

# 水利建设与管理

SHUILI JIANSHE YU GUANLI

原刊名 水利管理技术 (1980 年创刊)

月 刊

2022 年 第 42 卷 第 4 期

(总第 346 期)

2022 年 4 月 23 日 出版

主管单位 中国水利工程协会  
主办单位 中国水利工程协会  
编辑出版 《水利建设与管理》杂志社有限公司

主 编 安中仁  
副 主 编 任京梅 吴香菊  
责任编辑 陈淑珍

地 址 北京市西城区南滨河路 27 号小区  
7 号楼 11 层 1116 号(贵都国际中  
心 B 座 1116 室 编 1105)

邮 编 100055  
网 址 www.sljsygl.com  
在线投稿 www.sljsygl.com/home/login  
邮 箱 water6346@163.com  
联系电话 010-63305220 (发行)  
010-63305239 (投稿)  
010-63305258 (广告)

印刷单位 北京博海升彩色印刷有限公司  
发行范围 公开发行  
订 阅 全国各地邮局  
国内发行 中国邮政集团公司北京市报刊发行局  
本刊发行部

国内邮发代号 2-781  
国外发行 中国国际图书贸易集团有限公司  
国外发行代号 MO3713  
广告发布登记 京西市监广登字 20170082 号  
中国标准连续出版物号 ISSN 2097-0528  
CN 11-4446/TV

定 价 20.00 元

## 目次 2022年第4期

### 本期特稿

- 1 关于推进水利工程标准化管理的指导意见
- 3 水利部运行管理司负责同志解读《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》

### 南水北调工程专栏

- 7 南水北调中线工程驱动受水区高质量发展的基本效应

韩江波 陈 雯

### 科研设计

- 16 山西中部引黄工程技术难题及关键技术研究  
张成军 马 菲 石建军
- 24 涵盖生命周期关键点的边坡生态设计方法研究及应用 丁 培
- 29 基于水利仿真模拟设计的金湖县城西河节制闸加固结构分析研  
究 陈冬冬 李 杰 卞 威
- 35 山西农谷降水变化与旱涝特征分析及水利应对策略  
吴伟伟 冯锦萍 孟 佩

### 工程施工

- 43 老挝南俄 3 水电站引水隧洞淤泥流沙段综合治理  
魏兴存 刘汉斌 高富文
- 49 水工隧洞初衬下沉底板错台处置方法 叶瑞彬 吴锐敏
- 53 高效废水处理系统在黄金峡水利枢纽工程中的应用  
马光明 闫 良
- 58 堡镇港北等四座水闸外移工程基坑降排水方案设计与优化  
蔡超英 潘世洋

### 机电及金属结构

- 66 基于振动监测系统对竖井式贯流泵推力轴承异响原因的分析  
唐 演 缪融融 钱 杨
- 72 垂直运输设备空间三维定位的设计与实现  
李永山 刘发永 周新志

## 运行管理

79 鲁西南乡村振兴水系治理模式初探 赵红兵 朱明辉 李子玉

## 行业动态

• 3月23日,水利部召开水利工程运行管理工作会议,深入贯彻“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路,落实全国水利工作会议部署要求,总结2021年水利工程运行管理工作,分析当前形势,部署2022年重点任务。水利部副部长刘伟平出席会议并讲话,总工程师仲志余主持会议。

(来源:水利部网站,网址: [http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202203/t20220323\\_1566198.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202203/t20220323_1566198.html),日期:2022年3月23日)

• 4月11日,水利部召开水利工程建设工作会议,深入贯彻习近平总书记“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路和关于治水重要讲话指示批示精神,落实全国水利工作会议要求,总结2021年水利工程建设工作会议,分析当前面临的形势任务,部署2022年重点工作。水利部副部长刘伟平出席会议并讲话,总工程师仲志余主持会议。

(来源:水利部网站,网址: [http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202204/t20220412\\_1569145.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202204/t20220412_1569145.html),日期:2022年4月12日)

• 近日,水利部印发《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》《水利工程标准化管理评价办法》及其评价标准,旨在深入贯彻党中央、国务院决策部署,落实新阶段水利高质量发展目标任务,加快推进水利工程标准化管理工作,确保工程运行安全和效益持续发挥。本刊在本期特稿栏目转发了其中的指导意见全文和水利部运行管理司负责同志对此文件的解读。

(来源:水利部网站,网址: [http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202203/t20220330\\_1567532.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202203/t20220330_1567532.html),日期:2022年4月12日)

## 宣传与广告

封面 南水北调来水调入密云水库调蓄工程

封二 节水公益宣传

封三 《中国水能及电气化》杂志

封底 沅水桃源水电站工程

## 《水利建设与管理》

### 编委会

主任:孙继昌

副主任:安中仁 任京梅

委员(按姓氏笔画排序)

王爱国 石小强 许文海 孙公新

李坤刚 张利新 陈明忠 宗敦峰

祖雷鸣 唐传利 董红元 蒲朝勇

### 本刊声明:

1. 本刊为公开发行人物,作者投稿须遵守国家有关保密的法律法规,并对此负完全责任。
2. 本刊刊发的文字、图片等所有内容,本刊拥有网络电子版版权,未经许可不得转载。作者若有异议,请在来稿时声明。
3. 本刊已加入 OSID (Open Science Identity) 开放科学计划,欢迎作者使用。



中国水利工程协会  
公众号



《水利建设与管理》  
杂志社公众号

# WATER CONSERVANCY CONSTRUCTION AND MANAGEMENT

Vol. 42 No. 4 2022

## CONTENTS

### **Special Report**

- 1 Guidance on promoting the standardized management of water conservancy projects
- 3 The responsible comrade of the Operation Management Department of the Ministry of Water Resources interprets  
*Guidance on promoting the standardized management of water conservancy projects*

### **Special Column of South-to-North Water Diversion Project**

- 7 Basic effects of high-quality development of water receiving areas driven by the middle route of south-to-north water transfer project  
HAN Jiangbo, CHEN Wen

### **Scientific Design**

- 16 Research on technical problems of Yellow River Diversion Project in central Shanxi Province and key technology  
ZHANG Chengjun, MA Fei, SHI Jianjun
- 24 Research and application of slope ecological design method covering key points of life cycle  
DING Pei
- 29 Analysis and research on strengthening structure of Chengxihe regulating sluice in Jinhu County based on hydraulic simulation design  
CHEN Dongdong, LI Jie, BIAN Wei
- 35 Analysis on precipitation change and characteristics of drought and flood in Nonggu of Shanxi Province and water conservancy countermeasures  
WU Weiwei, FENG Jinping, MENG Pei

### **Project Construction**

- 43 Comprehensive treatment of silt and quicksand sections of diversion tunnel in Laos Nane 3 Hydropower Station  
WEI Xingcun, LIU Hanbin, GAO Fuwen
- 49 Treatment method of slab end faulting of sinking floor in hydraulic tunnel initial lining  
YE Ruibin, WU Ruimin
- 53 Application of high efficiency wastewater treatment system in Huangjinxia Water Conservancy Project  
MA Guangming, YAN Liang
- 58 Scheme design and optimization of foundation pit dewatering and drainage of four sluice outward movement project including Daobao Gangbei Sluice  
CAI Chaoying, PAN Shiyang

### **Electromechanical and Metal Structure**

- 66 Analysis abnormal sound causes of thrust bearing in vertical shaft cross-flow pump based on vibration monitoring system  
TANG Yan, MIAO Rongrong, QIAN Yang
- 72 Design and realization of space 3D positioning of vertical transportation equipment  
LI Yongshan, LIU Fayong, ZHOU Xinzhi

## Operation Management

79 Preliminary study on water system treatment mode of rural revitalization in Southwest Shandong Province

ZHAO Hongbing, ZHU Minghui, LI Ziyu

## 行业动态

- 2022 年 4 月 20 日，水利部副部长刘伟平主持召开会议，深入贯彻全国水利工作会议、水利部推动新阶段水利高质量发展领导小组会议有关要求，听取部网信办关于数字孪生流域建设先行先试工作进展情况汇报，研究部署加快推进数字孪生流域建设工作。水利部总工程师仲志余和有关司局负责同志参加会议。部网信办汇报了数字孪生流域建设先行先试工作进展、台账建立以及实施方案审核安排等情况，会议进行了深入讨论。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202204/t20220422\\_1570529.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202204/t20220422_1570529.html),日期:2022 年 4 月 22 日)

- 2022 年 4 月 13 日，魏山忠副部长主持开展国家“十四五”规划 102 项重大工程水利重点任务暨 2022 年第 1 次中央水利建设投资计划执行调度会商，深入贯彻中央经济工作会议、中央农村工作会议精神和 2022 年《政府工作报告》、国务院常务会议部署，按照全国水利工作会议的要求，部署加快推进水利工程建设。水利部总工程师仲志余出席调度会商。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202204/t20220414\\_1569389.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202204/t20220414_1569389.html),日期:2022 年 4 月 14 日)

- 2022 年 4 月 13 日，海口市南渡江引水工程顺利通过由海南省水务厅组织的竣工验收。

海口市南渡江引水工程是国家 172 项节水供水重大水利工程之一，建设内容主要包括水源工程、输配水工程、五源河综合整治工程及水库连通工程，批复总投资 36.21 亿元。2015 年 11 月工程开工，2020 年 12 月底中西部供水线路正式通水，2022 年 1 月工程全面完工。

海口市南渡江引水工程每年向海口市供水 1.77 亿立方米，可有效缓解城市生活及工业缺水矛盾，解决羊山地区农业灌溉用水问题，还可改善海口市河道水环境状况，显著提升海口市水安全保障能力。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202204/t20220415\\_1569581.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202204/t20220415_1569581.html),日期:2022 年 4 月 15 日)



# 关于推进水利工程标准化管理的指导意见

为深入贯彻党中央、国务院决策部署，落实新阶段水利高质量发展目标任务，加快推进水利工程标准化管理工作，确保工程运行安全和效益持续发挥，制定如下意见。

## 一、指导思想和总体目标

### （一）指导思想

以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入贯彻落实“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路，坚持人民至上、生命至上，统筹发展和安全，立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局，推动高质量发展，强化水利体制机制法治管理，推进工程管理信息化智慧化，构建推动水利高质量发展的工程运行标准化管理体系，因地制宜，循序渐进，推进水利工程标准化管理，保障水利工程运行安全，保证工程效益充分发挥。

### （二）总体目标

“十四五”期间，强化工程安全管理，消除重大安全隐患，落实管理责任，完善管理制度，提升管理能力，建立健全运行管理长效机制，全面推进水利工程标准化管理。2022 年底前，省级水行政主管部门和流域管理机构建立起水利工程标准化管理制度标准体系，全面启动标准化管理工作；2025 年底前，除尚未实施除险加固的病险工程外，大中型水库全面实现标准化管理，大中型水闸、泵站、灌区、调水工程和 3 级以上堤防等基本实现标准化管理；2030 年底前，大中小型水利工程全面实现标准化管理。

## 二、标准化管理要求

水利工程管理单位（以下简称水管单位）要落

实管理主体责任，执行水利工程运行管理制度和标准，充分利用信息平台和管理工具，规范管理行为，提高管理能力，从工程状况、安全管理、运行管护、管理保障和信息化建设等方面，实现水利工程全过程标准化管理。

（一）工程状况。工程现状达到设计标准，无安全隐患；主要建筑物和配套设施运行性态正常，运行参数满足现行规范要求；金属结构与机电设备运行正常、安全可靠；监测监控设施设置合理、完好有效，满足掌握工程安全状况需要；工程外观完好，管理范围环境整洁，标识标牌规范醒目。

（二）安全管理。工程按规定注册登记，信息完善准确、更新及时；按规定开展安全鉴定，及时落实处理措施；工程管理与保护范围划定并公告，重要边界界桩齐全明显，无违章建筑和危害工程安全活动；安全管理责任制落实，岗位职责分工明确；防汛组织体系健全，应急预案完善可行，防汛物料管理规范，工程安全度汛措施落实。

（三）运行管护。工程巡视检查、监测监控、操作运用、维修养护和生物防治等管护工作制度齐全、行为规范、记录完整，关键制度、操作规程上墙明示；及时排查、治理工程隐患，实行台账闭环管理；调度运用规程和方案（计划）按程序报批并严格遵照实施。

（四）管理保障。管理体制顺畅，工程产权明晰，管理主体责任落实；人员经费、维修养护经费落实到位，使用管理规范；岗位设置合理，人员职责明确且具备履职能力；规章制度满足管理需要并不断完善，内容完整、要求明确、执行严格；办公场所设施



设备完善,档案资料管理有序;精神文明和水文化建设同步推进。

(五) 信息化建设。建立工程管理信息化平台,工程基础信息、监测监控信息、管理信息等数据完整、更新及时,与各级平台实现信息融合共享、互联互通;整合接入雨水情、安全监测监控等工程信息,实现在线监管和自动化控制,应用智能巡查设备,提升险情自动识别、评估、预警能力;网络安全与数据保护制度健全,防护措施完善。

### 三、主要工作内容

(一) 制定标准化管理工作实施方案。省级水行政主管部门和流域管理机构要加强顶层设计,按照因地制宜、循序渐进的工作思路,制定本地区(单位)水利工程标准化管理工作实施方案,明确目标任务、实施计划和工作要求,落实保障措施,有计划、分步骤组织实施,统筹推进水利工程标准化管理工作。

(二) 建立工程运行管理标准体系。省级水行政主管部门和流域管理机构要依据国家和水利部颁布的相关管理制度和技术标准规范,结合工程运行管理实际,梳理工程状况、安全管理、运行管护、管理保障和信息化建设等方面的管理事项,制定标准化管理制度,按照工程类别编制标准化工作手册示范文本,构建本地区(单位)工程运行管理标准体系,指导水管单位开展标准化管理。以县域为单元,深化管理体制改革,健全长效运行管护机制,全面推进小型水库标准化管理,积极探索农村人饮工程标准化管理。

(三) 推进标准化管理的实施。水管单位要根据省级水行政主管部门或流域管理机构制定的标准化工作手册示范文本,编制所辖工程的标准化工作手册,针对工程特点,理清管理事项、确定管理标准、规范管理程序、科学定岗定员、建立激励机制、严格考核评价。

全面推进标准化管理,按规定及时开展工程安全鉴定,深入开展隐患排查治理,加快病险工程除险加

固,加强工程度汛和安全生产管理,保障工程实体安全;规范工程巡视检查、监测监控、操作运用、维护保养和生物防治等活动;划定工程管理与保护范围,加强环境整治;健全并严格落实运行管理各项制度,切实强化人员、经费保障,改善办公条件;加强数字化、网络化、智能化应用,不断提升在线监管、自动化控制和预警预报水平,落实网络安全管理责任。

(四) 做好标准化评价。水利部制定《水利工程标准化评价办法》,明确标准化基本要求和水利部评价标准。省级水行政主管部门和流域管理机构要结合实际,制定本地区(单位)的标准化评价细则及其评价标准,评价内容及其标准应满足水利部确定的标准化基本要求,建立标准化常态化评价机制,深入组织开展标准化评价工作。评价结果达到省级或流域管理机构评价标准的,认定为省级或流域管理机构标准化管理工程。通过省级或流域管理机构标准化评价且满足水利部评价条件的,可申请水利部评价。通过水利部评价的,认定为水利部标准化管理工程。

### 四、保障措施

(一) 加强组织领导。省级水行政主管部门要加快出台推进水利工程标准化管理的意见(方案),将标准化工作纳入河湖长制考核范围,建立政府主导、部门协作、自上而下的推进机制。选择管理水平较高、基础条件较好的工程或地区先行先试,积累经验、逐步推广。创新工程管护机制,大力推行专业化管护模式,不断提高工程管护能力和水平。流域管理机构要加强流域内水利工程标准化管理的监督指导和评价。

(二) 落实资金保障。省级水行政主管部门要落实好《水利工程管理体制改革实施意见》(国办发〔2002〕45号)、《关于切实加强水库除险加固和运行管护工作的通知》(国办发〔2021〕8号)文件的要求,积极与相关部门沟通协调,多渠道筹措运行管护资金,推进水利工程标准化管理建设。(下转第6页)

# 水利部运行管理司负责同志解读 《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》

近日，水利部制定出台《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》（以下简称《指导意见》）《水利工程标准化管理评价办法》（以下简称《评价办法》）及评价标准等文件。水利部运行管理司负责同志就《指导意见》等文件进行了解读。

## 一、《指导意见》等文件出台的背景是什么？

党的十九届五中全会明确提出，“十四五”时期经济社会发展要以推动高质量发展为主题。在水利部“三对标、一规划”专项行动总结大会上，李国英部长指出，新阶段水利工作的主题为推动高质量发展，明确了新阶段水利高质量发展的目标任务和实施路径，要求健全水利工程安全保护制度，确保水利工程安全。新时代提出新要求，加快推进水利工程标准化管理，有效改变水利工程粗放的管理模式，是推动新阶段水利高质量发展，保障水利工程安全的必然要求。

我国已建成由水库、堤防、水闸、灌区、泵站和调水工程组成的水利工程体系，这些水利工程在发挥巨大防洪减灾、供水灌溉、生态保护效益的同时，运行管理方面存在亟待解决的问题。部分存量病险工程尚未实施除险加固，工程安全隐患依然严重；基层水管单位技术力量薄弱、管护经费不足，运行管理水平相对落后；工程信息化、智慧化管理水平较低，运行管理手段落后。这些问题与新阶段水利高质量发展不相适应，必须加强水利工程运行管理，及时消除安全隐患，守住安全底线，同时，着力提升运行管理能力和水平，努力提高管理规范化、智慧化、标准化。

近年来，浙江、江苏、江西、山东、安徽等地，黄委、淮委等流域管理机构，结合管理实际，积极探索水利工程标准化管理，在保障工程安全、增强管理能力、提高管理水平方面，取得了明显工作成效。同时，在加强顶层设计、分类指导实施、完善标准体系、强化绩效考评等方面形成一批可借鉴的有效做法。总的来看，先期实践成效显著，在全行业推行水利工程标准化管理的条件已经具备，需要水利部加强顶层设计、制定制度标准，引导标准化管理的有序推进。

## 二、《指导意见》等文件的主要内容是什么？

这次印发的文件包括《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》《水利工程标准化管理评价办法》和水库、水闸、堤防等3类工程的标准化管理评价标准。

《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》提出了推进标准化管理的指导思想和总体目标；从工程状况、安全管理、运行管护、管理保障和信息化建设等5方面，明确了标准化管理要求；确定了推进标准化管理的具体工作内容：从加强组织领导、落实资金保障、推进智慧水利、强化激励措施和严格监督检查等方面提出了保障措施。

《水利工程标准化管理评价办法》共十六条，对标准化评价的适用范围、评价主体、工作程序、评价标准、申报水利部评价工作要求及退出机制作出规定。

水库、水闸、堤防等3类工程标准化管理评价标准，对应工程状况、安全管理、运行管护、管理保障



和信息化建设等5个方面标准化管理要求，分别制定了标准化基本要求和水利部评价标准，细化了评价内容、评价指标和赋分原则。

### 三、标准化管理的指导思想和主要目标是什么？

《指导意见》提出的指导思想是，以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入贯彻落实“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路，坚持人民至上、生命至上，统筹发展和安全，立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局，推动高质量发展，强化水利体制机制法治管理，推进工程管理信息化智慧化，构建推动水利高质量发展的工程运行标准化管理体系，因地制宜，循序渐进，推进水利工程标准化管理，保障水利工程运行安全，保证工程效益充分发挥。

《指导意见》确定的主要目标是，“十四五”期间，强化工程安全管理，消除重大安全隐患，落实管理责任，完善管理制度，提升管理能力，建立健全运行管理长效机制，全面推进水利工程标准化管理。2022年底前，省级水行政主管部门和流域管理机构建立起水利工程标准化管理制度标准体系，全面启动标准化管理工作；2025年底前，除尚未实施除险加固的病险工程外，大中型水库全面实现标准化管理，大中型水闸、泵站、灌区、调水工程和3级以上堤防等基本实现标准化管理；2030年底前，大中小型水利工程全面实现标准化管理。

### 四、标准化管理的具体要求是什么？

《指导意见》要求，从工程状况、安全管理、运行管护、管理保障和信息化建设等5个方面，实现水利工程全过程标准化管理。

一是工程状况方面，要求工程现状达到设计标准，无安全隐患；主要建筑物和配套设施运行性态正常，运行参数满足现行规范要求；金属结构与机电设备运行正常、安全可靠；监测监控设施设置合理、完

好有效，满足掌握工程安全状况需要；工程外观完好，管理范围环境整洁，标识标牌规范醒目。

二是安全管理方面，要求工程按规定注册登记，信息完善准确、更新及时；按规定开展安全鉴定，及时落实处理措施；工程管理与保护范围划定并公告，重要边界桩齐全明显，无违章建筑和危害工程安全活动；安全管理责任制落实，岗位职责分工明确；防汛组织体系健全，应急预案完善可行，防汛物料管理规范，工程安全度汛措施落实。

三是运行管护方面，要求工程巡视检查、监测监控、操作运用、维修养护和生物防治等管护工作制度齐全、行为规范、记录完整，关键制度、操作规程上墙明示；及时排查、治理工程隐患，实行台账闭环管理；调度运用规程和方案（计划）按程序报批并严格遵照实施。

四是管理保障方面，要求管理体制顺畅，工程产权明晰，管理主体责任落实；人员经费、维修养护经费落实到位，使用管理规范；岗位设置合理，人员职责明确且具备履职能力；规章制度满足管理需要并不断完善，内容完整、要求明确、执行严格；办公场所设施设备完善，档案资料管理有序；精神文明和水文化建设同步推进。

五是信息化建设方面，要求建立工程管理信息化平台，工程基础信息、监测监控信息、管理信息等数据完整、更新及时，与各级平台实现信息融合共享、互联互通；整合接入雨水情、安全监测监控等工程信息，实现在线监管和自动化控制，应用智能巡查设备，提升险情自动识别、评估、预警能力；网络安全与数据保护制度健全，防护措施完善。

### 五、各地推进标准化管理的主要工作内容是什么？

一是制定标准化管理工作实施方案。省级水行政主管部门和流域管理机构要加强顶层设计，按照因地制宜、循序渐进的工作思路，制定本地区（单位）水利工程标准化管理工作实施方案，明确目标任务、



实施计划和工作要求，落实保障措施，有计划、分步骤组织实施，统筹推进水利工程标准化管理工作。

二是建立工程运行管理标准体系。省级水行政主管部门和流域管理机构要依据国家和水利部颁布的相关管理制度和技术标准规范，结合工程运行管理实际，梳理工程状况、安全管理、运行管护、管理保障和信息化建设等方面的管理事项，制定标准化管理制度，按照工程类别编制标准化工作手册示范文本，构建本地区（单位）工程运行管理标准体系，指导水管单位开展标准化管理。以县域为单元，深化管理体制变革，健全长效运行管护机制，全面推进小型水库标准化管理，积极探索农村人饮工程标准化管理。

三是推进标准化管理的实施。水管单位要根据省级水行政主管部门或流域管理机构制定的标准化工作手册示范文本，编制所辖工程的标准化工作手册，针对工程特点，理清管理事项、确定管理标准、规范管理程序、科学定岗定员、建立激励机制、严格考核评价，按照标准化管理要求，全面开展标准化管理创建工作。

四是做好标准化管理评价。省级水行政主管部门和流域管理机构要结合实际，制定本地区（单位）的标准化评价细则及其评价标准，建立标准化管理常态化评价机制，深入组织开展标准化评价工作。

## 六、标准化管理评价与水利工程管理考核的关系，主要有哪些变化？

《评价办法》是在《水利工程管理考核办法》的基础上，根据标准化管理的新要求修订形成，文件印发后，将以水利工程标准化管理评价替代水利工程管理考核工作。主要有以下变化：

一是评价对象由水管单位改为水利工程。主要考虑到随着水管体制改革和机构改革的推进，各地集中管理逐步成为改革的趋势和方向，由一个水管单位管理多个水利工程的现象普遍存在，而诸多工程因类别、规模、功能、效益等各类因素影响，管理水平不尽相同，管理单位整体达标难度加大，示范带动作用

受到影响。因此，本次标准化评价，将评价对象调整为水利工程。水利工程申请标准化评价的主体为该工程的管理单位，即各水管单位可根据管理实际对管辖工程中的某个或某几个工程申报标准化管理评价。

二是评价内容突出了工程安全和信息化管理。标准化管理把保障工程安全作为首要任务，突出强化了工程实体和安全管理工作；并对运行管理全过程标准化提出明确要求，将管理标准细化到每项管理事项、每个管理程序，落实到每个工作岗位。同时，适应水利高质量发展的新形势新要求，按照水利部加强智慧水利建设的总体部署，明确了信息化建设的具体要求，增加了赋分权重。

三是评价标准充分考虑了地区间条件差异。水利部制定了一低一高两个标准，即标准化基本要求和水利部评价标准。省级水行政主管部门、流域管理机构可结合实际，制定本地区（单位）的评价标准，这个标准应满足水利部确定的基本要求。评价结果达到省级或流域管理机构评价标准的，认定为省级或流域管理机构标准化管理工程。通过省级或流域管理机构标准化评价且满足水利部评价条件的，可申请水利部评价。通过水利部评价的，认定为水利部标准化管理工程。

四是强化了流域管理机构的作用。为贯彻落实《水利部关于强化流域治理管理的指导意见》精神，发挥流域管理机构组织推进流域内标准化管理工作的作用，《评价办法》明确流域管理机构负责指导流域内水利工程标准化管理和评价，受水利部委托承担水利部评价的具体工作。申报水利部评价的工程，由水利部按照工程所在流域委托相应流域管理机构组织评价。

五是考虑了标准化管理评价和工程管理考核的衔接。目前，全国有165家水管单位通过水利部水利工程管理考核验收。标准化文件印发后，已通过水利部验收的水管单位保留原称号，待到新一轮复核年限时，按照《评价办法》重新申报水利部标准化管理工程评价认定。

另外，近年来，浙江、江苏、江西、山东、安徽



等地积极开展标准化试点,形成了符合地区特点的标准化工程分级名录。标准化文件印发后,各地在满足水利部标准化基本要求的基础上,可自主决定是否继续沿用已定级的标准化成果。

## 七、贯彻落实《指导意见》等文件有哪些具体要求和安排?

一是切实加强组织领导。推进水利工程标准化管理,是实现水利高质量发展的重要举措。水利部决定在全国范围内全面推进水利工程标准化管理,这是“十四五”运行管理工作的一件大事,部党组高度重视。省级水行政主管部门和流域管理机构是标准化管理工作的组织实施主体,要切实落实主体责任,强化组织领导。要将标准化工作纳入河湖长制考核范围,建立政府主导、部门协作、自上而下的推进机制。要结合本地区(单位)实际,抓紧制定“十四五”水利工程标准化管理实施方案和年度工作计划,明确目标任务和工作要求,构建运行管理标准体系,建立标准化管理常态化评价机制,全面推进标准化管理。

二是强化政策保障措施。各地要多渠道筹措运行

管护资金,选择管理水平较高、基础条件较好的工程或地区先行先试,积累经验、逐步推广,推进水利工程标准化管理建设。鼓励将标准化建设成果作为单位及个人的业绩考核、职称评定等重要依据,对标准化管理取得显著成效的,在相关资金安排上予以优先考虑。中国水利工程优质(大禹)奖评选把水利工程标准化建设成果作为运行可靠方面评审的重要参考。

三是着力抓好监督管理。各地要加强监督检查,按年度发布标准化管理建设进展情况,对工作推进缓慢、问题整改不力、成果弄虚作假的,严肃追责问责,确保标准化评价工作操作规范,程序公开、公正、透明,杜绝各种违规违法行为。流域管理机构要加强流域内水利工程标准化管理的监督指导和评价。水利部将建立信息上报和定期通报制度,准确把握工作进展,协调解决标准化管理建设过程中存在的重大问题,组织编制年度发展报告,及时总结推广工作中的好做法好经验,充分发挥示范带动作用。

(来源:中国水利工程协会网,网址:<https://www.cweun.org/show.php?cid=11&id=1172>,日期:2022年4月1日)

(上接第2页)

(三) 推进智慧水利。省级水行政主管部门和流域管理机构要按照智慧水利建设总体布局,统筹已有应用系统,补充自动化监测监控预警设施,完善信息化网络平台,推进水利工程智能化改造和数字孪生工程建设,提升水利工程安全监控和智能化管理水平。

(四) 强化激励措施。地方各级水行政主管部门和流域管理机构要将标准化建设成果作为单位及个人的业绩考核、职称评定等重要依据,对标准化管理取得显著成效的,在相关资金安排上予以优先考虑。中国水利工程优质(大禹)奖评选把水利工程标准

化建设成果作为运行可靠方面评审的重要参考。

(五) 严格监督检查。各级水行政主管部门和流域管理机构要把标准化管理工作纳入水利工程监督范围,加强监督检查,按年度发布标准化管理建设进展情况,对工作推进缓慢、问题整改不力、成果弄虚作假的,严肃追责问责。加强对标准化评价工作的监督检查,规范操作程序,保障公开、公正、透明,杜绝各种违规违法行为。

(来源:中国水利工程协会网,网址:<https://www.cweun.org/show.php?cid=11&id=1171>,日期:2022年4月1日)



## 编者按

2021年5月14日,习近平总书记在河南省南阳市主持召开推进南水北调后续工程高质量发展座谈会并发表重要讲话。近一年来,本刊通过特别策划、南水北调工程专栏和封面刊发相关宣传、介绍、管理、技术、研究性稿件和图片十余篇(版),为读者深入了解南水北调工程建设管理情况,贯彻讲话精神提供了交流机会。

在讲话发表即将一周年之际,本刊再度策划主题稿件《南水北调中线工程驱动受水区高质量发展的基本效应》。该文立意宏大,结构明晰,在广泛梳理相关文献的基础上,开展南水北调中线工程驱动受水区发展的理论逻辑研究,提出社会效应、经济效应、生态效应、系统效应、引致效应五大基本效应,并进行了深入论证。请读者细读品鉴,并欢迎作者进一步开展研究探讨,把南水北调与高质量发展主题的讨论引向深入。

# 南水北调中线工程驱动受水区高质量发展的基本效应

韩江波<sup>1,2</sup> 陈 雯<sup>3</sup>

- (1. 南阳师范学院南阳发展战略研究院,河南 南阳 473061;
2. 南阳师范学院河南省副中心城市研究院,河南 南阳 473061;
3. 河南省南水北调中线工程建设管理局,河南 郑州 450016)

**【摘 要】** 水资源是名副其实的“战略性经济资源”。作为优化水资源配置的重大战略性基础工程,南水北调中线工程不仅对沿线大中型城市供水和民生提供保障,缓解京津冀豫华北地区水资源短缺,而且将对受水区的供水结构和供水格局产生根本性的影响,能大幅度优化沿线生态环境,为构建“四横三纵、南北调配、东西互济”的水资源总体格局,推动我国经济社会的高质量、可持续发展和国家重大战略实施提供强有力的水支撑。南水北调中线工程驱动受水区高质量发展的基本效应体现为社会效应、经济效应、生态效应、系统效应、引致效应5个方面。其中,社会效应体现为改善就业和居民生活条件;经济效应体现为优化经济结构;生态效应体现为调节生态环境;系统效应体现为优化水资源系统;引致效应体现为完善配套工程体系。

**【关键词】** 社会效应;经济效应;生态效应;系统效应;引致效应

中图分类号: TV-9

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)04-007-09

收稿日期: 2022-03-01

基金项目: “研究阐释党的十九届六中全会和省十一次党代会精神”委托项目“推进南水北调后续工程高质量发展研究”(项目批准号: 2021WT49);河南省南水北调中线工程建设管理局委托项目“南水北调中线工程对河南受水区高质量发展驱动机制”;河南省哲学社会科学规划项目“河南提升智能制造产业基础能力的路径创新与政策研究”(项目编号: 2021BJJ074);南阳师范学院南阳发展战略研究院项目“南阳以飞地园区建设豫南高效生态经济示范区的对策(项目编号: YJY202107)””;河南省高等学校重点科研资助项目(项目编号: 22A790015)“河南省提升智能制造产业基础能力路径创新研究”;南阳师范学院国家社科培育项目(项目编号: 20211029)“我国智能制造产业基础能力提升的路径创新研究”。

作者简介: 韩江波(1982—),男,博士、副教授,经济学博士,研究方向为产业经济、宏观经济。



## Basic effects of high-quality development of water receiving areas driven by the middle route of south-to-north water transfer project

HAN Jiangbo<sup>1,2</sup>, CHEN Wen<sup>3</sup>

- (1. Nanyang Development Strategy Research Institute, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;  
2. Henan Sub-Central City Research Institute, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;  
3. Construction Administration Bureau of Middle Route of South-to-North Water Diversion Project of Henan Province, Zhengzhou 450016, China)

**Abstract:** Water is a veritable “strategic economic resource”. As a major strategic basic project to optimize the allocation of water resources, the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project not only provides guarantee for water supply and people’s livelihood in large and medium-sized cities along the route, but also alleviates the shortage of water resources in Beijing, Tianjin, Hebei, Henan and North China. It will also have a fundamental impact on the water supply structure and water supply pattern in the water receiving areas, greatly optimize the ecological environment along the route, and provide strong water support for building the overall pattern of water resources with “four horizontal and three vertical directions, north-south allocation and east-west mutual assistance”, and promoting the high-quality and sustainable development of China’s economy and society as well as implementation of major national strategies. The basic effects of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project to drive the high-quality development of the water receiving area are reflected in five aspects: social effect, economic effect, ecological effect, systematic effect and induced effect. Among them, the social effect is reflected in improving employment and living conditions of residents; the economic effect is to optimize the economic structure; the ecological effect is to regulate the ecological environment; systematic effect is reflected in optimizing water resources system; the induced effect is reflected in perfecting the supporting engineering system.

**Keywords:** social effect; economic effect; ecological effect; systematic effect; induced effect

### 1 引言

水是“生命之源”“文明之魂”,是人类一切生活、生产的必要条件,是人类物质文明、精神文明、政治文明、生态文明建设的“关键要素”和国家(地区)经济社

会发展的“重要保障”与“关键支撑”。自古以来,人类择水而居,城池滨水而建。长三角、珠三角等我国区域经济发展所形成的很多重要经济增长极,均是围绕“水”而形成。从此意义上看,水资源不仅可被视为“生态与环境的重要控制性要素”,而且能被看成是“人



类生存与发展不可缺少的基础性自然资源”,在很大程度上经济社会的发展空间取决于“水的承载空间”<sup>[1-5]</sup>。

2021年5月14日,习近平总书记在推进南水北调后续工程高质量发展座谈会上强调,南水北调工程事关战略全局、事关长远发展、事关人民福祉。作为缓解我国黄淮海平原水资源严重短缺、优化配置水资源的重大战略性基础设施,南水北调中线工程的输水干渠地跨河南、河北、北京、天津4个省、直辖市;受水区域为沿线的南阳、平顶山、许昌、郑州、焦作、新乡、鹤壁、安阳、邯郸、邢台、石家庄、保定、北京、天津等19座大中城市;重点解决河南、河北、北京、天津4省市的水资源短缺问题,为沿线十几座大中城市提供生产生活和工农业用水;供水范围总面积15.5万km<sup>2</sup>,输水干渠总长1277km,天津输水支干线长155km。通水7年多来,河南省受水区严格秉持“大水源、大水网、大水务”的建设理念,逐步健全南水北调中线工程建设,积极彰显配套工程作用,并以此为基础加速推进城乡供水一体化发展进程,各部门在严格贯彻落实“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路的基础上,高质量完成城乡供水的同源、同网、同质、同服务,让沿线越来越多的群众享有南水北调中线工程建设成果<sup>[6-8]</sup>。

当前,关于南水北调中线工程驱动受水区高质量发展的研究主要体现为“定量”方面,多采用模糊数学法、层次分析法、指数法、神经网络法等单一的方法<sup>[9-12]</sup>,近年来有学者通过应用计量经济学方法研究分析南水北调的经济社会影响<sup>[13-16]</sup>。但对南水北调中线工程驱动受水区高质量发展的理论逻辑缺乏专门的研究,尤其是未从社会、经济、生态等角度综合、系统地研究。理论是实践的先导,思想是行动的指南。只有从理论上深刻把握南水北调中线工程驱动经济高质量发展的内在逻辑,才能在实践中采取针对性政策推进“南水北调后续工程的高质量发展”。

## 2 社会效应:改善就业和居民生活条件

首先,南水北调中线工程可为受水区创造一系列的就业机会。重大、系统性的水利工程不仅有“覆盖面广”和“吸纳投资大”的特征,而且有“产业相关性强”和“创造就业机会多”的特点,具备较强的“投资拉动

经济增长”的功效。南水北调中线重大水利工程前期均经过科学的规划设计和多年的反复论证,投入的人力、物力、财力巨大,庞大的投资能创造大量的就业机会,保障经济社会协调发展。根据投资对就业的促进作用(经济的拉动作用)的乘数原理,中国宏观经济研究院测算,南水北调中线工程等重大水利工程每投资1000亿元能新增就业岗位49万个。若按照每5万元~10万元的投资可创造1个就业机会的标准,根据2000—2013年投资年度分摊计算,南水北调中线工程每年能为河南省增加8.6万个就业机会,尤其是工程建设高峰期参建单位超过1000家,有近10万建设者在现场工作,加上相关行业的带动作用,每年增加数十万个就业岗位,而投资拉动国内生产总值年均增长约0.12个百分点,通过乘数效应对经济增长的影响逐步扩大。南水北调中线工程通水之后吸纳就业的因素会逐步增多,例如,调水提供的水资源能对受水区的土地带来直接影响,增加对土地有效开发,也可对受水区的矿产资源进行高效利用,由此引致一系列就业机会。充足的外来水源能为生产用水提供充分保障,有利于企业扩大生产规模,在很大程度上刺激新兴企业发展,为受水区带来大量就业机会。中线工程通水之后,受水区及其相关产业会乘势发展和崛起,甚至会加速受水区产业经济格局的演化和变革,发生“产业基地化”“产业集群化”“产业园区化”,这将极大促使劳动力、科技人员、资金的集聚,甚至有可能在经济规律作用下形成“经济移民”。这对受水区尤其是河南、河北等欠发达地区的就业结构会产生“重塑效应”,从而有效缓解部分地区、产业过大的就业压力。

其次,南水北调中线工程可提高受水区居民生活质量。我国绝大多数缺水地区呈现典型的“资源型缺水”特征,河南省、河北省、北京市、天津市亦如此,随受水区城市规模逐步增大对水资源需求愈加迫切。通水以前,河南省受水区城镇供水水源主要为黄河水、周边径流或水库和地下水,水质普遍较差<sup>[17]</sup>。尤其是,河南、河北等省份的很多地区为发展经济不得不牺牲生态用水需求,而生态用水的不断减少,造成城市河湖清洁水源缺乏,城市水体浑浊甚至臭气熏天,极大破坏了城市水环境。一到非汛期,很多受水区城市河道干涸,或只有少量排





入的污水。这极大降低了居民的生活质量,甚至影响身体健康。通水后,依托南水北调中线这条纵贯南北的主动脉,河南省受水区城市水资源紧张的状况得到很大改观,增加的水源供给充实了城市生活和生产用水,不仅大幅度缓解用水紧张,而且极大改善环境卫生条件,进而高质量平衡受水区的“水资源区域配置”,最终使受水区城市因长期缺水而形成的环境问题得到根本性改观,居民生活质量提高。例如,河南的水资源总量低于全国的1.42%,而人均水资源量不及全国平均水平的1/5,郑州、濮阳等地人均水资源量甚至低于全国平均水平的1/10<sup>[20]</sup>。2021年7月19日,南水北调中线一期工程自陶岔渠首调水入渠水量累计达400亿m<sup>3</sup>。南水北调工程调来的水(以下简称南水)已成为工程沿线京津冀豫大中城市主力水源。自2014年12月工程通水以来,南水已经由规划时沿线大中城市生活用水的补充水源转变为主力水源,改变了京津冀豫受水区的供水格局。400亿m<sup>3</sup>水量中,除渠中存有的水量之外,已分别向河南、河北供水135亿m<sup>3</sup>和116亿m<sup>3</sup>,向北京、天津供水68亿m<sup>3</sup>和65亿m<sup>3</sup>,惠及沿线20多个大中城市及131个县,直接受益人口增至7900万,比2015年通水1周年时的3800万增加1倍多。其中,北京有1300万人喝上南水;天津、河北分别有1200万人、3000万人受益于南水;特别是南水已成为天津城区生活用水的主要水源,14个主城区居民全部用上南水。天津为提升农村居民饮水质量,建设集中供水厂,拓展自来水管网,并用调来的南水代替地下水,对2817个村286.8万农村人口全覆盖,基本实现了城乡供水一体化。河南郑州、南阳、平顶山等11个省辖市,及邓州、滑县等40个县级市的2400万群众全部用上南水;在河北,工程供水范围已覆盖石家庄、邯郸、邢台等7个省辖市,及定州、辛集等90余个县级市。工程连续安全平稳运行2400多天,极大确保了工程安全、供水安全、水质安全<sup>[18]</sup>。水质达到或优于地表水Ⅱ类标准,不仅可对“水资源配置格局”进行大幅度优化,还可从根本上保障群众用水安全,更可复苏沿线河湖生态环境,最终增强受水区人民群众的获得感、幸福感、安全感。稳定优良的水质极大改善水资源供需关系,从根本上扭转部分地区长期饮用高氟水、苦咸水的局面,确

保人民群众的生命健康,充分保障受水区城市供水和乡村振兴战略的实施。此外,工程对于沿线城市生态环境和地下水源涵养、回升起到极大的改善作用<sup>[19]</sup>。

### 3 经济效应:优化经济结构

首先,南水北调中线工程在一定程度上促进现代农业和旅游业的发展。河南省、河北省都属于农业大省,长期以来为推进城市化进程农业用水份额被严重挤占,有时只能使用污水,严重影响农业生产的质量。调水后,新增的水源除了满足城市发展用水,还能增加农业用水,进而推动农业长足发展。截至2021年8月18日,河南省累计受水137.41亿m<sup>3</sup>,供水范围覆盖河南省11个省辖市市区、41个县(市)城区和64个乡镇的87座水厂、引丹灌区、6座调蓄水库及20条河流,农业有效灌溉面积115.4万亩,受益人口2400万。充沛优质的南水注入农田,极大推动传统农业的提质增效和增收,也大幅度促进了生态农业的健康、可持续发展。为保证水质的安全,关停干渠两侧水源保护区的污染企业,对有些工业企业逐步进行改造和外迁,倒逼企业转型升级,客观上优化了产业布局。南水北调中线工程的实施推动受水区的旅游业进入新的发展机遇期。调水后受水区水量的增加极大改变沿线植被状况,进而逐步提高空气质量,并塑造崭新的绿色长廊,最终对沿线的生态景观形成美化、调节作用。在此情况下,旅游业、文化产业等第三产业获得较程度的发展。例如,河南省淅川县在南水北调丹江沿线建成32个精品生态观光示范园,6.5万渠首农民端上“生态碗”,带动1.2万名贫困户年增收近2万元。通水后,沿线水资源供给量极大增加,而缺水的地区用水紧张局面得到扭转,进而改善投资环境,增强对生产要素的吸引力,塑造新的旅游业发展优势。

其次,南水北调中线工程在一定程度上优化区域产业体系。我国目前整体上处于工业化中期,在调水之前,受水区中河南、河北存在“区域产业体系与当地水资源禀赋不匹配”的问题,水资源承载能力尚未被看成是区域产业布局的决定性因素。水资源是决定区域产业体系形成的多种因素之一,而对于水资源缺乏的地区,水资源的承载水平可对区域产业体系的形成产

生关键性的影响。我国北方地区产业体系的形成受制于经济利益、历史因素等多重因素,如果缺水地区承担着非常重要的经济社会发展功能,节水目标通常会让位于经济社会发展目标,与水资源禀赋相适应的产业体系则很难形成。例如,京津冀地区特别是冀中南地区的产业结构由于缺水的原因无法适应当地水资源禀赋。此外,受水区的工业化发展极不平衡,北京、天津属于发达城市,工业化发展迅速,而河南、河北等受水区的工业化进程落后于全国平均水平,与沿海发达地区存在较大差距。在河南省、河北省的一些地方,黑色金属冶炼及压延加工业、石油加工及炼焦业、化学原料及制品制造业、纺织业、食品加工制造等作为支柱产业,均体现出“高耗水”的特征<sup>[19]</sup>。在水资源紧张的情况下,供水分配通常采取“限农、压工、保生活”原则,部分耗水产业因此停产停工,相应的企业设备闲置,遭受巨大经济损失,与当地水资源禀赋相匹配的区域产业体系也无法建立。调水后,这些地区和行业用水紧张的局面得到极大缓解,并成功解决工业用水企业之间争水的矛盾,退还被挤占的农业和生态用水份额,闲置的生产设备重新投入使用,原先由于水资源短缺而受到限制的项目也得以恢复,受水区丰富的土地、矿产资源的开发得到充分的水资源保障。

