化钠溶液浓度 $c$ /(mol/L)	氯离子含量/%
1	3.0144	3.83	0.0998	0.450
2	3.0060	2.57	0.0998	0.356
3	3.0034	4.15	0.0998	0.489
4	3.0025	2.76	0.0998	0.325
5	3.0092	2.39	0.0998	0.281
6	3.0047	4.61	0.0998	0.543
7	3.0052	4.41	0.0998	0.519
8	3.0093	4.26	0.0998	0.501
9	3.0065	2.61	0.0998	0.307
10	3.0018	2.94	0.0998	0.347

由表 1 可知，电位滴定法测定的 10 组聚羧酸高性能



能减水剂的氯离子含量浮动较大,最大偏差 0.262%,标准偏差达 0.098%,变异系数达到 23.878%。

### 3.2 离子色谱法

聚羧酸高性能减水剂中的可溶性有机杂质采用 IonPacAS23 型阴离子色谱柱去除和分解。依据仪器使用方法进行多余峰削峰处理,有效降低其他成分的干扰,本试验中考虑降低硝酸的用量,以利于环保,且可优化色谱柱分离条件(试样分析的典型谱见图 1)。其他离子也比较好地得到分离,不影响氯离子的定量测定。

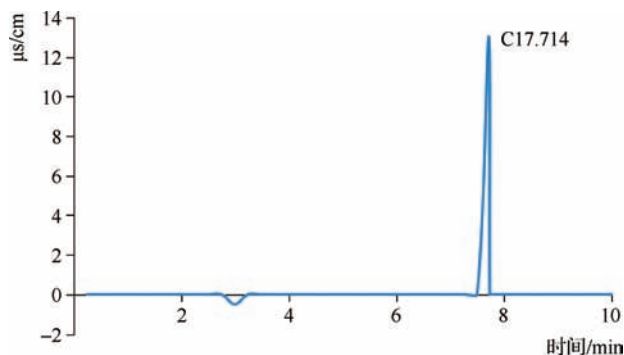


图 1 聚羧酸高性能减水剂试样离子色谱

离子色谱仪测得的聚羧酸高性能减水剂样品中氯离子含量见表 2。

表 2 离子色谱法测定的聚羧酸高性能减水剂试样中氯离子含量

序号	样品质量/ g	稀释 倍数	进样量/ mL	氯离子浓度/ ( $\mu\text{g/mL}$ )	氯离子含量/ %
1	1.0018	100	10	319.00	0.318
2	1.0024	100	10	311.00	0.310
3	1.0023	100	10	308.00	0.307
4	1.0051	100	10	315.00	0.313
5	1.0029	100	10	318.00	0.317
6	1.0042	100	10	315.00	0.314
7	1.0037	100	10	313.00	0.312
8	1.0083	100	10	320.00	0.317
9	1.0055	100	10	317.00	0.315
10	1.0009	100	10	310.00	0.310

由表 2 可知,离子色谱法测定的 10 组聚羧酸高性能减水剂的氯离子含量浮动较小,最大偏差 0.011%,标准偏差只有 0.004%,变异系数为 1.146%。离子色谱法测定结果精密度要比电位滴定法高 27 倍,因此,离子色谱法测定的氯离子含量更精确。

## 4 结 论

通过电位滴定法和离子色谱法 2 种试验方法对指定的聚羧酸高性能减水剂试样中氯离子含量测定的比对试验,综合试剂采购和管理、试验效率和精密度等方面比较分析,得到如下结论:

试剂采购和管理方面,由于电位滴定法采用的硝酸和硝酸银量较大,试剂属于易致爆危化品,试验产生的废液处理难以达标,加之危化品管控要求严格和社会环保意识逐渐提高,试验试剂不易在市面上采购到。离子色谱法可直接采购标液试剂,也非危化品,更易于管理和存储。

试验效率和精密度方面,氯化银稳定性差,人工操作频繁和计算复杂造成电位滴定法测量结果重复性较差,检测精度和效率低(每组试样需耗时 1.5 ~ 3h)、环保性差,很难满足实验室大组数试验的要求。离子色谱法精密度更高、试验快捷(每组试样仅耗时 5 ~ 10min)、环保性好,可直接测试,优势明显。

因此,测定聚羧酸高性能减水剂中的氯离子含量时,建议在实验室推广应用干扰少、分析速度快、适宜批量分析的离子色谱法。▲