



湖北省优秀期刊

《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊

万方数据——数字化期刊群入网期刊

《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊

维普网全文收录期刊

ISSN 1671-3354

# 水电与新能源

## HYDROPOWER AND NEW ENERGY

水电与新能源

2020年第一期(第34卷)



溪洛渡水电站

ISSN 1671-3354



主办单位

中国三峡出版传媒有限公司  
湖北省水力发电工程学会

1

2020  
第34卷

# 水电与新能源

月刊

2020年第1期

第34卷(总第187期)

2020年1月30日出版

1987年9月创刊

2010年1月更名

顾问 (以姓氏笔画为序)

刘经南 许崇育(挪威)

陆佑楣 张超然 钮新强

编辑委员会

主任委员 常晓林 李磊

副主任委员 黄介生 张海星 张博庭

柳建乔

委员 (以姓氏笔画为序)

王小毛 王义峰 王绍良 方创新

卢文波 付明 任大春 刘运志

刘建平 关杰林 李文伟 李冰

李志祥 李翀 李智 李磊

杨广杰 杨柏华 何金平 汪在芹

张志猛 张海星 张维平 张博庭

陆忠民 陈启卷 陈晓明 余敦先

郑斌 周伟 周友斌 周宜红

周建中 赵英林 胡伟 柳建乔

袁建伟 郭光文 郭棉明 涂长庚

涂圣勤 宾洪祥 黄介生 黄国兵

常晓林 蔡义钧 颜绍富

编辑部

主编 夏军

常务副主编 赵英林

技术总监 王绍良

执行副主编 徐云修

副主编 陈启卷 李文伟 周伟

办公室主任 刘卫民

办公室副主任 江晖

联络部主任 程汉兰

责任编辑 刘雪琴

编辑 刘雪琴 于华东 江晖

陆丹

英文翻译 程勇刚

视角设计 黎明

广告部 唐晏军

编务 钱小玉

主管单位 湖北省科学技术协会

主办单位 中国三峡出版传媒有限公司

湖北省水力发电工程学会

编辑出版 《水电与新能源》编辑部

地址 武汉大学工学部

邮编 430072

电话 027-68772726

E-mail sdxny5429@163.com

学会网站 http://www.hshe.org.cn

印刷单位 武汉市宏达盛印务有限公司

刊号 ISSN 1671-3354

CN42-1800/TV

广告经营许可证号 4200003300079

广告电话 027-87874931

国内定价 10.00元/册

公开发行 自办征订

## 目次

### □高端论坛□

新能源公司实施 EPC 建设管理模式情况分析…… 郭子臣,张 坤(1)

光伏建筑一体化屋面系统研究与实践 …………… 王 强,洪艺然(4)

基于 BP 神经网络模型的黄龙滩电厂下游水位流量关系分析 ……………

…………… 袁林山,张 力(7)

碾盘山水利水电枢纽工程河道采砂论证浅析 …… 林江武,廖 明(12)

国外小水电设计要点——以印尼 Bone 水电站为例……………

…………… 翟晓斌,游志纯,王桂林(16)

向家草坝节制闸牛腿拆除后弧形闸门的安装技术 ……………

…………… 牛爱军,李新华,陈崇德(19)

### □科学研究□

水电企业经济运行管控模式探讨与实践 ……………

…………… 陈 媛,寇立夯,李永利(23)

GIS、CFD 软件在风电场中的应用 ……………

…………… 王文中,陈海峰,王 旭,杜尚尚,许田琦(29)

波浪能发电现状及关键技术综述 ……………

…………… 陈映彬,黄 技,赖寿荣,赖佳亿,林樾荣(33)

海上风力发电及相关技术 …………… 林 盛,罗天怡(36)

海上漂浮式风机发展调研及分析 ……………

…………… 陈明亮,杨朋飞,常 璐,徐洋洋(38)

高心墙堆石坝蓄水变形和裂缝机理分析 …………… 柯 虎(44)

层状岩体横观各向同性劣化模型研究 ……………

…………… 潘洪月,张 丽,宛良朋,王 坤,赵代鹏(52)

### □建设与管理□

水布垭电厂调速器液压控制管路密封问题分析 …………… 杨 俊(58)

局部硫化技术在三峡水利枢纽深孔弧门水封更换中的应用 ……………

…………… 余洪斌,魏 丹,朱全平,胡毅力(62)

三峡库区城镇移民安置区社区管理方式研究 …… 许 凯,樊连生(66)

西藏光水互补发电研究现状与对策 …………… 刘 威(68)

一例干式变压器匝间短路故障分析 …… 周 平,叶华松,吴礼贵(72)

水电设备检修过程中运行管理的探索与优化 …… 王 彬,孙 勇(76)