尤其是,优质的水资源能极大提高企业产品质量和市场竞争优势,且把高效处理后的城市污水回用于农业生产,并以此为基础充分保障农业灌溉,进而促进农业发展。这不仅能极大减弱甚至解决部分受水区因缺水存在的“二元产业结构”问题,进而推进产业结构的合理化和高级化,而且能极大推动受水区农业经济的稳定、持续、繁荣、增长。调水之后,可充分秉持“节水优先”的发展思路,认真评估受水区的水资源承载能力,逐步推进地区产业结构、产业布局向“节水型”转变,且以此为基础塑造与区域资源禀赋相适应的现代产业体系。对于那些严重缺水地区而言,调水可充分满足生活所需,严格限制高耗水产业,并适当发展部分低耗水产业。对于那些水资源较为丰富的地区,可在妥善处理污水排放的前提下适当发展高耗水产业,最终形成“各展其长”和“优势互补”的区域产业体系。依靠不断优化水资源管理机制和模式,逐步倒逼产业结

构转向升级,进而彰显受水区的生产水平和经济优势,进一步促进区域产业体系逐步“节水化”和“高端化”。

值得注意的是,南水北调工程受水区用水情况的变动显然会造成当地经济社会发展情况的变化,且沿线地区水资源空间配置的重塑会进一步推动产业空间布局调整。南水北调工程虽可缓解沿线地区水资源的发展瓶颈,为受水区的产业发展创造条件,但也很可能会造成受水区之间的资源竞争,进一步加剧跨区域的“产业同构”和“恶性竞争”问题,进而损害区域产业经济的高质量发展,甚至有可能降低南水北调工程中的水资源质量。从这个意义上讲,要高度重视南水北调中线工程的水资源高效利用,可充分依托南水北调工程,进一步促进沿线有关地区的产业结构调整更趋科学、合理,防止沿线区域间的产业同构化,尽可能淘汰落后产能,进一步促进高耗水、高污染产业的绿色转型升级,且以此为基础促进高效节水行业的可持续发展,最终大幅度增加水资源利用的效率和效益。还可严格遵循南水北调中线工程受水区的区域特征、发展优势,深层次推进区域产业特色化、多样化分工,进而逐步产生“上下游产业联动机制”,并以此为基础塑造健全的产品价值链,不断促进区域间的产业深度对接协作。依托南水北调中线工程及其配套工程建设,进一步强化区域间的“产业绿色协同发展机制”,并陆续提升区域产业发展速度和生态环境承载力,最终为产业的高端发展提供相对健全的配套设施和更高端、高级、高质量的环境保护水平。

#### 4 生态效应:调节生态环境

首先,南水北调中线工程能大幅度增加生态用水量。当受水区出现用水紧张状况时,为生产和生活会占用部分生态用水,生态用水减少会破坏城市生态环境。引水后,沿线城市的水资源获得保证,充足的水资源能确保城市生活、生产的正常运作,而原先被挤占的生态用水也会“得到归还”,生态用水量得到提升,生态用水保证率不断提高。这会大幅度提高水资源的自我净化能力,进而改变过去由于水资源缺乏造成河流径流量减少或断流的状况。按照工程建设初期目标,中线供水侧重于解决城市生活、工业用水,并兼顾生态



用水。这能大幅度提高受水区的生态用水量,相应增加用于绿化、营造水体、清污等环境建设和高效治理的水资源,城市生态环境因此获得改善。在优化供水格局的同时,南水北调中线通过生态补水,促进沿线河湖生态恢复,同时为华北地区地下水超采综合治理提供重要支撑。南水北调中线已向北方 48 条河流生态补水 59 亿  $\text{m}^3$ 。其中,华北地区地下水超采综合治理河段回补 37.89 亿  $\text{m}^3$ 。河南、河北境内白河、滹沱河、大清河等河流水清岸美,白洋淀水质持续好转,天津市海河水位升高,北京市永定河、潮白河水量丰沛,这很大程度上归因于“南水”。南水北调工程供水量仍然在持续增长。截至 2020 年 12 月,中线工程向豫冀京津调水 348 亿  $\text{m}^3$ 。2020 年 5 月 9 日至 6 月 21 日,中线一期工程首次以  $420\text{m}^3/\text{s}$  设计最大流量输水,并借机向沿线 39 条河流生态补水 9.5 亿  $\text{m}^3$ 。通过置换超采地下水,实施生态补水,限制开采地下水等综合措施,河湖、湿地面积明显扩大,有效遏制地下水水位下降和水生态环境恶化趋势,促进了沿线生态文明建设。中线工程向受水区 47 条河流生态补水 49.6 亿  $\text{m}^3$ ,滹沱河、滏阳河、南拒马河等“饮”上“南水”,重现生机;华北地下水位下降趋势得到有效遏制,部分地区止跌回升。例如,白洋淀区水位升高 0.4m,水面面积扩大 47.18 $\text{km}^2$ 。

其次,南水北调中线工程能减少地下水开采。南水北调中线工程贯穿四个省及直辖市,受水区很大部分缺少地表水水源工程。用水需求逐步提升,入境水量逐步减少,沿线区域用水相对紧张,地下水开采加剧。频繁、大量的超采造成地下水位持续下降,地下漏斗面积不断扩大。例如,河南省受水区长期以来是地表水、地下水以及部分引黄水组成的供水结构,除少数城市可由西部大中型水库、引黄及河道提引水供水外,其余城市一般是由地下水供水。在河南省原有的供水系统中,8 个省辖市 60% 以上的水资源供给来自地下水,而其余 3 个城市中 40% ~ 60% 的水来自地下水。而这 11 个省辖市市区范围内深层地下水漏斗面积已超出 1000 $\text{km}^2$ ,许昌、焦作、鹤壁等市地下水最大埋深已经超过 60m。河北省累计超采地下水  $170 \times 10^8 \text{m}^3$ ,有 30 多处降水漏斗,总面积  $2 \times 10^4 \text{km}^2$ 。北京市累计超采地下水  $36.5 \times 10^8 \text{m}^3$ ,形成 1000 $\text{km}^2$  的漏斗区,中

心地下水埋深已达 40m。显然,如果这种状况持续下去,将造成地下水位持续下降、地面沉降等一系列环境地质问题,严重的达到破坏生态环境的程度<sup>[20]</sup>。引水后,受水区的地表水水量逐步增加,缓解了水资源紧缺的矛盾,部分水用于地下水回灌,阻止了地下水位大幅度下降和漏斗面积进一步扩大,有效控制和防止地面沉降对环境造成的危害。

最后,南水北调中线工程能进一步改善河湖和城乡生态环境。截至 2021 年 8 月底,南水北调中线工程生态补水量总共超 47 亿  $\text{m}^3$ ,充足的水资源量提高了生态用水保证率,并以此为基础恢复了受水区的水资源净化能力,过去由于水资源的过度开采所造成的径流减少甚至断流的局面得到大幅度改善。同时,受水区的湖泊、水库获得充足的补给,重获生机,而用于绿化、营造水体、清污等环境建设和治理的水资源会相应增加,生态环境获得显著改善。依靠生态补水,推动沿线河湖生态持续恢复和水环境持续改善,既可为淮河、海河、黄河流域河湖水系健康和水生态系统良性循环奠定坚实的基础,又能为受水区尤其是华北地区地下水超采综合治理提供重要的支撑。截至目前,南水北调中线工程总共向北方 48 条河流生态补水达 59 亿  $\text{m}^3$ ,而华北地区地下水超采综合治理河段回补 37.89 亿  $\text{m}^3$ 。利用调水,近年来北京陆续关停自备井、大幅压采地下水,并向重点水源地及城市河湖补水,地下水水位显著回升:自 2016 年起,北京地下水水位开始“止降回升”,而平原区地下水埋深已累计回升 3.72m。调水促进了“枯泉复涌”和“臭水沟摘帽”,为北京注入崭新的发展动力,使之呈现“蓝绿交织”“水城共融”的生态城市新格局。当前,河南、河北境内白河、滏阳河、七里河、瀑河、大清河等多条河流水清岸美,而白洋淀蓄水量达 3.67 亿  $\text{m}^3$ ,水面面积达 267 $\text{km}^2$ ,水质持续好转,湖心区水质稳定为 IV 类,达到近 10 年最好水平。天津市海河水位升高,河道水质明显改善。北京永定河、潮白河水量丰沛,重现清水灵动、鸟语蛙鸣的自然景观。2021 年 6 月 7 日至 7 月 9 日,中线工程向滹沱河、大清河等河北省多条河流实施夏季生态补水,中线总干渠补水总量为 1.14 亿  $\text{m}^3$ 。这极大助力了滹沱河、瀑河、南拒马河生态环境持续向好,子牙



河、子牙新河等已断流的河道重现生机。补水后的滹沱河与 2018 年补水前相比,沿线两侧 10km 范围内地下水水位回升 0.54m,滹沱河广阔的水面有效调节两岸的温度和湿度,生态回补效果显著。南水北调中线工程全面做好水源地水质保护各项工作,夯实了水源地水质保护基础,沿线水质明显提升。以 2016—2018 年全国万元 GDP 平均需水量  $73.6\text{m}^3$  计算,南水北调为北方增加的近 300 亿  $\text{m}^3$  水资源,可为受水区约 4 万亿元 GDP 的增长提供优质水资源支撑。南水北调中线工程供水目标达效速度由“慢”变“快”,中线工程调水量逐年递增,2020 年度实际供水 86.22 亿  $\text{m}^3$ ,超过中线工程规划多年平均供水规模。随着调水量的递增,受水区用水需求由“弱”变“强”,沿线各省(直辖市)在节水优先的前提下,高效利用南水北调水源,改善城乡生态环境。

## 5 系统效应:优化水资源系统

水资源系统可被看成是“由相互联系相互作用的若干要素组成的具有一定功能的水资源的有机整体。”水资源是社会、经济、生态发展的“纽带”,而水资源系统通常由社会经济系统、生态环境系统、水资源本身系统三个部分构成,且三个部分之间相互促进、密切相连,进而产生彰显一定功能的有机整体<sup>[21]</sup>。在社会的高质量发展期间,一定区域的水资源—生态—经济—社会相互交融,进而发展为“水资源系统”。各因素(子系统)可被视为水资源系统的“链条”,当其产生变化时会对其他链条造成不同程度的影响,进而对该系统所起的作用体现为耦合升压效应(加大系统变化)、耦合减压效应(减小系统变化)、耦合恒压效应(系统发生微小扰动)<sup>[22]</sup>。水资源子系统能对区域社会经济、人民生活造成一系列的影响,并连同其他子系统一起支持社会经济系统的可持续和高质量发展。在南水北调中线工程受水区水资源系统与其他子系统的关系中,南水北调受水区社会经济系统包括水资源系统、其他资源系统、农业子系统、工业子系统、其他产业子系统、生态环境系统、社会生活系统,而其中水资源系统由南水北调中线工程系统和受水区当地水资源系统共同构成,且注重“水资源开发利用和保护”和水资源与

社会经济资源、其他自然资源的密切联系<sup>[23-24]</sup>。南水北调中线工程供水进入受水区的水资源系统后,受当地水资源系统的影响,并与当地水资源系统一起支撑受水区经济社会的可持续发展。南水北调中线工程在为受水区带来崭新的水源的同时,也能极大改变水资源系统。

作为水资源与人类社会发展有机联系的“链接”,水资源优化配置涉及的是“把水资源在不同需水单位间的合理分配”,而水资源配置效应涉及的是“把水资源分配到不同用水部门之后形成的一系列收益”。水资源生态经济系统是由“水资源生态系统”和“经济系统”耦合而成的有机整体<sup>[25-28]</sup>。从此意义上看,水资源配置效果是指在特定区域内水资源依靠一系列的优化配置工作,将水资源分配到不同需水部门后形成的“生态效果”和“社会经济效果”。在统筹发展与安全的基础上,科学、合理地推进水资源管理工作的新任务、新要求。南水北调中线工程在其建设运行期间,显然会对全社会形成一系列的影响,尤其是作为国民经济发展基础产业的调水工程,与受水区的农业、工业、服务业发展息息相关,社会各方面的发展与人民生活更是需要水资源的充分保障。南水北调中线工程受水区的城市集中度高、人口密度大,且有些地方向天津、北京等还是全国经济较为发达的地区。通水后,较高的供水保证率、优质的水源直接影响了受水区的城市形态和功能结构,进一步促进受水区的社会经济发展。

南水北调中线工程建设通水以前,每个受水地区城市的地表水、地下水、用水户等构成各自的水资源系统,并逐步产生水资源—生态—经济—社会相互作用、耦合、发展的综合体。特别是,以各地市为单位分别对于水资源的开发利用、水资源的保护、水污染治理等领域进行管理,并陆续产生全套相对健全的水资源开发利用、规划、保护体系。但南水北调工程沿线涉及许多地区,这些地区环境治理状况和经济发展水平很不平衡,这种不平衡造成区域间环境标准很难统一,因而无法产生高效的环境治理协同机制,甚至会造成“跨区域污染转移问题”。

南水北调成败在水质,水资源、水生态、水环境三者应统筹协调、系统治理。调水之后,南水北调中线工



程对各受水区进行有效的“串联”,而受水区的地方政府紧紧围绕南水北调工程,各地之间不断强化沟通,进一步推动政策的“协同性”,并在此基础上大幅度缩小受水区环境治理的制度、政策、体制、机制区域差异,渐进、持续地推动区域间生态环境治理标准趋同,且充分依靠构建“生态环境监测网络”塑造高效率的“区域间环境污染联防联控体系”。值得注意的是,南水北调中线工程把不同的流域耦合为“水资源大系统”,逐步突破已有的地区、流域水资源系统结构,重塑原有的水文环境、径流效应。这会深层次推动调水工程与受水区经济结构、自然环境的相互作用。新增的供水水源在有效优化水资源时空分布格局的基础上,不仅能对原有的水资源子系统的组成结构进行重塑,而且能依靠优化水资源系统结构的关系对社会发展和自然环境产生正向的“反馈关系”。尤其是,充分依托南水北调中线工程,能不断强化制度机制创新建设,全方位突破各水量管控单元的协商、信息共享、监督的机制障碍和保障瓶颈,进而塑造相对健全的流域、行政区域水资源管理密切互动的体制机制、水资源“政府+市场”优化配置体制机制、水资源管控刚性约束指标体系建立等领域进行探索突破,最终把优质的水资源科学配置管理服务体系逐步塑造为支撑受水区各行业新经济、新消费、新功能的高质量发展新驱动力。

## 6 引致效应:构建配套工程体系

在新增水源建设的过程中,迫切需要新的配套设施与原供水系统进行高质量的匹配,为受水区带来崭新的工程建设项目,并以此为基础不断健全供水的结构系统。伴随南水北调中线工程建设完工,为进一步推进工程对经济增长、社会发展效益的推动作用和有效配合受水区的产业转型升级,一系列有关的基础设施正处于逐步健全之中。相应地,城市路网体系陆续增强,城市供电、供水、供热、供气等基础设施加速建设,特别是事关人民群众生活的教育、医疗卫生、文化、体育等公共服务设施获得较大发展,而受水区居民的生活条件同时获得极大改善。配套工程规划始终贯彻“资源节约”“环境友好”“人水和谐”“科学发展”的治水理念,和科学统筹规划、近远期结合,循序渐进、重点

推进的分步建设计划。多年来,南水北调中线河南省配套工程与干线工程同时规划实施,并在实施过程中逐步延伸和完善。配套工程规划建设预算总投资为150.2亿元,除国家财政补助一部分资金之外,省市财政、南水北调基金(资金)及银行贷款按4:4:2的比例筹措。河南省严格按照“以城镇生活、工业供水为主,适当兼顾生态用水”的发展原则,可持续、高质量推进中线配套工程建设。南水北调中线工程规划每年向河南省分配水量37.69亿 $\text{m}^3$ ,扣除引丹灌区分水量6亿 $\text{m}^3$ 和总干渠输水损失,至分水口门的水量为29.94亿 $\text{m}^3$ ,由南水北调总干渠39座分水口门,通过配套网络向南阳、平顶山、周口、漯河、许昌、郑州、焦作、新乡、鹤壁、濮阳、安阳等11个省辖市的34个市县的83座水厂供水。同时,河南省制定“政府主导、分级管理”的建设管理总体思路,高效调动、发挥各级政府的工作主动性和积极性,并以此为基础选择“政府主导、多方筹措”的集资方案,最终形成“安全优质”“畅通高效”的水网体系。南水北调中线总干渠与河北配套工程构筑起安全供水网络体系,通过40余座分水口、128座地表水厂,将优质的南水送达受水市县。

河南省在“十四五”规划中提出,优化南水北调水资源配置,合理扩大供水范围,科学布局调蓄工程,完善供配水体系,让中线工程综合效益得到有效发挥。根据“节水优先”“优水优用”“先近后远”“先易后难”的水资源配置思路,河南省向省内水资源紧缺、水源单一的城市以及无其它替代水源的深层地下水开采区扩大供水,范围涵盖13座省辖市的76座城市及城乡一体化供水涉及的乡镇,扩大范围包含沈丘、项城、孟州、沁阳、林州、开封市区等26座城市(县)。到2025年河南省将从南水北调配套体系就近引水,向中东部地区城市和工业供水,增加改善125万人用水问题,最终受益人口将达到2525万。河南省规划新建供水管道2742km,新建观音寺、沙陀湖、鱼泉、马村4座调蓄工程,形成“以总干渠为纽带,以供水线路、生态补水河道为脉络,以调蓄水库为保障,辐射水厂及配套管网、河湖库网的供配水体系”,进而增强南水北调资源在河南省的利用能力、城乡供水保障能力。未来引江补汉工程实施后,南水北调中线工程年输水能力可扩大为

117.4 亿  $\text{m}^3$ ,这显然能更好地满足用水需求,进一步促进黄河流域生态保护、中原城市群的高质量发展,最终为确保高质量建设现代化河南、高水平实现现代化河南提供水安全保障。

依托南水北调中线工程,河南省受水区严格推进科学管理,不断强化工程运行管理,最终确保“工程安全”“供水安全”“水质安全”。通过高强度推进“精准定价”,对工程土建、绿化日常维修养护项目,合理地列出标准化的工程量清单,并以此为基础不断推动项目定价的透明化和科学化。此外,通过实施科学的“精细维护”,从“编制维修养护项目方案”到“选择维护单位”,从“评定过程质量进度”到“安全文明施工”,都要保证各环节求精求细,并在此基础上全力塑造“生命线精品工程”。为保证供水的安全,南水北调中线工程及其配套工程采用高新科技手段,全方位塑造“自动化调度闸控系统”,高效完成水位、流量、闸门开度等调度信息的自动采集和各类闸门的远程自动控制,并高效结合沿线的水情和工情,高质量制定和科学下达调度指令,而各级调度机构据此全方位开展精准输水调度。为高质量保障“一渠清水永续北送”,中线工程的水质监测体系主要由“1 个中心、4 个实验室、13 个自动监测站、30 个固定监测断面”组成,充分借助现代化检测设备定期检查水质,并依靠视频监控、电子围栏等智能设备与工程巡查人员、水质日常巡查人员、警务室人员联动配合,及时发现、处置水质异常状况。积极推进“智慧中线”建设,有效依托信息化手段,进一步开发“自动化调度”“决策支持系统”“工程巡查维护实时监管系统”,并充分利用信息、移动互联等先进技术,促进中线工程 44 个管理处全场景视频智能分析,为工程安全运行保驾护航。

## 7 结 语

文章把南水北调中线工程驱动受水区高质量发展的基本效应分为社会效应、经济效应、生态效应、系统效应、引致效应。其中,社会效应体现为南水北调中线工程为受水区创造一系列的就业机会和提高受水区居民生活质量;经济效应体现为南水北调中线工程在一定程度上促进现代农业和旅游业的发展、优化区域产

业体系、提高企业产品质量和市场竞争优势以及推动产业空间布局调整;生态效应体现为南水北调中线工程能增加生态用水量、减少地下水开采以及改善河湖和城乡生态环境;系统效应体现为改变水资源系统和支持社会经济系统的可持续和高质量发展;引致效应体现为科学布局调蓄工程,完善供配水体系,让中线工程综合效益得到有效发挥。未来,应对发达国家重大水工程驱动经济高质量发展的案例进行研究,从中探寻相关经验启示。此外,还要增加南水北调中线工程驱动受水区高质量发展的实证研究。◆

## 参考文献

- [1] 于合群. 加强南水北调中线工程运行管理,保障供水安全提高供水效益[J]. 中国水利,2019(23):33-34.
- [2] 张敏. 南水北调中线工程水源区农旅产业耦合发展机制与路径分析[D]. 郑州:中原工学院,2020.
- [3] 郭晶. 南水北调中线工程水源地水源保护生态补偿研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2021.
- [4] 陈晨. 南水北调中线工程累计调水 400 亿立方米[N]. 光明日报,2021-07-20(10).
- [5] 尹彦礼,王琮琪,杨晨,等. 南水北调中线工程通水前后白洋淀湿地生态服务价值变化分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2021(5):38-45.
- [6] 侯红昌. 以创新发展理念引领提升南水北调中线工程综合效益的思考[J]. 河北水利,2020(8):26-27.
- [7] 杨孩,王小军,张俊,等. 南水北调中线工程渠首增调水对水质影响分析[J]. 环境生态学,2021(5):19-24.
- [8] 刘占坤等. 南水北调中线工程沿线地区用水空间竞合关系研究[J]. 中国农村水利水电,2021(6):191-196.
- [9] 付巧峰. 模糊综合评判在水资源价值评估中的应用[J]. 西北大学学报(自然科学版),2008(2):187-191.
- [10] 周维博,李佩成. 干旱半干旱地域灌区水资源综合效益评价体系研究[J]. 自然资源学报,2003(3):288-293.
- [11] KRAJNC D, GLAVIC P. A model for integrated assessment of sustainable development[J]. Resources Conservation & Recycling, 2005, 43(2):189-208.
- [12] 关爱萍. 南水北调工程受水区经济效应评价——以河南省为例[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2008(6):29-36.
- [13] 李善同,许新宜. 南水北调与中国发展[M]. 北京:经济科学出版社,2004.

(下转第 23 页)





# 山西中部引黄工程技术难题及 关键技术研究

张成军 马 菲 石建军

(山西中部引黄工程建设管理有限公司,山西太原 030000)

**【摘 要】** 山西中部引黄工程是山西省大水网建设中的骨干工程,引黄工程面临断层破碎带、喀斯特地下水等复杂地质问题,通过一系列科学试验及研究工作,工程攻克了工程设计、泵站建造和引水隧洞开挖支护等六大工程技术难题,形成了包括取水工程设计建造、TBM 超长深埋隧洞施工、长距离小断面引水隧洞钻爆法施工、工程运行调度和控制在内的四大关键技术,确保了工程的顺利进行,为山西省转型跨越发展奠定了水基础。

**【关键词】** 中部引黄;引调水工程;技术难题;关键技术;TBM;运行调度

中图分类号: TV554

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)04-016-08

## Research on technical problems of Yellow River Diversion Project in central Shanxi Province and key technology

ZHANG Chengjun, MA Fei, SHI Jianjun

(Shanxi Central Yellow River Diversion Project Construction Management Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** The Yellow River Diversion Project in central Shanxi Province belongs to a backbone project during the construction of Shanxi large water network. The Yellow River Diversion Project suffers from complex geological problems such as fault fracture zone, karst groundwater, etc. Six major engineering technical problems are solved in the project such as engineering design, pumping station construction, diversion tunnel excavation and support, etc. through a series of scientific tests and research work. Four key technologies are formed, including design and construction of water intake project, construction of TBM ultra-long and deep buried tunnel, construction of long-distance and small section water diversion tunnel by drilling and blasting method, project operation scheduling and control, thereby ensuring smooth progress of the project and laying a water foundation for the transformation and leap-forward development in Shanxi Province.

**Keywords:** central Yellow River diversion; water diversion project; technical problems; key technology; TBM; operation scheduling

时空分布不均是我国水资源的特点,缓解资源性缺水问题,有必要兴建引调水工程。引调水工程通过

建立江河湖库之间的水利联系,达到提高水资源利用率,强化水安全保障能力的目的。相关资料显示,迄今

收稿日期: 2021-06-22

基金项目: 国家自然科学基金——深部隧洞卸荷岩体水力特性及破坏机理研究(51679215);山西省水利科技项目——长距离输水隧洞水力计算、模型试验及施工支洞的仿真分析与优化

作者简介: 张成军(1969—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事水工结构、材料研究及水利工程建设管理方面工作。

为止全球范围内超过 40 个国家及地区建成了 400 多项规模不一的调水工程(其中不包括主干渠长度小于 20km,年输水量小于 1000 万  $\text{m}^3$  的工程)。

近 50 年来,我国各省份先后兴建了若干个跨流域引调水工程,影响力较大的如南水北调、引大济湟、引黄入淀、引黄济青、引黄入晋、引汉济渭、滇中引水、引江补汉、引江济淮及鄂北调水等工程,这些工程获得了良好的社会生态效益,同时在大跨度渡槽、高压倒虹等输水建筑物方面的研究也取得了突破性的进展,尤其在复杂地质环境中超长深埋隧洞建设的关键技术问题上取得了显著进步。我国引调水工程在建设规模、处理复杂难题的关键技术及水资源高效配置等方面均已达到世界先进水平。

## 1 工程概况

### 1.1 工程规划

山西省中部引黄工程是山西省的大型骨干引水工程,是全省大水网建设中输水线路最长、覆盖市县最广、投资规模最大、受益人口最多的水利工程,规划年供水 6.02 亿  $\text{m}^3$ ,工程从黄河北干上游段天桥电站库区取水,主要输水到山西吕梁山沿线的 16 个县市。

中部引黄工程包括取水工程和输水工程。取水工程设计取水流量 23.55  $\text{m}^3/\text{s}$ ,泵站装机容量 96000kW,水泵设计扬程 200m,装备 7 台机组。从天桥电站提水后,通过无压引水隧洞,从出水池全线自流向下到各个分水口。输水工程线路全长约 384km,整体线路较长;其中隧洞长度约 382km,埋深较大,且工程沿线地质构造与水文地质条件复杂。

### 1.2 水文地质和工程地质

中部引黄工程地下水类型主要有碎屑岩裂隙水以及碳酸盐岩类喀斯特裂隙水等;引黄工程区位于黄河流域,以吕梁山脉中脊为分界线,工程地理环境复杂,汾河水系和入黄支流水系分别位于分界线东西两侧。跨越多个地貌单元,从北向南依次有黄土丘陵区、褶皱断裂高中山区、侵蚀构造中山区、破碎黄土塬区等,地形起伏较大,全线地面高程 908 ~ 1640m。

引黄工程跨越鄂尔多斯断块和吕梁太行断块两大

二级构造单元。其中离石断裂带是位于山西断陷带西侧吕梁隆起的西坡上,由北向南绵延逾 270km 的断裂带,此断裂带局部与中部引黄工程输水线路相距较近甚至相交,在隧洞掘进过程中存在围岩稳定性差和突水等工程地质问题。

引黄工程无论是隧洞总长,还是单个贯通长度都居世界前列,受选线限制,长距离输水隧洞在建设过程中,将不可避免地需要穿越具有复杂地质构造的山岭地区,勘察阶段难以对洞室周边地下水及围岩稳定情况有较准确的掌握。本工程初设阶段勘探钻孔平均深度为 166m,技施阶段平均深度为 230m,同时对个别重要地段进行了深孔钻探、原位测试、地应力测试、抽水试验。但由于工程线路平均埋深较大,最大埋深达到 694m,所以在勘察阶段,由于勘探技术手段、设备和选线的局限性,想要准确查明隧洞水文地质并进行有效的工程地质评价十分困难。

## 2 工程建设技术难题

### 2.1 复杂地质条件高含沙量取水工程设计建造问题

#### 2.1.1 高含沙量引水问题

黄河是高含沙量河流,在黄河大北干流富含泥沙段取水,认识和解决泥沙这项艰巨难题具有重大意义。目前,取水口上游的龙口水库和万家寨水库枢纽已经冲淤平衡,采取蓄清排浑的运行方式,将导致取水口的过沙含量增大,对中部引黄取水不利,影响中长线输水的科学安全调度。

取水口泥沙淤积研究、沉沙池设计、开展高含沙量引水线路中泥沙运动特性和疏导方法等关键技术的研究是一个重要难点。

#### 2.1.2 设计方案和设备比选

首部取水枢纽主要有天桥电站左坝头取水 + 黄崖沟内设泵站和枣林沟沟口取水 + 铁匠铺设泵站两种方案,两种方案的取水条件、引水线路布置、泵站布置、设计扬程、出水压力管线与主干线隧洞的衔接、压矿情况、施工条件等都均有不同。

对于半地下泵站和地下泵站两种方案,需要根据取水水位、出水池水位、泵站机组选型和扬水方案,结



合工程水文地质、高程关系、工程量、运行检修等因素进行综合分析对比。

对于水泵的型式、单机流量以及额定转速等关键参数,需要根据泵站设计流量、扬程、运行时间、泥沙磨蚀、使用寿命以及国内外运行经验等多因素来综合考量。

因此对首部取水枢纽方案比较、取水泵站选址及建筑物选型、水泵选型进行多方面综合比较研究,达到合理优化的目标是十分困难的。

### 2.1.3 中部引黄工程地下泵站厂房围岩稳定及防渗问题

引黄工程取水工程的地下泵站位于天桥泉域排泄区,主要含水层为奥陶系中统上马家沟组灰岩,同时灰岩的渗透系数为  $32.7 \sim 34.9 \text{ m/d}$ ,具有较强的渗透性。泵站埋深区间为  $170 \sim 195 \text{ m}$ ,喀斯特水水位  $834 \text{ m}$ ,地下泵站底板开挖高程  $802.6 \text{ m}$ ,喀斯特水水位高于底板开挖面  $30 \text{ m}$  以上,静水压力较高,经估算如果降水至高程  $802.1 \text{ m}$  时,基坑涌水量为  $33000 \sim 36000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,影响半径达  $1861 \text{ m}$ 。同时,地下泵站顶拱部泥灰岩较软,强度应力比为  $1.56 \sim 3.01$ ,遇水后软化,稳定性极差。

如何确保地下泵站厂房的围岩稳定和地下水处理是一大挑战。

### 2.1.4 泵站工程岩锚梁施工及质量控制问题

中部引黄泵站厂房岩锚梁岩台开挖地质条件为:岩锚梁下端位置处发育一条泥灰岩夹层,该夹层的厚度在  $1 \sim 5 \text{ m}$ ,夹层遇水易软化,强度较低,且在夹层上部灰岩层交界处又发育一层  $10 \sim 20 \text{ cm}$  厚的泥化夹层,对岩锚梁的施工质量安全造成显著影响。同时,随着后续的地下洞室开挖,高强度爆破产生的震动极易使岩锚梁产生裂缝,对岩锚梁的施工质量控制及安全运行造成巨大威胁。

如何确保厂房岩锚梁质量控制及在后续施工中的结构安全,是泵站厂房施工质量的关键。

### 2.1.5 取水口倒悬空腔复杂环境下的围堰施工技术

取水口围堰设计拟采用混凝土拱围堰,基础开挖高程为  $824 \text{ m}$ ,拱中心线半径  $12.35 \text{ m}$ ,中心线长度

$16.28 \text{ m}$ ,围堰厚度  $1.5 \text{ m}$ 。但是通过实地勘察得知:进水口部高程  $824 \text{ m}$  以下一定区域内存在倒悬空腔,导致中墩至上游边墩范围内的拱围堰基础在高程  $824 \text{ m}$  处不能严格依据设计图纸进行布置。需要重点探究在取水口存在局部倒悬空腔的情况下,如何高效、安全地进行围堰施工这一难题。

## 2.2 泉域、地下水影响大,突涌水问题严重

工程线路涉及天桥、柳林和郭庄三个泉域。泉域内喀斯特水位大多位于设计隧洞洞底以下,比如总干桩号  $93+696 \sim 97+384$  和  $119+843 \sim 124+558$  段的碳酸盐岩类裂隙喀斯特水,预计涌水量分别达为  $1.8 \text{ 万 m}^3/\text{d}$  和  $2.3 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ ;东干  $9+109 \sim 11+855$  地段穿过奥陶系中统地层,位于柳林泉域的排泄区,喀斯特发育程度较高,且外水压力大,估计涌水量达到  $13 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

碎屑岩类裂隙水主要赋存在以砂岩、页岩和泥岩为主的二叠、三叠系地层中,该类水埋深不大,富水性不均,特别是三叠系地层中,砂岩含量相对较多,涌水量较大。比如西干桩号  $30+365 \sim 85+600$  地段,长约  $55 \text{ km}$ ,洞顶地层岩性为三叠系中统二马营组砂岩和泥页岩,开挖时涌水量较大,估算涌水量达到  $21 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

## 2.3 软质岩变形大,穿越断层破碎多,不良地质现象突出

工程隧洞穿越的软岩地层较多,以三叠系、二叠系、石炭系、奥陶系、寒武系及前寒武系地层为典型代表,遇到泥灰岩、泥页岩及片岩等,在地应力和地下水的作用下,主要有塑性挤出、塑流涌出及重力坍塌等破坏形式。

工程区的离石断裂带最新活动时代为早更新世,虽然为非活动性断裂,但是距离总干后段及东干首段、西干首段等洞段较近,工程线路约有  $80 \text{ km}$  与之相距较近或者交织,断裂带呈密集劈理带或碎裂岩带,围岩裂隙的主要发育方向与隧洞走向呈小角度相交,位于地下水位以下时富水性强,且有高压特征。在隧洞掘进过程中存在围岩稳定性差和突水等工程地质问题。此外工程沿线共经过 13 条断层,线路附近分布十余条断层,共有 7 条断层处于地下水位以下,其中 3 条断层位于区域喀斯特地下水位以下。



## 2.4 长距离小断面隧洞钻爆法施工难题

本工程设计流量  $23.55\text{m}^3/\text{s}$ , 断面型式有马蹄形、城门洞形和圆形三种。从总干到各个支线, 随着输水量的减少, 断面尺寸也逐渐变小。例如, 浦大支线隧洞的断面净宽  $2.5\text{m}$ , 净高  $3.04\text{m}$ , 直墙段高  $2.2\text{m}$ , 顶拱中心角  $135^\circ$ , 半径仅为  $1.35\text{m}$ 。

隧洞断面小, 开挖支护作业效率低, 有轨运输施工组织不便, 运料出渣、通风、排水等重大技术需要攻克。钻爆法开挖长隧洞, 地质条件极为复杂, 随着地层岩性、构造的不同, 工程区出现各种问题, 如突涌水、塌方、大变形、高外水压力、下穿北川河及省级公路等疑难问题和技术需要攻克。

## 2.5 深埋超长隧洞 TBM 施工难题

### 2.5.1 TBM 性能要求

中部引黄 TBM 段施工的洞段围岩以灰岩、白云岩、泥灰岩及变质岩为主, 硬质岩占绝大多数。TBM 洞段埋深较大, 构造应力较大, 岩性复杂, 特别是东干 TBM 受地下水影响较大, 涌水量达到  $3\text{万 m}^3/\text{d}$ , 这要求 TBM 除了高强度的结构设计外, 还应具有足够的推力储备及扭矩储备以适应高地应力、软岩大变形、喀斯特及突涌水、高外水压力、断层破碎带等不良地质。需要在 TBM 选型以及推进系统推力、刀盘驱动转矩、刀盘驱动功率等主要技术参数方面加强论证。

### 2.5.2 TBM 长距离独头掘进出渣运输及通风问题

总干  $77+040.9 \sim$  总干  $118+395.8$  段为岩石洞段, 长  $41.4\text{km}$ , 采用两台 TBM 对向掘进, 见图 1。其中, TBM1 标掘进  $26.25\text{km}$ 。

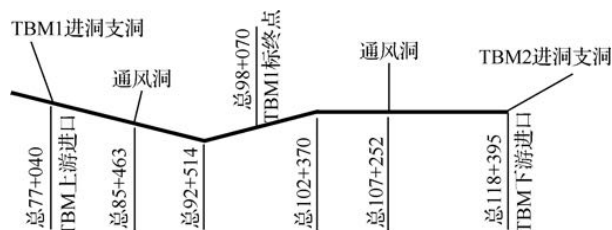


图1 TBM1 标进洞支洞与通风洞布置

由于 TBM1 标通风支洞地处黑茶山保护区, 水资源丰富, 通风支洞开挖过程中地质条件复杂多变, 隧洞涌水量大, 施工进度缓慢, 与主洞 TBM 掘进进度不

能匹配。因此须对 TBM1 主洞的出渣方案及通风系统进行优化, 以满足总干工程进度的需要。

现阶段, 国内外 TBM 独头掘进通风距离多在  $20\text{km}$  以内, 如辽宁大伙房输水工程最大通风距离为  $12.7\text{km}$ , 引大济湟工程采用混合式通风方式, 最大通风距离  $14.3\text{km}$ 。在中间增设风机后, 独头通风距离可达到  $20\text{km}$  以上。

长距离 TBM 出渣运输及通风系统如何进行优化, 解决  $26\text{km}$  独头掘进条件下的出渣及通风问题, 是中部引黄工程施工面临的一大前所未有的难题。

### 2.5.3 不良地质问题处理

针对不良地质条件, 如岩层破碎带、高压富水地层、软弱地层、溶洞等, TBM 适应性较差, 掘进效率低, 处理不当甚至会发生突水、塌方、卡机、淹机等工程事故, 严重影响工程的安全、质量、经济与社会效益。

中部引黄工程总共有三条 TBM 施工段, 全部采用敞开式双护盾 TBM。其中, 中部引黄总干线 3 号隧洞, 长度  $50.9\text{km}$ , 最大埋深  $610\text{m}$ , TBM 掘进面临高地应力岩爆以及软弱围岩大变形卡机等风险。东干 TBM3 标, 洞径  $3.2\text{m}$ , 断面较小, 后配套系统不易布置, 施工较困难, 且面临高压富水段, 不如钻爆法灵活, 存在潜在的工期风险, 需要重点研究。

## 2.6 调水工程运行调度难题

中部引黄工程输水线路总长  $384.5\text{km}$ , 共有 12 个分水口, 主要建筑物包括无压引水隧洞、埋涵、倒虹吸 2 座、渡槽 2 座、地面式闸室 7 座 (进水闸、分水闸、节制闸共 23 个)、地下式闸室 5 座 (进水闸、分水闸、节制闸共 10 个), 无调蓄水库, 具有输水线路长、供水区域广、控制闸泵及分水口多等特点。

由于工程引水隧洞全线无压, 干线没有水库缓冲, 在面对复杂多变的水力工况时, 泵站、闸室、线路需要高度协同, 同时还涉及泵站效能、水量分配、市场运作等多种问题。如何建立科学的运行调度管理系统, 发挥工程的最大效益是一大难题。

此外, 工程上还有平面控制网方案设计, 高墩大跨度预应力渡槽挂篮施工技术等, 都是在中部引黄工程中遇到的技术难点。



### 3 关键技术研究

#### 3.1 复杂地质条件高含沙量取水工程设计建造技术

##### 3.1.1 高含沙量引水线路中泥沙运动特性的研究

黄河干支流属于高含沙水流,多沙河流的运动特性、输沙特性和低含沙水流有很大不同,河床冲淤变化快,水沙需要耦合求解。通过试验分析取水口库区的泥沙特性,测量取水口上下游河段地形,研究分析取水口来水来沙过程,建立了库区多泥沙水深平均的二维泥沙数学模型。同时考虑高含量水沙特性,尤其泥沙恢复饱和系数等参数的取值对于模型的影响进行了深入探讨研究,模型验证后分析预测了库区取水口的河床演变及对取水的影响,成果应用于后续模型试验及输水调度研究。

##### 3.1.2 首部取水枢纽方案、取水泵站选址及建筑物选择、水泵选型等

首部取水将枣林沟取水口优化为义门镇取水口,采用工作闸门设在1号洞首部的无压取水布置方式。根据取水水位、出水池水位、泵站机组选型和扬水方案等,最终确定为地下泵站的方案。取水泵站的选址,在满足地形、地质条件的基础上,兼顾取水口位置与泵站压力管道出水池位置,最大限度地降低了泵站设计扬程,减少了工程运行期管理费用。综合考虑取水口引水引沙情况和泥沙颗粒对水泵机组的磨损情况,在1号隧洞末端布置沉沙池。为保证泵站更好地匹配提水流量、运行灵活,采用5台设计流量 $4.71\text{m}^3/\text{s}$ 的立式单吸三级离心泵,2台设计流量 $6.6\text{m}^3/\text{s}$ 的立式单吸单级离心泵,设计扬程约200m。

##### 3.1.3 泵站厂房施工

首先,在地下泵站周围进行帷幕灌浆封闭地下水,然后对厂房进行分层开挖。

地下泵站处软质岩主要以泥灰岩为主,多分布于地下泵站顶拱及上部位置处。开挖前,先对顶拱分布的泥灰岩层进行高压固结灌浆处理,以提高该岩层的强度和整体性;开挖后及时封闭开挖面,采用格栅钢架和喷锚支护等封闭措施;为防止围岩持续变形,在封闭

措施的基础上,及时对施工厂房顶拱的钢筋混凝土进行衬砌,并借助锚索将围岩和衬砌拉结为一体。

##### 3.1.4 岩锚梁裂缝处理

地下厂房部分岩锚梁施工过程中可见裂缝情况,为解决或防止这一问题,需借助预应力锚杆及固结灌浆等有效方式实施加固操作,通过对地下厂房工程地质条件、施工程序及围岩应力变形监测资料的综合分析,论证了加固处理后岩锚梁的运行安全性,监测数据表明加固处理对于岩锚梁起到了有效的安全保障作用。

##### 3.1.5 取水口预留岩埂围堰施工和预留钢管桩岩坎爆破拆除关键技术研究

针对进水口高程824m以下局部存在倒悬空腔,综合考虑围堰混凝土施工的不利因素,决定采用预留岩埂加固的挡水围堰方案,在围堰内基坑开挖支护,并加强防渗漏的处理。方案实施后,收集了加固期间相应的安全变形监测数据,数据显示预留岩埂趋于稳定状态,证实预留岩埂挡水围堰的加固是一项安全有效的措施。

取水口岩坎工程中,注浆钢管桩的安装密度为 $0.83\text{根}/\text{m}^2$ ,并与周围建筑物过于接近,爆破拆除难度大。如何安全实施高难度爆破拆除需要技术攻关,通过分析工程结构特点和力学性质,合理设计预裂孔、倾斜光爆孔、炮孔间距等爆破参数,来控制爆破块度和爆破效果。爆破拆除按下述方式进行:爆破之前,首先拆除所涉及的内支撑梁,爆破选择的是一次性整体爆破形式。每两个钢管桩之间布设一个炮孔,基岩处相应的单耗维持在 $0.7\sim 0.8\text{kg}/\text{m}^3$ ,底部的单耗值则超出了 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 。从实践来看,爆破能够实现钢管桩、岩石二者的快速有效分离,同时严格控制了爆破界限,能够有效保障区域内建筑物的安全。

#### 3.2 TBM 超长深埋隧洞施工关键技术

##### 3.2.1 TBM 长距离独头掘进出渣运输系统方案及通风系统研究

TBM1标工程隧洞坡度大、独头掘进距离长,洞内最长运输距离达26.3km,掘进段开挖直径为5.06m,成洞段隧洞内净空仅4.3m。

为解决小断面、长距离隧洞出渣难的问题,创新性地研制开发了磁力摩擦式中间加力驱动系统,在辅助

驱动胶带下方设置磁钢,磁力穿透辅助驱动胶带作用于连续皮带机承载胶带的钢丝绳,从而在隧洞空间有限的情况下合理布置设备。该系统避免了在转载式多点驱动情况下,石渣由助力驱动从高处下落对胶带产生的二次冲击荷载。该磁力摩擦式中间加力驱动系统很好地适应了 TBM 施工中不连续出渣及石渣对皮带损伤等问题,确保驱动力始终在合理范围内,保证施工出渣的顺利运行。

TBM1 标段独头掘进长度为 26.3km,如何提高通风保证率,在不损失风量的条件下将进风向下游持续输送,需要考虑通风布置方案。工程成功形成了一套完整的巷道式通风系统(见图 2),包括利用压入式轴流通风机从进洞支洞进风,利用抽出式除尘风机回风,辅以间隔串联布置的接力风机。采用无损接力风机连接片(见图 3),实现对连接片内部压力的实时监控,并变频调节风速,从而减少了串联风机接口处的漏风量,提高了供风量及供风压力,为实现独头 26km 掘进提供了有力保障,单月最长掘进达到 1054m。

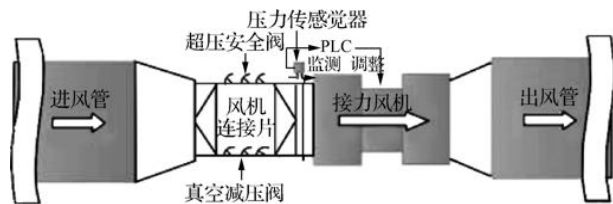


图2 无损接力风机连接片工作原理

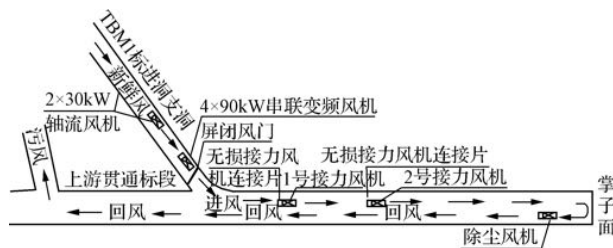


图3 通风系统布置

### 3.2.2 高压富水地层 TBM 施工技术

针对不良地质条件,如岩层破碎带、高压富水地层、软弱地层、溶洞等,TBM 适应性较差,掘进效率低,处理不当甚至会发生突水、塌方、卡机、淹机等工程事故,严重影响工程的质量,安全性和经济性都将降低。

中部引黄工程 TBM3 标施工穿越高压富水破碎带等不良地质段,开挖面及隧道周边发生突涌水,水压

高、涌水量大。由于断面洞径小,TBM 设备占用隧道空间,注浆设备作业受到限制,为正常施工带来了巨大的困难。针对上述问题,提出了“钻孔分流+表面嵌缝+浅层封堵+深层加固”的裂隙注浆堵水处理措施,配合新型的注浆材料,实现了对高压富水裂隙渗流出水的有效封堵,形成了高压富水隧洞硬岩地层径向注浆堵水施工关键技术。

## 3.3 复杂环境下长距离小断面引水隧洞钻爆法施工技术

### 3.3.1 长距离小断面引水隧洞运料出渣、通风、排水技术

由于隧洞断面较小,作业面有限,无法通过增加施工人员和机械设备来提高工作效率,因此引水隧洞运料出渣、通风、排水等方面的合理安排是需要解决的关键技术。

a. 风水管线的布置。通过合理布置隧洞风水管线,减少了风水管线对施工的干扰,有效地解决了隧洞内空间狭小对施工机具的影响,加快了施工进度。

b. 避(调)车洞的选择和布置。必须确定合理的加宽段距离。由于隧洞断面小,无论采用装载机或耙渣机进行装渣,都必须设置加宽段,加宽段设置的间距过大,导致装渣时间长,影响工程进度。加宽段设置的间距小,增加了加宽段数量,隧洞开挖支护量大,不经济,另外加宽段断面较大,施工难度大,导致进度较慢。因此必须合理确定加宽段距离。

c. 运输出渣。针对小断面、大坡度的施工支洞,采用矿用提升绞车加平板运输车的配套运输系统施工,这种施工方案大大降低了安全风险,具有施工速度快、效率高、造价低等优点,而且有效解决了绞车拉矿车传统运输出渣、混凝土运输过程中多次装卸倒运问题,工程质量得到保障,实践证明平板提升系统将有轨运输变相过渡成了无轨运输方式,此类运输方案比传统的有轨运输月进尺平均提高了 20m,减少投入两台挖机或装载机进行二次装车,节省多次倒运工时,施工进度明显提升。

d. 针梁台车衬砌快速施工组织。超前支护、钻爆开挖、装渣出渣、立架、喷锚等工序交替作业频繁。工





序多、衔接频繁、相互干扰大,通过对工序和施工工艺的调整,解决了隧洞断面狭小、无法连续作业的问题,提高了衬砌的施工速度。

### 3.3.2 小断面隧洞钻爆法开挖段突涌水灾害治理的注浆技术

现实隧洞开挖过程中,尽管有各种地质预报和探测手段,但是不可避免地遇到不良地质时,容易发生突涌水。治理的原则是:在满足工程安全顺利施工的情况下,尽量减少对地下水及周边环境的不良影响。

工程中应根据实际情况,包括围岩的隔水性能、涌水量和压力、涌水补给路径和范围、工程进度和预算以及地下水水位下降对环境的影响等,来综合考量“排”和“堵”的结合。针对高水压小断面引水隧洞的特点,提出了基于掌子面卸压、SYDH快速速凝剂、简易孔口止浆阀等技术的超前帷幕注浆方法。具体做法如下:沿隧道开挖轮廓线径向布置钻孔,按一定间距钻孔,采用排水减压技术,在开挖面上钻若干个排水孔;然后注入双液浆充填节理裂隙,增强围岩强度同时封堵涌水路径,达到固结围岩和止水目的,并建立了相应的施工规范,在实际工程中得到了应用,效益显著。

### 3.3.3 浅埋隧洞下穿复杂建(构)筑物关键技术

针对浅埋隧洞下穿复杂建构筑物,提出了综合考虑隧道自身安全与环境安全风险相结合的施工控制技术标准。内容涵盖施工前的建筑物现状调查和危险性分级;施工方法的分析和拟定;施工过程监测和过程控制;工后评估和恢复方案制定。克服了传统地下工程施工只考虑隧道自身安全或者环境安全风险的情况。

## 3.4 调水工程运行调度与控制关键技术

工程调度遵循监测立体、决策科学和控制自动的思路,构建工程调度与运行管理系统,保证工程安全运行,全面实现工程的信息化管理和科学调度。首先在工程沿线布设数据采集和传输设备,采集流量、水位、水压、水质、泥沙等数据,构建实时立体监测体系;开发建立水力水质仿真模型、水资源优化配置、系统优化控制模型等,对水资源调度方案进行模拟、研究和分析,为科学调度提供决策支持;最后建设稳定可靠、安全快捷的闸(泵)站监控操作系统,实现调度方案的自动化

和精准化。

## 4 结 语

中部引黄工程建设在水泵选型、厂房分层开挖、厂房防渗处理、取水口泥沙淤积研究、长距离深埋隧洞施工关键技术、复杂环境下小断面引水隧洞长距离施工、下穿大河和公路施工等方面积累了丰富的经验,由于工程规模巨大,涉及难点众多,创新点多,在遇到很多困难时,国内外没有太多经验可以借鉴,其工程综合难度达到世界级。

中部引黄工程将从根本上解决了山西经济发展的短板问题,保障山西省水资源宏观调控战略的有效实施,为山西省转型跨越发展奠定水基础。中部引黄工程的成功建设,将对类似大中型跨流域引调水工程起到重要的借鉴作用,为长距离调水工程建设和安全运行提供技术和实践支撑,具有显著的社会和经济效益。◆

## 参考文献

- [1] 钮新强.南水北调中线工程穿黄隧洞关键技术研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(6):42-46.
- [2] 贾增明,胡安静,孔买群.山西引黄水源工程地下泵站厂房围岩位移应力分析[J].云南水力发电,2019,35(4):108-113.
- [3] 张明洁.中部引黄水源工程取水口岩坎围堰拆除方案设计[J].山西水利,2019(10):22-24.
- [4] 杨鲲鹏.中部引黄工程双护盾TBM掘进隧洞堵水施工实践[J].山西水利,2016(11):44-45,47.
- [5] 田志斌.深埋长隧洞突发涌水时分流多级排水系统设计研究[J].水利建设与管理,2019,39(10):16-20.
- [6] 杨井国,何无产,姜克栋.严寒地区冬季隧洞湿喷施工技术研究[J].水资源开发与管理,2019(2):62-65.
- [7] 郝永刚.山西省中部引黄工程地下泵站围岩稳定分析评价[J].水利建设与管理,2020,40(8):5-12.
- [8] 马浩.TBM综合支护系统在中部引黄引水隧洞不良地质段的应用[J].建筑机械,2018(4):59-62.
- [9] 杨石眉.离石断裂活动性分析及其对中部引黄工程影响评价[J].山西水利科技,2016(4):10-13.
- [10] 郭明道.山西省中部引黄工程与公路交叉情况分析[J].山西水利,2016(8):45-45,52.
- [11] 黄伟山.小导管注浆技术在小断面隧洞涌水治理中的应用[J].水利科技,2017(3):33-34,50.

- [12] 咎伯阳. 中部引黄工程小断面引水隧洞通风设计[J]. 山西水利科技, 2017(1): 36-38, 50.
- [13] 赵经纬. 中部引黄工程引水隧洞下穿高速公路超前大管棚施工方案研究[J]. 山西水利科技, 2018(3): 24-27.
- [14] 吴小静. 水工隧洞建设对区域水资源优化的影响[J]. 水资源开发与管理, 2017(10): 11-14.
- [15] 谈英武, 景来红, 杨维九, 等. 我国跨流域调水的长隧洞工程[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(5): 1-6.
- [16] 姜文峰. 山西省中部引黄工程沉沙池设计[J]. 山西水利, 2014(6): 48-49.
- [17] 李明. 山西省中部引黄工程水泵泵型优化研究[J]. 太原理工大学学报, 2013, 44(1): 67-70.
- [18] 刘浩阳, 赵根, 刘美山, 等. 预留钢管桩岩坎爆破拆除关键技术措施研究[J]. 爆破, 2020, 37(2): 92-96, 102.
- [19] 赵弟明. 浅埋深引水隧洞下穿高速公路施工技术[J]. 河北水利, 2020(5): 13-14, 43.
- [20] 赵琦彦. 浅埋暗挖隧洞下穿居民区安全施工技术[J]. 山西水利, 2015(12): 39-40.
- [21] 张大牛. 山西中部引黄工程小断面隧洞快速掘进施工方法[J]. 山西建筑, 2016, 42(5): 182-184.
- [22] 田志斌. 山西中部引黄工程 TBM 卡机成因分析及脱困技术[J]. 水利水电快报, 2018, 39(5): 31-34.
- [23] 孟元媛. 中部引黄工程首部枢纽泵站厂房方案比选[J]. 山西水利, 2018, 34(4): 49-50.
- [24] 冯璐, 田志斌. 山西中部引黄工程 TBM 长距离独头掘进通风研究[J]. 人民长江, 2018, 49(4): 67-70, 82.
- [25] 李新阳, 冯信, 黄亮, 等. 山西中部引黄泵站工程岩锚梁施工及质量控制[J]. 云南水力发电, 2019, 35(4): 120-126.
- [26] 刘春发. 国内外大型调水工程现状和启示[J]. 水科学与工程, 2009(5): 77-78.
- [27] 刘冀山, 肖晓春, 杨洪杰, 等. 超长隧洞 TBM 施工关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2005(4): 37-43.
- [28] 钮新强, 张传健. 复杂地质条件下跨流域调水超长深埋隧洞建设需研究的关键技术问题[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(4): 523-536.
- [29] 胡泉光, 陈方明, 陈恩瑜. 深埋长引水隧洞 TBM 施工关键技术探讨[J]. 人民长江, 2015, 46(7): 19-21.
- [30] 杜小洲. 引汉济渭秦岭输水隧洞关键问题及其研究进展[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 138-142.
- [31] 王旺盛, 陈长生, 王家祥, 等. 滇中引水工程香炉山深埋长隧洞主要工程地质问题[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(9): 154-159.
- [32] 王慧, 韦凤年. 南水北调关键技术突破对推动我国水利技术进步具有重要意义——访中国工程院院士钮新强[J]. 中国水利, 2019(23): 29-32.
- [33] 张中东, 桂绍波, 万继伟, 等. 黄金峡水利枢纽工程大型水泵机组选型设计及运行调节研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 49-54.

(上接第 15 页)

- [14] 何维达, 陆平, 邓佩. 北京市供水与用水政策的一般均衡分析——基于水资源 CGE 模型[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2015(2): 72-76.
- [15] 赵晶, 毕彦杰, 韩宇平, 等. 南水北调中线工程河南段社会经济效益研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019(6): 855-856.
- [16] 吴海峰, 苗洁. 论南水北调供水效益充分发挥的制约及对策[J]. 潍坊工程职业学院学报, 2019(5): 5-10.
- [17] 李耀忠. 南水北调中线“两个所有”现场运行管理实施模式初探[J]. 中国水利, 2019(23): 40-42.
- [18] 冯琳伟, 高亮, 杜青辉. 焦作市南水北调工程受水区水资源优化配置研究[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2020(3): 5-10.
- [19] 雷小牛, 邱远尧, 王忠山, 等. 水价提升的波及影响与分析研究[J]. 中国水利, 2005(13): 107-112.
- [20] 李世军, 黄喜良, 李伦. 河南省农村饮水事业发展探讨[J]. 河南水利与南水北调, 2020(4): 27-28.
- [21] 李洋. 南水北调对受水区水资源配置效果影响评价研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- [22] 楚文海. 脆弱生态约束下典型喀斯特流域水资源可持续利用评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2007.
- [23] 王浩, 殷峻暹. 洪水资源利用风险管理研究综述[J]. 水利发展研究, 2004(5): 4-8.
- [24] 陈南祥. 复杂系统水资源合理配置理论与实践——以南水北调中线工程河南受水区为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [25] 吴泽宁. 基于生态经济的区域水质水量统一优化配置研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [26] 邢端生. 基于可持续发展的水资源配置方案评价研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.
- [27] 陈丹, 陈菁, 吕祝乌, 等. 水科学定量研究新思路: 能值理论与方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2008(2): 1-5.
- [28] 蒋桂芹. 水资源对区域经济社会贡献的能值分析研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.



# 涵盖生命周期关键点的边坡生态设计方法研究及应用

丁培

(塔里木河流域干流管理局,新疆 库尔勒 841000)

**【摘要】** 为了模拟生态工程边坡的演变,并设计出有效的生态工程解决方案,必须考虑植物根系的发育和惰性材料的衰变。生态工程动态变化的特性使得在设计工作过程中必须考虑到生物的不同阶段。针对塔里木河流域,提出了一种涵盖生态工程边坡生命周期中不同关键点的设计方法,并将其应用到设计阶段。通过对设计阶段关键点的检测,提出了一种改进的生态工程设计方案。采用该方法进行外部和内部稳定性检验,其相应的安全系数值随着时间的增加而增加,说明这两种演化过程之间不存在冲突。

**【关键词】** 生态工程;塔里木河;边坡稳定

中图分类号: U416

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)04-024-05

## Research and application of slope ecological design method covering key points of life cycle

DING Pei

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

**Abstract:** The development of plant roots and the decay of inert materials must be considered in order to simulate the evolution of ecological project slopes and design effective ecological project solutions. Different stages of biology must be considered during design work due to the dynamic change characteristics of ecological projects. A design method covering different key points in the life cycle of ecological project slope is proposed and applied to the design stage aiming at Tarim River Basin. An improved ecological project design plan is put forward by detecting the key points in the design stage. The external and internal stability is tested by the method. The corresponding safety factor values is increased with the increase of time, thereby indicating that there is no conflict between the two evolutionary processes.

**Keywords:** ecological project; Tarim River; slope stability

生态工程采用植物与惰性结构相结合的方法来控制土壤侵蚀和滑坡,与传统的土木工程解决方案相比,生态工程解决方案具有更经济、易于施工、低景观影响等优势。生态工程遵循了可持续性的设计理念,使用

在工程附近的木材或岩石等材料,在降低生态工程成本的同时,保护岸坡稳定,同时由于根系与土壤的相互作用随着时间的增加越发牢固,从而实现边坡的长期稳定土壤内部重要变化发生在植物开始生长和繁殖新

收稿日期: 2021-06-16

作者简介: 丁培(1987—),女,本科,工程师,主要从事水量调度、水资源管理、工程运行管理、生态输水、防汛调度等工作。



根的时候。此外,作为生态工程技术中使用的惰性结构之一,木材通常不经过处理,其物理性能会随着时间的推移而衰减。因此,对于生态工程边坡设计,必须在整个边坡设计寿命周期内更明确地考虑时间和构件耐久性问题。

此外,作用在边坡上的载荷或应力的变化也会导致边坡稳定性的变化。因此,往往需要针对不同情况进行稳定性分析,反映边坡生命周期的不同阶段。在边坡设计寿命期间,涉及到生态工程技术稳定性检测的两个主要因素是木材和植物。木材会随着时间的推移而退化,而植物的根部会发育和生长。

本文在木材使用寿命期内结合木材退化和植物的生长过程对工程稳定性进行分析,提出一种新的生态工程设计方法,该方法整合惰性构件和植物之间的应力转移过程,将这两个典型的动态特性和生态工程的演变相结合,并进行案例研究,证明了该方法的可行性。

## 1 材料特性和研究方法

### 1.1 材料特性

#### 1.1.1 木材耐久性

木材的自然耐久度因木材种类而异。木材不同部分的耐久度也不同,通常,木材边缘是最不耐腐的部分;而心材不能经过处理,因此其耐久性取决于其自然耐久性等级。地面上未经处理的木材在经过一段时间后,将由外而内地腐烂。木材分区和衰变过程见图1,衰变深度见图2。木材的衰减率 $r$ (mm/年)可由下式计算:

$$r = k_{\text{木}} k_{\text{e}} \quad (1)$$

式中: $k_{\text{木}}$ 取决于木材的类型; $k_{\text{e}}$ 取决于当地的气候条件,例如:平均降水量、年平均气温和干燥的月份数。

木材的衰变过程是由外向内进行的,而剩余的木材保持了原始的力学性能。每一层边材衰减的滞后时间 $t_{\text{边材滞后}}$ (年)可以根据边材衰减率 $r_{\text{边材}}$ 估算:

$$t_{\text{边材滞后}} = 5.5 r_{\text{边材}}^{-0.95} \quad (2)$$

如果在 $t$ 时刻衰减深度为 $d_t$ ,则抗弯强度 $R$ 可由

下式计算:

$$R = \frac{\pi}{32} (D - 2d_t)^3 f_d \quad (3)$$

式中: $D$ 为初始直径,mm; $f_d$ 为设计强度值,kPa,采用特征强度值和结构设计标准计算,未腐烂木材的特征强度值可以在文献中找到或在实验室中测量。

木材的使用寿命被认为是其剩余强度下降到原始强度70%的时间。对于初始直径为 $D$ 的圆形木材,在弯曲作用下,其使用寿命下的衰变深度 $d_L$ 可由下式计算:

$$d_L = \frac{1}{2} \times (1 - 0.7^{1/3}) D \quad (4)$$

使用寿命 $L$ (年)可由下式计算:

$$L = t_{\text{滞后}} + \frac{d_L}{r} \quad (5)$$

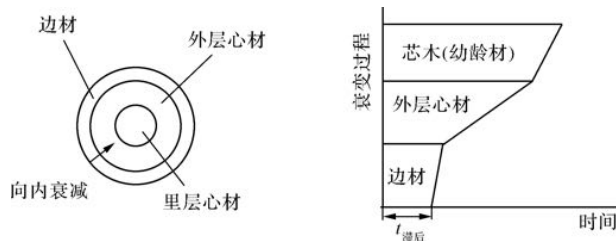


图1 木材分区和衰变过程

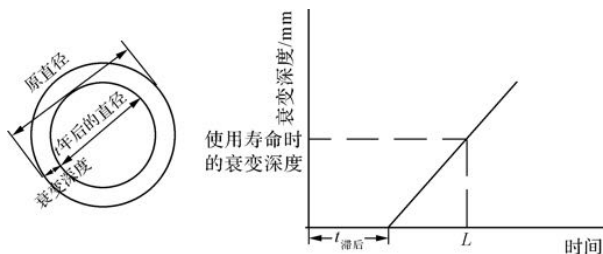


图2 木材的衰变深度

#### 1.1.2 植物

植物对边坡稳定性既有有利影响,也有不利影响,是生态工程中最具变化性的因素。根系承担荷载并将应力分布到土壤中,因此与植物生长或根系分布深度相关的模型引入生态工程技术设计中具有重要意义。根的大小和长度不同,具有不同的抗拉强度和固结度。因此,在变形的土壤根系中,主要有两种破坏机制:根的拉伸断裂模式和根的拔出模式。初步评估植被加

固,一种简单的破坏模型可以假定所有的根在荷载作用下受拉断裂,公式如下:

$$c_r = 1.2RAR(z) \cdot T_r \quad (6)$$

式中: $c_r$ 为黏聚力,MPa; $RAR(z)$ 为 $z$ 处的根系横截面积与土体剪切面积之比; $T_r$ 为根系抗拉强度,MPa。

由于其简单性,减少了输入参数深度 $z$ 处的根面积比和根系抗拉强度 $T_r$ 。需要注意的是,该模型只考虑采用小根(直径小于10mm)来计算增加的黏聚力值( $c_r$ ),因为大根仅作为结构锚固物,对边坡稳定有利。

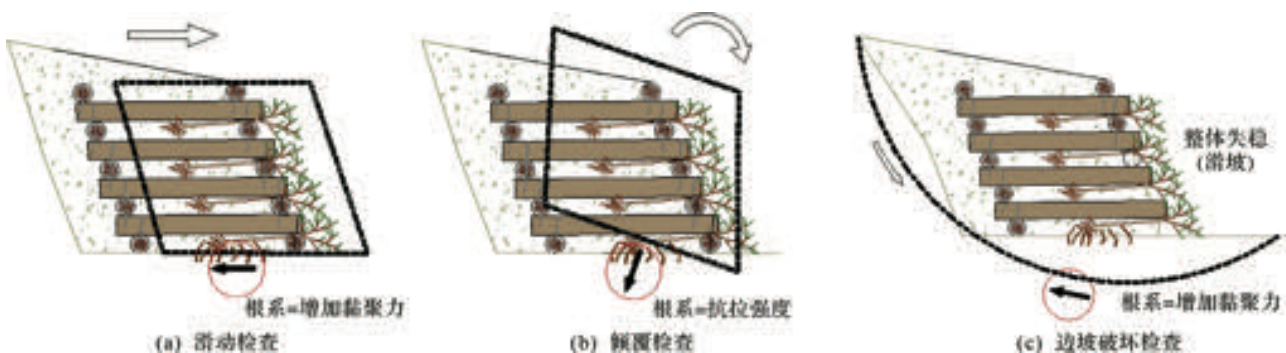


图3 根系作用示意

## 1.2 研究方法

为了分析生态工程解决方案的实用性,评估其随时间对系统稳定性的影响,需要对不同时期的边坡稳定性进行检查。基于耐久性的考虑,生态工程边坡设计必须包括至少两个阶段:植物生根前和生根后对土力学特性的影响。当使用未经处理的木材时,可以通过使用寿命概念作为基础,在设计阶段引入衰变过程演变。所使用的惰性材料必须在其使用寿命内提供有效的稳定作用,因为随着时间的推移,所有元素相互作用会影响系统的整体安全系数。

将木结构构件的使用寿命假定为设置一个阈值,超过这个阈值,植物和木材之间就没有相互作用。在没有使用木材的情况下,从设计的角度来描述生态工程工作的整体演变,需要一个包含全部植物效果的附加阶段。在使用木材的情况下,根据式(5)计算木材使用寿命 $L$ ,定义为附加阶段。

### 1.1.3 工程内外稳定性

为确保工程稳定性,生态工程须从结构的角度进行检查,检查必须包括衰变和植物效应,以便反映生态工程在使用寿命期间的变化。通过比较素土和植被护坡的边坡安全系数(FoS)来展示使用生态工程护坡的稳定性增强效果。边坡破坏可分为局部破坏、倾覆破坏和整体滑动破坏,因此边坡稳定性主要对以上三种破坏方式进行分析,见图3。

## 2 案例研究

### 2.1 研究区概况

研究站点位于新疆塔里木河流域,塔里木河干流位于塔里木盆地北缘,起始于阿克苏河、叶尔羌河和田河的交汇处肖夹克,归宿于台特玛湖,全长1321km。地理位置为北至天山南麓山前倾斜平原的边缘,南抵塔克拉玛干大沙漠,西端为农一师阿拉尔垦区,东与孔雀河及其尾间罗布泊洼地以西为邻。

### 2.2 材料特性

考虑到土的类型和渗透性,即粉砂,只考虑排水条件。通过剪切试验得到的土体强度特性:有效黏聚力为7kPa、有效内摩擦角为30°、土壤重度为20.1kN/m<sup>3</sup>。根据可持续设计理念,生态工程结构的木材取自工程附近的胡杨,胡杨芯材的耐久性 $K_{\text{木}}=1.30$ ,边材的 $K_{\text{木}}$ 值为5.44。对于永久荷载,修正系数为0.5。材料系数为1.3,因此,设计抗弯强度为7.69N/mm<sup>2</sup>。木材密度插值显示,对于胡杨的含水率为21%特性,木材密

度为  $525.25\text{kg/m}^3$ 。活枝由长  $1.80\text{m}$  的怪柳组成,直径  $10\text{mm}$ 。

### 2.3 建议的生物工程方案

经过对现场地形的分析,决定设计一个  $1.8\text{m} \times 1.8\text{m} \times 5.0\text{m}$  的木垛墙。回填区的坡度设计为  $30^\circ$  并与周围的地形相匹配。每排原木每米使用三根怪柳活枝,见图 4。

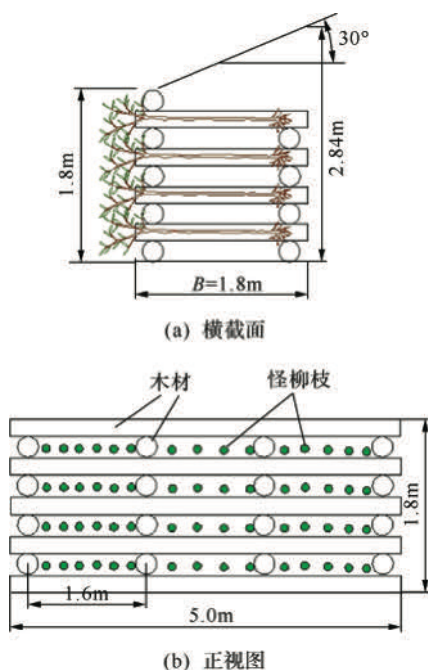


图 4 木垛墙几何形状

内部稳定性检查是针对“地下条件”进行的,即木材被埋在地下的临界情况,见图 5。从耐久性和弯曲应力两方面来看,外排的原木都被认为是最关键的。内排的原木将受到全年较低的温度和湿度变化的影响,此深度的氧气水平较低,因此,生物活动将较低。最后,从弯曲分析的角度来看,外排不像内排那样在前

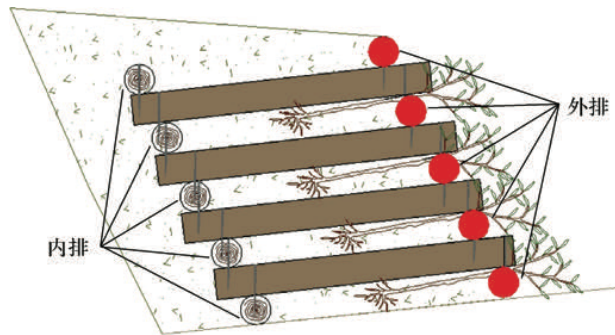


图 5 木垛墙的自然耐久性情况(地下条件)

面有土来抵消土推力。木垛墙总的单位重量可以通过考虑原木所占体积和土壤所占体积来计算,则木垛墙的重度为  $61.96\text{kN/m}$ 。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 木材特性

采用的衰减模型显示,  $r_{\text{心材}}$  为  $2.04\text{mm/年}$ ,  $r_{\text{边材}}$  为  $8.52\text{mm/年}$ ,  $t_{\text{滞后}}$  为  $0.72$  年,  $L$  (使用寿命) 为  $6.22$  年。基于使用寿命值 ( $L = 6.22$  年), 以及本案例研究的目的, 定义了两个额外的设计阶段: 一个  $t = 3$  年, 另一个  $t = 6$  年。

### 3.2 植物特性

5 种被调查植物的抗拔力随株龄增加而增加。3 年和 6 年的最大拉拔力分别为  $1.90\text{kN}$  和  $3.87\text{kN}$ 。考虑到壁面设计中每米 3 株,  $t = 3$  年和  $t = 6$  年用于倾覆稳定性验算的拔出值分别为  $5.7\text{kN}$  和  $11.61\text{kN}$ 。由于根在原木墙的外侧发育较好, 拉拔力的力臂计算为  $B/4$  (其中  $B$  为原木墙底部的长度, 见图 4)。

根抗拉强度的指数规律为  $T_r = 28.7981D^{-0.87155}$  MPa ( $R^2 = 0.88$ )。对于滑动验算, 根据式 (6) 进行, 在选定时间情景下,  $t = 3$  年和  $t = 6$  年的附加黏聚力值分别为  $4.6\text{kPa}$  和  $5.93\text{kPa}$ 。

### 3.3 稳定性检测

外部稳定性检查见表 1。内部稳定性检查见表 2。

表 1 为所选时间段 ( $t = 0$  年、 $t = 3$  年、 $t = 6$  年) 的外部稳定性检验。

表 1 不同时间段的 FoS 值

时 间 项 目	$t = 0$ 年 (无植物影响)	$t = 3$ 年	$t = 6$ 年
FoS 滑动	1.46	1.78	1.87
FoS 倾覆	2.15	2.25	2.36
FoS 整体 (滑坡检查)	1.47	1.49	1.53

表 2 为所选时间段 ( $t = 0$  年、 $t = 3$  年、 $t = 6$  年) 内稳定性检验。弯曲跨度等于  $1.6\text{m}$ 。  $M$  为设计弯矩; 抗弯强度  $R$  可根据式 (3) 计算得出。



表2 不同时期的稳定性检验

时 间 项 目	$t=0$ 年	$t=3$ 年	$t=6$ 年
设计弯矩/(kN·m)	6.02	6.02	6.02
衰变深度/mm	未衰变	5.67	11.21
直 径/m	0.2	0.18	0.17
抗弯强度/(kN·m)	6.05	5.07	4.23
评 价	内部稳定性 已验证	内部稳定性 未验证	内部稳定性 未经验证, 木结构不再 发挥稳定作用

从表2可以看出,在 $t=3$ 年验算中,内部稳定性没有得到验证。这意味着,该结构可能会倒塌。在这一阶段,有两种选择:增加木材的直径,或降低弯曲构件的跨度,这将增加材料要求,但将更持久。在这种新设计下,木垛墙能够使用足够的时间,因此植物能够充分发挥其稳定作用。因此,提出的新方法可检测到结构将不稳定的情况,没有给足够的时间让植物生根加固边坡。传统的设计不会发现这种情况,因此在生态工程设计阶段的改进已经被证明。

#### 4 结 语

在设计阶段就必须考虑生态工程的动态特性,以真实地模拟和估算生态工程的演化过程。参数,如木材的衰变过程和变化的植物特性作为稳定因素,必须整合到生态工程的设计方法中。本文提出了一种考虑生态工程特殊性的方法,为了在确定的设计时间范围内覆盖工程的演变,提出了一种分时阶段的设计方案。该方法较好地反映了典型生态工程干预过程中的应力转移现象。与传统工程设计方案不同,该方法能够检测关键设计情况。通过提出的方法,确保了植物生长和繁殖新根的必要时间。

生态工程监测数据的积累将是一个重要的信息来源,既可以更好地定义关键的时间阶段,也可以收集关于木材衰变、根系形态和植物进化等方面的数据。◆

#### 参考文献

- [1] 王捷. 浅析上海市几种常用生态护岸型式的设计思路[J]. 水资源开发与管理,2019(11):42-46,4.
- [2] 胡伽. 高边坡绿化喷植技术在月潭水库工程的应用[J]. 水利建设与管理,2018,38(12):14-16,21.
- [3] 克衣木·买买提. 浅谈塔里木河流域干流生态恢复与治理[J]. 资源节约与环保,2020(12):22-23.
- [4] 王珊珊,王金林,周可法,等. 塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应[J]. 水资源保护,2021,37(2):69-74,80.
- [5] 李晓飞,范贵隆. 边坡生态工程技术现状综述及展望[J]. 水利建设与管理,2012(7):65-68.
- [6] 管文轲,赖帅彬,张和钰,等. 塔里木河下游胡杨更新主要限制因素及应对措施[J]. 防护林科技,2021(1):67-70,81.
- [7] 谢潇,孙秀山. 边坡生态防护技术研究[J]. 绿色科技,2020(4):192-194.
- [8] 姜亚. 宿迁船行灌区生态护坡技术研究[J]. 水资源开发与管理,2018(6):37-40.
- [9] 王克响,宗全利,蔡杭兵,等. 基于 BSTEM 模型的植被根系对塔里木河岸坡稳定性影响过程模拟[J]. 干旱区资源与环境,2021,35(3):118-125.
- [10] 王海平. 边坡生态复绿治理工程技术探讨[J]. 世界有色金属,2020(7):294-295.
- [11] 贾春旺,刘常青,黄建华,等. 边坡生态复绿治理工程主要施工技术研究[J]. 建筑工程技术与设计,2020(12):1851.
- [12] 高小虎,黄翔,田露. 水利水电工程边坡防护和植被恢复设计[J]. 水资源开发与管理,2017(9):38-42.



# 基于水利仿真模拟设计的金湖县城西河节制闸加固结构分析研究

陈冬冬 李 杰 卞 威

(淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 224300)

**【摘 要】** 针对金湖县城西河活水工程节制闸工程加固设计方案开展参数优化,利用仿真计算平台建立计算模型,经模拟,锚固洞部位拉应力为最大,锚固洞、闸顶平台最大拉应力与纵向间距参数为正相关,但锚固洞最大拉应力与横向间距参数呈二次函数关系,且为负相关;闸顶平台最大拉应力受横向间距参数影响较小,稳定在 1.03MPa;锚块最大拉应力受纵向设计参数抑制影响,间距增大 20mm,平均可削弱其 14.7% 的拉应力,但其受横向间距参数影响较小,稳定在 1.5MPa。特征部位最大压应力虽纵向设计参数为递增,但横向间距参数影响下锚块、锚固洞变化较小,稳定在 11.2MPa、15.8MPa,闸顶平台在横向间距 90mm 后递减。研究认为纵向、横向设计参数分别为 160mm、100mm 时加固方案最优。

**【关键词】** 水利仿真;金湖县;节制闸;加固;锚索

中图分类号: TV698

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)04-029-06

## Analysis and research on strengthening structure of Chengxihe regulating sluice in Jinhu County based on hydraulic simulation design

CHEN Dongdong, LI Jie, BIAN Wei

(Huai'an Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an 224300, China)

**Abstract:** Parameters are optimized aiming at the strengthening design scheme of Chengxihe runoff water project regulating sluice project in Jinhu County. The calculation model is established based on the simulation computing platform. The tensile stress of the anchor hole site is the maximum. The maximum tensile stress of the anchor hole and the sluice top platform is positively correlated with the longitudinal spacing parameters. However, the anchor hole maximum tensile stress and the transverse spacing parameters show quadratic function relation, and they are negatively correlated. The maximum tensile stress of the sluice top platform is less affected by the transverse spacing parameters, which is stable at 1.03MPa. The maximum tensile stress of the anchor block is inhibited by the longitudinal design parameters. The spacing is increased by 20mm, and the tensile stress can be weakened by 14.7% on average. However, it is slightly affected by the transverse spacing parameters, which is stable at 1.5MPa. Although the longitudinal design parameters of the maximum tensile stress in the characteristic site is gradually increased. However, the change of the anchor block and the anchor hole is small under the influence of the transverse spacing parameters, which is stable at 11.2MPa and 15.8MPa respectively. The maximum tensile stress of the sluice top platform is gradually decreased at the transverse spacing of 90mm. It is considered that the

收稿日期: 2021-04-21

作者简介: 陈冬冬(1985—),男,本科,中级工程师,主要从事水利工程设计工作。



reinforcement scheme is optimal when the longitudinal and transverse design parameters are 160mm and 100mm respectively.

**Keywords:** hydraulic simulation; Jinhu county; regulating sluice; reinforcement; anchor rope

## 1 项目背景

水工设施安全稳定性受运营年限、运营工况以及结构材料等多方面因素影响,因而对水工建筑物安全稳定性进行结构加固设计很有必要,开展相应的加固设计及稳定性分析对提升水利设施安全运营意义重大。根据物理模型试验理论,众多学者利用水利设施几何设计图建立室内原型,并开展相应的水工建筑物物理模型试验,分析水工结构失稳破坏过程中渗流、应力与变形等特征,为水利设施提供重要设计参数参考。另一方面,对水利结构材料的耐久性和应力稳定性等指标开展室内力学试验,研究包括基岩、土体、多种类型材料的力学破坏特征,为水利设计提供依据。仿真计算作为重要研究手段,可对设计方案进行模拟式计算分析,对相关参数、影响因素进行模拟优化,以使设计方案处于最佳状态,相关学者利用相关仿真软件分析了大坝、水闸、泵站等多种水利设施的静、动力安全稳定性,为其他相似水利工程设计提供计算参考。采用仿真模拟计算,可较快获得不同设计方案下设计参数的优化,且可针对方案优化结果进行设计方案调整,为工程设计和施工提供重要参照。特别是在一些大型水工结构或水利设施中,提前开展加固结构仿真设计优化或除险加固模拟,对最终方案的确定和评价均具有重要意义。本文针对金湖县城西河活水工程节制闸加固设计优化问题,利用水利仿真模拟计算方法开展锚索纵、横向设计参数优化对比分析,为确定最佳加固方案提供依据。

## 2 工程模型分析

### 2.1 城西河节制闸概况

金湖县城是淮河下游水利重镇,其中城西河是县域内重要活水河流,该河流域总面积为  $3.11\text{km}^2$ ,全长  $3762\text{m}$ ,设计为引水蓄水治理河流活水工程。引水泵站设计流量  $8\text{m}^3/\text{s}$ ,排涝标准为远期 20 年一遇洪水,设计排涝面积  $3.11\text{km}^2$ ,设计自排洪涝能力  $5.03\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ ,

总体排涝设计流量  $16\text{m}^3/\text{s}$ 。该活水工程拟修建 3 座大型水闸,包括取水闸、提水闸及泄流节制闸,其中取水闸水工建筑按照 4 级标准设计修建,设计工况净扬程为  $4.7\text{m}$ ,提水闸设计提水流量为  $1.5\text{m}^3/\text{s}$ ,排涝工况净扬程为  $2\text{m}$ 。节制闸作为城西河活水工程中重要泄流控制枢纽水利设施,其设计流量为  $16\text{m}^3/\text{s}$ ,泄流消能时上、下游水位分别为  $14\text{m}$ 、 $12\text{m}$ ,设计为 1 孔  $15\text{m}$  气袋升降式翻板闸,墙前后的水位差为  $1.0\text{m}$ ,翼墙墙顶高程  $14.5\text{m}$ ,墙后填土与墙顶齐平,填土为粉砂土,节制闸翼墙设施静力稳定性较好,动力荷载下抗滑系数超过 1.15,最大地基反力达  $84.88\text{kPa}$ ,节制闸翼墙设计立面见图 1。节制闸身顺水流向长  $10.00\text{m}$ ,垂直水流向宽  $16.60\text{m}$ ;闸室底板顶高程  $11.00\text{m}$ ,闸墩顶高程  $14.50\text{m}$ ,河道底高程  $11.00\text{m}$ ;上游护坦长  $8.00\text{m}$ ,下游消力池长  $8.00\text{m}$ 。闸基设计防渗长度为  $12.5\text{m}$ ,设计闸室在静力荷载设计工况下静力不均匀系数为 1.15,最大地基反力为  $27.03\text{kPa}$ ,动力荷载下应力不均匀系数为 1.35,抗滑系数低于 1,地震动力响应性能欠佳,抗震性能较弱。

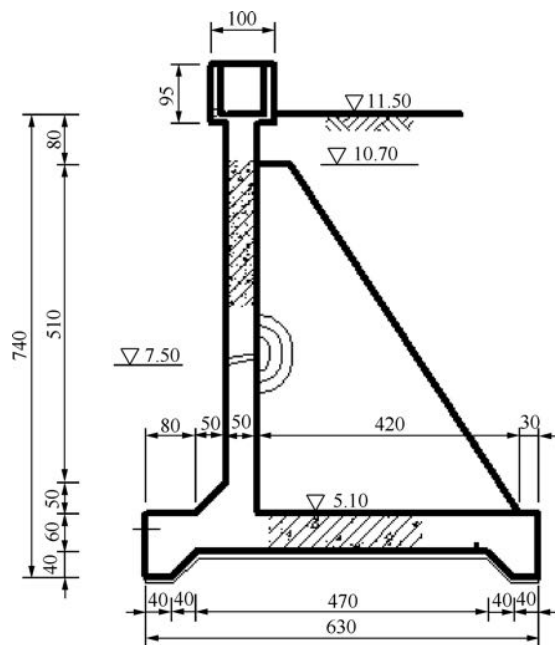


图 1 节制闸翼墙设计立面图 (尺寸单位:cm)

城西河活水工程节制闸所处场地为金湖至东台坳陷,地质构造活动较弱,稳定性较好,表面分布有人工填土、粉质黏土及壤土三种土层,其中壤土层厚最大,最厚处超过 4.6m,粉质黏土层承载力较大,标贯计入数达 15 次。覆盖土层渗透性均一般,抗冲刷能力较强,可确保节制闸基础在水压力下处于较稳定运营状态。由于城西河节制闸是区域内重要水利中控建筑,工程设计部门考虑对其进行二次加固,设计采用预应力锚索作为支护加固措施,在上述工程资料基础上开展加固结构的模拟设计分析,进而优化相关设计参数,提高节制闸设计水平与运营稳定性。

## 2.2 模型建立

以城西河活水工程节制闸工程为研究对象,采用主、次预应力锚索作为加固设计方案,设计概念几何图见图 2。其中设计 14 根主锚索,两层布设,次锚索与主锚索垂直分布,设计 12 根次锚索,每根锚索锚筋直径为 12mm,水闸闸室翼墙边壁与锚索连接方式为接触式连接,主、次锚索设计张拉吨位分别为 3400kN、2600kN,确保水闸闸室在静、动力荷载工况下均能满足运营安全性。现由于主、次锚索布设方案已确定,但锚索横、纵向间距并未优化,而间距设计参数的差异性,对锚索加固性能以及经济成本均有较大影响,因而对设计参

数进行优化,获得最佳方案很有必要。利用仿真计算平台建立计算模型,水闸整体模型见图 3。由于整体计算模型对锚索加固结构以及闸室特征结构识别性较差,因而给出结构体系中各特征部位的仿真模型,见图 4。

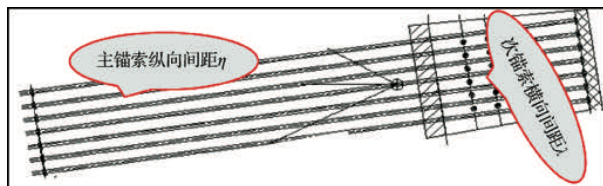


图2 锚索加固结构设计概念几何图

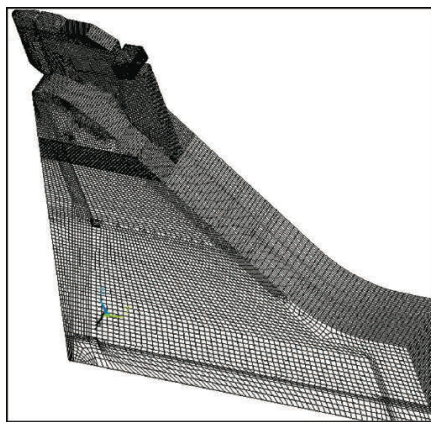
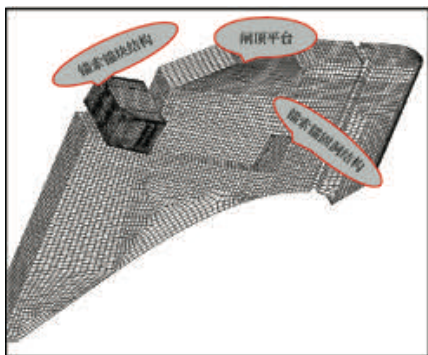
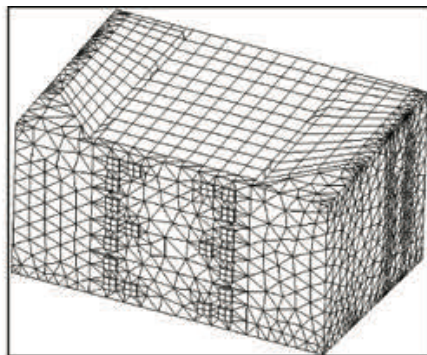


图3 水闸整体模型



(a) 特征部位



(b) 锚块

图4 各特征部位的仿真模型

所建立的仿真计算模型根据计算部位重要性划分单元网格,在锚块以及锚固洞等特征部位网格划分密度设置较大,其中整体计算模型共获得单元网格 389652 个,节点数 356985 个,而独立锚块模型获得 185625 个单元网格,节点数 169582 个。计算模型中设

定  $X$  正向为顺河流下游方向, $Y$  正向为沿水闸右轴线方向, $Z$  正向为水闸向上方向。

## 3 加固结构纵向设计参数分析

根据主锚索纵向间距与加固结构应力稳定性关系



(纵向设计参数  $\eta$  分别设定为 100mm、120mm、140mm、160mm、180mm、200mm, 而锚索横向设计参数统一设定为 100mm), 计算方案中仅改变锚索纵向设计参数  $\eta$ , 其他设计参数见表 1。

表 1 各方案加固结构设计参数

方案编号	纵向设计参数 $\eta$ /mm	横向参数 $\lambda$ /mm
A	100	100
B	120	
C	140	
D	160	
E	180	
F	200	

### 3.1 拉应力特征

根据不同纵向设计参数  $\eta$  计算方案获得节制闸重要特征部位拉应力变化特征, 见图 5。从图 5 中可知, 本文所列出的闸顶平台、锚块与锚固洞部位最大拉应力随纵向设计参数  $\eta$  变化并不相同, 三个部位中最大拉应力位于锚固洞, 在纵向设计参数为 120mm 时锚固洞最大拉应力为 3.38MPa, 而相同工况下的闸顶平台、锚块最大拉应力相比前者分别降低了 54.9%、30.6%, 表明节制闸加固结构中锚固洞所受张拉破坏威胁最大, 应重点加固防护。对比各特征部位最大拉应力随纵向设计参数的变化可知, 锚固洞、闸顶平台最大拉应力随纵向参数增大而递增, 在纵向设计参数为 100mm 时, 闸顶平台最大拉应力为 1.22MPa, 而设计参数增大至 140mm、180mm、200mm 后, 各方案中最大拉应力相比前者分别增大了 49.1%、15%、74%, 在纵向设计方案中, 间距参数增大 20mm, 平均可导致闸顶平台最大拉应力增大 22.4%, 而对于锚固洞部位来说, 其最大拉应力平均涨幅为 7.9%, 表明纵向设计参数越大, 越不利于锚固洞与闸顶平台等部位的抗拉设计。与前两者特征部位最大拉应力变化态势不一样的是, 锚块最大拉应力与纵向设计参数具有负相关关系, 设计参数 140mm、160mm、200mm 方案中该部位最大拉应力相比参数 100mm 时分别降低了 25.7%、37.9%、45%, 即纵向间距设计参数越大, 越能限制锚块上最大拉应力发展, 提升锚块应力稳定性。分析锚块最大拉应力降幅

可知, 在纵向设计参数 100 ~ 160mm 内, 间距增大 20mm, 平均可削弱拉应力 14.7%, 而在设计参数 160 ~ 200mm 内, 间距增大 20mm, 其降幅为 5.9%, 表明锚块最大拉应力受纵向设计参数抑制影响呈先大后小的趋势。综合而论, 闸顶平台、锚固洞最大拉应力在设计参数 180mm 后均超过 2.5MPa, 超出结构材料抗拉应力允许范围, 而锚块最大拉应力在 160mm 后的抑制效果减弱, 因此认为纵向设计参数以 160mm 为最佳。

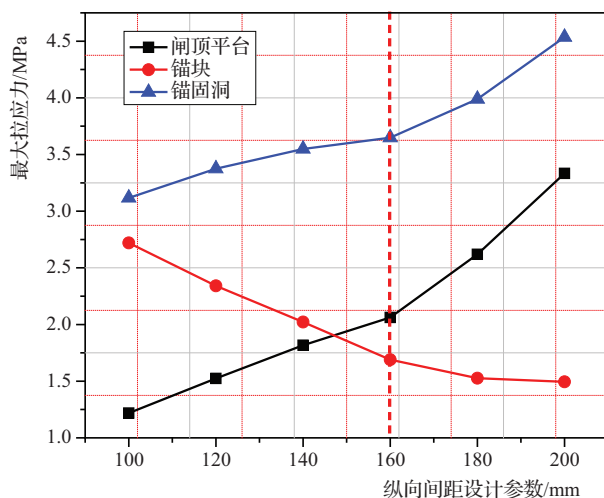


图 5 纵向参数影响下特征部位最大拉应力变化特征

### 3.2 压应力特征

纵向设计参数影响下特征部位最大压应力变化特征见图 6。从图 6 中可知, 三个特征部位最大压应力随纵向设计参数均为递增变化, 纵向设计参数为 100mm 时, 闸顶平台最大压应力为 10.9MPa, 纵向设计参数为

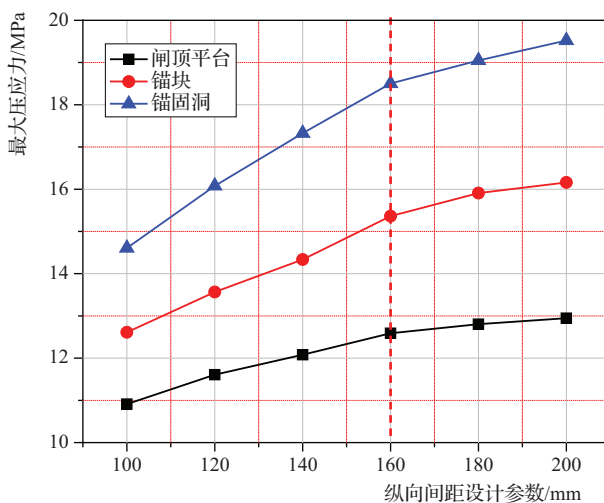


图 6 纵向参数影响下特征部位最大压应力变化特征



140mm、160mm、200mm 时的最大压应力相比前者分别增大了 10.7%、15.4%、18.6%，从整体涨幅来看，每增大 20mm 纵向间距，闸顶平台最大压应力可上涨 3.5%，而对于锚块与锚固洞来说，其最大压应力分别可上涨 5.1%、6%。三个特征部位最大压应力递增，可降低张拉预应力损失影响，但最大压应力应控制在结构材料安全允许强度范围内。从最大压应力变化幅度来看，纵向设计间距 100~160mm 内，三个特征部位的最大压应力均满足结构应力要求。另一方面，闸顶平台、锚块、锚固洞最大压应力平均涨幅分别为 4.9%、

6.8%、8.2%，而在该区间后，平均涨幅均有所降低，印证了纵向设计参数为 160mm 时更有利于加固结构安全稳定。

D 方案下节制闸模拟运营期加固结构中锚块某一时刻拉、压应力分布特征见图 7。从应力分布特征可看出，锚块拉应力分布在锚块截面 Z 向，且两侧有近对称分布的压应力，而锚块大部分区域以小拉应力分布为主，表明预应力锚索在节制闸运营过程中稳定性较好，不仅自身抗拉性能较好，闸室稳定性亦较佳。

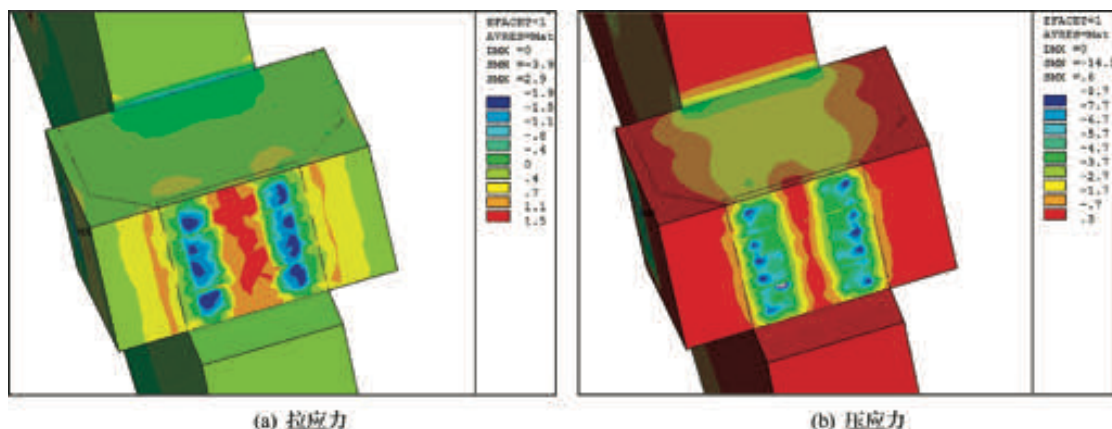


图 7 锚块拉、压应力分布特征

## 4 加固结构横向设计参数分析

### 4.1 拉应力特征

对加固结构横向间距设计参数进行分析，设计横向设计参数  $\lambda$  分别为 60mm、80mm、90mm、100mm、120mm，而纵向间距设计参数均为 160mm，其他设计参数均保持与前述一致。

利用数值仿真计算获得横向设计参数影响下加固结构特征部位最大拉应力变化特征，见图 8。从图 8 中可知，闸顶平台与锚块最大拉应力受横向设计参数影响较小，两部位下最大拉应力在各设计方案下分别稳定在 1.03MPa、1.5MPa，其中闸顶平台最大拉应力变化波动幅度不超过 2%，说明加固结构中闸顶平台、锚块拉应力发展不受锚索横向间距限制。与前两者特征部位呈鲜明态势的是，锚固洞最大拉应力与横向设计参数为负相关关系，且两者具有二次函数关系，横向设计

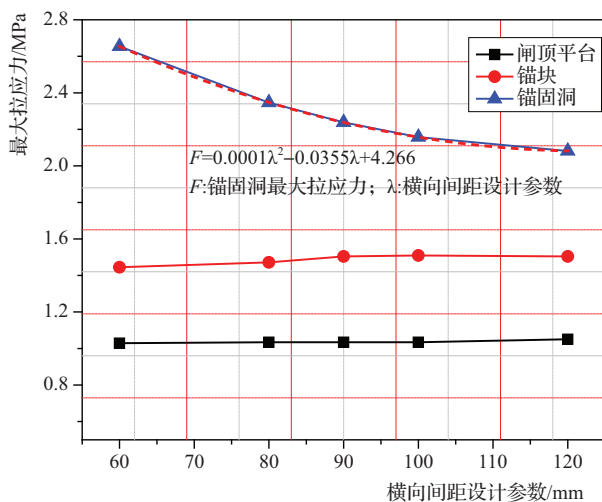


图 8 横向参数影响下特征部位最大拉应力变化特征

参数 60mm 时锚固洞最大拉应力为 2.65MPa，而间距 90mm、100mm、120mm 方案中最大拉应力相比前者分别降低了 15.7%、18.7%、21.6%，表明锚索横向间距控制越大，越可限制锚固洞上最大拉应力。分析锚固



洞最大拉应力降幅可知,在横向设计参数 60 ~ 100mm 内,间距增大 10mm,最大拉应力平均降幅为 6.6%,而间距超过 100mm 后,增大 20mm 间距,最大拉应力仅降低了 3.2%,表明最大拉应力降低趋势逐步减小。从工程成本与结构安全稳定性考虑,横向间距参数为 100mm 时更佳。

#### 4.2 压应力特征

同理获得了加固结构特征部位最大压应力与横向设计参数间变化关系,见图 9。从图 9 中可知,锚块与锚固洞最大压应力分别稳定在 11.2MPa、15.8MPa,受横向设计参数影响较小,两者最大变化幅度分别为 1.6%、1.7%。而闸顶平台最大压应力在横向间距为 60 ~ 90mm 时,基本稳定在 8.3MPa,横向间距超过 90mm 后,闸顶平台最大压应力有所降低,横向设计参数 90mm 时闸顶平台最大压应力为 8.34MPa,而横向设计参数 100mm、120mm 下最大压应力相比前者分别降低了 6.1%、18.7%,表明横向设计参数超过一定界限后,才对闸顶平台压应力有显著影响。从结构设计安全方面考虑,当横向设计参数为 100mm 时,一方面不影响锚块、锚固洞压应力,另一方面,可降低闸顶平台压应力,且间距控制 100mm 设计方案经济成本更佳,亦可匹配结构拉应力安全设计要求。

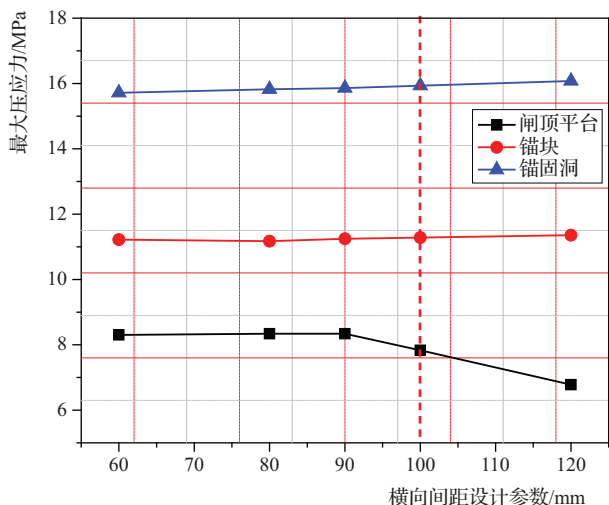


图9 横向参数影响下特征部位最大压应力变化特征

## 5 结 论

本文采用水利仿真模拟计算手段,不仅确定了加

固结构最优设计方案,同时针对设计方案的优劣性展开了对比分析,为其他工程设计优化或参照提供了重要依据,也为仿真优化手段在锚固设计中应用提供了重要参考。主要得到以下四点结论:

a. 锚固洞部位是加固结构上拉应力最大的部位;锚固洞、闸顶平台最大拉应力随纵向参数增大而递增,间距参数增大 20mm,平均可导致两部位最大拉应力增长 22.4%、7.9%;锚块最大拉应力受纵向设计参数抑制影响,间距增大 20mm,平均可削弱其拉应力 14.7%,且抑制趋势为先大后小。

b. 闸顶平台、锚块最大拉应力受横向设计参数影响较小,分别稳定在 1.03MPa、1.5MPa,锚固洞最大拉应力与横向设计参数呈二次函数关系,且为负相关,横向设计参数 60 ~ 100mm 内,间距增大 10mm,最大拉应力平均降幅为 6.6%,而在间距 100mm 后,增大 20mm,最大拉应力仅降低 3.2%。

c. 三个特征部位最大压应力随纵向设计参数均为递增变化,增大 20mm 纵向间距,闸顶平台、锚块与锚固洞分别可上涨 3.5%、5.1%、6%;锚块与锚固洞最大压应力受横向设计参数影响较小,分别稳定在 11.2MPa、15.8MPa,闸顶平台最大压应力在横向间距达到 90mm 后才开始降低。

d. 综合拉、压应力特征与工程建设成本经济性,纵向设计参数为 160mm、横向设计参数为 100mm 时方案最优,对水闸加固效果最佳;工程仿真设计结果对金湖县城西河节制闸的加固设计提供了重要计算参考,且各设计参数对加固结构应力稳定性的影响在其他工程中亦可借鉴。

#### 参考文献

- [1] 吴小龙. 基于 ANSYS 计算的苏区新四孔水闸墩流固耦合下动力响应特征分析研究[J]. 广东水利水电, 2021(2): 52-57, 69.
- [2] 汪娴. 浅析干渠拦河枢纽闸门控制自动化系统设计[J]. 水资源开发与管理, 2016(5): 74-76.
- [3] 颜其林. 乌东德水电站左岸地下厂房 B 类角砾岩区域稳定性分析[J]. 水利建设与管理, 2019, 39(1): 1-10.
- [4] 关李海, 许贵彬, 杨柳, 等. 基于 ANSYS (下转第 84 页)

# 山西农谷降水变化与旱涝特征分析及水利应对策略

吴伟伟<sup>1</sup> 冯锦萍<sup>2</sup> 孟佩<sup>1</sup>

(1. 晋中市水利局, 山西 晋中 030600;

2. 山西省节约用水服务有限公司, 山西 太原 030002)

**【摘要】** 根据1960—2019年山西农谷降水和厄尔尼诺数据,利用线性回归法、M-K检验法、小波分析法、Z指数法对降水变化趋势、突变性、变化周期、旱涝特征等进行了分析,并对与厄尔尼诺的关联性进行了研究。结果表明:近60年山西农谷降水量呈波动减少趋势,1967年发生突变,突变后降水量由升转降,在24~26年时间尺度上降水存在主周期。年际旱涝时段特征明显且集中,春季干旱集中,多在无厄尔尼诺年份,洪涝分散,多在厄尔尼诺衰退期;夏季干旱集中,洪涝分散,在厄尔尼诺发展期易发生干旱,衰退期易发生洪涝。最后分析了水资源开发利用中的问题,提出水利应对策略,为农业稳产高产提供参考。

**【关键词】** 山西农谷;降水;厄尔尼诺;M-K检测法;小波分析法;旱涝指数;水资源利用

中图分类号: P467 + P338.6 + TV213.9 文献标志码: A 文章编号: 2097-0528(2022)04-035-08

## Analysis on precipitation change and characteristics of drought and flood in Nonggu of Shanxi Province and water conservancy countermeasures

WU Weiwei<sup>1</sup>, FENG Jinping<sup>2</sup>, MENG Pei<sup>1</sup>

(1. Jinzhong Water Conservancy Bureau, Jinzhong 030600, China;

2. Shanxi Water Conservation Service Co., Ltd., Taiyuan 030002, China)

**Abstract:** The change trend, mutation, change period, drought and flood characteristics of precipitation are analyzed by using linear regression, M-K test method, wavelet analysis method and Z index method based on the precipitation and El Nino data in Nonggu of Shanxi Province from 1960 to 2019. The correlation thereof with El Nino is studied. The results show that the precipitation in Nonggu of Shanxi Province is fluctuated and decreased in recent 60 years. The mutation change occurred in 1967. The precipitation is increased, and then it is decreased after the mutation change. There is a main cycle of precipitation in the 24 ~ 26a time scale. The interannual drought and flood periods have obvious and concentrated characteristics. The drought is concentrated in spring, mostly in the non-El Nino years. The flood is scattered, mostly in the El Nino decline period. The drought is concentrated in summer. The flood is scattered. Drought easily occurs in El Nino development period. Flood easily occurs in the recession period. The problems in the development and utilization of water resources are analyzed finally. Countermeasures for water conservancy are proposed, thereby providing reference for stable and high yield agriculture.

收稿日期: 2021-01-16

作者简介: 吴伟伟(1981—),男,本科,高级工程师,主要从事水文水资源、水利水电、农田水利工作。





**Keywords:** Shanxi Nonggu; precipitation; El Nino; M-K test method; wavelet analysis method; drought and flood index; utilization of water resources

山西农谷位于山西省中部太原盆地,是国家现代农业示范区、国家农高区和现代农业产业科技创新中心,有山西农谷标准化委员会及大数据中心,是山西农业发展最前沿阵地。近年来山西农谷形成了以干鲜果、设施蔬菜、畜牧养殖、苗木花卉为主的四大优势特色产业,在北方旱作农业区农业提质增效、做大特优农产品、做优设施农业、做强现代农业服务业等方面成效显著。山西农谷的农田水利同样发达,2017年农田灌溉水有效利用系数0.604,位于山西省前列,但是从气候和水利角度看,暖干化趋势显著、旱涝灾害频发、地下水超采严重,成为农业发展的瓶颈,因此,分析降水变化和旱涝特征,以水资源合理利用为中心提出水利应对措施是十分必要的。

## 1 区域概况

山西农谷位于山西省太谷区,面积1053km<sup>2</sup>,处于祁吕贺山字形构造前弧东翼和新华夏构造体系联合作用处,地势由东南向西北倾斜,分别是山地、丘陵和平原,海拔767~1914m,属温带大陆性季风气候。多年平均气温9.8℃、蒸发量1614mm、无霜期157天,最大冻土深度67cm,四季变化明显,雨热同季,光热资源丰富,土质肥沃,是优良的农业种植区,拥有耕地面积46万亩。区域属汾河流域,境内有乌马河、象峪河、津水河、咸阳河四大河流,见图1,水利设施有中型水库2座、小水库8座、中型灌区2个、小型自流灌区25个、小型泵站灌区55个、机井3133眼。有效灌溉面积38万亩,节水灌溉面积32万亩,其中防渗渠灌2.35万亩、管灌25.14万亩、喷灌1.74万亩、微灌2.77万亩。

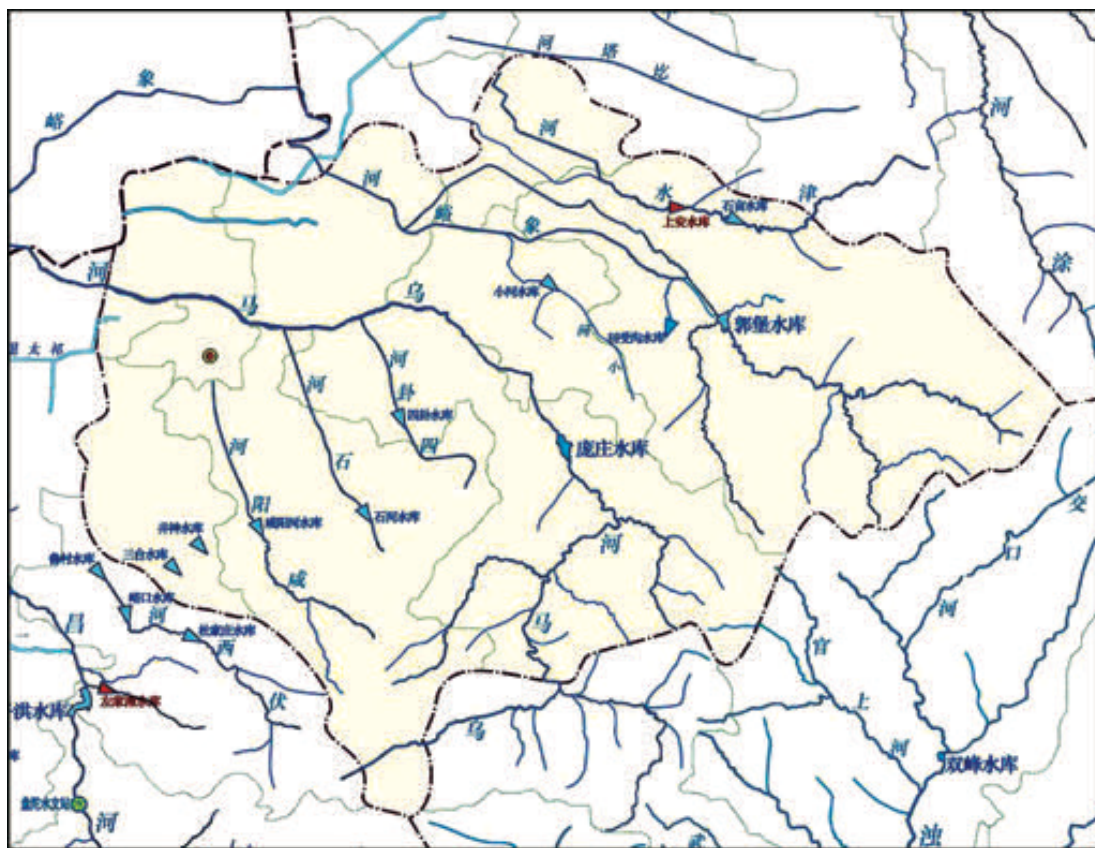


图1 山西农谷水系图



## 2 采集过程与计算方法

山西农谷降水量数据主要利用太谷区雨量站 1960—2019 年逐月数据通过加权平均值法求得,水利工程数据主要来自晋中市水利统计资料,水资源数据主要来自晋中市 2017 年水资源公报。数据分析采用线性回归法、滑动平均法、M-K 检验法、小波分析法、旱涝 Z 指数法等。

## 3 降水特征分析

### 3.1 四季变化特征

山西农谷 1960—2019 年逐月降水见图 2,四季特征如下:

a. 冬季,12—次年 2 月份,降水占比 2.3%,控制当地气候的是蒙古高压和阿留申低压,地面盛行西北、偏北风,寒潮、冷空气活动频繁,空气湿度小、气温低,形成冬季气候干冷的特点。

b. 春季,3—5 月,降水占比 16.2%,受蒙古高压、阿留申低压、印度低压、副热带高压影响,形成鞍形气压场,冷空气活动频繁,冷高压侵入后变形快,回暖迅速,形成天气多变、冷暖变化大,风多风大,降水稀少的特点。

c. 夏季,6—9 月,降水占比 56.8%,主要受印度低压和副热带高压影响,地面盛行东南风、偏东风,有利于水汽从孟加拉湾和南海洋面输送到当地上空,形成雨热同季,降水集中,雷雨大风、冰雹、暴雨等灾害天气多发的气候特征。

d. 秋季,9—11 月,降水占比 24.7%,出现与春季四个大气活动完全相反的转变,蒙古高压和阿留申低压活跃起来,印度低压、副热带高压逐渐退去,到 9 月下旬至 10 月上旬雨季结束,出现晴朗少云、凉爽宜人的秋高气爽天气。

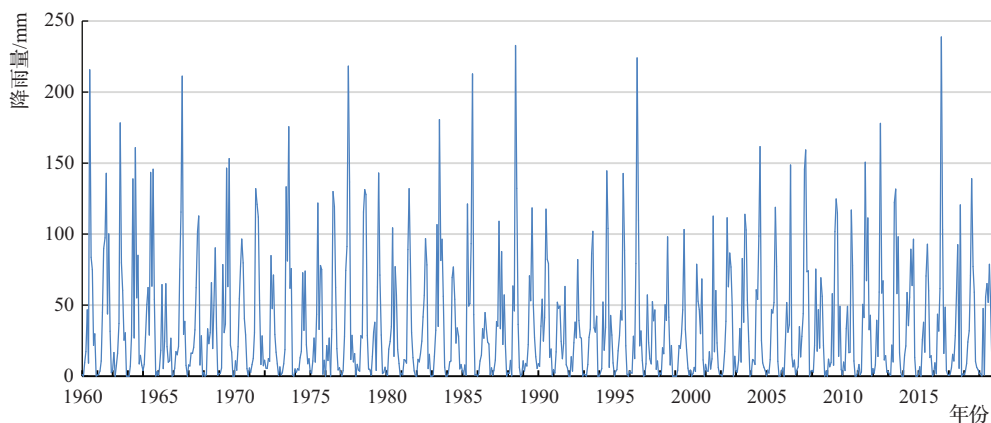


图 2 山西农谷 1960—2019 年逐月降水量

### 3.2 趋势性分析

山西农谷 1960—2019 年降水量变化趋势见图 3,由图 3 可以得出:

a. 多年平均降水量为 423.8mm,最大值为 621.4mm(1977 年),最小值为 219.0mm(1986 年)。

b. 降水量呈波动下降趋势,减小速率为 1.1319mm/a,结合温度上升趋势,表明山西农谷气候呈暖干化趋势。

c. 时序上分为三个丰水段和两个枯水段:1960—

1964 年、1976—1978 年、2011—2014 年为丰水段,1979—1982 年、1991—2001 年为枯水段。

d. 从 3 年滑动平均曲线来看,1997 年前降水呈下降趋势,1998—2011 年呈上升趋势,2012 年以后呈下降趋势。

e. 62 年中旱涝交替 32 次,年际变化均值为 132mm,其中 1980—1990 年最高,年均达 172.9mm,1990—2000 年最低,年均均为 95.6mm,可见旱涝交替频繁是山西农谷降水最显著的特点。

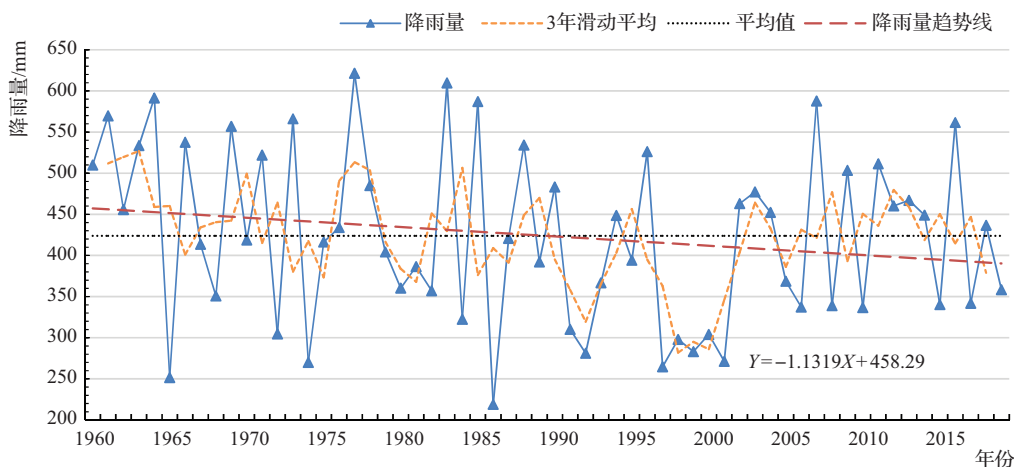


图3 山西农谷1960—2019年降水量变化趋势

### 3.3 突变性分析

用 Mann-Kendall 检验法对山西农谷 1960—2019 年降水进行突变分析(见图4),由图4可以看出:UF 值在 1967 年以后均小于 0,在  $\alpha = 0.05$  显著水平上,1967 年发生突变,突变后降水量由升转降,且一直保

持着下降趋势,1998 年下降超过 0.05 显著水平临界值,表明下降趋势显著,2002 年 UF 值开始回升,但未出现与 UB 交点,且一直为负值,说明降水回升有限,下降趋势显著。

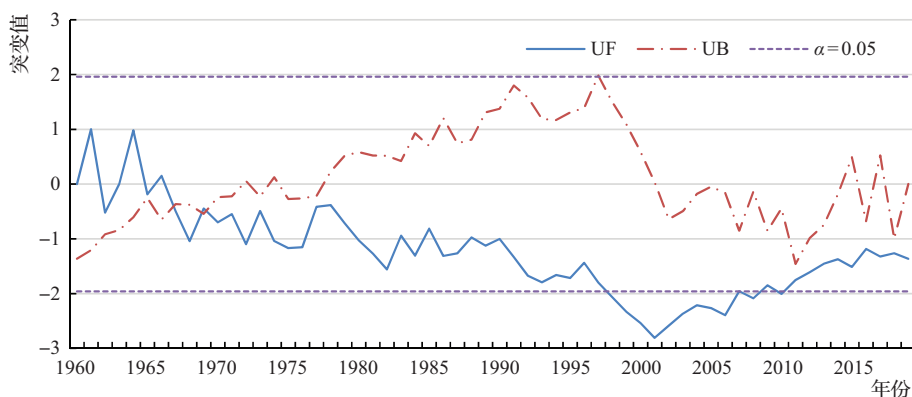


图4 山西农谷1960—2019年降水量突变检验

### 3.4 周期性分析

为进一步探寻降水变化规律,采用小波分析法对降水变化进行周期性分析,绘制小波变换系数实部等值线图和小波方差图(见图5、图6),可以看出山西农谷降水在长、中、短期时间尺度上都有明显的周期变化,在 24~27 年时间尺度上存在主周期振荡,在 2 年和 6~7 年的时间尺度上也存在弱周期,呈现很强的规律性,利于降水趋势的预测和水资源调控,尤其是在 6~7 年时间尺度上与厄尔尼诺发生周期接近,最有利

于水利工程调控。

## 4 旱涝灾害分析及与厄尔尼诺关系

春夏两季是农作物生长的关键期,旱涝灾害已成为农业主要杀手,利用 Z 指数法对山西农谷 1960—2019 年降水进行旱涝特征分析,即假设某一段时间内的降水量服从 Person III 型分布,通过对降水量进行正态化处理,将 Person III 型分布转化为以 Z 为变量的标准正态分布,计算公式如下:

假设某时段降水量服从 Person III 型分布,其概率

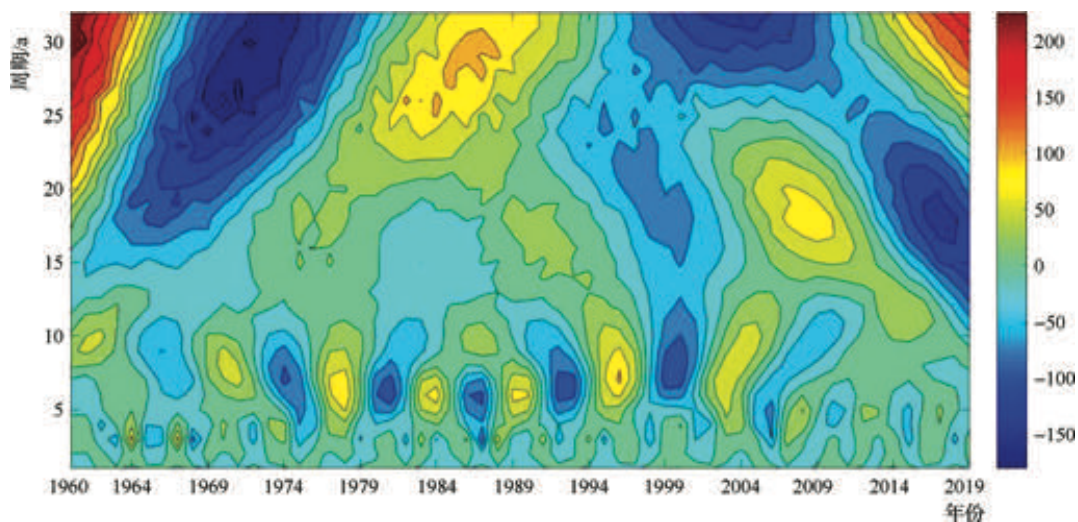


图5 山西农谷 1960—2019 年降水距平小波系数实部等值线图

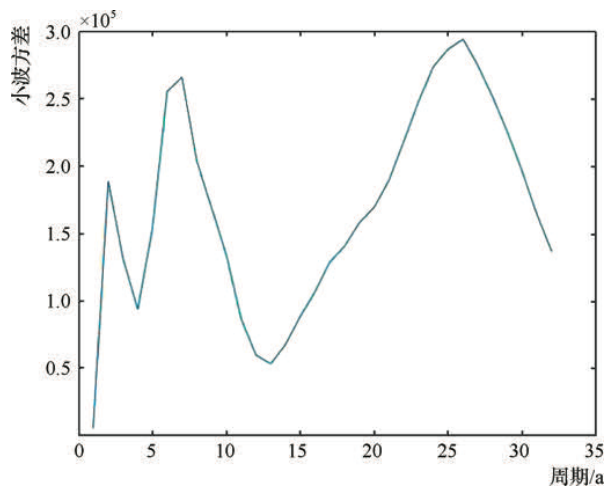


图6 山西农谷 1960—2019 年降水量距平小波系数方差图

密度函数公式为

$$f(X) = \frac{\beta}{\Gamma(\alpha)} (x - \alpha)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-\alpha)} \tag{1}$$

式中:α 为形状参数;β 为尺寸参数;x 为降水量,mm;

Γ(α) 为 gamma 函数。  
通过对降水量进行正态化处理,则可将其概率密度函数转化为以 Z 为变量的标准正态分布,公式如下:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left[ \frac{C_s}{2} \varphi_i + 1 \right]^{1/3} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \tag{2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \tag{3}$$

$$\varphi_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \tag{4}$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n\sigma^3} \tag{5}$$

式中:C<sub>s</sub> 为偏态系数;φ<sub>i</sub> 为标准标量;σ 为标准差。  
将 Z 指数划分为 7 个等级,计算 1960—2019 年山西农谷年际和春夏发生旱涝出现年数,见表 1。

表 1 山西农谷 1960—2019 年 Z 指数旱涝等级及出现次数

等级	Z 值	类型	次 数			频 率/%		
			全年	春季	夏季	全年	春季	夏季
1	$Z \leq -1.645$	重旱	2	2	4	3.3	3.3	6.7
2	$-1.645 < Z \leq -1.037$	大旱	8	7	6	13.3	11.7	10.0
3	$-1.037 < Z \leq -0.542$	偏旱	11	8	7	18.3	13.3	11.7
4	$-0.542 < Z \leq 0.542$	正常	20	27	25	33.3	45.0	41.7
5	$0.542 < Z \leq 1.037$	偏涝	8	6	9	13.3	10.0	15.0
6	$1.037 < Z \leq 1.645$	大涝	9	7	4	15.0	11.7	6.7
7	$1.645 \leq Z$	重涝	2	3	5	3.3	5.0	8.3



#### 4.1 年际旱涝特征

山西农谷年际发生重旱、大旱、偏旱、正常、偏涝、大涝、重涝的频率分别是 3.3%、13.3%、13.3%、41.7%、10.0%、15.0%、3.3%。年际旱涝特征表现为:④明显的时段特征,大旱 8 次中有 7 次集中在 1991—2001 年,偏旱 11 次有 9 次集中在 1980—1984 年、2006—2010 年、2015—2019 年三个时段,偏涝、大涝 17 次中有 8 次集中在 1960—1973 年;⑤重旱和重涝与厄尔尼诺现象密切相关,重涝发生 2 次(1977 年、1983 年),1977 年出现厄尔尼诺现象,经历了厄尔尼诺的发展期和衰退期,旱涝急剧转变,1976 年秋至 1977 年 5 月初连续 200 天大旱,小麦死苗率达 40%,春播困难,5 月 14 日出现连阴雨,7—8 月连降暴雨出现特大洪灾;1983 年出现 2 次厄尔尼诺现象,5 月上旬出现暴雨,降水量达 106.7mm,7 月连降暴雨,出现特大洪灾;重旱发生的 2 次(1965 年、1986 年)也均出现厄尔尼诺现象。

#### 4.2 春季旱涝特征

春季发生重旱、大旱、偏旱、正常、偏涝、大涝、重涝的频率分别是 3.3%、11.7%、13.3%、45%、10.0%、11.7%、5.0%。春季旱涝特征表现为:④发生干旱的年份非常集中,且与厄尔尼诺无关年份居多,1972—1978 年 7 年发生 6 次干旱,其中大旱 1 次、重旱 2 次,1989—2001 年 13 年发生 7 次干旱;⑤发生洪涝的年份相对分散,且与厄尔尼诺相关年份居多,出现 3 次丰水段 1963—1965 年、1983—1985 年、1990—1991 年,大涝、极涝多数发生在厄尔尼诺衰退期;⑥春季降水少,月均仅为 22.9mm,除大涝、重涝其他年份降水均无法满足北方农作物用水需求,60 个年份里需春浇的年份达 50 年,因此民间有十年九旱的说法。

#### 4.3 夏季旱涝特征

夏季发生重旱、大旱、偏旱、正常、偏涝、大涝、重涝的频率分别是 6.7%、10.0%、11.7%、41.7%、15%、6.7%、8.3%。夏季旱涝特征表现为:④发生干旱的年份集中,1991—2001 年发生 7 次干旱,2015—2019 年 5

年发生 3 次干旱,4 个重旱年份均出现厄尔尼诺现象,6 个大旱年份有 4 年出现厄尔尼诺现象,多数处于厄尔尼诺发展期;⑤发生洪涝的年份较为分散,5 个重涝年份均发生在厄尔尼诺衰退期,4 个大涝年份中 2 个发生在厄尔尼诺衰退期。可以看出,夏季旱涝与厄尔尼诺现象联系更加紧密,在厄尔尼诺现象发展期易发生干旱,衰退期易发生洪涝。

### 5 水资源利用现状及存在的问题

#### 5.1 水资源总量少,开发利用程度高

由于农谷地区多年平均降水量 423.8mm,属半干旱地区,水资源总量仅为 13391 万  $m^3$ ,人均 430 $m^3$ ,低于国际公认极度缺水线 500 $m^3$ 。然而 2017 年用水总量达 10370 万  $m^3$ ,水资源开发利用率高 77%,属高开发利用区域,表明水资源利用已经超出环境承载能力,破坏了生态平衡。再根据降水减少速率计算,每年减少水资源量 119 万  $m^3$ ,更加加剧了水的供需矛盾,进而形成了榆太祁中型孔隙浅层地下水超采区。

#### 5.2 水工程调蓄能力差,雨洪利用率低

山西农谷降水主要集中在夏季,达 240.6mm,多以强降雨出现,然而水利工程总蓄水能力仅为 3400 万  $m^3$ ,夏季有大量的水白白流走,经计算 2017 年地表水利用率仅为 42%,其中 85% 为夏季雨洪损失。从水利工程布局分析有以下三个问题:④两大河流乌马河和象峪河水工程蓄水能力低,仅有 2 座中型水库,无其他蓄水设施;⑤无水系连通工程,无法从空间上调配水资源;2016 年咸阳河和乌马河流域发生大暴雨,形成洪灾,洪水无法补给缺水地区,也未集蓄起来,导致接下来几年形成重旱;⑥蓄水设施稀少,主要体现在拦河坝、塘坝、蓄水池等水利工程的不足,湿地和湖泊等天然水库更为稀少。

#### 5.4 防洪有死角,重排轻滞

夏季降水量大历时短,是洪灾主要发生时段,根据旱涝特征分析大涝、重涝发生频率为 15%,每次都会造成巨大的经济损失。近年来山西农谷防洪能力大幅



提升,境内河流堤防多数达到10年一遇以上防洪标准,水库也均进行了除险加固,随着河长制的深入,河道垃圾也大幅减少,行洪能力增强。但是咸阳河的无尾河问题一直未得到解决,河道纵坡大,沿岸企业、村庄多,洪水破坏力强,还会造成下游城区内涝,成为防洪死角,亟待解决。其次境内河道过直,河网密度小,沟壑纵横,缺少湿地或洼地,滞水能力较差。

### 5.5 旱灾频发,应对能力差

从旱涝特征来看,山西农谷干旱最明显的特征是集中,年际、春夏两季均有此特点,尤其在厄尔尼诺发展期干旱多发,随着水资源供需矛盾加剧,旱灾破坏力已成倍放大。在应对干旱方面,目前的主要措施是打井,据统计区域现有机井3133眼,密度极高,短期内是解决干旱的有效措施,但是不可持续,地下水位已出现严重下降,每年超采1800万 $\text{m}^3$ ,形成了晋中最大的地下水超采区。应对能力差还表现在水利工程蓄水能力低、滞水能力差、河湖水系未连通、高效节水灌溉面积少等方面。

### 5.6 农业用水多,高效节水面积少

春季降水稀少,伏旱频次高,旱涝急转是山西农谷气候另一个重要特征,受影响最大的就是农业,然而区域农业用水量已占到总用水量的80%,说明种植结构不合理,高耗水作物偏多,这就造成了旱灾对农业影响更大更广。从农田水利上讲,区域主要灌溉方式以管道输水加长畦灌溉为主,漫灌较为普遍,灌溉方式落后。近年来随着国家现代农业示范区建设的开展,喷微灌面积提高到了12%,水有效利用系数提高到0.604,但是相比农业发达地区差距仍较大,无法应对水资源短缺和干旱频发问题。

## 6 水利优化策略

### 6.1 河湖连通,滞蓄水两手抓

河湖连通工程可以有效解决降水时空分布不均问题,最大限度利用好水资源,尤其是利用好雨洪资源,就山西农谷来说,乌马河与象峪河流域、咸阳河与乌马

河流域有狭长的接触带,高低落差不大,地形条件不复杂,为流域连通提供了天然良好条件。其次是滞水,河湖治理时尽量保持原有河道形状,每隔一段设置一个雨水花园、生态缓洪区、人工湿地等形式的滞留区,提高滞水能力,补充地下水。蓄水方面可以在河道上建设合理数量的低堰、塘坝、人工湖泊和调蓄库,提高蓄水能力。只有滞蓄两手抓,才能从宏观上提高水资源转化率,提高防洪抗旱能力。

### 6.2 兴建雨水集蓄设施,城乡村山路全利用

雨水集蓄利用不仅需要在河湖兴建水利工程,还需要在广大具备集流条件的“城乡村山路”建立分散式收集系统。当地降水集中于夏季,且多以强降雨形式出现,为雨洪集蓄利用提供了良好条件。具体建议有:①在乌马河、象峪河、咸阳河建小型调蓄库,库区可以在河床或流域间;②东部山区较多,村镇多分布于山脚平缓地带,集雨面好、汇流量大,可兴建蓄水池或雨水花园,解决山区水源短缺问题,还能缓洪防火;③公路集雨效率高、离农田近,可在道路两边兴建水窖,发展补充灌溉面积;④以海绵城市建设为基本框架,尽快实现雨污分离,构建多级雨水收集系统,为城市提供综合的生态系统服务,缓解供水紧张。

### 6.3 制定不同尺度应对策略

在长时间尺度上,构建与水资源承载能力相适应的经济社会发展模式和产业结构,保证水资源供需的长期稳定,在降水上升期,水利工程应突出“渗、滞”的功能,延缓地表径流,涵养地下孔隙水、裂隙水和喀斯特水。在降水下降期,限制高耗水产业,调整农业种植结构,实施有机旱作农业,水利工程应突出“蓄、用”的功能,提高蓄水能力,增强河湖连通功能,从时空上尽量做到平衡,尤其预防干旱链。在中时间尺度上,水利工程应突出“净、用”两大功能,构建海绵系统,充分利用土壤渗透、植被、水体净化水质,提高非常规水资源的利用效率,将输水渗漏降到最低。在短时间尺度上,各行业各部门可及时缩减用水定额应对干旱,把所有水源包括集中供水水源和分散自备水源以及机井纳入



统一的水资源管理系统,统一分配,统一调度,最大限度地蓄水节水,稳定土层含水率。

#### 6.4 发展高效节水,改进灌溉方式

发展高效节水是解决半干旱地区农业灌溉的最佳方式,山西农谷农业发达,农民技术水平较高,通过积极宣传、引导和培训结合农业水价综合改革,可以让农民快速适应并掌握高效节水灌溉,尤其是利用微灌的水肥一体化技术,可大幅提高用水和施肥效率。大田作物则可通过改进地面灌溉方式,如短畦、垄作沟灌等方式提高水利用率。同时还要调整作物结构,选用节水高产型品种,农耕蓄水和覆盖技术、增施有机肥和水肥耦合技术,应对资源型缺水。

#### 6.5 制定基于天气预报的灌溉制度

目前短期气象预报技术趋于成熟和准确,通过天气预报数据可以预测作物蒸发蒸腾量,进而计算出作物不同时间段的需水量,结合土壤墒情监测,可制定出科学的灌溉制度,从而大大提高水利工程供水计划的科学性。尤其是大中型灌区,输水线路长,灌溉周期长,天气预报技术对灌溉制度非常重要,能从最后一公里上做到科学决策,从而有效提高水资源利用效率,促进供水单位标准化规范化管理。这就需要在气象部门、农业部门、水利部门、供水单位之间建立平台,实现信息共享。

### 7 结 语

综上所述,山西农谷的水资源严重短缺,农业用水量较大,作为山西农业较发达的地区,只有在摸清旱涝灾害规律的基础上,科学布置和兴建水利工程,结合科学的管理制度,建管并重,才能有效根治水资源短缺问题,实现农业稳定发展,向农业现代化迈进。◆

#### 参考文献

[1] 梁运香,韩龙,赵海英,等.近50年晋中市气候变化及对农作物的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2011,

31(4):354-359.

- [2] 问星星.山西气候变化特征与旱涝灾害趋势判断[J].农业科技(下旬刊),2017(9):289.
- [3] 杜娟娟.山西省黄河流域节水现状及供需形势分析[J].水资源开发与管理,2020(11):24-27,39.
- [4] 杨东,王慧,程军奇,等.近50年青海省气候变化特征及其与 ENSO 的关系[J].生态环境学报,2013(4):547-553.
- [5] 丁彩霞,延军平,方兴义,等.宁夏地区气候暖干化与旱涝灾害趋势的关系[J].水土保持通报,2014,34(2):250-254,261.
- [6] 李金莲.1961—2018年四子王旗旱涝特征及其变化规律分析[J].水资源开发与管理,2019(12):17-21.
- [7] 刘正才.洪涝及干旱灾害的预测与控制[J].水利管理技术,1994(3):13-14.
- [8] 马露,杨东,曾婷.1961—2012年山东省气候变化特征及其与 ENSO 的关系[J].中国农学通报,2015,31(16):241-249.
- [9] 赵路伟,徐刚.河南省1961—2014年气温和降水量的时空变化特征[J].南水北调与水利科技,2016,14(3):17-23,54.
- [10] 高茂盛,李红梅,王卫东,等.1961—2014年陕西省气候资源变化趋势及突变分析[J].中国农业大学学报,2017,22(11):121-132.
- [11] 贺红梅,韩通,高蓉.甘肃中部近66a气候变化特征与旱涝等级响应[J].甘肃科学学报,2018,30(4):65-72.
- [12] 周德东,边玉国.水利灌区水情自动监测系统的设计[J].水利建设与管理,2016,36(1):27-30.
- [13] 胡彩虹,赵留香,王艺璇,等.气象、农业和人文干旱之间关联性分析[J].气象与环境科学,2016,39(4):1-6.
- [14] 韩作强,张献志,芦璐,等.厄尔尼诺现象对黄河流域汛期降水的影响分析[J].气象与环境科学,2019,42(1):73-78.
- [15] 王虎甲.凉州区发展高效节水农业的几点经验[J].水利建设与管理,2013,33(4):74-75.
- [16] 汪海涛.浅谈南疆农业高效节水发展现状[J].水资源开发与管理,2017(3):49-51.

# 老挝南俄 3 水电站引水隧洞淤泥流沙段 综合治理

魏兴存 刘汉斌 高富文

(中国水利水电第十工程局有限公司, 四川 成都 610072)

**【摘要】** 为对老挝南俄 3 水电站引水隧洞淤泥流沙进行科学、有效的综合治理,实现安全通过和达到工程运行要求,工程应用地质钻探、地质雷达超前预报、贯通后物探检测、收敛监测等多种手段,实现准确、实时地质调查和判定,采取基于新奥法理念灵活、有针对性的外、内层支护以及分区块开挖支护措施实现了流沙段强制通过,制定防渗钢板、不锈钢止逆阀永久止水方案,实现了运行期内外水压平衡和减少内水外渗。

**【关键词】** 引水隧洞;淤泥流沙;物探;新奥法;防渗结构

中图分类号: TV554

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)04-043-06

## Comprehensive treatment of silt and quicksand sections of diversion tunnel in Laos Nane 3 Hydropower Station

WEI Xingcun, LIU Hanbin, GAO Fuwen

(Sinohydro Bureau 10 Co., Ltd., Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Geological drilling, geological radar advance forecast, geophysical detection after penetration, convergence monitoring and other means are applied in the project to realize accurate and real-time geological survey and judgment in order to scientifically and effectively treat silt and quicksand of the diversion tunnel in Laos Nane 3 Hydropower Station, achieve safe passage, and reach operation requirements of the project. Flexible and targeted outer-inner layer supports as well as partition and block excavation support measures based on the concept of new austrian tunnelling method are adopted to realize the forced passage in the quicksand sections. The permanent water stop plans of impermeable steel plates and stainless steel check valves are developed to achieve the balance of internal and external water pressure and reduce internal water outward seepage during operation.

**Keywords:** diversion tunnel; silt and quicksand; geophysical prospecting; new austrian tunnelling method; seepage control structure

### 1 工程概况

#### 1.1 工程背景

老挝南俄 3 水电站位于老挝中部山区,是湄公河

一级支流南俄河干流梯级开发的第 3 级(自下游向上游)年调节水电站,水库正常蓄水位 723.00m,相应库容为 14.11 亿  $\text{m}^3$ ,电站装机容量 480MW。老挝南俄 3 水电站属 I 等大(1)型工程,引水隧洞主要建筑物级

收稿日期: 2021-05-18

作者简介: 魏兴存(1987—),男,本科,工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工作。



别为2级,全长10635.263m,设计引用流量 $180\text{m}^3/\text{s}$ ,洞内流速 $3.97\text{m/s}$ ,设计开挖断面为圆形和马蹄形,开挖洞径为9.2m、8.7m,标准过水断面直径为7.7m。引水隧洞沿线共跨越三条较大冲沟,其中3号冲沟位于引水隧洞中部区域桩号约T6+400位置处,影响洞段桩号为T6+640~T6+770,共计130m,埋深120~160m,冲沟沟底高程较水库正常蓄水位低53m。

## 1.2 工程地质

### 1.2.1 地质调查

a. 可行性研究阶段。由于3号沟地段为裸露型喀斯特地貌,原始森林、植被茂密,人迹罕至,交通生活条件很差,勘测阶段只完成了1个钻孔勘探,钻孔深度100m,仅探明为灰岩覆盖在花岗岩岩体上,观测点处岩石呈厚层状或块状,坚硬,表现出不规则侵蚀表面,地下有落水洞、溶洞等。

b. 洞挖初期。桩号T6+763掌子面打爆破钻孔时遇到严重地下水,地下水喷出8~10m远,并伴随有泥沙;复工开挖至桩号T6+713时,T6+713~T6+763段内出现多起涌水、塌方及淤泥流沙现象,由于塌方流沙量大,加之时值雨季,3号冲沟地表水多沿沟床下落水洞源源不断汇入地下,在掌子面堆积大量泥沙,工作面淹没,水流通过支洞流出洞外,最大流量约 $2000\text{m}^3/\text{h}$ 。期间补充勘探钻孔10个,钻孔主要沿引水隧洞轴线两侧及隧洞轴线布置,距离隧洞轴线垂直方向12~122.9m,钻孔垂直深度55.5~161.2m,最深穿过隧洞底板23.6m。

c. 强制通过期。在强制通过期实施地质雷达超前预报,对掌子面前方地质情况及成灾可能性作出预报,以便制定准确、高效的开挖、支护、灌浆加固方案。

隧洞贯通后,为进一步查明该段围岩岩体情况,确定3号冲沟段永久衬砌支护方案,补充了7个钻孔的勘探和物探检测,由勘察单位指定钻孔位置,孔径75cm,深度15~30m,终孔24h后开展单孔波速测试、孔内摄像、垂直钻孔间波速穿透。

### 1.2.2 地质评价

根据建设各阶段的地表调查、钻孔、物探资料,淤

泥流沙段地质综合评价如下:3号冲沟段位于二叠系灰岩与三叠系花岗岩的断层岩性接触带部位,宽1.5~3.5m,为黑色断层泥充填,花岗岩区岩体风化强烈,最大风化深度160m,多属V类围岩。断层下盘灰岩风化程度相对较弱,地下水丰富,受区内降雨量丰沛影响,灰岩地层喀斯特发育,3号冲沟河床落水洞遍布,沟内地表水通过落水洞与地下水具有较好的连通性,地下水靠基岩裂隙水和地表水下渗补给,但在雨季冲沟地表水入渗占主导地位。

T6+651~T6+765处于不规则岩性接触带,T6+651~T6+713隧洞段位于花岗岩与灰岩的侵入接触蚀变带内,上覆全风化岩体松散,T6+660~T6+678揭露存在有地下空腔,空腔顶板与隧洞底板之间的岩墙厚度约1.8m,局部隧洞底板以下岩体条件差,3号冲沟段隧洞轴线地质剖面见图1。

## 2 强制通过措施

### 2.1 基本思路

结合工程地质、水文条件,3号冲沟洞段淤泥流沙控制及贯通方案的基本思路为:地下水强排、清淤、封闭掌子面→治水→附近已开挖洞段外、内层支护→超前地质预报及管棚施工→分区分块开挖、支护→系统预固结灌浆→全过程收敛监测。

### 2.2 处理措施

a. 地下水强排、清淤、封闭掌子面。由于支洞设计纵坡为倒坡,雨季洞内渗水补给量显著增大,因此选择在雨季过后一个月左右开始,随着水位下降开始洞内清淤工作,清淤至距掌子面20m位置,确定洞内流沙不出现明显流动发展。铺设木板形成施工通道,对裸露的工作面采用挂网喷混凝土方式进行封闭,喷射混凝土厚度不小于10cm。

b. 治水。采用堵、排、截、引结合的治理措施:设置钢筋石笼挡坎,拦截流沙的同时保证流沙内渗水排除。排查掌子面附近已开挖洞段渗水点,钻孔埋设 $\phi 100$ 、 $\phi 50$ 钢管作为深层排水孔。化学灌浆堵漏。堵漏材料采用SL-669-I型聚氨酯,单孔孔径16mm,孔距



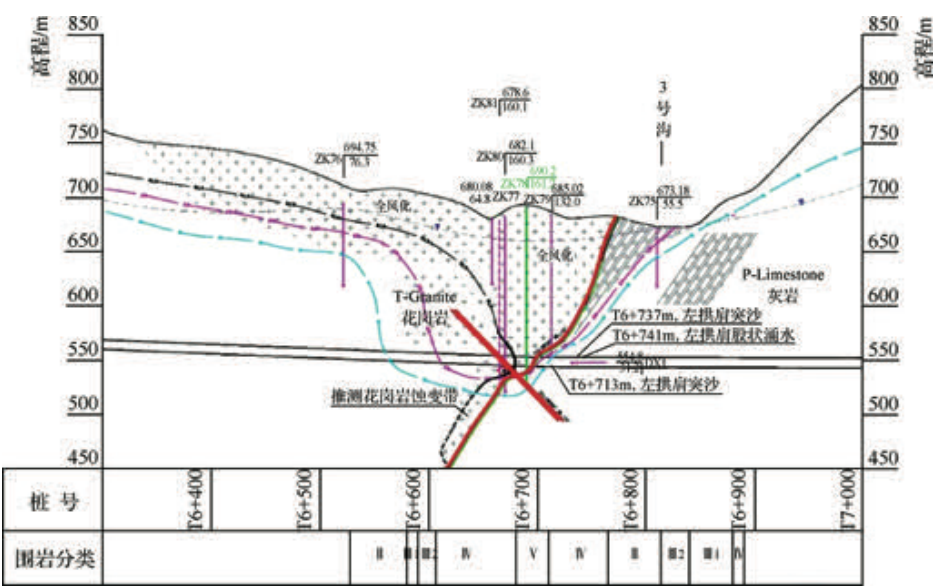


图1 3号冲沟段隧洞轴线地质剖面

5cm,孔深50cm,使用SDB-6.3型手动试压泵清洗钻孔,冲洗压力为灌浆压力的80%,采用止水针塞住孔口,灌浆孔兼做排气回浆孔。使用DH-512微型高压电动注浆机按照自下而上次序进行间歇性灌浆,开灌压力为0.1MPa,当吸浆率小于5mL/min时,逐渐加压至0.3MPa,二次灌浆孔压力为0.3MPa;当注入量大于20mL/min时,采取低压、待凝措施,一次注入量不大于500mL;根据吸浆量情况逐步升至设计压力,当吸浆率小于1mL/min时,保持压力延续灌注30min后扎管待凝,4~5h后检查注浆效果,对管口不饱满的注浆管进行第二次注浆直至饱满。

c. 掌子面附近已开挖洞段外、内层支护。外层支护措施如下:①钢支撑采用I20a工字钢进行钢拱架和顶拱下对撑,拱脚用锁脚锚杆焊接固定,钢支撑间排距0.5~0.7m,使用φ25@40cm钢筋将所有钢拱架连接成整体;②系统锚杆φ25长6m,入岩5.8m,间排距2m;③系统挂钢筋网喷10cm厚混凝土,局部流沙口采用钢筋或工字钢回填混凝土。

内层支护措施为低压固结回填灌浆,间排距2m,梅花形布置,喷锚区域固结灌浆压力0.1~0.3MPa,无盖重区域灌浆压力0.3~0.5MPa,当注入率不大于1L/min时,继续灌注30min,结束灌浆,待凝12h。

d. 掌子面超前预报。按每15m洞长左右在开挖掌子面上进行地质雷达超前预报,对掌子面前方15m洞长的地质情况及成灾可能性作出预报,共计超前预报14次,单个(桩号T6+763为例)开挖掌子面的地质雷达测线布置及各测线成像例图见图2~图4。

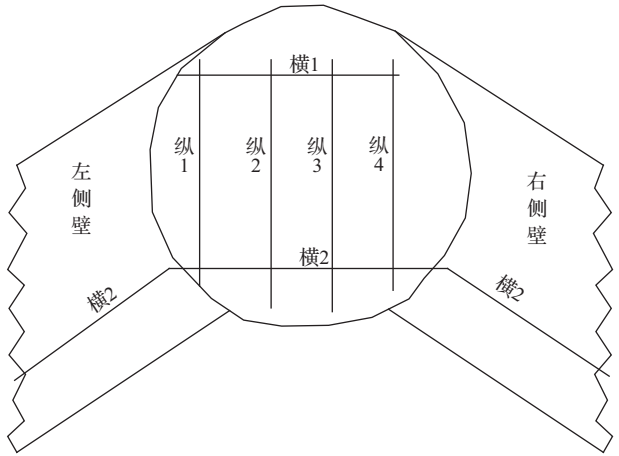


图2 掌子面地质雷达预报测线位置示意

e. 分区分块开挖、支护。分层开挖、支护三维立视示意图5。先采用10cm间距的φ80无缝钢管内插3φ25钢筋注浆大管棚进行封口,然后采用φ40+φ25钢筋小导管上扬5°满铺支护,最后分层分区开挖并钢支撑跟进支护,并及时挂网喷混封闭后继续进尺,每开挖一段及时用30cm厚混凝土对底板进行硬化。

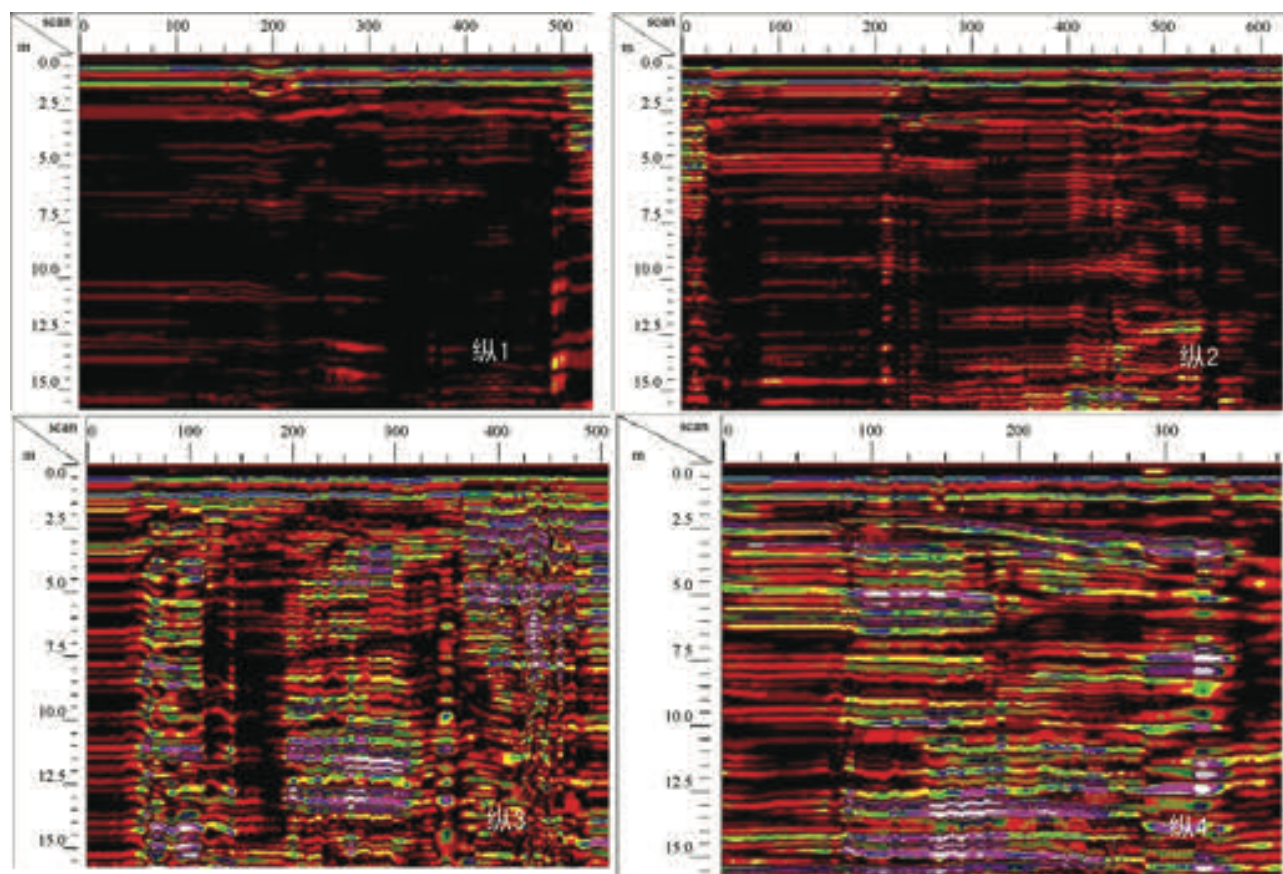


图3 各纵向测线雷达影像图

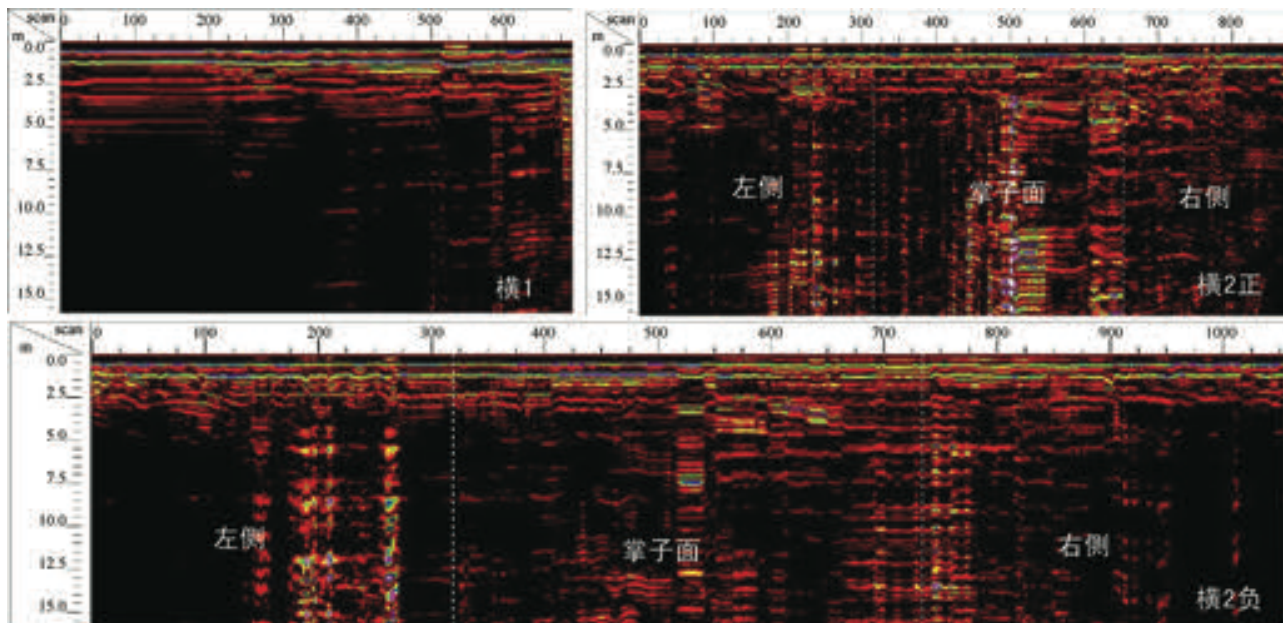


图4 各横向测线雷达影像图

对于钢拱架沉降变形严重段底板及时采用焊接水平对撑 I20a 工字钢进行加固。

f. 贯通后进行系统预固结灌浆。6m@1.5m×1.5m 梅花形布置,灌浆压力 0.5~0.1MPa。

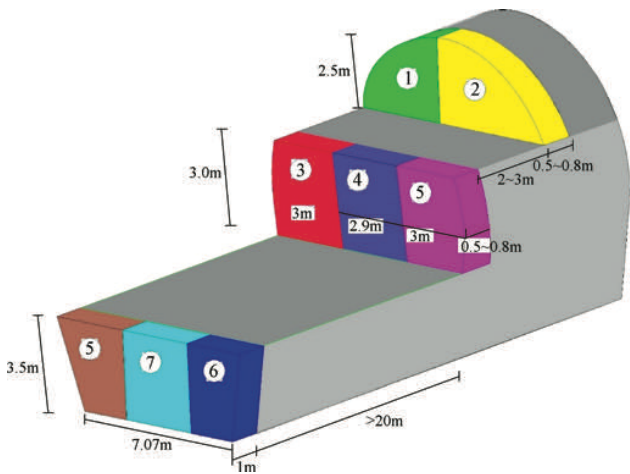


图5 分层开挖、支护示意

g. 全过程收敛监测。3号冲沟段共计设置了12个监测断面,每个断面安装3个收敛测头(反射贴片),断面安装见图6,采用TM50,全站仪(精度0.5″)自由架站对收敛测头进行免棱镜观测,盘左右各观测2次取平均值得到各测点的相对坐标,换算成相应边长最后整编、比较、分析。

通过累计收敛观测,累计变形最大在T6+752断面

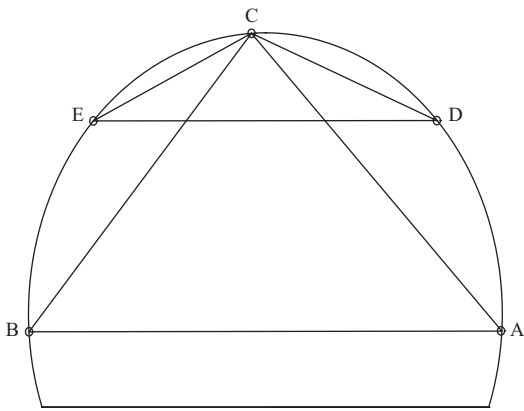


图6 收敛点布设断面示意

面的右侧(A-C线路)处,达到48.6mm,该断面各线路变化过程趋势见图7。在隧洞贯通后第一个雨季初期T6+752、T6+731.5、T6+717、T6+668四个断面变形速率加快,出现钢支撑变形现象,及时采取钢桁架支撑加强措施,钢支撑加强钢桁架断面见图8,后续监测呈现收敛趋势。最终各测点允许位移值满足V类围岩120~160m埋深相对值0.60%~1.60%的要求,贯通后未出现塌方。

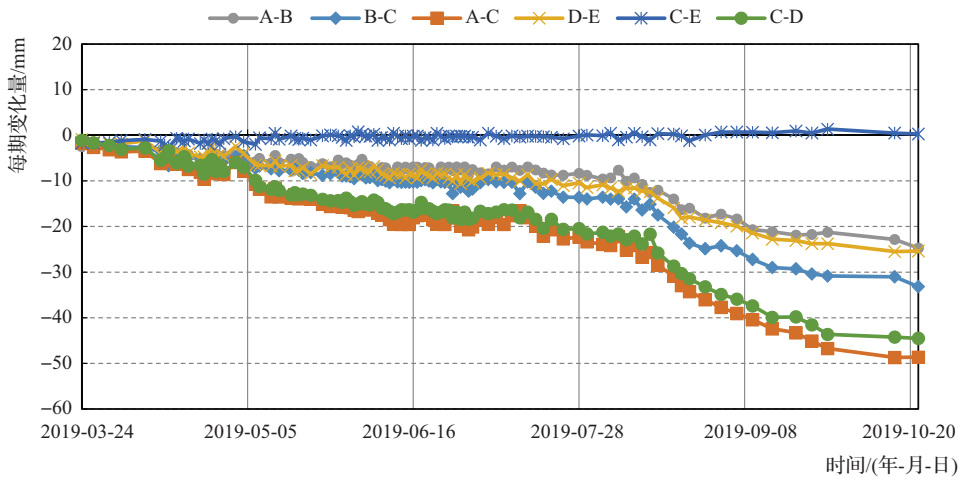


图7 T6+752断面变化曲线

3 永久衬砌支护方案

研究确定T6+640~T6+770范围采用防渗钢板回填混凝土的永久衬砌支护方案:①防渗钢板设置于隧洞内表面,内径6.5m,材质Q345C,厚20mm,加劲环间距800mm;②主要渗水点开孔,设置φ100不锈钢法

兰逆止阀与原排水孔钢管连接,用于平衡充水前和放空期内外水压,以及减少内水外渗;③钢板外回填C25混凝土,回填体厚度不小于70cm;④采用系统锚杆,φ25,长4.5m,入岩4.35m;⑤接触、固结灌浆孔,入岩20m,每排18个,顶拱120°范围回填灌浆,接触灌浆压力0.2MPa,回填固结灌浆压力0.3MPa。





按照钢板运输、安装以及构造要求,对钢板进行抗内压计算和隧洞放空期防渗钢板抗外压稳定计算,防

渗钢板计算结果见表1、表2。

表1 计算结果

内压计算板厚/ mm	最小板厚/ mm	外压计算板厚/ mm	确定板厚/ mm	加劲环/mm			抗外压稳定安全系数	
				厚度	高度	间距	加劲环间钢板	加劲环
18	14	18	20	20	240	800	2.011	1.44

表2 单位长度钢材量

防渗钢板 半径/mm	钢板厚度/ mm	加劲环间距/ mm	加劲环高度/ mm	加劲环厚度/ mm	单位长度钢板 重/t	单位长度加劲环 重/t	单位长度钢材总 重/t
3300	20	800	240	20	3.27	1.02	4.28

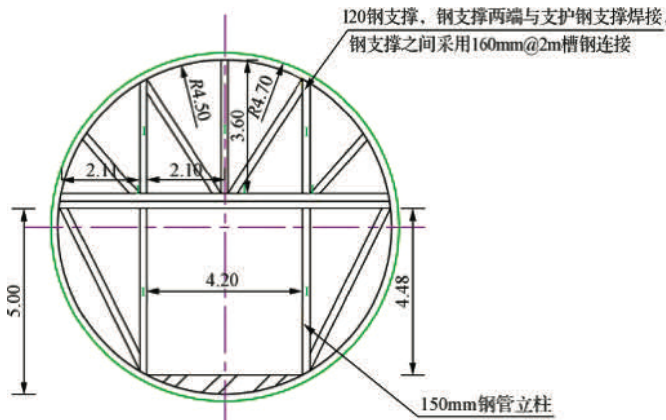


图8 钢支撑加强钢桁架标准断面(单位:m)

#### 4 结 语

老挝南俄3水电站引水隧洞过3号冲沟段是一个裸露型喀斯特与埋藏型喀斯特地貌并存、不同岩层深层风化接触带、淤泥流沙及地下水活动剧烈的典型地下工程,洞挖期出现多次严重涌水、塌方、淤泥流沙现象。准确判定地质条件并制定科学合理的处理措施至关重要,工程利用地质钻探、物探等手段准确判定工程地质条件,应用地质雷达超前预报系统对施工掌子面前方岩体情况及成灾可能性作出预报,采取基于新奥法理念的外、内层支护以及分区区块开挖支护方式,最终该流沙洞段安全通过,为隧洞提前实现全线贯通奠定了条件,避免了地质误判、措施不合理导致的资源浪费、工期延误以及安全威胁。贯通后又创新性地制

定防渗钢板、止逆阀方案,达到工程运行要求。老挝南3水电站淤泥流沙段综合治理是淤泥流沙等不良地质地下工程处理措施的较系统、科学的典型案例,对于类似工程具有一定的借鉴意义。◆

#### 参考文献

- [1] 郭洪林,覃南,宋翔.长距离大型引水隧洞双台车连续衬砌施工技术[J].水利建设与管理,2019,39(9):48-53,27.
- [2] 黄庆坛.石壁水库除险加固工程中新建独立输水隧洞方案比选[J].黑龙江水利科技,2020,48(3):108-110.
- [3] 李建洋,李江明.“混凝土灌注桩+大管棚”在东山五标塌方处理中的实践与研究[J].四川水利,2020,41(3):17-22,25.
- [4] 左坤.观音阁水库输水隧洞方案选取及输水系统安全措施探讨[J].水资源开发与管理,2016(5):35-37.
- [5] 黄世生.管棚支护在水电站引水隧洞施工中的应用[J].水利建设与管理,2016,36(12):13-15.
- [6] 杨井国,何无产,姜克栋.严寒地区冬季隧洞湿喷施工技术研究[J].水资源开发与管理,2019(2):62-65.
- [7] 刘丽东.不良地质条件下隧洞塌方施工技术研究[J].甘肃水利水电技术,2016,52(5):63-65.
- [8] 钟毅,祝华峰.映电总厂恢复生产工程淤泥清运及回收利用系统工艺[J].四川水力发电,2010,29(Z1):121-123.
- [9] 李广.天生桥二级水电站2号引水隧洞典型溶洞段的处理[J].红水河,2001,20(3):33-36.
- [10] 姜洪生,励建全,高桥正男.河道疏浚淤泥固化处理设备、流程及应用[J].中国市政工程,2011(6):34-35.



# 水工隧洞初衬下沉底板错台处置方法

叶瑞彬 吴锐敏

(深圳市金河建设集团有限公司, 广东 深圳 518049)

**【摘要】** 隧洞工程在导流、供水、灌溉、水源输送等水利工程项目中较为常见,通常由初衬和二衬组成。在初期开挖阶段初衬支护的稳定性和安全性最为重要。对黄沙坑水库输水隧洞施工 C3 合同段在施工过程中遇到的砂岩、泥岩以及地下涌水、涌泥等典型地质影响下出现的初衬下沉和底板错台现象,通过原因分析,采用有针对性的排水治水、仰拱闭环、加强支护等技术处理方法,取得了较好效果,可为类似工程提供借鉴。

**【关键词】** 水工隧洞;初衬下沉;底板错台;处置方法

中图分类号: TV544+.923

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)04-049-04

## Treatment method of slab end faulting of sinking floor in hydraulic tunnel initial lining

YE Ruibin, WU Ruimin

(Shenzhen Jinhe Construction Group Co., Ltd., Shenzhen 518049, China)

**Abstract:** The tunnel project is more common in diversion, water supply, irrigation, water source transportation and other water conservancy projects. It is generally composed of a primary lining and a secondary lining. The stability and safety of the initial lining support are the most important in the initial excavation stage. The causes of initial lining sinking and floor slab end faulting phenomena under the typical geological influence such as sandstone, mudstone, underground gushing water, gushing mud, etc. encountered during construction of sand pit reservoir water conveyance tunnel construction C3 contract section are analyzed in the paper. Targeted drainage water control, inverted arch closed loop, support strengthening and other technical treatment methods are adopted with excellent effect, thereby providing reference for similar projects.

**Keywords:** hydraulic tunnel; initial lining sinking; floor slab end faulting; treatment method

### 1 工程概况

#### 1.1 工程简介

黄沙坑水库工程隧洞施工 C3 合同段,范围为 K4+481~K9+823.56,设计纵坡 1‰。为满足施工要求,在桩号 K6+091.98 处设施工斜支洞,支洞长 360m。为

解决高程 408.0m 以下的龙坑、新厝、岩里等雪峰灌片耕地的灌溉需求,结合施工考虑,在主洞洞岭拐弯出设一长 1.341km 的施工支洞,在支洞出口设灌溉放水口,采用 DN600 锥阀控制。隧洞出口采用明管埋设至水厂,明管长 100m 连接至供水厂前池,并在水厂前池出口处设一个 DN800 锥阀控制。

收稿日期: 2021-06-22

作者简介: 叶瑞彬(1980—),男,本科,工程师,主要从事水利工程建设与管理工作。



黄沙坑水库隧洞工程施工 C3 合同段地质条件复杂,隧洞围岩的岩性有白云质灰岩、砂岩、泥岩,地质构造主要有北西向和近东西向断裂及层面裂隙,且溶隙、溶洞发育。隧洞处于地下水位以下,地下水活动明显,且存在喀斯特水,受多重不利因素组合影响,围岩不稳定一极不稳定占主导地位。

## 1.2 设计情况

C3 标段隧洞为无压隧洞,主洞设计长度为 5342.58m,灌溉支洞长 1341m,主洞开挖断面为 2.6m×2.8m(宽×高)城门洞形。隧洞开挖采用新奥法全断面爆破,初衬支护形式分为 4 个类型:① I、II 类围岩不支护;② III 类围岩初衬为喷射 C30 混凝土 80mm 厚;③ IV 类围岩初衬采用 I16 工字钢拱架+挂网+锚喷 C25 混凝土 50mm;④ V 类围岩初衬采用  $\phi 42$  超前小导管+I18 工字拱架+挂网+锚喷 C25 混凝土 50mm,设计 V 类围岩开挖初衬断面见图 1。

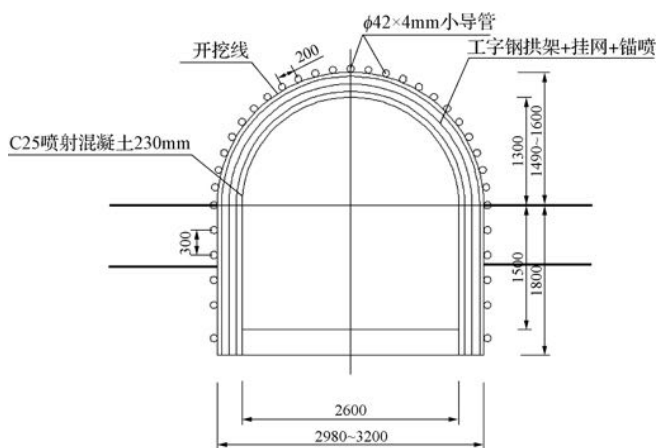


图 1 V 类围岩开挖初衬断面 (单位:mm)

## 2 施工情况

隧洞开挖分为三个工区分头施工,主洞从大桩号开始往小桩号掘进,在施工至 K9+175 段时发现,在已完成初衬的 K9+656~K9+590 喷射混凝土有开裂及掉块先兆,底板地面明显下沉造成隧洞地面出现错台。项目部立即停止施工,并组织技术人员会同参建单位进行隧洞勘测素描,经测量发现 K9+656~K9+590 段初期衬砌出现收敛变形,左侧洞身右倾 5°,拱顶累积下沉 180mm,隧洞地面错台,有下沉现象,高差达到 220mm,洞顶初衬喷射混凝土出现贯穿性裂缝。

## 3 原因分析

隧洞前期施工洞段主要为主洞和支洞的出口段,隧洞地质以土质,IV 类、V 类围岩为主,K9+656~K9+590 段以粉质黏土、砂岩、泥岩、软岩为主,且覆盖层薄,围岩分布地带发育溶沟、溶槽、溶洞,富水性较好,断裂构造发育,工程地质复杂。水工隧洞受洞径小、洞段长的局限,普遍为边开挖边做初期支护衬砌,未能及时进行二次衬砌,因此隧洞受外部因素影响长期发生蠕变导致隧洞初期衬砌破坏时有发生。

a. 因 K9+656~K9+590 距出口段不远,属典型的浅埋隧洞,洞中渗水、涌泥现象比较严重,流经此处往洞外排水,且近期连续下了 1 个月的雨,粉质黏土吸水后土体自重增加,使得泥岩黏聚力下降甚至消失,产生较大的变形力,破坏土体稳定性,使其自稳性变差,支护抗力不足。

b. 根据泥岩自身的特性,归类为 V 类围岩,该段含部分碎石性黏土,土体松散,自稳能力差,承载能力小,在内部黏聚力和岩体之间摩擦系数小、支撑力不够的情况下,极易出现局部压力增大,产生挤压力,造成土体变形,隧洞下沉。

c. 泥、砂岩,呈散体状,稳定性极差,遇地下水冲刷极易带走不稳定的松软物质形成空洞,受地下水影响而软化、泥化,并且膨胀作用减小结构面摩阻力,从而导致初衬结构失效。

d. 分析原设计开挖初衬方式,优点是节省工期和成本,但是对于极端地质、地质条件复杂、富地下水的暗挖段,由于没有施作仰拱封闭成环,容易因隧洞底板地面扰动、变形而影响隧洞的自稳能力和支撑力,造成隧洞下沉变形甚至坍塌的病害。

## 4 处理方案

通过对隧洞下沉变形、底板错台原因进行分析,总结出影响初衬稳定的各项因素分别为地下水影响、围岩影响和支护方式影响等。由于下沉是多种原因造成的,所以制定了如下综合处理的技术方案。

### 4.1 排水治水处理

隧洞病害处理必须坚持“先治水再治塌”的原则。

由原因分析可以看出,地下水造成的典型地质恶化对引起初衬下沉、底板错台起到较大的作用,因为不良地质段围岩具有软弱破碎、承载力低、稳定性差、变形量大及遇水崩解等特点,所以首要条件是对隧洞的地下水进行处理。处理应遵循“宜疏不宜堵”的原则,采用“小堵大疏、堵排结合、先固后堵”的手段。盲目地对大出水点进行封堵,往往会造成该区段及周边的地下水位及压力迅速升高,从而可能导致其他部位出水量、出水压力增大以及围岩失稳。隧洞的渗水、漏水、涌水处理,应根据出水压力和水量进行分类判断处理,制定有针对性的排水治水措施方案,不可盲目采用单一处理手段。

a. 对于涌水带泥的出水部位,应填入由土工布包裹的砂石过滤料,在保证排水通道畅通的情况下阻止泥砂流失,并埋设引流排水管,将水引入隧洞排水系统,待二衬完成及回填灌浆后方能封堵拆除。

b. 对于出水压力大(出水量大)的部位,采用带阀门的排水管用钢筋网及混凝土安装固定以便控制水流的方向,并在出水点周围做固结灌浆处理,二衬施工时关闭闸阀将其填埋在边墙背后的混凝土中。

c. 对于无压力的小渗漏水处理,可先观察漏水处周围 1m 范围内是否有滴水点、湿润点,若无以上现象可判定为周围岩层无薄弱部位,可以采用封堵措施,布置灌浆孔直接注入水泥-水玻璃双浆液封堵。

d. 改变隧洞排水方式。隧洞排水方式由原“排水明沟自流出洞”改为“设置集水井、布设水泵和排水管分级接力强排”方式,减少地下水在洞内渗流时间,从而减少水对隧洞主体初衬结构的冲刷及破坏。

## 4.2 加密钢拱架

加密工字钢拱架,使拱架的间距变小,从而增强支护的刚性。由原设计的 2.0m/榀变更为 0.5m/榀,并在工字钢拱架底部增设工字钢横撑,形成闭环。施工顺序为:以 2m 为一环,采用风镐人工凿除初衬喷射混凝土;当原有初衬中使用钢筋网片连接时,须用气割切断钢筋,严禁使用手持砂轮机切割钢筋;根据洞径轴线剔除变形突出的土体后安装加密工字钢拱架。当原来已安装的拱架变形过大需拆除时,必须先安装代替钢拱再拆除原工字钢拱架,新装、更换过程要确认隧洞变

形沉降稳定、清理拱顶及周围松散岩体后才能施工,并严格按照短进尺 2.0m/段分批实施,过程要控制,不能一次性大拆大改以防止出现坍塌,确保施工过程安全。

## 4.3 增加锁脚锚杆

锁脚锚杆垂直于拱脚岩壁穿过软弱、不稳定的岩体,锚固在深层稳定的岩体中,既起到悬吊钢拱架作用,也能挤压土体形成压缩区,使岩体的整体性和承载能力得到提高。在工字钢拱架上打入锁脚锚杆能使工字钢拱架支护更加稳定,避免出现掉拱、拱脚收敛等问题,在每榀工字钢拱架上打入锁脚锚杆,锚杆与水平方向最佳夹角为  $15^\circ$ 。锚杆采用  $\phi 22$  钢筋,长度 3.0m,7 根为一组。锁脚锚杆采用上下分层、左右对称的方式布置,从工字钢中间钻孔穿入。

## 4.4 施作仰拱

仰拱结构是为了优化衬砌拱部支护结构受力情况而在隧洞底部设置的使整个衬砌结构组合成一个闭合圆环的反向拱形支护结构,是隧洞支护体系的重要组成部分之一。一方面仰拱结构能够将上部衬砌结构传递来的隧洞上部的围岩压力以及隧洞路面荷载有效传递到下部围岩,另一方面其还能够有效抵抗隧道下部地层产生的向上的反力抵抗下部围岩的上鼓。而且仰拱与衬砌上部结构结合成整体,使隧洞衬砌结构能够封闭成环,提高了结构的稳定性。

在隧洞底板原工字钢拱架底部采用风镐开挖成弧形仰拱,最深处的深度为 500mm,仰拱两端支托在工字钢拱架下方,用 C15 混凝土填筑,见图 2。修筑仰拱后与初期衬砌封闭成环,既提升支护结构的刚度及承载能力,也约束隧洞周边围岩位移,抑制隧洞底板的土体隆起,控制隧洞围岩塑性区发展,增强支护结构的受力性能,使隧洞受力更加均匀、合理。

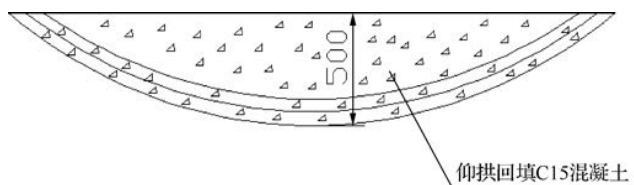


图2 隧洞增加仰拱做法

## 4.5 布设注浆小导管

在封闭拱架的拱部  $180^\circ$  范围内,环向布设注浆小导

#### 4.6 加设钢筋网片喷混凝土

钢筋网片安装固定后便可进行混凝土喷射,喷射分为两次进行,混凝土为 C25 细石混凝土,厚度为初喷 50mm 厚,二次喷 180mm 厚。

## 4.7 处理效果

通过使用上述多种综合改进措施,形成隧洞综合处理大样,见图4。进行处理后的隧洞段经过6个月变形监测,洞墙累计变形不超过2mm,拱顶下沉累计3mm,拱底累计下沉3mm,隧洞结构无裂缝、无渗水现象,隧洞趋于稳定,安全可靠。有了这一段的处理经验,后面未开挖段遇到类似围岩,都采用此支护开挖方式,没有再出现此类病害。

## 5 结 语

通过黄沙坑水库输水隧洞施工 C3 合同段在遇 V 类围岩极端不良地质施工过程初衬下沉和底板错台原因的分析,采取针对性的处理措施,提出采有改变排水方式、加密工字钢拱架、增加锁脚锚杆、施作仰拱、布设注浆小导管、加设钢筋网片喷射混凝土等综合处理方

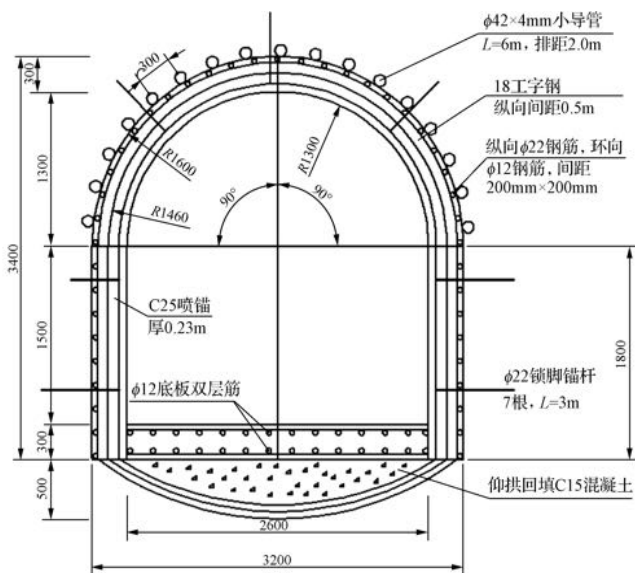


图4 隧洞综合处理大样图(单位:mm)

法来限制土体变形和处理隧洞底板下沉、错台,可为类似工程提供借鉴。◆

## 参考文献

- [1] 赵玉辉. 隧洞围岩蠕变变形侵限处理施工技术[J]. 水利建设与管理, 2017, 37(3): 16-18.
- [2] 嵇振礼. 隧道仰拱结构支护性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [3] 单振江. 防渗渠道施工实例及其技术探讨[J]. 水资源开发与管理, 2016(5): 67-69.
- [4] 刘登学, 池建军, 丁秀丽, 等. 某输水隧洞衬砌开裂机理与防治措施探讨[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(Z1): 852-858.
- [5] 凌永玉, 刘立鹏, 汪小刚, 等. 大尺寸水工隧洞衬砌物理模型试验系统研制与应用[J]. 水利学报, 2020, 51(12): 1495-1501.
- [6] 谢小帅, 谢兴华, 王小东, 等. 隔水层对深埋隧洞衬砌外水压力的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(Z2): 146-150.
- [7] 鲁朝显, 李鹏. 白龟山水库尾水隧洞开挖支护技术[J]. 水利建设与管理, 2018, 38(7): 14-17, 6.
- [8] 杨井国, 何无产, 姜克栋. 严寒地区冬季隧洞湿喷施工技术研究[J]. 水资源开发与管理, 2019(2): 62-65.
- [9] 焦家训, 张玉莉, 张太喜, 等. 小断面隧洞斜井洞挖技术研究与应用[Z]. 宜昌: 葛洲坝集团基础工程有限公司. 2016.
- [10] 秦洋. 大断面隧洞衬砌混凝土温控技术研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(24): 131-132.
- [11] 李泽发. 水工输水隧洞衬砌结构裂缝成因及预防[J]. 河南水利与南水北调, 2019, 48(6): 50-52.



# 高效废水处理系统在黄金峡水利枢纽工程中的应用

马光明 闫 良

(陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710100)

**【摘 要】** 水利水电工程建设过程中会产生大量施工废水,特别是砂石料加工及混凝土生产过程,如处理不及时会对当地环境造成严重影响。在黄金峡水利枢纽工程中,为解决此问题,采用了多种方法进行对比试验。最终,采用高效废水处理系统,成功实现了高效处理、循环利用及绿色环保的目标。该系统可为类似工程实现施工废水“零排放”拓展新思路,为实现绿色施工做出贡献。

**【关键词】** 废水处理;高效系统;循环利用;黄金峡水利枢纽

中图分类号: X703

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)04-053-05

## Application of high efficiency wastewater treatment system in Huangjinxia Water Conservancy Project

MA Guangming, YAN Liang

(Shaanxi Hanjiang-to-Weihe River Water Transfer Project Engineering Construction Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The construction process of water conservancy and hydropower project produces a large number of construction wastewater, especially sand and stone processing as well as concrete production process. Inadequate treatment thereof will cause serious influence on the local environment. A variety of methods are adopted for comparative tests in Huangjinxia water conservancy project in order to solve the problem. Finally, the efficient wastewater treatment system is adopted to successfully realize efficient treatment, recycling and green environmental protection. The system can expand a new idea for similar projects to achieve “zero discharge” of construction wastewater, thereby making contribution to the realization of green construction.

**Keywords:** wastewater treatment; high efficiency system; recycling; Huangjinxia water conservancy project

中国是一个严重缺水的国家,水资源地域分布极不平衡,特别是北方地区缺水情况更为严重。随着国家社会经济的发展和人民生活质量的提升,跨区域调水工程势在必行。在这些水利水电工程建设施工的同

时会产生数量较大的废水及少量的生活污水。生活污水可采用化粪池及一体化 MBR 膜设备+消毒设备等方式进行处理,处理方法简单且成熟。该类工程施工废水主要由①枢纽建筑物基坑渗水因开挖变浑浊、混凝土

收稿日期: 2021-03-29

基金项目: 陕西省水利科技计划项目——三河口水库库区与消落区土地生态利用研究(2019slkj-B1)

作者简介: 马光明(1974—),男,本科,高级工程师,主要从事大中型水利水电工程建设及管理工作。



浇筑施工及混凝土防渗墙造孔污染等;⑥各类隧洞爆破开挖、出渣、衬砌及灌浆过程中渗水污染变浑浊;⑦砂石料生产加工、混凝土生产、机械维修保养等方式产生。其中砂石料生产废水数量最大,悬浮物浓度很高,对其废水处理要求也更高,难度较大。

引汉济渭黄金峡水利枢纽工程建设区域为南水北调中线工程与引汉济渭工程双水源地,对水质的要求较高,工程施工产生的废水全部禁止外排,必须全部回用处理。枢纽主体工程、各类隧洞工程及临时工程施工产生的废水经净化处理达标后可用于厂区抑尘洒水、绿化、冲厕以及运输道路洒水等;河床天然骨料加工产生的废水经净化后重新回用,做到废水零排放。

## 1 工程概况

黄金峡水利枢纽工程是陕西省引汉济渭调水工程重要组成部分,工程级别为 I 等,工程规模为大(1)型。该工程以调水为主、发电为辅,兼顾航运,其多年平均供水量约为 10 亿  $\text{m}^3$ ,泵站设计流量 70.0  $\text{m}^3/\text{s}$ ,扬程 106.45m,总装机容量 12.6 万 kW。该水库正常蓄水位 450m,总库容约为 2.2 亿  $\text{m}^3$ ,电站总装机容量 13.5 万 kW。大坝为混凝土重力坝,大体积断面采用

碾压混凝土,坝顶长度 349m,最大坝高 63m。建设工期为 52 个月。

## 2 黄金峡水利枢纽工程标段划分及废水处理方案简介

黄金峡水利枢纽按照枢纽前期工程(坝顶以上两岸坝肩开挖支护)、枢纽主体大坝工程、枢纽砂石料加工及混凝土生产供应、鱼类增殖站和引水隧道等项目分标段进行建设。枢纽前期工程及鱼类增殖站以水面以上开挖、回填为主,废污水产生的量较少,采用池塘自然沉淀法处理。引水隧道标段因长时间施工排水采用“多级沉淀池+絮凝剂+反滤设备”处理形式。主体大坝工程仅在建筑物水下开挖生产废水且废水浊度小,其他时段为地下渗水及少量混凝土施工废水,故开挖废水及地下渗水采用“大型沉淀池+反滤土工布”处理形式,混凝土及灌浆施工产生的废水采用沉淀池自然沉淀法处理。枢纽砂石料加工前期采用“多级沉淀池+絮凝剂+反滤设备”处理形式,其工艺流程见图 1,因不能满足高强度施工需要,后期改造为本文介绍的高效废水处理设备系统。

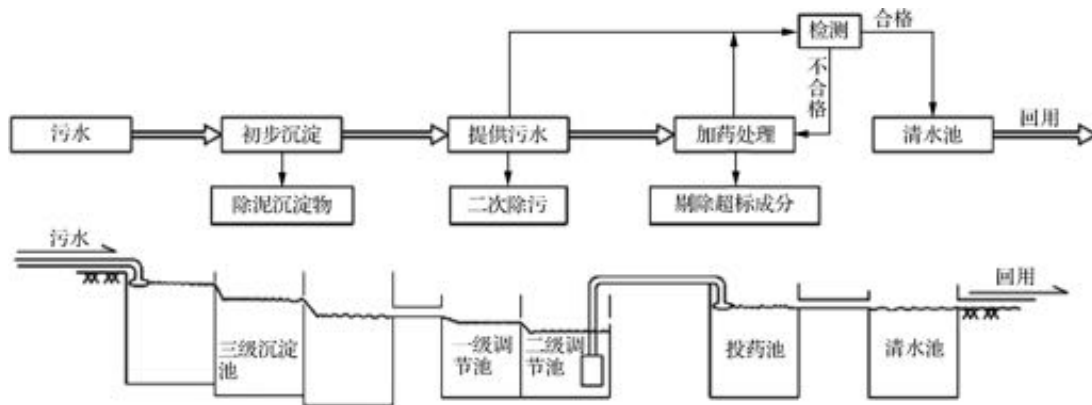


图 1 一般废污水处理工艺流程(自然沉淀+絮凝剂)示意图

## 3 高效废水处理系统设备在黄金峡砂石加工系统中的应用

### 3.1 砂石加工系统废水处理设备选型

黄金峡水利枢纽主体工程混凝土总量为 136.8 万  $\text{m}^3$ ,共需成品骨料约 310.0 万 t。共规划有四个天

然料源地,分别为高白沙、史家梁、白沙渡及史家村。料场均位于河漫滩,全部由卵砾石夹砂及纯砂层组成,砂砾石料储备总量 447.3 万  $\text{m}^3$ ,母料开采砂料含泥量一般大于 8%,必须进行冲洗。

黄金峡水利枢纽砂石加工系统设计规模,按一天两班 14h 工作制满足常态混凝土 8.0 万  $\text{m}^3$ /月供应能

力,系统设计处理能力为 780t/h,系统生产能力为 600t/h。骨料加工产生冲洗废水 450 ~ 500t/h,废水含固率约 5%,经计算每小时产生的污泥量为 25t/h。无论从砂石料加工能力还是废水处理工作量来看,施工强度均较大。

鉴于母料开采实际含泥量超出原设计提供的指标,经过前期生产性试验,认为原有的“多级沉淀池 + 絮凝剂 + 反滤设备”废水处理方案及设施不能满足高峰时段混凝土生产需求,必须对原设计方案进行升级改造。经过多方调查及比对,最终选择本文所介绍的高效处理设备,成功解决了废水处理零排放及淤泥干化等重大难题,保护了水源地环境。

### 3.2 高效废水处理设备的应用

#### 3.2.1 设计依据及原则

设计依据及原则为:④废水“零排放”;⑤具有先进性和可调节性;⑥根据废水水质、水量的变化,出水口达到水质稳定,能够达标回收利用,且系统运行稳定、安全,设备便于操作和维修;⑦淤泥能定时排放,浓缩淤泥含水率应不大于 20%,晾晒后便于外运至渣场填埋或作为复垦基层。

#### 3.2.2 废水处理设计原理

砂石筛分车间和棒磨机车间冲洗废水,自流进入上部沉淀池,颗粒较大物料在沉淀池自然沉淀,按期采用反向挖掘机配自卸汽车对沉淀池内积渣进行清理;悬浮物浓度较高的废水从沉淀池溢流口经过钢管自流进入浓缩沉淀罐内,在此期间通过在管道混合器内混合加药,浓缩罐将大部分悬浮物自然沉淀在罐体底部,上层清澈水体从浓缩罐上部自流进入清水池内,循环生产;浓缩罐底部淤泥在罐体上部水压下自流进入带式压滤机中,带式压滤机将淤泥干化处理,处理后形成的泥饼通过胶带机送入干化泥储存池堆存,装载机配自卸汽车将干化后的淤泥运至指定渣场;压滤机底部收集带药性的滤液由渣浆泵抽送至锥罐,做循环处理。压滤机选用 1 台 3.5m 带式压滤机,每小时出泥量为 30t,满足要求。整套系统工艺流程见图 2,设备示意图见图 3。

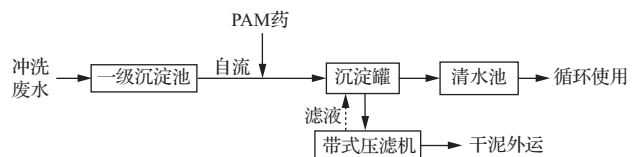


图2 高效废水处理系统工艺流程

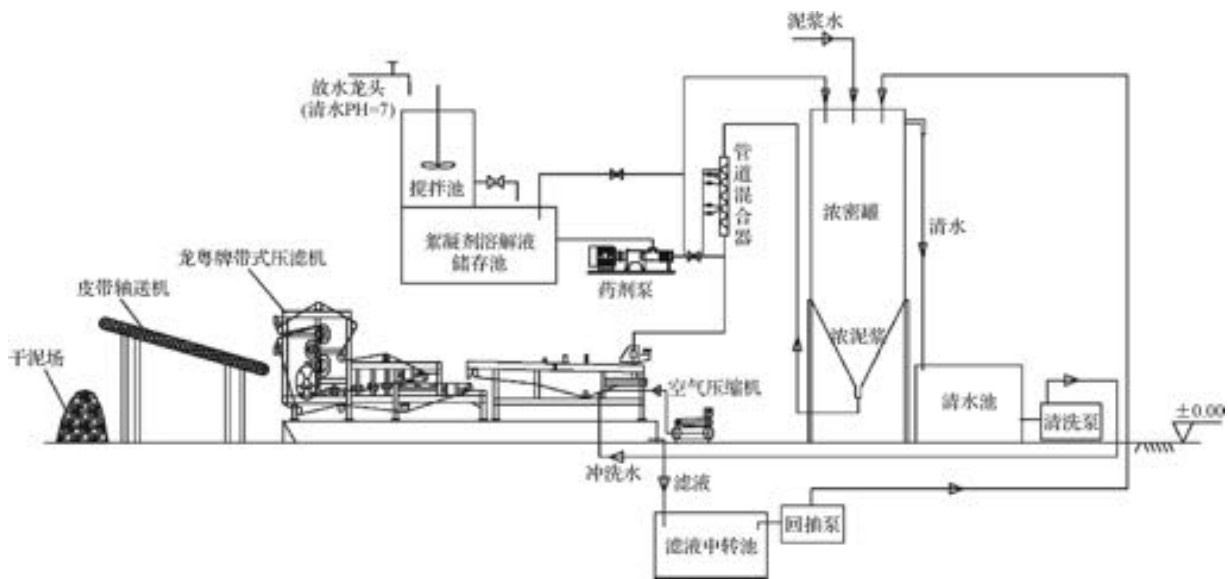


图3 高效废水处理系统设备示意图

#### 3.2.3 主要设施技术参数及功效

a. 沉淀池。上部沉淀池设置高程 443m,该池用于

暂时贮存经洗砂设备溢流的废水,利用自然地势高差,导流管将经除细砂后的生产废水送入后续的浓密沉淀



罐进行进一步处理。

**b. 浓密沉淀罐。**通过废水导流管将除细砂后的生产废水导入该设施,管道泵将絮凝剂和混凝剂通过管道混合器与生产废水混合,并在管道内逐渐增大,进入浓密沉淀罐内的稳流筒,经稳流筒降低水流速度后,污泥水逐渐滑落到浓密沉淀罐底部,并在罐体底部浓缩,在罐内上部水压下底部浓缩泥水经管道进入带式压滤机进行进一步的处理,处理后的沉淀罐上部清液自流进入清水池中,回用于生产。沉淀罐采用钢结构。

冲洗骨料产生废水 450 ~ 500t/h。锥罐设计直径 10m、筒深 6m、锥部深 6m、总高度为 14m,锥罐可容纳约 650m<sup>3</sup> 的水。

**c. 带式压滤机。**按照每小时产生污泥量 25t,选用 1 台 3.5m 带式压滤机。利用带式压滤机内的滤布对沉淀罐底部排出的浓缩泥浆进行有效截留。带式压滤机的优点是自动化程度高,现场容易做到干净卫生。

### 3.2.4 废水处理设施现场布置

加药房布置高程 443m;浓密沉淀罐紧邻原清水池边上,其基础高程 424.7m,罐顶高程 438.8m;压滤机布置在四级沉淀池的第一、二池子顶部,池顶高程 428.7m,池子顶部采用钢结构封闭,便于作业人员通行;第一个池子作为压滤机压滤后滤液收集池,第一个池子和第二个池子下部连通,作为处理后的清水蓄水池;第三级沉淀池作为干化后的泥饼储存池。废水处理现场见图 4。



图 4 黄金峡砂石加工系统高效废水处理设备现场

### 3.2.5 废水处理投药措施

废水处理投放的药剂主要为聚合氯化铝、聚丙烯酰胺、盐酸,其中聚合氯化铝与聚合烯酰胺为絮凝剂,主要处理悬浮物,盐酸主要作用是调节 pH 值。掺入量根据污水浑浊度进行确定,施工单位可自行选择絮凝剂。

**a. 聚合氯化铝(PAC)。**该药剂絮凝效果好,可快速絮凝成型。其掺入量应根据废水浑浊度及悬浮物实测指标进行确定。一般悬浮物平均值按 2000mg/L 标记,其投药量按 50 ~ 100mg/L 计算。初次最佳投药量约为 400mg/L。

**b. 聚丙烯酰胺(PAM)。**该药剂作为助凝、絮凝及污泥脱水使用。其掺入量应根据废水浑浊度及悬浮物实测指标进行确定。将药剂放入搅拌桶内,经搅拌均匀后,通过计量泵添加至设备加药区。一般悬浮物平均值按 1000mg/L 标记,投药量为 1mg/L,初次最佳投药量约为 5mg/L。

**c. 黄金峡砂石加工系统加药方法及参数。**主药为砂石加工专用高效沉淀剂,辅药为高效聚氯化铝。主药和辅药在加药房分开加水拌制,通过管道自流进入沉淀罐或压滤机。药液拌制时间不少于 20min。根据现阶段生产情况,主药液配置比例为每立方米水配主药 1kg,每小时需要药液 22m<sup>3</sup>;辅药液配置比例为每立方米水配辅药 0.5kg,每小时需要药液 2m<sup>3</sup>。

### 3.2.6 废水处理设备操作规程及维护保养

#### 3.2.6.1 上罐沉淀

①搅拌药剂:加清水,开搅拌电机进行加药搅拌;搅拌药剂时间为 20 ~ 50min,开辅药打入泥浆池先一步反应;②污泥上罐:开进泥阀上罐,开上罐主药剂泵,开刮泥机;③罐内沉淀:调节上罐药剂流量,罐内泥水分离。上罐进泥阀关闭停止时上罐药剂泵停止,罐顶药剂阀门关闭。

#### 3.2.6.2 上机压泥

①搅拌药剂:开搅拌电机进行加药搅拌;②设备运行:开空压机,气压达标后(检查压滤机滤布是否撑紧)启动主传动电机、浓缩机、稀释电机、清洗泵;③上机压泥:启动上机主药剂泵、上机辅药剂泵、打开出泥



管道闸阀、调节上机泥量、主药和辅药的流量大小,主传动和浓缩机转速,药剂与泥浆反应在料斗出料成絮凝状或凝结核。

### 3.2.6.3 结束运行

关闭出泥管道闸阀、上机主药剂泵停止、上机辅药泵停止、关闭刮泥机。上机管路反冲水开启、疏通管道防止泥浆凝结核管,压滤机空转清洗 20min。

### 3.2.6.4 设备维护与保养

③设备轴承座隔半月至一个月加一次黄油;④设备调偏滑动杆、撑紧辊滑动杆、链条、齿轮勤加机油或黄油均可;⑤设备电机每月检查油表一次,油少就加机油;⑥设备辊筒沾泥用水枪进行冲洗;⑦尽量保持每日

罐体清空泥量;⑧定期清理布料器料斗残留杂物、石子或凝结核的泥块;禁止石子落入泥浆池以防损伤渣浆泵、滤布,堵塞罐体与管路。

### 3.2.7 高效废水处理设备系统效果分析

黄金峡砂石加工系统成品骨料加工过程中施工废水水泥状悬浮物达到 4 万 ~ 5 万 mg/L,水流特别浑浊,经过此高效系统设备处理后下降至 50 ~ 60mg/L,经过处理后的浊水出现质的飞跃,可全部回收利用,继续用于成品砂石料加工,真正实现了施工废水零排放。此高效系统设备设计上达到了技术可行、运行可靠标准。该系统的建设及运行完全满足国家对一级水源环保的预期要求。废水处理效果对比见图 5。



图 5 废水处理效果对比

## 3.3 经济效益分析

该方法与传统沉淀方法(如:多级沉淀池+絮凝剂+反滤设备)相比在投资上基本相当,但生产效率是传统沉淀方法的 3 ~ 5 倍,有效提高了成品骨料生产强度,保证了枢纽大体积混凝土拌和供应施工,并有效预防了偷排现象。

## 4 经验与建议

对于施工废水总量较小或每小时出水量小的项目,为节约成本,可采用连续沉淀池并人工加药的方式进行处理。若每小时出水量较大或废水总量较大,为快速有效处理废水,应采用自动化程度较高且处理效果较好的高效废水处理设备。(下转第 78 页)



# 堡镇港北等四座水闸外移工程基坑 降排水方案设计与优化

蔡超英<sup>1</sup> 潘世洋<sup>2</sup>

(1. 上海市堤防泵闸建设运行中心, 上海 200080;  
2. 常州工学院土木建筑工程学院, 江苏 常州 213032)

**【摘要】** 为保证基坑开挖的效率与安全需进行降排水施工。本文以上海市崇明岛堡镇港北等四座水闸外移工程为例, 针对地下水位埋深浅、基坑开挖深度大工况下的基坑降排水方案进行设计与优化, 介绍了降排水施工的基本流程, 为类似工程提供参考依据。该工况下采用管井降水方案; 在本工程降水中, 结合现场实际情况, 通过调直开挖边线、取消轻型井点, 较好地提高了施工效率和经济效益。

**【关键词】** 水闸; 基坑; 降排水; 管井降水; 优化

中图分类号: TV52

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)04-058-08

## Scheme design and optimization of foundation pit dewatering and drainage of four sluice outward movement project including Daobao Gangbei Sluice

CAI Chaoying<sup>1</sup>, PAN Shiyang<sup>2</sup>

(1. Shanghai Dike Pump and Sluice Construction and Operation Center, Shanghai 200080, China;  
2. School of Civil Engineering, Changzhou University of Technology, Changzhou 213032, China)

**Abstract:** It is necessary to carry out the dewatering and drainage construction in order to ensure the efficiency and safety of the foundation pit excavation. The outward movement project of four sluices in Gangbei, Daobao Town, Chongming City, Shanghai is adopted as an example in the paper. The foundation pit dewatering and drainage scheme under the condition of shallow underground water level buried depth and deep excavation depth of foundation pit is designed and optimized. The basic flow of dewatering and drainage construction is introduced, thereby providing reference for similar projects. Pipe well dewatering plan is adopted under the condition. The practical condition in the site is combined during dewatering of the project. The construction efficiency and economic benefits are greatly improved through straightening the excavation sideline and cancelling the light well sites.

**Keywords:** sluice; foundation pit; dewatering and drainage; pipe well dewatering; optimization

本文以上海市崇明岛堡镇港北等四座水闸外移工程为例, 针对地下水位埋深浅、基坑开挖深度大的工

收稿日期: 2021-03-08

作者简介: 蔡超英(1971—), 女, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程建设管理工作。

况,对基坑降排水方法、优化分析和施工工艺进行了分析总结,可为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

崇明岛堡镇港北等四座水闸外移工程位于崇明北沿,堡镇港至八滄港区间主海塘及其外侧滩地上,地貌类型为潮坪地貌类型。场地内受河流冲积影响,地势稍有起伏。原始地貌为滩地及鱼虾池塘,有一座箱涵老闸通道,涵闸两侧为一条土方便道,便道宽约 3.5m,绝对标高约 6.0m,便道贯穿拟开挖基坑东西侧,位于基坑中部。

工程所处位置原滩面地面绝对标高约 4.0m,水闸地基最低建基面标高 -3.15m。基坑土方开挖工程量 67632m<sup>3</sup>,基坑面积 5940m<sup>2</sup>,基坑土方开挖面积 13000m<sup>2</sup>,基坑边坡坡度 1:3,采用二级放坡。

## 2 地质条件与地下水分析

根据地质勘察资料,工程勘察范围(最深 60.3m)内的地基土为第四纪全新世 Q34~Q23 的沉积层,主要由填土、粉性土、砂性土、淤泥质土及黏性土组成。根据地基土沉积年代、成因类型及物理力学性质差异,

将场地沿线 60.3m 深度范围内土层划分为 4 个主要层次,其中①、②、⑤、⑦层分别根据各自的土层特性分为若干亚层。

工程拟建场地内地下水类型属第四纪松散层中孔隙潜水及承压水。浅层地下水属孔隙性潜水,主要赋存于①<sub>3,2</sub>层、②<sub>3</sub>层及②<sub>3</sub>夹层中,外侧临长江口,直接受江水补给,其水位变化主要受控于大气降水、江面蒸发及潮水等因素。地下水稳定水位埋深在 0.20~1.7m 之间,相应标高为 2.72~4.83m。承压水分布于⑦层,层顶最浅处埋深 34.0m,而本工程基坑最大开挖深度约 7m,承压水对本工程开挖无影响。

本工程水闸基坑开挖对地下水天然动力平衡有一定影响。工程施工活动改变了原有天然状态下地下水及土体的动力平衡状态,导致在渗透力及静水压力的作用下,有流砂、管涌及基坑突涌等可能性。各土层及渗透系数分析汇总如表 1。场地浅部以①<sub>3,2</sub>层及②<sub>3</sub>层及②<sub>3</sub>夹层为主,上述土层中②<sub>3</sub>层渗透性较强,在一定的渗透力及静水压力作用下,局部易产生渗水和流砂等现象,为维护边坡和基坑稳定,需采取降水、止水、隔水等有效措施。

表 1 土层情况

序号	土层层号	标高区间/m	厚度/m	渗透系数 $K/(\text{cm/s})$	渗透等级
1	① <sub>3,2</sub> 层灰色淤泥质粉质黏土(新近沉积土)	3.73~2.13	1.6	$3.00 \times 10^{-6}$	微透水
2	② <sub>3</sub> 层灰色砂质粉土	2.13~-3.47	5.6	$3.00 \times 10^{-4}$	中等透水
3	② <sub>3</sub> 夹层灰色淤泥质粉质粘土	-3.47~-5.47	2	$2.00 \times 10^{-6}$	微透水
4	② <sub>3</sub> 层灰色砂质粉土	-5.47~-13.97	8.5	$3.00 \times 10^{-4}$	中等透水

## 3 降水方案设计与优化

### 3.1 降水方案设计

工程设计基坑降水方案拟采用轻型井点降水和管井降水,其中轻型井点 7 套,管井 21 口。轻型井点沿基坑二级平台间隔 1.2m 布置,管井在基坑底大体均匀分布。轻型井点及管井降水设计构造图及布置图 1~图 4 所示。

### 3.2 随施工过程优化的降排水方案

在降排水施工过程中,需要根据实际情况对降排

水方案,从效率和经济性等方面做调整与优化。设计基坑开挖边线东西两侧边线中部均向坑内凸出约 5.2m,长度约 77.2m,双轴搅拌桩机械移位的同时还要转向,经现场勘察并经设计单位同意后,将开挖边线外移调直,双轴搅拌桩沿开挖线顺直连接。调整后可减少桩机转向 8 次,减少双轴搅拌桩角点 8 个,提高了施工效率,同时降低了因桩机移位转向及双轴拐角连接对止水帷幕连接完整性的不良影响。

在降排水前期,根据设计方案设置了一组轻型井点,采用 7.5kW 真空泵,40 根  $\Phi 48$  井管,降水效果很差,

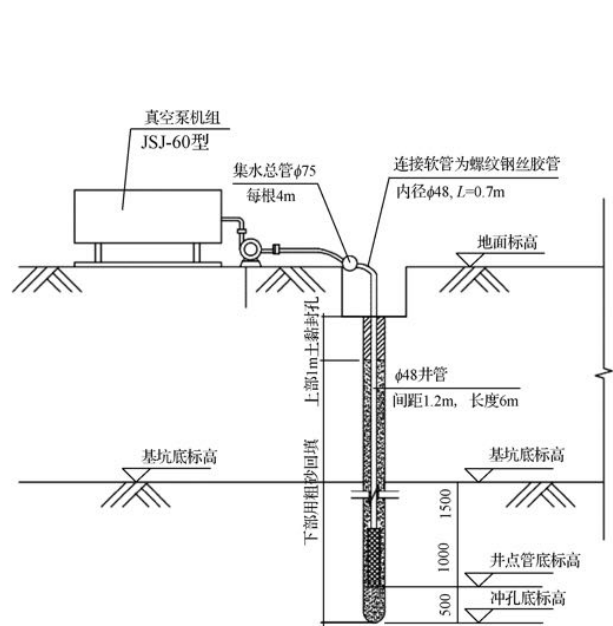


图1 轻型井点降水构造图

(未标注的长度单位为 mm, 标高单位为 m)

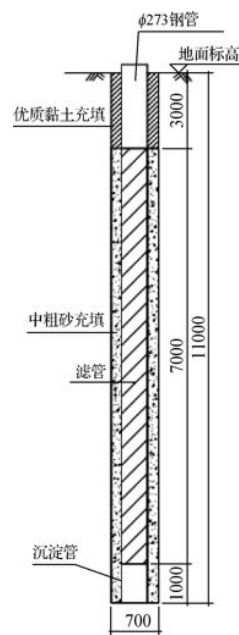


图2 管井构造图

(未标注的长度单位为 mm, 标高单位为 m)

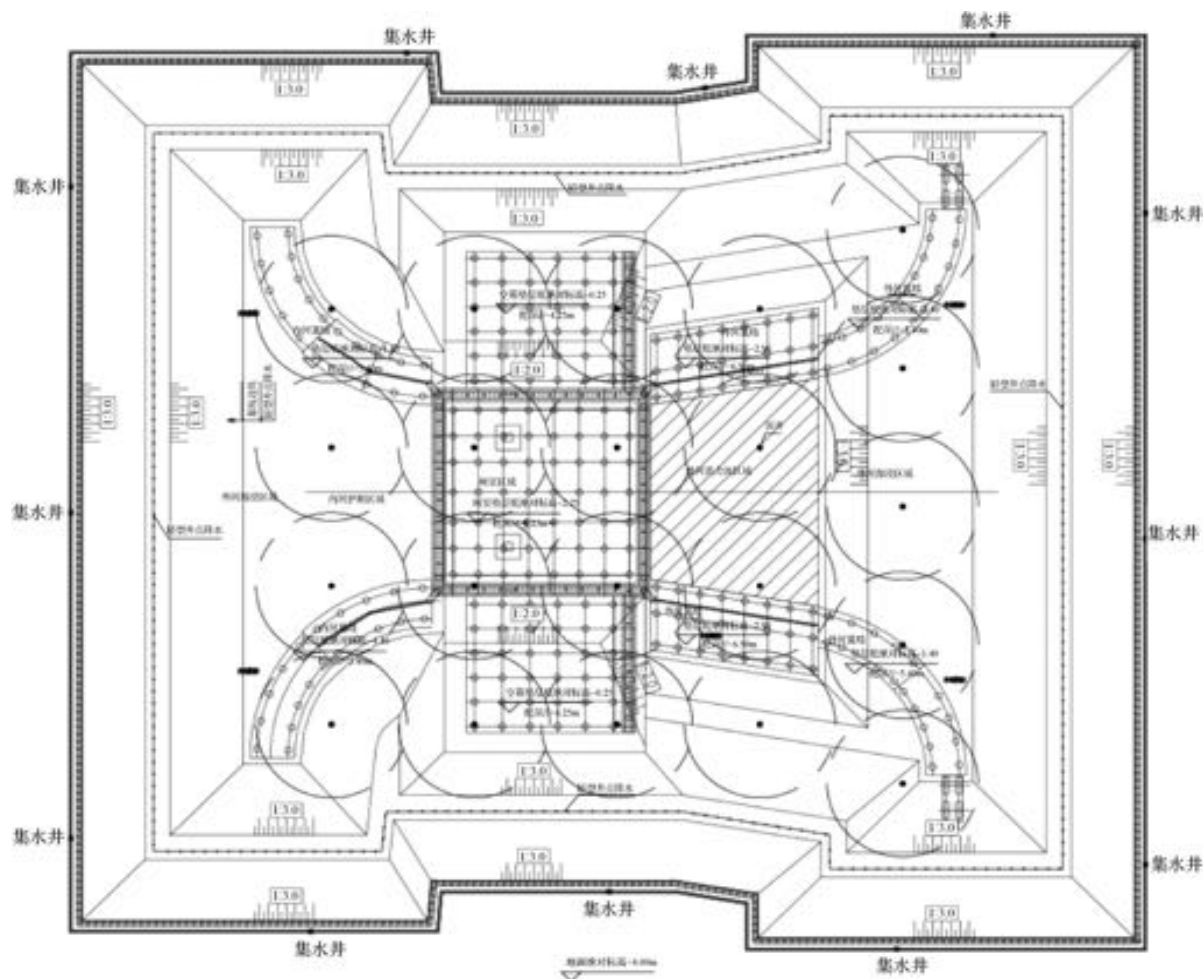


图3 降排水平面布置图 (未标注的长度单位为 mm, 标高单位为 m)



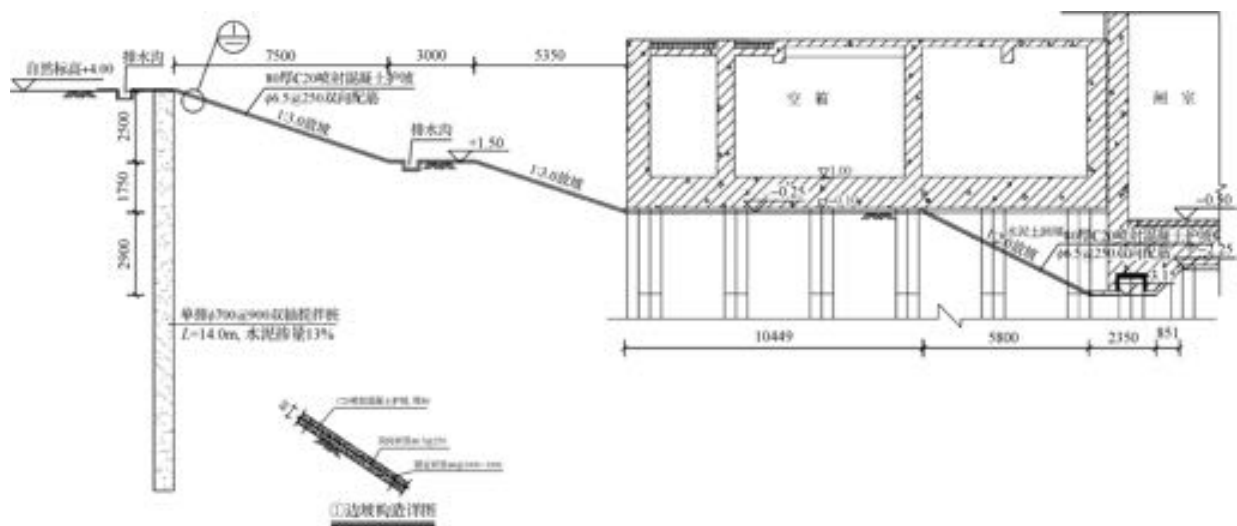


图4 降排水基坑剖面图(未标注的长度单位为mm,标高单位为m)

且耗电量大、不经济,实践表明轻型井点降水不适宜地下水稳定水位高的地质条件。为保证降水效果和工程进度,取消轻型井点降水措施,全部采用管井降水,并

对管井数量和布置进行重新计算和优化,详细优化计算过程见3.3节和3.4节。优化后基坑平面图及剖面图如图5、图6所示。

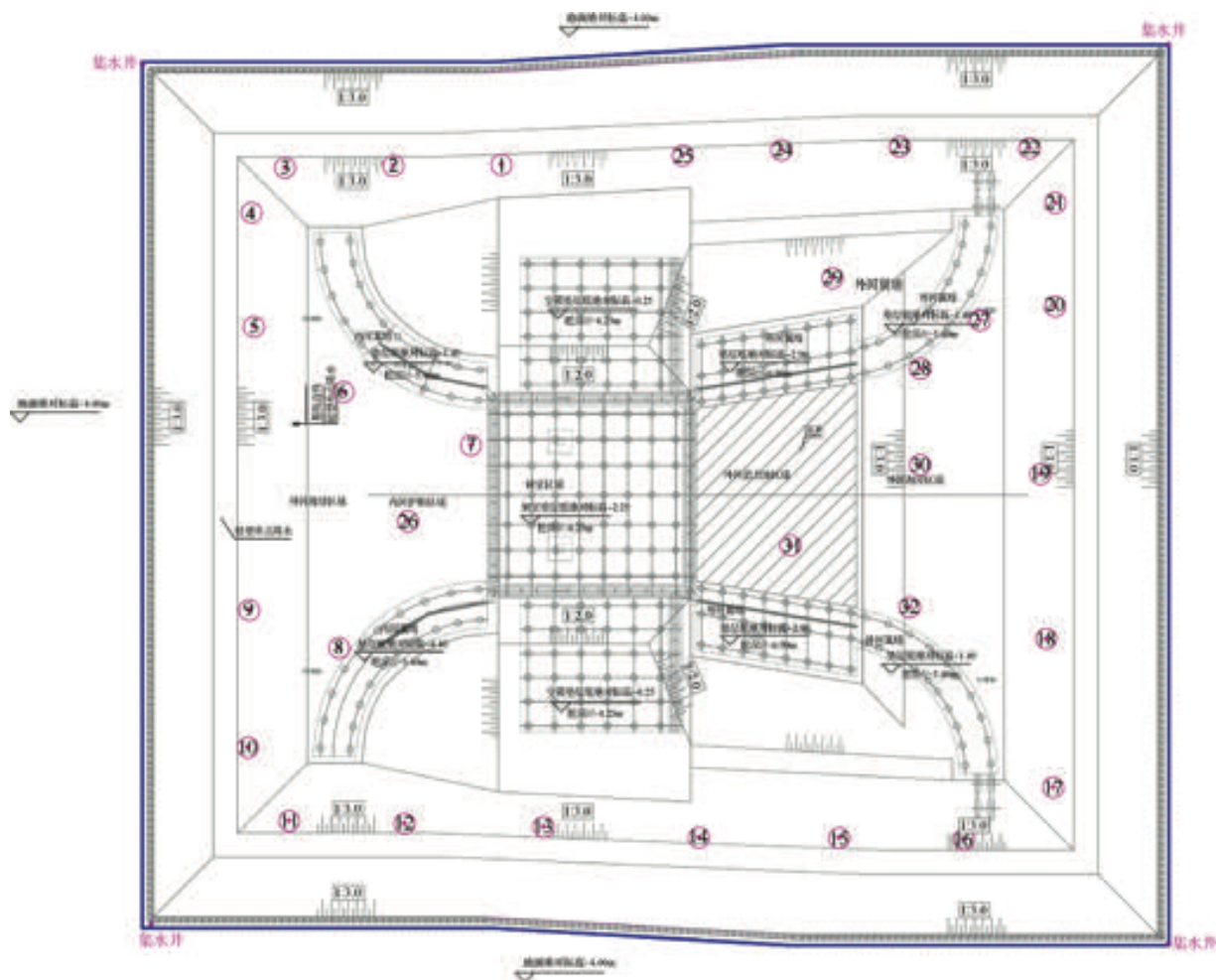
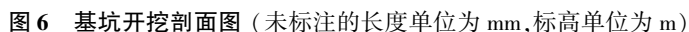


图5 优化后实际开挖基坑平面图(未标注的长度单位为mm,标高单位为m)



HW5——降水井过滤器的工作长度,取 3.0m;

HW6——沉砂管长度,取 5.5m。

最终,  $HW = 7.2 + 1 + 5 + 3 + 3 + 2.5 = 21.7(\text{m})$ ,  
取  $HW = 22\text{m}$ 。

#### c. 含水层厚度

$$H = \text{含水层厚度之和} = 1.6 + 5.6 + 2.0 + 8.5 = 17.7(\text{m}) \quad (3)$$

### 3.3.3 降水参数计算

降水井采用直径 400mm 的无砂混凝土管。

#### a. 加权平均渗透系数

$$k = \frac{\sum kh}{\sum H} = \frac{(1.6 \times 3 + 5.6 \times 300 + 2 \times 2 + 8.5 \times 300) \times 10^{-6}}{17.7} = 2.4 \times 10^{-4}(\text{cm/s}) = 0.21(\text{m/d})$$

#### b. 降水影响半径

$$R = 2S \sqrt{kH} = 30.85\text{m}, \text{取 } R = 30\text{m}$$

其中,  $S$  为基坑水位降深,  $S = 7.2 + 1 - 0.2 = 8(\text{m})$ 。

#### c. 涌水量

因为管井深度大于含水层厚度,管井穿透整个含水层,按照完整井基坑涌水量计算,计算公式如下:

$$Q_{\text{总}} = 1.366k \frac{(2H - S)S}{\lg\left(1 + \frac{R}{r}\right)} \quad (4)$$

其中,  $H = 17.7\text{m}$ ,  $S = 8\text{m}$ ,  $r = 50\text{m}$ ,  $R = 30\text{m}$ ,  $k = 0.21\text{m/d}$ 。

计算得  $Q_{\text{总}} = 308.05\text{m}^3/\text{d}$ 。

单个管井涌水量计算公式如下:

$$Q_{\text{井}} = 1.366k \frac{(2H - S)S}{\lg R - \lg r_{\text{井}}} \quad (5)$$

其中,  $r_{\text{井}}$  为管井半径,  $r = 0.04\text{m}$ 。

计算得  $Q_{\text{井}} = 21.87\text{m}^3/\text{d}$ 。

### 3.4 管井布置及数量

根据地质条件及地下水分析,管井降水主要目的是保证基坑边坡的稳定,同时预防局部产生渗水和流砂,确保基坑土方顺利开挖。根据管井降水目的,管井布置和数量确定如下:

a. 单个管井排水量小于等于单个管井涌水量,为保证整个基坑涌水量与排水量平衡,管井数量不少于:

$n = Q_{\text{总}}/Q_{\text{井}} = 308.05/21.87 = 14.09(\text{口})$ , 取整为 15 口。

b. 为保证基坑边坡的稳定,管井沿基坑周边布置,布置间距不得大于 30m,基坑周长 620m,管井数量不少于  $620/30 = 20.67$  口,取整为 21 口。

基坑平均长度 88m,平均宽度 68m,仅沿基坑周边设置管井,基坑中间部位超出管井降水影响半径,在基坑中间顺水流方向设置不少于 4 口管井。

c. 考虑常规水泵损坏时维修问题及降水不利影响因素,取 1.25 的富余系数,管井数量为  $(21 + 4) \times 1.25 = 31.25(\text{口})$ ,取整为 32 口。

实际施工过程中,综合考虑局部不利地质、土方开挖顺序、开挖深度、施工便道布置、拟建建筑物位置等因素影响,管井并不是严格等距均匀布置。

按照土方开挖的先后顺序布置管井,在基坑开挖后先施工的结构物位置尽量不设置管井,避免因结构施工而封井,减少管井的使用时间,避开结构物基础位置布置管井,可以尽可能的延长管井使用时间。遇到出水量大,水位降低效果不好的部位,可以适当加密管井布置。遇到开挖深度小,地质条件好的区域可以适当加大管井间距。闸室、空箱段最先开始结构施工,同时原始地表上有一条便道可作为土方运输便道,因此闸室、空箱段区域可以不布置管井。内河海漫段、内河护坦段、外河消力池段、外河海漫段至少布置 1 口管井,确保基坑无渗水或管涌。管井实际布置平面图如图 8 所示。

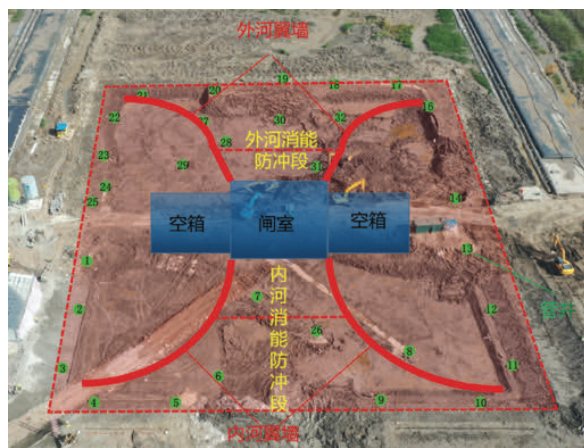


图 8 管井实际布置平面图





## 4 降排水施工工艺

本工程降排水施工分为三个阶段,依次为:止水帷幕双轴搅拌桩施工阶段、管井成井及降排水阶段、封井阶段。

### 4.1 双轴搅拌桩施工

水闸基坑止水帷幕采用单排  $\phi 700@900$  双轴搅拌桩,桩长 14m,共 544 根。根据试验方案,确定水泥掺量为 13%。双轴搅拌桩的完成增大了外部地下水进入基坑的渗径,提高了管井降水效率。止水帷幕双轴搅拌桩施工工艺流程图如图 9 所示。

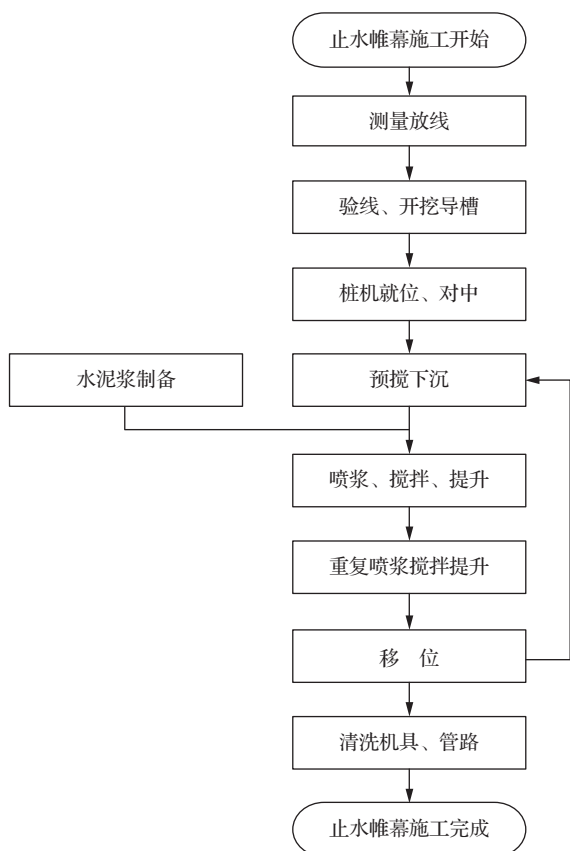


图 9 止水帷幕双轴搅拌桩施工工艺流程图

### 4.2 管井成井及降排水施工

#### 4.2.1 管井降水施工工艺流程

管井成井及降排水施工工艺流程为:井位放样→护筒埋设→钻孔→清孔→下井管→四周回填滤料→清除井内泥砂→安装潜水泵、排水管道→试抽水。

#### 4.2.2 管井施工方法及技术措施

管井采用钻孔法成孔,然后埋设无砂混凝土管井。

无砂混凝土管井内径 40cm,壁厚 5cm,管井顶高出地面 50cm,从管井顶至地面下 150cm 为普通混凝土管,管井底部一节(1m 长度)为有底无孔普通混凝土管,管井中间部分为无砂混凝土管。井管外包裹二层钢丝滤网,外侧填 10cm 厚 2~4mm 粒径粗黄砂滤料,井口 1m 处用黏土填实,防止地表水流入地下。

钻孔成孔过程中利用水泵抽水下钻头,边冲边旋转水枪头。成孔孔径 700mm,成孔深度超过井底标高 1.0m 以上。成孔后进行清孔,合格后用细钢丝绳兜底,各段井管依次连接缓慢下沉。上下节井管用四根 30mm 宽竹条沿井管周围用 10 号铁丝绑扎连接牢固。接头处用 200~300mm 塑料薄膜扎紧,防止挤入泥砂淤塞井管。

每 3m 井管利用混凝土块保护层保持垂直,使井置于孔中心,放到孔底后,井侧滤料(粗砂)均匀连续填入,井底部也填入滤料。井口高出地面 0.5m 以上,必要时孔口加盖,防止泥砂或杂物掉入井内。

#### 4.2.3 分块开挖明沟排水

基坑边坡二级平台设置 300×300 排水明沟和间隔 50m 设置 500×500 集水井,排水明沟坡度 0.02%。

对开挖区按照 10m×20m 的区格进行划分,测量放样后,挖机沿区格边线开挖 1.5m×1m 明沟。明沟开挖后通过集水井将明沟内逐渐增加的渗水量泵至围堰以外,以降低基坑开挖区域浅层土体湿度,提高承载力。

### 4.3 管井封堵施工

随着水闸基础和结构施工,逐步对停止降水的管井进行封井。降水管井下部填砂土或砂砾,土或砂砾用水封密实,上部 2m 用 C20 混凝土填封,上口与垫层混凝土齐平。

## 5 降水效果与工程造价

### 5.1 管井水位监测

从止水帷幕双轴搅拌桩开始施工至闸室底板垫层浇筑期间实际降排水施工工期为 106 天。由于本工程各部位管井成孔及降排水时间间隔长,以本工程水闸



闸室、空箱部位附近的1号管井、7号管井及13号管井降水监测数据为例进行统计分析,到闸室底板垫层

浇筑止,记录降水天数共计49天,各管井降水水位图如图10所示。

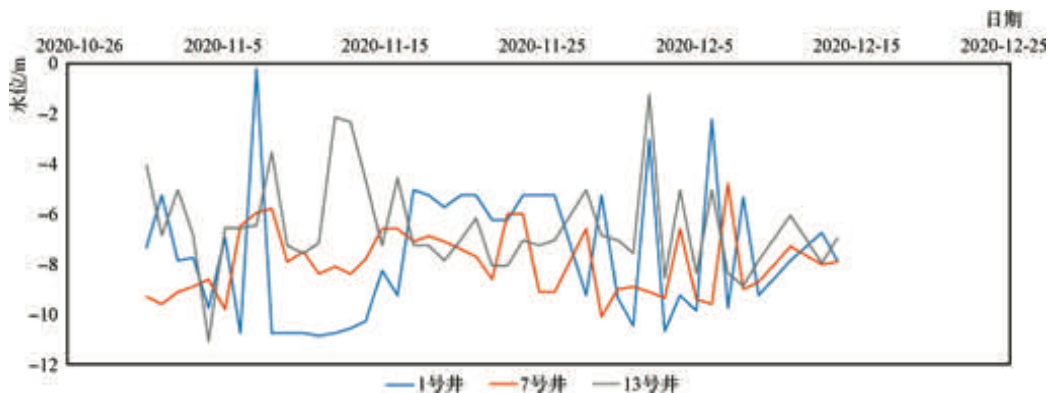


图10 管井降水水位图

图中各管井水位出现的突变点,主要是由于受现场施工环境影响,管井中水泵未能作业导致水位突然上升。根据各管井线性趋势,管井水位呈下降趋势,地下水水位低于 $-5\text{m}$ 。

## 5.2 降水工程造价

本工程在原施工临时降排水措施基础上进行了优化,去掉了轻型井点降水,提高了降水效率,缩短了降排水施工工期,实际工程造价较原方案有较大幅度的下降。

## 6 结 语

针对典型工程,在地下水位埋深浅、基坑开挖深度大的工况下对基坑降排水方法、优化方案和施工工艺进行了分析总结,结论如下:

**a.** 实践表明轻型井点降水不适宜地下水稳定水位高的地质条件。对于开挖深度大、地下水埋深浅、土层渗透系数较大的工程宜采用管井降水方案。在进行管井降排水设计时,根据地质条件、土层的渗透系数、开挖深度条件确定降水的深度、管井深度和计算涌水量。再根据工程特点,确定管井布置原则和数量,结合现场开挖顺序和运输便道合理布置管井位置和数量。

**b.** 由于土层地质条件的复杂性,有关计算参数取值是否正确将影响井点系统涌水量计算结果的准确性。同时,在实际布置井点位置时,受到现场施工情况,地质条件等因素影响,井点很难完全按照理论计算

设计布置。

**c.** 降水实践中要实时搜集现场信息,以理论计算为基础,结合现场实际降水效果,优化降水方案,从而逐步提高降排水施工技术。文中案例通过调直开挖边线和取消轻型井点降水的优化措施提高了降水效率,缩短了降排水施工工期,降低了工程造价。◆

## 参考文献

- [1] 徐强. 论水利水电工程施工管理[J]. 水利建设与管理, 2014(10):9-11.
- [2] 张宇,李同春,齐慧君. 软土地基水闸底板有限元分析的桩基模拟方法[J]. 水利水电技术, 2020, 51(6):65-71.
- [3] 王红刚. 浅谈河口滨海软土地区水闸深基坑围护施工方案[J]. 四川水利, 2020, 41(4):94-96.
- [4] 洪飞,洪潮,李京辉. 提高水闸基坑井点降水效果的措施研究[J]. 水利建设与管理, 2020, 40(12):74-78.
- [5] 邓渊,王帅军,胡敏,等. 复杂条件下河道软基超大深基坑潜水与地下承压水降水技术[J]. 施工技术, 2021, 50(2):27-30.
- [6] 许斌,孙有志,姜丽军. 关于水闸施工井点降水的研究[J]. 水利科技与经济, 2009, 15(7):657-658.
- [7] 李莹,刘淑敏,唐棋滨,等. 水利工程中河道软基超大深基坑降水质量控制技术[J]. 施工技术, 2021, 50(2):31-34.
- [8] 施永光,张雪梅. 中型水闸基坑降排水方案及计算浅析[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(4):153-155.
- [9] 王进利,王爱敏. 轻型井点降水在麻湾干渠工程中的应用[J]. 山东水利, 2018(8):35-36.



# 基于振动监测系统对竖井式贯流泵 推力轴承异响原因的分析

唐 演 缪融融 钱 扬

(江苏省淮沐新河管理处,江苏 淮安 223005)

**【摘 要】** 振动监测系统可对大型竖井式贯流泵运行状态进行有效的监测与分析,同时可提升设备管理水平,可为泵站管理者搭建一个全面实时掌握机组设备运行状况的智能监测平台。本文主要讲述了振动监测系统的构成和判定标准,并通过案例证实了该系统分析和判断机组故障效果显著,可有效解决传统故障诊断和维修中存在的问题,提高诊断的准确性和及时性,极大地提高了设备使用寿命。振动监测系统可在泵站工程监测中推广应用。

**【关键词】** 振动监测;泵站;推力轴承;频谱

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)04-066-06

## Analysis abnormal sound causes of thrust bearing in vertical shaft cross-flow pump based on vibration monitoring system

TANG Yan, MIAO Rongrong, QIAN Yang

(Jiangsu Huaishuxinhe Management Office, Huai'an 223005, China)

**Abstract:** The vibration monitoring system can be used for effectively monitoring and analyzing the operation status of large vertical shaft cross-flow pumps. Meanwhile, the equipment management level can be improved. It can build an intelligent monitoring platform for the pump station managers to master the operation status of unit equipment comprehensively in real time. The composition and judgment standards of the vibration monitoring system are mainly described in the paper. It is proved through cases that the system has significant analysis and judgment effect of unit faults. The problems in traditional fault diagnosis and maintenance can be effectively solved. The accuracy and timeliness of diagnosis are improved, thereby greatly improving the service life of the equipment. The vibration monitoring system can be used as a daily monitoring method, which can be popularized and applied in pump station project.

**Keywords:** vibration monitoring; pumping station; thrust bearing; spectrum

利用计算机振动监测系统对泵站机组振动数据进行测试及分析,能够有效掌握机组实时运行工况,确保

机组长期安全可靠运行,发挥泵站工程抗旱、排涝、调水等综合效益。泵站机组设备在运行过程中噪声问题

收稿日期: 2021-04-16

作者简介: 唐演(1987—),男,本科,工程师,主要从事水利工程建设与管理工。

主要反映在机组轴系及轴系各个部件的运行状态上,噪声产生的原因除机组本身旋转部分及固定部分的振动外,主要是水流对机组过流部件的作用力和电机电磁力对机组轴系产生的不平衡作用力,虽然振动发生的起因会有所不同,但各因素之间又相互联系、相互影响。例如当水流作用力引起机组转动部件发生振动时就会使发电机定、转子间的气隙产生不均匀变化,而此不平衡的电磁力会使转动部件振动加剧,从而形成一个循环的恶性影响,合理范围内的振动值是允许的,但当振动幅值超过规定范围时,便会对机组设备的正常运行造成威胁。本文以通吕运河水利枢纽泵站工程2号竖井贯流泵机组推力轴承部位运行时的异响为例,利用振动监测系统分析机组各监测部位振动情况,排查异响部位,并提出改善措施。

## 1 泵站概况

南通市通吕运河水利枢纽泵站工程位于通吕运河上游入江口门处,距长江口约2.2km。通吕泵站流量为 $100\text{m}^3/\text{s}$ ,采用3台套竖井贯流泵机组,单机流量 $33.3\text{m}^3/\text{s}$ ,水泵叶轮直径3.3m,单机配套电机功率1600kW,总装机容量4800kW,水泵与电机采用H2SH17+OWGE50.1型齿轮箱连接。

该机组配备振动监测系统,主要采集设备的振动、

摆度、转速、压力脉动等参数,系统采用自动控制方式运行。机组振动监测系统见图1。

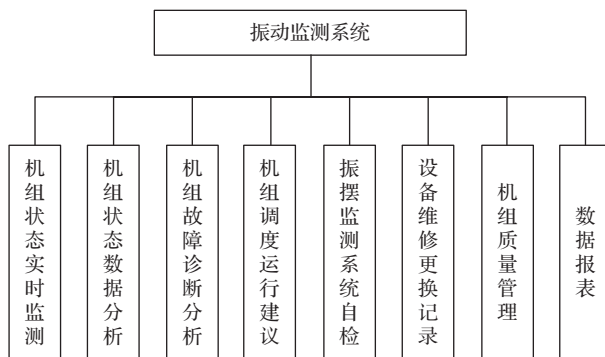


图1 振动监测系统

泵站在运行过程中发现2号竖井式贯流泵运行时推力轴承部位产生异常声响,为进一步排查异响成因,采用该机组配备的振动监测系统对其进行监测故障分析。

## 2 机组结构及测点布局

### 2.1 结构组成

通吕泵站的竖井式贯流泵由三相异步电机、柱销式联轴器、二级减速齿轮箱、流道系统、叶轮、导叶及混凝土的刚性基础等构成,现场监测部位取样测点见图2。机组主要参数见表1。

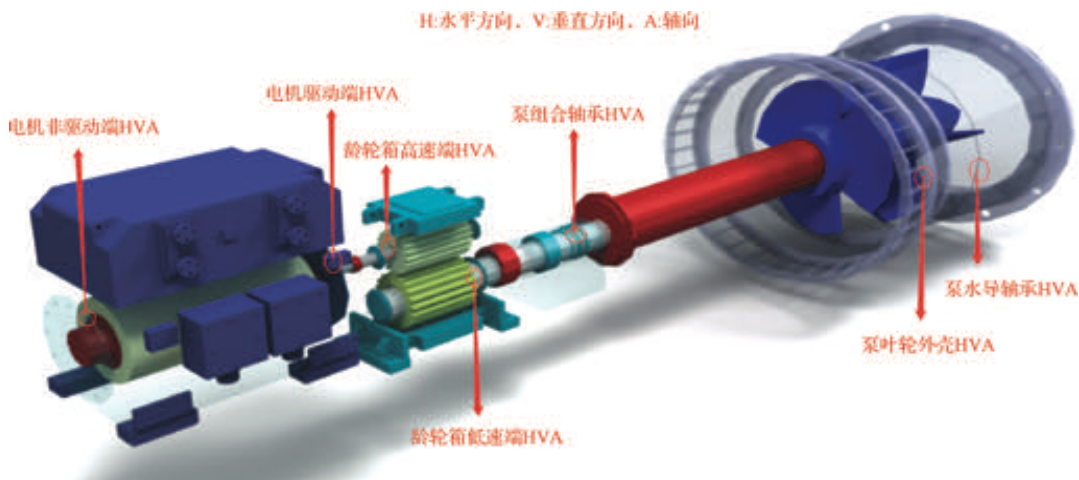


图2 机组测点布置图



表1 机组主要参数

电 机		齿 轮 箱		水 泵	
功 率	1600kW	重 量	4290kg	设计扬程	1.98m
转 速	742r/min	功 率	1440kW	效 率	73.2%
输入电压	10000V	润滑油黏度	ISO VG320	转 速	104.16r/min
输入电流	116A	输入转速	745r/min	设计流量	33.3m <sup>3</sup> /s
功率因数	0.83	输出转速	104.56r/min	轴功率	884kW
轴承型号	驱:6234C3	—	—	推力轴承	SKF29380
	非:6228C3			调心轴承	23180CA

## 2.2 振动判定标准

参考 ISO10816 振动监测评估标准,具体见表2。

表2 振动监测评估标准

支撑类型	区域边界	速度有效值/ (mm/s)	位移有效值/ μm
刚性基础	A/B	2.3	29
	B/C	4.5	57
	C/D	7.1	90
柔性基础	A/B	3.5	45
	B/C	7.1	90
	C/D	11.0	140

该标准适用于额定功率大于300kW小于等于50MW的大型机器;新交付的机器振动通常属于A区域;机器振动处在B区域可长期运行;机器振动处在C区域一般不适宜长期运行;机器振动处于D区域其振动烈度足以导致机器损坏。

根据振动评估标准,判定机组的振动在4.5mm/s以下属于可接受范围。

## 2.3 对通吕泵站2号机组振动测试

测试仪器:在线监测系统、VB8离线数采器。

传感器安装方式:螺钉安装、磁铁吸附。

测试参数设置:位移、速度、加速度及解调谱波形频谱。

位移:频宽1000Hz,谱线数1600。

速度1:频宽200Hz,谱线数1600;速度2:频宽1000Hz,谱线数3200。

加速度1:频宽2000Hz,谱线数3200;加速度2:频宽10000Hz,谱线数6400;加速度3:频宽20000Hz,谱

线数6400。

解调谱:电机及齿轮箱高速度端解调带宽1~10000Hz,谱图显示频宽2000Hz,谱线数3200;齿轮箱低速端、推力轴承及水导轴承解调带宽0.5~10000Hz,谱图显示频宽2000Hz,谱线数3200。

## 2.4 测点数据

经机组监测部位现场数据采集,通吕泵站2号竖井贯流泵在运行时出现异响的振动数据测试结果见表3、表4。

表3 速度通频值 单位:mm/s

设备测点	水平方向	垂直方向	轴 向
电机自由端	0.9456	0.7427	0.9674
电机驱动端	1.341	1.04	2.252
齿轮箱输入轴前轴承	1.283	0.5746	1.524
齿轮箱输出轴后轴承	0.4343	0.6626	0.4901
泵组合轴承	0.2679	0.2361	0.3243

表4 加速度通频值 单位:g

设备测点	水平方向	垂直方向	轴 向
电机自由端	0.2712	0.1788	0.3738
电机驱动端	0.2134	0.2035	0.4346
齿轮箱输入轴前轴承	0.2032	0.1987	0.3179
齿轮箱输出轴后轴承	0.1413	0.2547	0.1904
泵组合轴承	0.07976	0.09066	0.07743

## 3 振动值采集频谱与分析

经检测2号竖井贯流泵电机非驱动端水平、垂直和轴向的振值为0.9456mm/s、0.1788mm/s和0.9674mm/s,电机驱动端水平、垂直和轴向的振值为



1.341mm/s、1.04mm/s 和 2.252mm/s, 齿轮箱输入轴前轴承水平、垂直和轴向的振值为 1.283mm/s、0.5746mm/s 和 1.524mm/s, 齿轮箱输出轴后轴承水平、垂直和轴向的振值为 0.4343mm/s、0.6626mm/s 和 0.4901mm/s, 水泵推力轴承水平、垂直和轴向的振值为 0.2679mm/s、0.2361mm/s 和 0.3243mm/s。

根据以上数据分析发现机组的各部件振值全部处

于规定的标准范围内, 但水泵推力轴承的时域波形图中呈现规则性的冲击信号见图 3~图 7, 从频谱图中可以分析出该推力轴承冲击信号的频率为泵轴转频、推力轴承的内外圈缺陷频率, 时域波形图中存在周期性冲击迹象, 这与水泵推力轴承部位发出的异常声响周期性基本一致, 和时域波形图中存在的周期性冲击迹象相符。

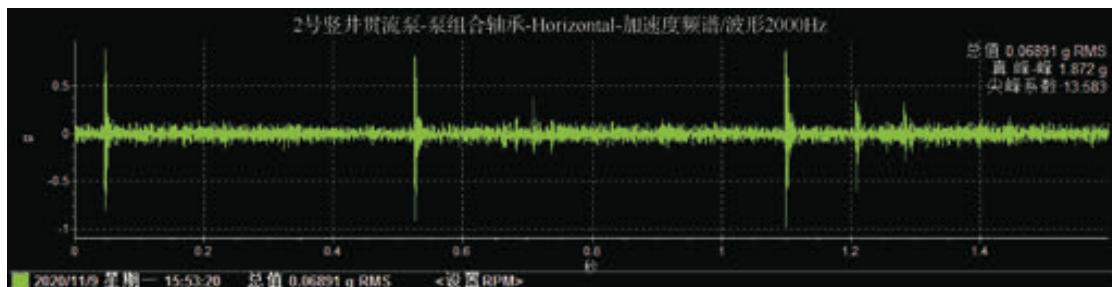


图 3 水泵推力轴承水平方向加速度频谱(分析频率 2000Hz)

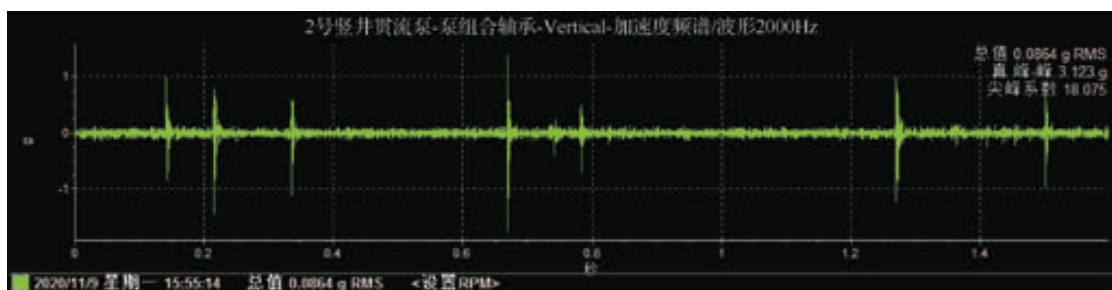


图 4 泵组合轴承垂直方向加速度频谱(分析频率 2000Hz)

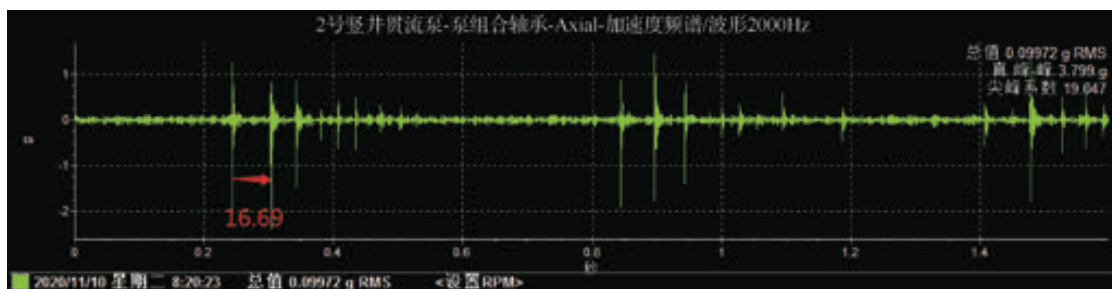


图 5 泵组合轴承轴向加速度频谱(分析频率 2000Hz)

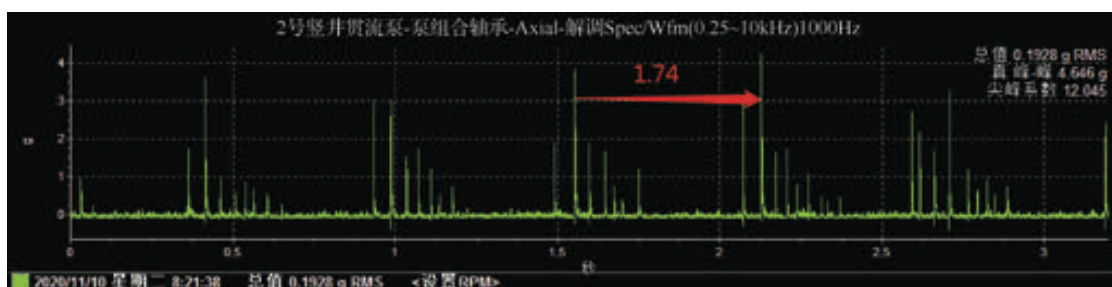


图 6 泵组合轴承轴向解调波形图

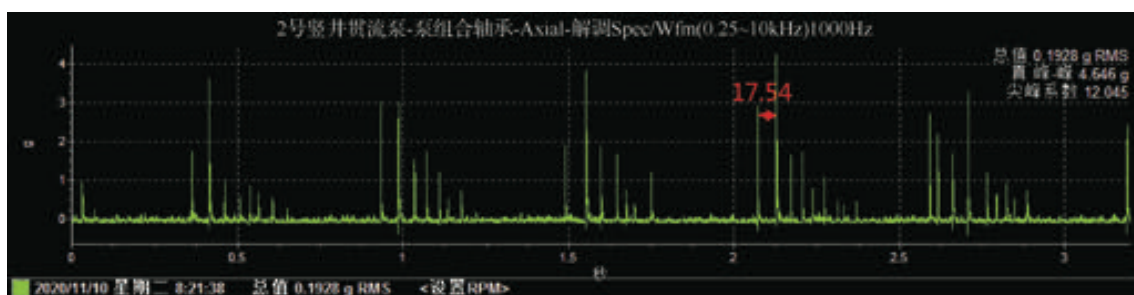


图7 泵组合轴承轴向解调波形图

#### 4 水泵推力轴承异响成因分析

通过对泵站现场运行人员记录的数据与振动监测系统采集的数据进行分析对比,与该机组推力轴承产生异响的时间基本相符,下面对水泵推力轴承产生冲击信号频率原因进行分析:

推力轴承松动时的示意图见图8。AB是产生间隙的两个面,可以是轴承座内侧A和外圈外侧B,或者是内圈内侧A和轴表面B。把轴承和与之正常刚性连接的部件看作一个整体,为了方便示意将这个间隙画大,里边的细线小圈是离心力旋转到各个角度的示意。

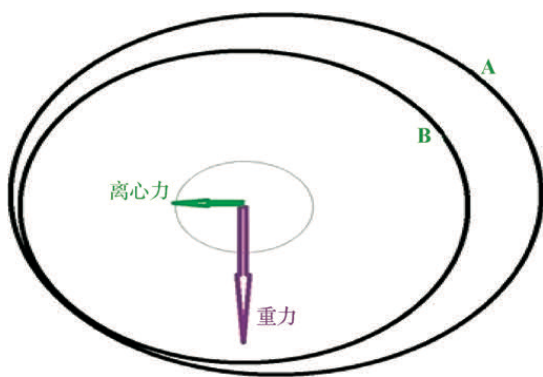


图8 推力轴承松动示意图

分析B的受力,其本身产生两个力:一是始终向下的重力;二是 $360^\circ$ 不断旋转的离心力。A面给B面的支撑力,是被动的。

假设转子顺时针旋转,在旋转的过程中离心力向下时,B肯定在最下边,和A接触;离心力转到向左,B相应的向左向上偏,与A保持接触;离心力向上时,由于它比重力小很多,B是到不了最顶上的,还在左侧某

个角度;离心力开始向右偏以后,就会把B往右拉开,脱离A,并在右侧某个位置落下,重新与A接触,产生一次撞击,然后在右侧保持接触,转到下边。每转一周重复这个过程,产生一次冲击,这就是产生冲击信号频率的原因。

当轴承内部间隙存在偏差时,滚动轴承由于间隙的偏差导致其运行的轨迹超出标准规定的轨道内,会导致滚动体与轴承的内外圈存在碰磨的迹象,从而产生异响。

综上分析,通过振动监测系统采集的机组振值、谱图表现的特征迹象及齿轮联轴器的相关信息得出2号竖井贯流泵推力轴承存在如下故障:①推力组合轴承存在内外圈缺陷;②推力组合轴承由于间隙偏差存在动静部件碰磨的迹象,产生异常声响。

#### 5 改善措施

##### 5.1 处理方法

通过对2号竖井贯流泵推力轴承异响的分析得出轴承间隙偏差是产生推力轴承异响的根本原因,因此调整轴承内部的间隙偏差会对该推力轴承部件的碰磨起到改善作用。泵站维修人员就是针对这个原因,利用减薄推力轴承轴向垫片、加厚径向垫片(铜皮)的方法进行处理,维修后该机组运行时推力轴承异响消失,故障得到了有效解决。

##### 5.2 改善效果评估

对调整好间隙的2号竖井贯流泵进行振动数据的测试验证,调整前后的时域波形图见图9、图10。

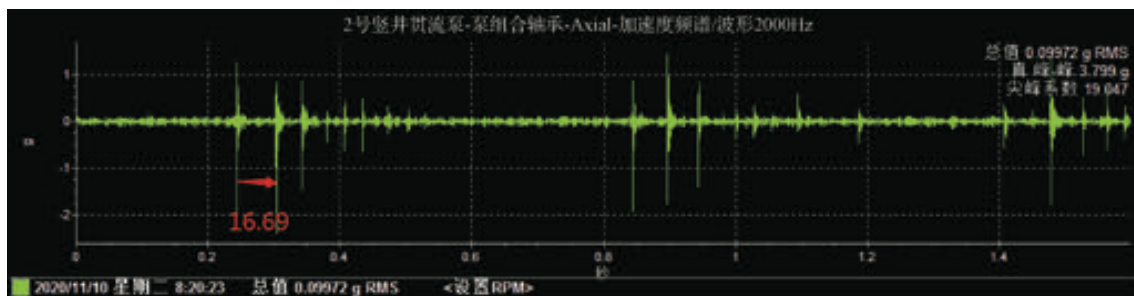


图9 泵组合轴承轴向加速度波形图(调整前)

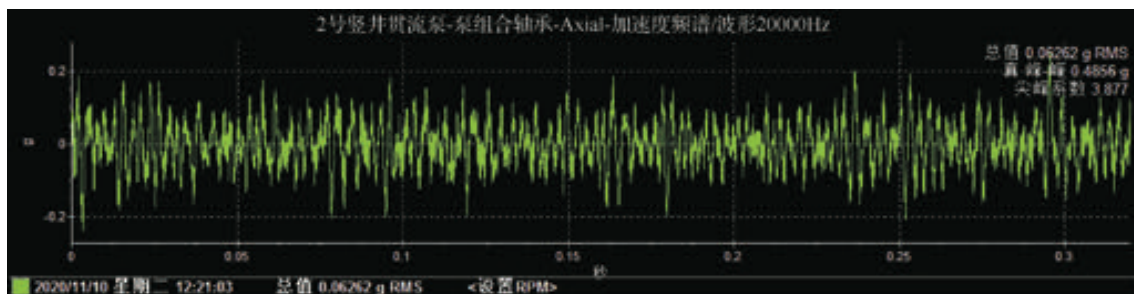


图10 泵组合轴承轴向加速度波形图(调整后)

通过调整前后的时域波形图的冲击现象对比发现,机组推力组合轴承的时域波形图已无周期性冲击信号,现场无冲击异响,机组运行正常。

## 6 结 语

基于振动监测系统对泵站设备的监测与分析能够及时、有效地发现机组运行过程中出现的故障,并且通过对监测数据的频谱分析提出有效的故障诊断和维修方向,大大提高了诊断的准确性和及时性,排除了设备因为故障或维护不当带来的经济损失,提高了设备使用寿命,具有广泛的推广意义。◆

### 参考文献

- [1] 李鹏,王彬. 基于振动和电流频谱特征的电机转子断条诊断研究[J]. 中国设备工程,2019(20):88-90.
- [2] 吴庭苇. 轴承摩擦磨损对柔性支承转子动力响应特性的影响[J]. 原子能科学技术,2020,54(4):715-724.
- [3] 盛喆. 基于多智能体的泵站多机组优化调度系统研究[J]. 水资源开发与管理,2019(10):61-67.
- [4] 孙凝,阎峰,岳靖淋,等. 水泵机组振动问题分析研究[J]. 给水排水,2019,45(3):49-53.
- [5] 张丙华,李昌红. 浅谈盐卡泵站水泵选型设计[J]. 水利建设与管理,2020,40(6):14-19.
- [6] 赵顺萍,肖泽,孙凝,等. 应用振动监测与故障分析诊断技术提高泵站设备管理水平[J]. 中国给水排水,2015,31(6):105-108.
- [7] 骆寅,董健,韩岳江. 基于无线传感网络的水泵振动状态监测系统[J]. 现代电子技术,2020,43(12):30-34.
- [8] 成一雄. VB编程软件模拟计算水泵稳定工况点实用方法[J]. 水利建设与管理,2020,40(3):34-39.
- [9] 赵峰. 应用测试与仿真方法对水泵机组振动诊断[J]. 噪声与振动控制,2016,36(5):155-159.
- [10] 施准备,竺维佳,彭玉成,等. 基于CFD数值模拟的水泵机组振动分析[J]. 水力发电,2010,36(10):62-64,72.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 机械振动 在旋转轴上测量评价机器的振动 第3部分:耦合的工业机器:GB/T 11348.3—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.



# 垂直运输设备空间三维定位的设计与实现

李永山<sup>1</sup> 刘发永<sup>2</sup> 周新志<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066;

2. 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065)

**【摘要】** 本文针对在水利水电工程项目中,构建垂直运输设备防碰撞智能系统时的运输设备定位问题,通过分析门机、塔机和缆机的吊运特点,结合相关传感器以及 BDS + GPS 技术,解决了设备关键部分的空间三维定位问题,并在岷江犍为航电枢纽工程和雅鲁藏布江加查工程中进行了试验。结果表明,该定位方法简单、可靠性高,满足复杂环境下垂直运输设备机群防碰撞系统的定位要求。

**【关键词】** 垂直运输设备;防碰撞;GPS;BDS

中图分类号: TV53 + 2

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)04-072-07

## Design and realization of space 3D positioning of vertical transportation equipment

LI Yongshan<sup>1</sup>, LIU Fayong<sup>2</sup>, ZHOU Xinzhì<sup>2</sup>

(1. SinoHydro 5 Bureau Co., Ltd., Chengdu 610066, China;

2. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** When the anti-collision intelligent system of vertical transportation equipment is constructed in water conservancy and hydropower projects, aiming at the positioning problem of transportation equipment, The space 3D positioning problem of key parts of the equipment is solved by combining relevant sensors and BDS + GPS technology in the paper through analyzing the lifting characteristics of door cranes, tower cranes and cable cranes. They are tested in Minjiang Jianwei Navigation and Electricity Junction Project and Yarlung Zangbo River Jiacha Project. The results show that the positioning method is simple with high reliability. It can meet the positioning requirements of anti-collision system of vertical transportation equipment cluster in complex environment.

**Keywords:** vertical transportation equipment; anti-collision; GPS; BDS

垂直运输设备是水利工程施工期间主要的起重与垂直入仓设备,具有覆盖面积广、运输效率高等特点。垂直运输设备主要有塔式起重机(塔机)、门座起重机(门机)、缆索起重机(缆机)等。

根据坝(厂)及枢纽建筑物布置特点、施工导流方

式、场区地形地质条件和工期要求,通常有以下两种不同的布置方案:①门塔机为主,其他垂直运输设备为辅的布置方式;②缆机为主,其他垂直运输设备为辅的布置方式。然而,由于建设施工场地有限、施工作业面狭小、作业设备较多、近距离交叉作业频繁,任何布置方

收稿日期: 2021-05-28

作者简介: 李永山(1986—),男,本科,高级工程师,从事水利水电工程施工和管理工作。



案都存在着相互碰撞的风险。

目前,通常采用现场指挥员和限制设备工作区域等方法防止碰撞事件发生<sup>[1]</sup>,但施工效率受到影响,无法完全发挥设备运输的优势。随着电子信息技术的发展,自动预警系统极大提升了设备的运行效率,在设备运行过程中,精确定位是实现自动预警系统的重要技术支撑。黄建文等<sup>[2]</sup>采用 GPS 与 RFID 定位技术建立了垂直运输设备防碰撞智能系统,实现了设备之间的碰撞预警;张治钰等<sup>[3]</sup>利用 GNSS-RTK 技术对垂直运输设备的关键部位进行定位;王建农等<sup>[4]</sup>采用角度传感器、风速传感器及倾角传感器对塔吊进行空间三维定位,具有较高的报警准确率。在实际工程应用中,三峡大坝防碰撞系统<sup>[5]</sup>利用超声波回波测距技术测量设备与周围物体的距离;龙滩水电站和龙开口水电站的防碰撞系统采用 GPS 定位技术获取各个施工设备的具体位置<sup>[6-7]</sup>。然而,GPS 定位易受构筑物遮挡或天气影响导致信号不稳定<sup>[8]</sup>,定位结果出现较大偏差,仅采用传感器的定位技术虽然能实现对门塔机的定位,却难以实现对缆机小车的定位。

因此,本文结合多传感器与 GPS + BDS 技术,实现不同垂直运输设备在移动轨迹多变情况下关键部位的精确定位,并依托岷江犍为航电枢纽工程和雅鲁藏布江加查工程进行试验,结果表明,达到了精准实时定位的目的<sup>[9]</sup>。

## 1 主要垂直运输设备运动轨迹模型

塔机在进行施工作业时,塔身固定不动,主要通过回转机构、提升机构、小车等将起重物运送到相应的施工点<sup>[10-11]</sup>。此外,在某一个阶段的施工过程中往往塔机高度不变。因此,塔机工作范围主要为以塔身为中心的圆形范围内,见图 1。

塔机的运动主要考虑大臂的运动情况,运动轨迹可以用大臂顶点位置的变化表示:

$$P(x_p, y_p, z_p) = \begin{cases} x_p = x + l \cos(\theta + \Delta\theta) \\ y_p = y + l \sin(\theta + \Delta\theta) \\ z_p = z \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $l$  为大臂的长度, m;  $\theta$  为当前大臂顶点位置与坐标水平方向夹角, °;  $\Delta\theta$  为下一时刻大臂回转的变化角

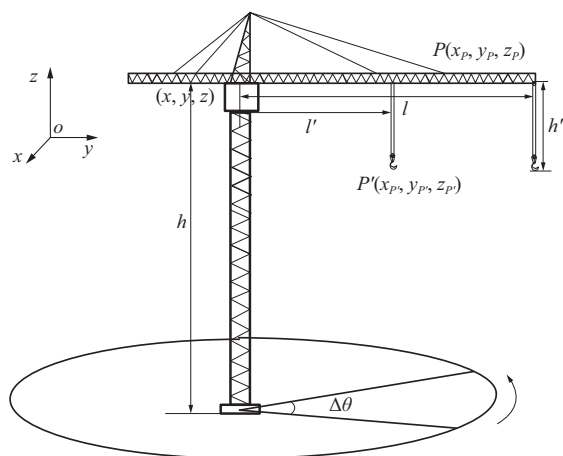


图1 固定式塔式起重机吊运示意图

度, °;  $(x, y, z)$  为大臂与塔身交叉点的位置,  $(x_p, y_p, z_p)$  为下一时刻的大臂顶点位置坐标。图 1 中:  $l'$  为小车与塔身的距离, m;  $h'$  为吊钩与小车的垂直距离, m。

塔机吊钩  $P'$  的数学模型为

$$P'(x_{p'}, y_{p'}, z_{p'}) = \begin{cases} x_{p'} = x + l' \cos(\theta + \Delta\theta) \\ y_{p'} = y + l' \sin(\theta + \Delta\theta) \\ z_{p'} = z - h' \end{cases} \quad (2)$$

与塔机不同,门机在作业时,大臂可以上下摆动,并且设备可以整体移动,因此,在建立门机的运动时既要考虑大臂和吊钩的运动情况,还需要考虑机体的运动情况,见图 2。

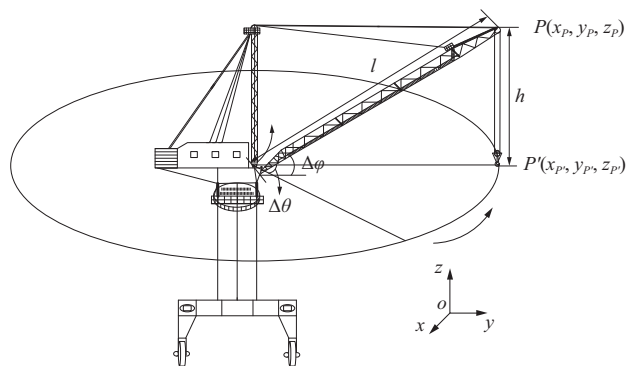


图2 门座起重机吊运示意图

门机位置固定的情况下,主要考虑大臂的运动,如下所示:

$$P(x_p, y_p, z_p) = \begin{cases} x_p = x + l \cos(\varphi + \Delta\varphi) \cos(\theta + \Delta\theta) \\ y_p = y + l \cos(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\theta + \Delta\theta) \\ z_p = z + l \sin(\varphi + \Delta\varphi) \end{cases} \quad (3)$$



式中:  $(x, y, z)$  为当前时刻的大臂与塔身交叉点位置,  $\varphi$  为当前时刻大臂的幅角,  $^\circ$ ;  $\theta$  为当前时刻大臂的回转角,  $^\circ$ ;  $l$  为臂长;  $(x_p, y_p, z_p)$  为下一时刻预测点的坐标。

吊钩的位置为  $P'$  点, 则吊钩的运动数学模型为

$$P'(x_{p'}, y_{p'}, z_{p'}) = \begin{cases} x_{p'} = x + l \cos(\varphi + \Delta\varphi) \cos(\theta + \Delta\theta) \\ y_{p'} = y + l \cos(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\theta + \Delta\theta) \\ z_{p'} = z + l \sin(\varphi + \Delta\varphi) - h \end{cases} \quad (4)$$

门机整体移动的情况下, 通过获取行走机构的信息, 包括移动的单位方向向量  $e$  和移动步长  $\Delta s$ , 可知, 新的门机位置点为

$$[x', y', z']^T = [x, y, z]^T + \Delta s \cdot e \quad (5)$$

其中, 单位方向向量为—维列向量。

缆机是另一种物料运输设备。与塔机和门机不同, 缆机在主塔和副塔之间有缆索, 通过牵引机构牵引载重小车在缆索上运输物料, 见图 3。

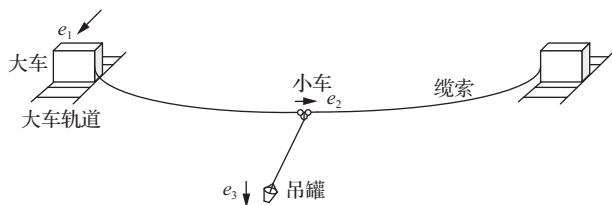


图3 缆机吊运示意图

缆机运动是一个复合运动过程, 包括大车、小车和吊罐的运动。对于大车, 新的位置点可以表示为

$$[x', y', z']^T = [x, y, z]^T + \Delta s \cdot e_1 \quad (6)$$

式中:  $e_1$  为移动的单位方向向量;  $\Delta s$  为移动步长, m。

在吊运过程中, 一般包括小车沿缆索运动、吊罐提升运动和吊罐下降运动。数学模型难以描述其具体位置变化, 本文将采用 BDS 和 GPS 的组合对其进行定位。

## 2 不同垂直运输设备的定位方案

考虑到地形、工况、设备布置方案等因素的影响, 不同类型的垂直运输设备其定位方案设计不同。针对门塔机, 需要搭载回转信号采集传感器、幅角信号采集传感器、倾角传感器、编码器和吊钩高度信号采集传感器等。对于缆机, 除了小车采用 DBS + GPS 组合定位,

其他大车需要搭载行走距离及相对位置信号采集传感器以及吊钩高度信号采集传感器。

### 2.1 运输设备大车定位

对于沿轨道进行移动的设备, 如门机和缆机的大车, 通过在垂直运输设备行走部位安装支架与编码器来达到快速定位的目的。

有轨垂直运输设备定位关系见图 4, 由图 4 可知, 可以基于事先设定的轨道起点的坐标  $(x_1, y_1)$ 、轨道终点坐标  $(x_2, y_2)$ 、轨道长度  $L_1$  (m) 以及在运行过程中在轨道上的行程  $D_1$  (m) 来计算当前的起重机的运行坐标  $(X_1, Y_1)$ 。

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= x_1 + D_1 \frac{x_2 - x_1}{L_1} \\ Y_1 &= y_1 + D_1 \frac{y_2 - y_1}{L_1} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

同理可知垂直运输设备 2 与垂直运输设备 3 的位置为:  $(x_3 + D_2(x_4 - x_3)/L_2, y_3 + D_2(y_4 - y_3)/L_2)$  和  $(x_5 + D_3(x_6 - x_5)/L_3, y_5 + D_3(y_6 - y_5)/L_3)$ 。

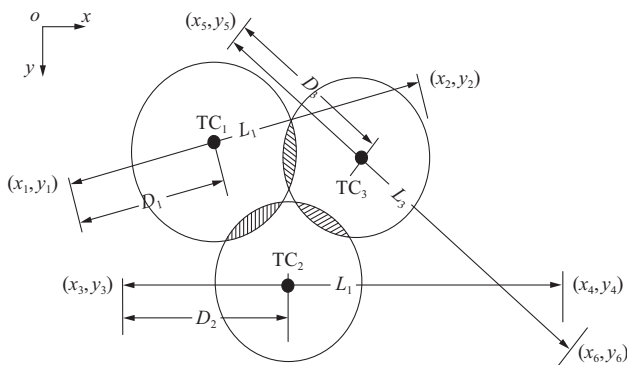


图4 有轨垂直运输设备定位关系

造成编码器定位误差的原因主要是垂直运输设备行走轮打滑空转造成采集的数据不能代表垂直运输设备真实的行走数据, 因此工程中在垂直运输设备的行走装置上安装从动轮, 从动轮行走的距离采用高精度绝对值编码器进行采集, 通过从动轮行走的距离来判断垂直运输设备的位置。

### 2.2 门塔机大臂定位

幅角传感器用于采集角度信息, 使用在门机等需要起升大臂的设备上, 垂直运输设备大臂角度变化时幅角传感器输出信号随之变化。垂直运输设备采用幅

角传感器采集大臂的幅角信号,见图5,以 $P_1$ 为例,驾驶室的位置为原点,通过幅角传感器测量出 $P_1$ 位置的偏置角度 $\alpha$ ,即可得到 $P_1$ 的位置信息。 $P_1$ 的 $x$ 轴坐标为 $L\cos\alpha$ , $P_1$ 的 $z$ 轴坐标为 $L\sin\alpha$ ,故 $P_1$ 相对驾驶室的相对位置为 $(x_0 + L\cos\alpha, y_0, z_0 + L\sin\alpha)$ 。

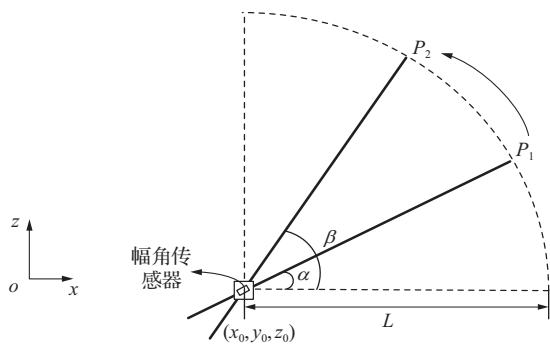


图5 幅角位置信息获取

把幅角传感器盒安装在靠近大臂根部右侧适当处,安装时请注意传感器的方位,传感器盒的箭头必须指向大臂顶点,否则测量范围将无法涵盖所有工作倾角范围,传感器的有效范围为 $-20^\circ \sim 90^\circ$ 。

机臂平面位置确定原理见图6,由图6可知,当确定门塔机的回转信息时,通过回转信号采集传感器可以采集工作臂的回转角度 $\alpha$ , $P_1$ 的 $x$ 轴坐标为 $L\cos\alpha$ , $P_1$ 的 $y$ 轴坐标为 $L\sin\alpha$ ,因此, $P_1$ 相对位置为 $(x_0 + L\cos\alpha, y_0 + L\sin\alpha, z_0)$ ,同理可知道当工作臂移动到 $P_3$ 时, $P_3$ 的 $x$ 轴坐标为 $L\cos\beta$ , $P_3$ 的 $y$ 轴坐标为 $L\sin\beta$ ,因此, $P_3$ 的相对位置为 $(x_0 + L\cos\beta, y_0 + L\sin\beta, z_0)$ 。

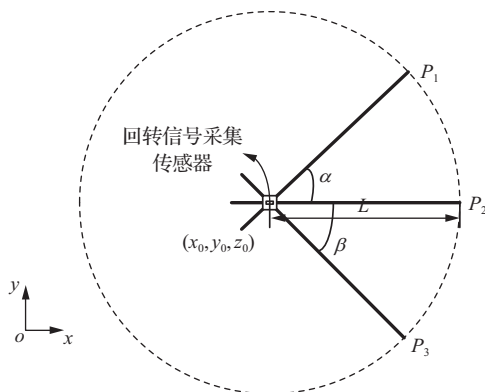


图6 机臂平面位置确定原理

### 2.3 缆机小车定位

GPS + BDS 定位的原理是通过测量用户 GPS +

BDS 接收机天线到卫星之间的距离,并根据卫星的瞬间位置三维坐标,得到用户 GPS + BDS 接收机的位置三维坐标。单点定位的缺点是精度低,一般来说能达到十几米的定位误差,定位精度远达不到塔机防碰撞智能控制系统对于塔机以及塔机部件的定位要求,因此,采用 GPS + BDS 差分定位方式可有效提高位置测量的精准度,以达到防碰撞系统的要求。

GPS + BDS 差分示意图见图7,由图7可知,确定一个流动点的位置,GPS + BDS 接收机至少要接收到四颗卫星的信号。所有的卫星信号都包含轨道误差、对流层时延误差、电离层时延误差等系统误差。地面上接收机1和接收机2的距离在一定范围内误差可以忽略不计,可以认为到达两个接收机的卫星信号在通过大气层时具有相同的系统误差,即具有相同的修正数。设定图中接收机1作为基准站,接收机2作为流动站。接收机1将修正数传送给接收机2,接收机2用其来修正测量结果,从而提高接收机2的定位精度。

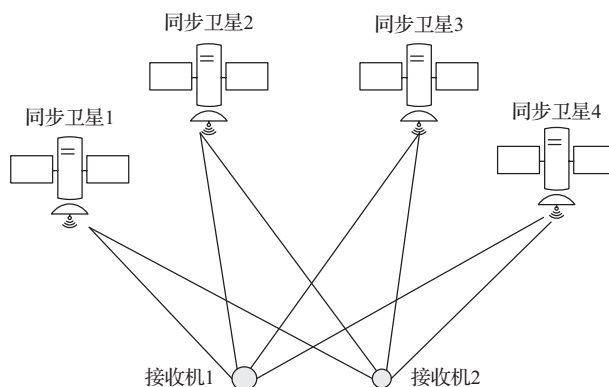


图7 GPS + BDS 差分示意图

GPS + BDS 差分定位的原理是基准站利用接收机进行载波相位测量并求出其载波相位的修正数,然后基准站接收机将修正数传送给流动站接收机,流动站接收机用其来修正测量结果。

基准站发射电台信号属于直线传播,所以为了使基准站和流动站的数据传输的距离更远,应将基准站设置在地势比较高的测点上。数据传输距离和测站高度的关系为

$$L = 4.24(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (8)$$

式中: $L$ 为数据传输距离,m; $h_1$ 、 $h_2$ 分别为基准站和流



动站的 GPS + BDS 天线高出地面的高度, m。可以根据测区大小设置不同的发射天线高度。假设若塔机位置测量系统的基准站和流动站 GPS + BDS 天线高度比施工现场地面高出 2m(实际当中远远大于 2m), 其数据传输距离是 8.48km, 完全能够满足塔机防撞系统所要求的数据传输范围。

在基准站  $p$  上利用接收机对  $i$  卫星信号进行载波相位测量, 得到基准站  $p$  到  $i$  卫星间的距离测量值, 即

$$\rho_p^i = \lambda(N_{p0}^i + N_p^i + \varphi_p^i) \quad (9)$$

式中:  $\lambda$  为载波的波长, m;  $N_{p0}^i$  为基准站  $p$  上进行载波相位测量的初始整周数;  $N_p^i$  为整周数的变化量;  $\varphi_p^i$  为载波相位测量的观测值。

利用已知的基准站  $p$  的坐标  $(X_p, Y_p, Z_p)$  和  $i$  卫星的坐标  $(X^i, Y^i, Z^i)$  计算基准站到卫星的几何距离  $\rho_p^i$ , 得到基准站  $p$  到  $i$  卫星的距离修正数, 即

$$\Delta\rho_p^i = \rho_p^i - \rho_p^i = [(X_p - X^i)^2 + (Y_p - Y^i)^2 + (Z_p - Z^i)^2]^{1/2} - \lambda(N_{p0}^i + N_p^i + \varphi_p^i) \quad (10)$$

在流动站  $K$  上, 利用 GPS 接收机接收  $i$  卫星信号并进行载波相位测量的同时, 也接收基准站发送过来的修正数。设流动站  $K$  对卫星  $i$  信号进行载波相位测量获得的距离观测值为

$$\rho_k^i = \lambda(N_{k0}^i + N_k^i + \varphi_k^i) \quad (11)$$

式中:  $N_{k0}^i$  为流动站  $K$  上进行载波相位测量的初始整周数;  $N_k^i$  为整周数的变化量;  $\varphi_k^i$  为载波相位测量的观

测值, m。

现将流动站  $K$  利用接收到的距离修正数按式 (10) 进行修正获得修正后的距离值, 并将流动站  $K$  到  $i$  卫星的几何距离公式代入, 即可得式 (12):

$$\rho_p^i + \lambda[(N_{k0}^i - N_{p0}^i) + (N_k^i - N_p^i) + (\varphi_k^i - \varphi_p^i)] = [(X^i - X_k)^2 + (Y^i - Y_k)^2 + (Z^i - Z_k)^2]^{1/2} + \delta\rho \quad (12)$$

式中:  $\delta\rho$  为同一历元各项残差之和。

当基准站  $p$  流动站  $K$  同时观测相同的至少四颗 GPS 卫星时, 即可得至少四个如上式的方程组, 解之可得流动站  $K$  的坐标  $(X_k, Y_k, Z_k)$  和  $\delta\rho$ 。

### 3 实例分析

为了测试定位系统的性能, 在岷江犍为航电枢纽发电厂房工程和加查水电站项目工程中开展试验, 其中包括对垂直运输设备行走信息采集、回转信息采集、变幅数据采集等测试。

#### 3.1 行走信息采集准确性试验

岷江犍为航电枢纽发电厂房工程的垂直运输设备采用高精度绝对值编码器的定位。发电厂房工程共计 5 台门机, 门机行走数据以机组之间沉降缝的位置为参考坐标, 试验期间测得 5 组数据, 每组数据采集的时间间隔为 7 天, 试验数据见表 1。

表 1 行走数据采集试验数据统计

单位: m

试验日期	试验组	控制点桩号				
		0 + 167. 06	0 + 206. 94	0 + 246. 82	0 + 286. 70	0 + 326. 58
2017-09-17	第一组	0 + 167. 06	0 + 206. 91	0 + 246. 76	0 + 286. 66	0 + 326. 64
2017-09-24	第二组	0 + 167. 09	0 + 206. 98	0 + 246. 86	0 + 286. 77	0 + 326. 66
2017-10-01	第三组	0 + 167. 15	0 + 207. 05	0 + 246. 94	0 + 286. 82	0 + 326. 70
2017-10-08	第四组	0 + 167. 21	0 + 207. 09	0 + 246. 97	0 + 286. 82	0 + 326. 71
2017-10-15	第五组	0 + 167. 09	0 + 206. 80	0 + 246. 66	0 + 286. 56	0 + 326. 44

门机位置信息误差偏离值见表 2。

通过行走信息采集准确性试验可知, 门机在两周的运行期内, 定位系统的误差小于 10cm, 门机在第三周转过程中最大误差偏离值超过 10cm, 因此该系统至少在运行两周后进行一次行走定位校核。

#### 3.2 回转信息采集试验

回转信息的采集通过安装在回转机构上的回转信号采集器进行, 回转信息误差标准为门机每回转 1 周垂直运输设备的回转信息采集误差不超过 1°, 门机回转信息误差偏离值见表 3。



表2 行走数据采集与实际位置的偏离值 单位:m

试验日期	试验组	控制点桩号				
		0+167.06	0+206.94	0+246.82	0+286.70	0+326.58
2017-09-17	第一组	0	-0.03	-0.06	-0.04	0.06
2017-09-24	第二组	0.03	0.04	0.04	0.07	0.08
2017-10-01	第三组	0.09	0.11	0.12	0.12	0.12
2017-10-08	第四组	0.15	0.15	0.15	0.12	0.13
2017-10-15	第五组	0.03	-0.14	-0.16	-0.14	-0.14

表3 门机回转信息误差偏离值数据统计 单位:(°)

试 验 组	设备1	设备2	设备3	设备4	设备5
回转1周偏离值	0.2	0.2	0.3	0.5	0.2
回转2周偏离值	0.6	0.7	0.3	0.6	0.2
回转5周偏离值	0.7	1.1	1.2	0.9	0.3
回转10周偏离值	4	3	5	4	7

平均回转1周的回转信息误差偏离统计见表4。

表4 平均每回转1周的门机回转信息误差偏离值 单位:(°)

试 验 组	设备1	设备2	设备3	设备4	设备5
第一组	0.20	0.20	0.30	0.50	0.20
第二组	0.30	0.35	0.15	0.30	0.10
第三组	0.14	0.22	0.24	0.18	0.06
第四组	0.40	0.30	0.50	0.40	0.70

通过垂直运输设备回转试验可知,门机随回转周数的增加,回转信息的采集误差会逐渐增大,在一段时间内保持在1°以内,符合垂直运输设备防碰撞系统的要求。但仍需要每隔一段时间进行校验。

3.3 变幅数据采集试验

门机大臂变幅采用幅角传感器进行采集,变幅误差标准为门机大臂每4个周期(每移动25°为一个周

期)的幅角误差不超过1°,变幅信息误差偏离值见表5。

表5 平均每4个周期的门机变幅信息误差偏离值 单位:(°)

试 验 组	设备1	设备2	设备3	设备4	设备5
第一组	0.5	0.4	0.7	0.6	0.5
第二组	0.4	0.5	0.5	0.8	0.4
第三组	0.7	0.6	0.5	0.5	0.7
第四组	0.5	0.5	0.7	0.5	0.7

通过垂直运输设备变幅试验可知,门机随变幅周期的增加,变幅信息的采集误差在一段时间内保持在1°以内,但仍需每隔一段时间进行校验以满足垂直运输设备防碰撞系统的要求。

3.4 缆机小车的定位误差

由于缆机上小车无法用高精度绝对值编码器进行定位,因此,加查水电站项目工程缆机设备的小车采用了GPS+BDS的定位方式,该定位方式通过测量基准站与小车的相对位置,来获得小车的准确位置。小车下悬挂了吊钩,准确获取小车的位置对垂直运输设备防碰撞决策具有重要意义。表6记录了空钩情况下5组不同位置的小车坐标信息。

表6 小车测量位置与实际位置误差统计 单位:m

测试组	小车位置 GPS + BDS 测量结果	小车位置实际值	误 差
第一组	(120.47,77.20,3294.21)	(120.00,78,3291.37)	2.99
第二组	(239.76,78.59,3282.33)	(240.00,78,3281.17)	1.32
第三组	(465.98,77.72,3274.04)	(465.00,78,3276.59)	2.74
第四组	(585.01,78.18,3283.43)	(585.00,78,3284.07)	0.66
第五组	(705.47,77.10,3297.02)	(705.50,78,3295.62)	1.66



由结果可知, GPS + BDS 的定位方式能够反映小车与基准站的相对位置, 由于基准站的位置固定, 通过小车与基准站的相对位置, 能够准确获取小车的实际位置, 达到预期精度要求。

#### 4 结 语

针对水电工程垂直运输设备防碰撞智能控制系统中运输设备关键部位定位问题, 研究采用多传感器与 GPS + BDS 技术, 其中, 缆机小车等利用 GPS + BDS 的差分定位方式, 门塔机以及缆机的行走机构采用从动轮上安装编码器的定位方式, 其他关键部位采用相应的传感器获取实时信息。在岷江犍为航电枢纽工程和雅鲁藏布江加查工程中进行了试验, 结果表明, 其满足复杂环境下垂直运输设备机群防碰撞系统的定位要求。◆

#### 参考文献

- [1] 谢洪林, 郭建文, 刘金山, 等. 小湾水电站拱坝施工中缆机的运行管理与探索[J]. 水力发电, 2009, 35(9): 94-97.
- [2] 黄建文, 祝建军, 张婷. 基于 GPS/RFID 组合定位的缆机塔机防碰撞系统研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11

(10): 90-95.

- [3] 张治钰, 邓世恒, 张晴. 大坝塔机缆机防碰撞系统研究[J]. 科技创新与应用, 2016(35): 28-28.
- [4] 王建农, 王伟. 基于空间三维定位技术的塔吊防撞监控系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(12): 3272-3274.
- [5] 吴昊, 马国锋. 威海市南海新区挡潮闸工程履带吊抬吊门机轨道梁施工工艺探析[J]. 水利建设与管理, 2019, 39(7): 34-38, 33.
- [6] 李扬, 颜蔚, 汤炜. 精细化智慧水利信息平台的应用实践[J]. 水资源开发与管理, 2021(4): 55-58, 38.
- [7] 张志强, 吴庆鸣, 夏大勇, 等. 大坝施工设备防碰撞预警系统[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(1): 134-137.
- [8] 夏大勇, 熊雄, 朱洪强, 等. 龙滩水电工程大坝施工设备防碰撞预警系统的开发[J]. 红水河, 2006, 25(4): 60-63.
- [9] 顾承庆, 赖江波, 马俊. 新安江水电厂坝顶门机吊具自动穿销装置的研究[J]. 水利建设与管理, 2019, 39(4): 80-84.
- [10] 李雪锋, 许义群, 高春辉, 等. 龙开口水电站防碰撞系统的设计、开发与应用[J]. 水力发电, 2013, 39(2): 57-60.
- [11] 索惠霞. 基于信息化技术的水利现代化思路研究[J]. 水资源开发与管理, 2017(10): 78-81.

(上接第 57 页)

根据引汉济渭黄金峡水利枢纽工程施工废水处理经验, 建议推广使用此类高效废水处理系统设备, 以确保废水处理及时高效, 为各类建设项目高强度施工提供有利条件, 提高建设单位核心竞争力, 为水利工程建设高质量发展奠定坚实的基础。◆

#### 参考文献

- [1] 刘元红, 顾晶. 关于河道沿线老旧建筑污水处理的问题研究[J]. 水资源开发与管理, 2020(6): 39-42.
- [2] 胡昕晔, 翁晏呈, 黄彰奕. 上海农村生活污水治理现状与发展的思考[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(1): 73-76.
- [3] 陈卫, 熊君, 祁娟维. 预灌浓浆在糯扎渡电站防渗墙施工中的应用[J]. 人民长江, 2009, 40(24): 46-47, 56.
- [4] 肖昱, 李宏伟. 引汉济渭工程建设中秦岭生态环境保护工

作思路探究[J]. 水利建设与管理, 2020, 40(11): 74-77, 67.

- [5] 高旭艳. 关中地区水系存在问题的治理措施初探[J]. 水资源开发与管理, 2016(2): 32-34.
- [6] 张家托, 曹华. 黄金峡水利枢纽工程砂石加工系统废水处理[J]. 湖南水利水电, 2019(6): 90-92, 99.
- [7] 王洁瑜, 刘正东, 龙翔宇. 贵州地区水利工程砂石料加工系统废水处理方式探讨[J]. 科技创新与应用, 2015(8): 24-25.
- [8] 谢晶. 黄金峡水利枢纽工程砂石加工系统采用的施工工艺[J]. 四川水力发电, 2019, 38(2): 41-44, 59.
- [9] 吴海金. 大藤峡水利枢纽工程砂石料系统优化设计[J]. 企业科技与发展, 2016(3): 62-65.
- [10] 李亮. 村镇生活污水常用处理工艺简介与对比[J]. 水资源开发与管理, 2017(6): 23-26.

# 鲁西南乡村振兴水系治理模式初探

赵红兵<sup>1</sup> 朱明辉<sup>1</sup> 李子玉<sup>2</sup>

(1. 山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心, 山东 济南 250014;

2. 山东省曹县常乐集镇农业农村服务中心, 山东 曹县 274405)

**【摘要】** 为探究鲁西南乡村振兴水系系统治理技术方法,在调查分析鲁西南农村水系特征、保护治理现状及存在问题基础上,结合乡村振兴要求,提出了集总体规划布局、治理措施内容和运行管护机制于一体的鲁西南农村水系坑塘系统治理模式。实践证明:农村水系坑塘应统一调查规划和系统保护治理,从水系空间布局、水资源利用配置、生态要素系统配置和治理功能目标定位进行规划布局,分区分类采取相应治理措施和运行管护机制,加强保护治理技术系统集成研究,实施科学治理,为乡村振兴提供有力的水系生态支撑。

**【关键词】** 农村水系;坑塘;治理模式;乡村振兴;鲁西南

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)04-079-06

## Preliminary study on water system treatment mode of rural revitalization in Southwest Shandong Province

ZHAO Hongbing<sup>1</sup>, ZHU Minghui<sup>1</sup>, LI Ziyu<sup>2</sup>

(1. Shandong Provincial Haihe and Huaihe Xiaqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center, Jinan 250014, China;

2. Shandong Caoxian County Changleji Town Agricultural Comprehensive Service Center, Caoxian 274405, China)

**Abstract:** Rural revitalization requirements are combined to put forward Southwest Shandong rural water system pit system treatment mode on the basis of investigating and analyzing rural water system characteristics, the protection treatment current situation and existing problems in Southwest Shandong Province in order to explore the rural revitalization water system treatment technical methods in Southwest Shandong Province, wherein the overall planning and layout, treatment measure content and operation control protection mechanisms are integrated in the mode. Practice proves that uniform investment planning and systematic protection treatment should be implemented in the rural water system pits. They should be planned and arranged in the aspects of water system space layout, utilization and allocation of water resources, ecological element system configuration and treatment function target positioning. Corresponding control measures and operation management mechanism are adopted in different zones and categories. The integration study of protection and control technology systems is reinforced. Scientific management is implemented, thereby providing powerful water system ecological support to rural revitalization.

**Keywords:** rural water system; pits; treatment mode; rural revitalization; Southwest Shandong Province

收稿日期: 2021-05-21

作者简介: 赵红兵(1977—),男,硕士,高级工程师,从事水利工程与河湖管理工作。



水系治理对促进乡村振兴具有重要作用,但长期以来因缺乏有效治理,农村水系成为制约乡村振兴的短板,加强农村水系治理十分必要和紧迫。农村水系治理是一项系统工程,目前相关治理研究还不够系统深入,特别是针对不同区域特征的整体治理模式还缺乏相应研究。本文结合乡村振兴水系治理实践要求,探讨鲁西南农村水系治理总体规划布局、治理措施内容、运行管护机制等方面的技术经验,以期对乡村振兴水系治理提供有益借鉴。

## 1 水系特征与保护治理现状

### 1.1 区域概况与水系特征

鲁西南地处黄泛平原区,主要为山东省菏泽市及济宁市、聊城市的部分县(区),多年平均降水量662.7mm,但年内年际变化大,夏季降水量约占全年总量的60%,较大年达900mm以上,较小年低于450mm。黄河从该区北部由西向东贯穿全境,是最大的客水来源,对城乡供水、农业灌溉、地下水回补极为重要;该区东部由南至北分布有南四湖和南水北调东线工程。鲁西南是重要粮食主产区,区内人口稠密,2019年菏泽市总人口为878.17万(户籍人口1026.53万),人口密度为722人/km<sup>2</sup>(户籍人口密度845人/km<sup>2</sup>),是重要的劳力输出地区。区内水资源短缺,菏泽市人均水资源占有量约为全省的3/4、全国的1/8,由于浅层地下水含盐含氟量高不适宜长期饮用,在引黄水量刚性约束和地下水严禁超采的情况下,水资源供给和水生态维护面临严峻的形势。

根据第一次全国水利普查成果,菏泽市流域面积50km<sup>2</sup>及以上河流达119条,设计灌溉面积2000亩及以上灌区面积762.86万亩,其中灌溉渠道4890km、灌排结合渠道11047km、排水沟道13684km,沟渠密度5.82km/km<sup>2</sup>;全市虽然没有常年水面面积1km<sup>2</sup>及以上的天然湖泊,但建有平原引水水库5座,总库容1.41亿m<sup>3</sup>,且所有村庄内部及边缘均或多或少地分布有大小不一的坑塘,小到数十平方米,大到几十亩,大都由于建房、烧砖、修路等取土而形成。坑塘在鲁西南农村水系中具有突出地位,是农村水系的重要组成。村庄

排水沟、坑塘与村外灌排沟渠、河流共同构成了鲁西南农村水系分布基本格局。

此外,鲁西南农村水系还具有以下明显特征:①人工河道特征明显:水系多以人工开挖形成为主,易于调整变化;②平原河道特征明显:河道落差小,易造成水动力不足,受水土流失和引黄泥沙影响,河道淤积明显;③引黄输沙特征明显:河道除具有行洪滞洪、蓄水输水、生物生境等基本功能外,引黄河渠还具有引黄输沙功能;④季节特征明显:由于降水集中和引黄水量控制,除少数大河深塘外,大量沟渠和坑塘时常处于干涸状态。

### 1.2 保护治理现状与存在问题

近年来,菏泽市对面积0.67hm<sup>2</sup>(10亩)以上的坑塘开展了调查和治理,取得了显著成效。但农村流域面积50km<sup>2</sup>以下的小微水系、面积0.67hm<sup>2</sup>以下的大量坑塘,尚缺乏全面调查和治理保护。山东省全面实行河湖长制以来,要求全面建立省、市、县、乡、村五级河湖长体系,包括沟渠、坑塘在内的小微河道、湿地全面纳入河湖长制范围,水系坑塘管理保护空前加强。

由于农村发展基础薄弱,特别是对农村水系坑塘的重要性认识不足,目前农村水系坑塘保护治理还存在一些难以适应乡村振兴的困难和问题。

a. 淤积严重,荒废明显。由于黄泛平原特殊的地貌和土壤特性,以及引黄等因素,水系坑塘淤积严重,大量沟渠、坑塘长期缺少清淤维护和治理,处于荒废状态。

b. 乱占乱用明显,连通性差。由于缺乏统一规划和有效控制,村庄水系与居住区、路网、林网、农田等区域生态要素建设不配套,各种开发建设造成河流、沟渠、坑塘被填埋、占用、阻断的现象较为常见,严重破坏了水系的整体性和连通性。

c. 水污染严重,水环境质量差。农村污水收集处理率低甚至多为直排,一些被阻断隔离的死塘水体黑臭现象严重;村庄坑塘常常被当作垃圾倾倒场所,环境状况和景观面貌堪忧。

d. 水系功能降低,自我修复能力弱。水域空间减少,水系连通性降低,降低了水系行洪滞洪调节能力,



加之水源补给不足、污染负荷超量、生态治理修复缺位等原因,造成水系坑塘自我净化和修复能力不足。

e. 管护基础薄弱,责任难落实。农村沟渠、坑塘等小微水系属于集体所有,实行农村土地承包经营制度以来,有的被承包经营,有的被非法占用,农村水系坑塘缺乏统一调查登记和规划治理,治理、管护、使用相脱节。农村集体经济薄弱,水系坑塘多数面临缺钱治、缺人管的状况。

## 2 水系坑塘治理促进乡村振兴的重要作用

乡村振兴提出了产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕的总要求,需要充分发挥水系坑塘治理在农村生态、生产、生活各方面建设的重要支撑和保障作用。

### 2.1 维护自然水循环

水系坑塘是农村雨洪资源收集利用的主要载体,是地下水补给的重要条件,对维护当地地表水与地下水平衡具有重要作用。在人类活动影响及地表硬覆盖日趋严重的情况下,维护和改善农村水系坑塘的空间分布和结构规模,对维持鲁西南地区自然水循环具有重要意义。

### 2.2 防御水旱灾害

水系坑塘是农村重要的行洪滞洪、蓄水供水基础设施,其分布结构、连通程度、规模容量等直接关系到农村区域的防洪抗旱能力。对于降水高度集中在夏季的鲁西南农村,防止水系坑塘被填埋、占用和阻断,确保具有足够的洪水调蓄空间,是防御水旱灾害的重要基础。

### 2.3 促进增产增收

鲁西南农村水系坑塘具有灌溉、养殖、种植等不同的生产功能,是粮食主产区发展特色农业的重要资源。以坑塘水系为依托,通过发展“生态养殖+生态种植+观光旅游”的复合产业,拓宽农村产业道路,促进集体增收和农民致富。

### 2.4 改善人居环境

水系坑塘不仅是自然水循环的重要环节、水旱灾

害防御的主要设施,也是改善村庄生态环境和景观面貌的关键因素。水系坑塘是保护生物多样性的重要场所,同时能够改善局地气候,提高景观丰富度。经过景观设计治理并配套文化娱乐设施的水系坑塘,是群众休闲娱乐的好去处,是承载村庄精神文化生活的重要场所。

## 3 总体规划布局

### 3.1 水系空间布局

实施区域水系整体连通。根据区域自然产流汇流规律,实施村庄坑塘与河沟连通、村庄水系与村外水系连通,水系、坑塘形成“纵横交织、长藤结瓜”式的水网布局,确保水域空间面积不缩小,维护和改善水系坑塘行洪滞洪、输水蓄水调控空间,形成系统完整的农村水旱灾害防御设施体系。

### 3.2 水资源利用配置

实施地表水与地下水平衡联动。根据区域有利的引黄条件,建立健全当地水与引黄水合理调配使用的工程体系,充分发挥水系坑塘引蓄地表水和回补地下水的功能,蓄丰补枯,合理利用配置区域内地表地下水资源,促进区域水平衡。

### 3.3 生态要素系统配置

实施房、路、林、田、沟、渠、塘、河等流域(区域)生态要素综合配套、系统治理。村庄居住区,由高到低合理布置房、路、林、沟、塘、河等要素,路、林、沟相配套,沟、塘、河相连通,有效保持水土和防御水旱灾害,建设生态宜居空间;村外农田区,由高到低合理配置路、林、田、渠、沟、塘、河等要素,路、林、沟渠相配套,渠、沟、塘、河相连通,建设旱能浇、涝能排的生态农业稳产高产区。

### 3.4 治理功能目标定位

实施分类分区治理。根据水系坑塘在自然生态和社会生产、生活中的服务功能,水系坑塘功能目标可划分为生态型、生产型和生活型,生态型是必备基本功能,生产型、生活型是复合功能。根据保护治理程度的不同,农村水系坑塘划分为保护类、修复类和治理类。



现状已经满足功能目标的,为保护类;停止和消除不合理人为干扰,水系坑塘能自行恢复功能的,为修复类;需要人为主动干预,实施治理措施才能达到功能目标的,为治理类。农村水系坑塘治理应在满足行洪、滞洪、排涝、输水、蓄水、补水等生态功能的前提下,充分发挥不同水系坑塘灌溉、养殖、景观、游憩、文化等多种生产、生活服务功能,提高水系坑塘治理综合效益。村庄居住区,在生态型治理基础上根据情况实施生活型复合治理;村外农田区,在生态型治理基础上根据情况实施生产型复合治理。鲁西南农村水系坑塘治理目标类型划分见表1。

表1 鲁西南农村水系坑塘治理功能目标类型划分

农村区位	水系坑塘类别	功能目标类型
居住区	排水沟	生态型(行洪排涝)
	坑塘	生态型(行洪滞洪、蓄水补水、生物栖息地)+生活型(亲水景观、亲水设施、水文化体验)
	河流	生态型(行洪排涝、输水补水、生物栖息地、生态廊道)+生活型(亲水景观、亲水设施、水文化体验)
农田区	灌溉渠道	生态型(输水补水)+生产型(农业灌溉)
	灌排结合渠道	生态型(输水补水)+生产型(农业灌溉)
	排水沟道	生态型(行洪排涝、输水补水)
	坑塘	生态型(行洪滞洪、蓄水补水、生物栖息地)+生产型(水产养殖、农业种植、农业灌溉)
	河流	生态型(行洪排涝、输水补水、生物栖息地、生态廊道)+生产型(农业灌溉)

## 4 治理措施内容

### 4.1 水系连通

通过河道(渠道)开挖、涵管连通等方式,完善村庄排水沟道,连通村里村外各种河道水体,实现水系坑塘的三维连通,避免过度硬化和渠化,形成系统完整连通的水系网。合理确定不同河道(段)防洪标准,满足河势稳定和“涝能排、旱能引”的洪水调控功能,增强水

体流动性和自净能力,恢复和提升河道生态廊道功能。

### 4.2 清违清淤

全面查处乱占乱建、乱围乱堵、乱垦乱种、乱堆乱放、乱倒乱排等各类侵占和破坏水域岸线的行为,依法清除阻碍行洪的建筑物、构筑物 and 设施,畅通河道水系,恢复和改善河道生态环境。对淤积严重的河道(渠道)、坑塘根据防洪排涝、输水灌溉、水质改善、生态保护等要求实施清淤,扩大河道行洪断面,增加蓄水容积,满足水系行洪滞洪、输水蓄水能力。

### 4.3 防冲防淤

河道内的水闸、泵站、进出水口等工程采取防冲消能措施,保证工程安全持久运行。在村庄排水沟渠合理设置沉沙池,防止水土流失造成沟渠淤积,并定期清淤维护;为防止引黄泥沙淤积,针对不同引黄灌溉渠系情况布设沉沙池,保证引黄渠系效益持久发挥;对深长暗渠和涵管,合并布设检修井和沉沙池,保证工程正常运行和维修养护。

### 4.4 岸坡整治

依规划定河道、坑塘岸线及管理范围,根据河道、坑塘的自然特点,因地制宜选择适宜的岸坡形式,留足坡顶宽度,满足生态、生产、生活治理要求。村庄居住区,沿街道布设的排水沟通常为矩形断面,采用砖砌或混凝土护砌形式,并根据安全和生活需要采取盖板覆盖,交叉路段采用暗涵或者管涵连通护砌。村庄内外的坑塘、河道,原则上采用自然护坡,通过地形整治,放缓、平整坑塘、河道岸坡,平顺、丰富岸线,满足岸坡稳定、形态美观的治理要求;对深挖坑塘和常流水河道,常水位下采用抛石护脚、石笼护脚等形式,坡面采用植物护坡、生态混凝土砖护坡等形式;在人类活动密集的村庄岸段可设置阶梯式岸坡和亲水台阶。

### 4.5 污染防治

调整人的行为方式。通过加强宣传、强化监督、落实奖惩等措施,积极引导广大群众树立资源节约、环境友好的绿色生产生活理念,有效落实环境保护和河湖管理保护相关法律法规规定,节约集约利用水资源,最大限度减少污染物排放,从源头上防止河湖污染。加

强工程治污。具体内容包括:④控源截污,积极推行污水资源化利用:不具备污水集中收集的村庄,建设出户污水沉淀池,收集和净化生活污水,并提供庭院绿化用水;做好粪污资源化利用,结合改厕和种养方式转变,实现粪污有效收集和就近还田利用;推行保水保肥耕种措施,提高农田有机物污染物利用效率;严格工业企业污染治理排放;⑤内源污染治理:对底泥已经严重污染的河道坑塘,按规定实施底泥清理、处置;⑥实施水体净化:结合水系连通、清违清淤、岸坡整治等,增强水体流动性;通过建设岸线植物隔离带、种植水生植物、建设生态浮床(浮岛)、放殖水生动物等措施,提升水生态系统和水体自净能力。

#### 4.6 生态建设

坚持以自然修复为主、人工促进为辅的理念开展水系坑塘生态保护、修复和治理工作。具体内容包括:①做好区域水土保持:村庄居住区,建设“海绵社区”,硬化与绿化合理搭配,防止地面大面积整体不透水硬化,通过微地形改造和下沉式绿地建设等措施,实现村庄雨洪有效入渗和就近集水灌溉绿化,消除“雨天流泥水、晴天起灰土”的现象;村外农田区,沟渠路林相配套、成网成带,防护林沿路沿和沟渠坡顶布设,防风固沙、保持水土;②做好岸线生态绿化:按照适地适树的原则,尽可能选择乡土绿化植物,乔灌木结合,因河因地实施绿化,既改善岸线生态环境又不妨碍行洪输水、影响堤防岸坡安全稳定;洪水位以下滩地、岸坡和输水河渠临水侧岸坡宜植草绿化,其他岸线根据坡顶宽度、兼做道路等情况选择合适的绿化方式;③做好水域生态利用:种植适合的水生植物和放殖适宜的水生动物,形成良性水系生态系统。种植和养殖品种及方式选择,水系坑塘“生活型”治理以景观观赏为导向,“生产型”治理以生产增收为导向,但禁止施肥种植和投饵养殖。

#### 4.7 景观文化

鲁西南农村水系基本为顺直型河道和沟渠,根据干支等级不同具有不同的河道宽度和岸线道路宽度,总体形成开阔、规则的网格型田园水系景观。在农田区,结合水系生态绿化,形成河道边界清晰整齐、绿植

高低错落有致、景观要素丰富的水系生态景观廊道,并运用图示、文字的形式展示水系工程内容,让人们能够感受到沟渠路林成网、田成方与充满生机、景随时移的自然美感,同时又能营造了解水、珍爱水和关心河湖、保护河湖的良好氛围。在村庄居住区,在不侵占河道过水断面、占用坑塘蓄水空间、影响岸坡稳定和破坏生态环境的情况下,因地制宜地修建水边步道、亭阁,开辟滨水活动场所,设置亲水设施和文化景观小品,实施园林绿化美化,营造安全、生态、亲水、优美的宜居水环境,让人们能够体验和感悟人与水、人与自然和谐共生的真谛,塑造和传承村庄特色文化。

### 5 运行管护机制

#### 5.1 落实河道划界确权

除确权为国有外,农村水系坑塘属于村集体资源与资产。应根据河道管理范围划定和农村“三资”清理相关要求,明确河道管理范围和权属,收回被非法占用的水域岸线,避免公共资源资产被侵占和破坏。划界确权成果除颁证和公告外,还应纳入统一的国土资源管理信息系统。现场通过埋设界桩、设置拦网、种植林带等方式有效固化、显化河道、坑塘管理范围边界。对具有生产功能并实施承包经营的坑塘,村集体应向承包人明确收益分配与运行管护相关权利义务,并严格落实。

#### 5.2 落实管护责任主体

按照全面实行河湖长制要求,有序规范河长、湖长设置,全面落实水系坑塘管护责任主体,确保农村水系坑塘不重不漏纳入河湖长制管理。跨乡镇及以上行政区的河道(渠道、湖泊),设置县级及以上河长、湖长;跨行政村的河道(渠道、坑塘),设置乡级河长、湖长;其他河道(渠道、坑塘)设置村级河长、湖长。建立完善河湖长制管理信息平台,确保河湖(河道、坑塘)对象、河湖长设置、管护治理等信息全面、及时、可靠,管护责任可查、可考。

#### 5.3 健全保护治理投入机制

首先,系统规划治理。将水系坑塘保护治理纳入乡村振兴规划,使保护治理工作有规可依,整合各方力





量实施系统保护治理。其次,加大财政资金投入。加大财政支持力度,加快水系坑塘治理达标和问题清零,通过设立公益性岗位或购买服务的形式,实现水系坑塘有人管、管得好。再次,积极引导社会参与。按照“谁受益、谁管理、谁负担”的原则,积极引导群众负责治理管护自家门前沟、田中塘等小微水系;运用市场手段,积极引入第三方重点对生产型河塘实施治理和运营维护,以此增加的村集体经济收入返还水系坑塘保护治理,实现以河养河、以塘养塘的良性循环。

#### 5.4 落实日常管护责任

建立健全村规民约,加大宣传力度,引导广大村民自觉参与和积极监督水系坑塘管理保护,从源头上有效防止侵占和破坏水系坑塘的各种行为。加强教育培训,提高管护人员队伍的管护技能和水平,有力做好水系工程的运行调度和维修养护、水系坑塘日常环境保洁和生态系统更新维护,防止人为水产养殖、植物种植不当造成水系坑塘生态破坏和环境污染,及时查处各种破坏水系坑塘的违法违规行为。

## 6 结 语

水系坑塘在鲁西南乡村振兴中具有维护自然水循环、防御水旱灾害、促进增产增收、改善人居环境等重要作用。加快鲁西南农村水系坑塘治理,应立足于鲁西南自然和经济社会发展条件,采取合理的规划布局、治理措施和运行管护机制。当前,农村水系坑塘保护治理迫切需要开展统一调查规划,以乡镇为单位、以村

为单元实施系统保护治理;同时进一步细化实化河湖长制,完善政策机制,加强保护治理技术系统集成研究,实施科学治理,为乡村振兴提供有力的水系生态支撑。◇

#### 参考文献

- [1] 李原园,杨晓茹,黄火键,等.乡村振兴视角下农村水系综合整治思路与对策研究[J].中国水利,2019(9):29-32.
- [2] 杨德斌.农田水利与乡村景观融合方式的研究[J].百科论坛电子杂志,2021(10):2534.
- [3] 赵红兵.河湖违法问题长效防治路径和方法研究[J].中国水利,2020(10):19-22.
- [4] 河湖生态系统保护与修复工程技术导则:SL/T 800—2020[S].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [5] 谈祥,张佳蕊,杨珊珊.浅谈生态型农田排水沟的设计与试验研究[J].水资源开发与管理,2020(3):8-12.
- [6] 李涵.新时期农村水利工程建设管理问题与对策[J].水利建设与管理,2019,39(11):46-48.
- [7] 顾跃.新时期小型农田水利工程管理问题与对策探究[J].农业科技与信息,2016(29):109,112.
- [8] 张鲁婧.济南市农业水价综合改革的难点及对策建议[J].水资源开发与管理,2017(10):55-57.
- [9] 杜威璇.农田水利设施供给质量缺憾及其改善[J].中州学刊,2020(2):26-32.
- [10] 王蕾,曾心韵.我国小型农田水利设施供给发展现状分析——来自181个村庄的微观数据[J].江苏农业科学,2020,48(17):307-312,325.
- [11] 姚天宝.河长制“一河一策”中面源污染统计分析及处理措施[J].水资源开发与管理,2020(2):62-66.

(上接第34页)

- Workbench的抽水蓄能电站调压室围岩与衬砌接触模拟研究[J].水电与抽水蓄能,2020,6(4):66-70,88.
- [5] 周健,侯丽,张峰.降雨工况下水工挡土墙稳定分析[J].水利技术监督,2019(6):223-227.
  - [6] 尤小强.水利工程项目的闸设计探讨[J].水资源开发与管理,2016(6):74-77.
  - [7] 许晖,肖鑫明.鱼枳水库溢洪道物理模型试验研究[J].湖南水利水电,2020(5):36-39,57.
  - [8] 宋峰.水工混凝土表面不同防护材料抗渗性能对比试验研究[J].江苏水利,2020(3):43-46,50.

- [9] 段立辉.恰甫其海电站中孔泄洪闸门应力检测及分析[J].水利建设与管理,2014,34(11):65-69.
- [10] 艾红志.石佛寺水库枢纽布置探析[J].水资源开发与管理,2016(6):63-67,58.
- [11] 孟庆巍.基于水利枢纽工程水工混凝土结构耐久性评价[J].黑龙江水利科技,2019,47(8):153-157.
- [12] 杨冬鹏.硅烷浸渍技术提高浑河闸护坦板耐久性的试验研究[J].水利建设与管理,2020,40(11):7-11,6.
- [13] 任锦亮,吕军,张健.基于MIKE 21模型与经验公式在桥梁防洪评价中壅水计算的对比分析[J].水资源开发与管理,2020(5):24-30.