# HYDROPOWER AND NEW ENERGY

January 2020      Number 1

## Contents

---

Practice of EPC General Contracting Construction Management Mode in New Energy Development Co., Ltd. of Hubei Energy Group .....	<i>GUO Zichen, ZHANG Kun</i> (1)
Building Integrated Photovoltaic Roof System : Research and Practice .....	<i>WANG Qiang, HONG Yiran</i> (4)
Analysis of the Stage-discharge Relationship for River Channel Downstream Huanglongtan Hydropower Plant based on BP Neural Network Model .....	<i>YUAN Linshan, ZHANG Li</i> (7)
Instream Sand Mining in Nianpanshan Water Conservancy and Hydropower Project ...	<i>LIN Jiangwu, LIAO Ming</i> (12)
Key Design Points of Small Overseas Hydropower Projects —— A Case Study of the Bone Hydropower Station Project in Indonesia .....	<i>ZHAI Xiaobin, YOU Zhichun, WANG Guilin</i> (16)
Radial Gate Installation Technology of the Control Gates in Xiangjiacao Dam while Re-casting the Concrete Brackets Simultaneously .....	<i>NIUAijun, LI Xinhua, CHEN Chongde</i> (19)
Study and Practice of an Economic Operation Management and Control Mode in Hydropower Enterprises .....	<i>CHEN Yuan, KOU Lihang, LI Yongli</i> (23)
Application of GIS and CFD Software in Sind Farm .....	<i>WANG Wenzhong, CHEN Haifeng, WANG Xu, DU Shangshang, XU Tianqi</i> (29)
Current Situation and Key Technologies of Wave Power Generation .....	<i>CHEN Yingbin, HUANG Ji, LAI Shourong, LAI Jiayi, LIN Yuerong</i> (33)
Current Situation and Technology of Offshore Wind Power Generation .....	<i>LIN Sheng, LUO Tianyi</i> (36)
Development of Offshore Floating Wind Turbine Unit .....	<i>CHEN Mingliang, YANG Pengfei, CHANG Lu, XU Yangyang</i> (38)
Analysis of the Impoundment Deformation and Cracking Mechanism of a High Core Wall Rockfill Dam .....	<i>KE Hu</i> (44)
A Transversely Isotropic Deterioration Model for Layered Rock Mass .....	<i>PAN Hongyue, ZHANG Li, WAN Liangpeng, WANG Kun, ZHAO Daipeng</i> (52)
Analysis on Sealing Problem of the Hydraulic Control Pipeline for Governor in Shuibuya Hydropower Plant .....	<i>YANG Jun</i> (58)
Application of Local Vulcanization Technology in the Replacement Work of Water Seals for Radial Gates of Deep Outlets in Three Gorges Project .....	<i>YU Hongbin, WEI Dan, ZHU Quanping, HU Yili</i> (62)
On the Community Management Method of Urban Resettlement Region in Three Gorges Reservoir Area .....	<i>XU Kai, FAN Liansheng</i> (66)
Current Situation and Countermeasures of Photovoltaic Power and Hydropower Complementary Generation in Xizang .....	<i>LIU Wei</i> (68)
Analysis of an Inter-turn Short-Circuit Fault of Dry-type Transformer .....	<i>ZHOU Ping, YE Huasong, WU Ligui</i> (72)
Exploration and Optimization of the Operation Management in Maintenance Process of Hydropower Equipment .....	<i>WANG Bin, SUN Yong</i> (76)

---

**Editor:** Editorial Office of Hydropower and New Energy

**Post Address:** No. 8 South East-lake Road, Wuhan, Hubei, China

**Post Code:** 430072

**Chief Editor:** XIA Jun

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.001

# 新能源公司实施 EPC 建设管理模式情况分析

郭子臣, 张 坤

(湖北能源集团新能源发展有限公司, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**湖北能源集团新能源发展有限公司自项目采用 EPC 总承包建设模式的实施以来,不断总结经验教训,逐步改进完善管理思路与方法,有效解决了发展中面临的问题,逐步形成 EPC 总承包项目管理的一整套卓有成效的方法,能适应市场形势需要,取得良好的成绩,并对目前存在的问题提出了应对措施。

**关键词:**EPC 总承包;优势;改进;不足及对策

中图分类号:F406.14

文献标志码:C

文章编号:1671-3354(2020)01-0001-03

## Practice of EPC General Contracting Construction Management Mode in New Energy Development Co., Ltd. of Hubei Energy Group

GUO Zichen, ZHANG Kun

(Hubei Energy Group New Energy Development Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The practice of EPC general contracting construction management mode in New Energy Development Co., Ltd. of Hubei Energy Group is introduced. Since the implementation of the EPC mode, management experience and lessons are continuously summarized and the management concepts and methods are gradually improved. A full set of effective EPC project management measures are proposed, which can meet the requirements of the current market and achieve satisfactory results. Also, some countermeasures are proposed for existing problems.

**Key words:** EPC general contracting; advantage; improvement; deficiencies and countermeasures

2014年公司成立之初,面临建设项目多,管理任务重,管理人员不足的情况,为此湖北能源确定新能源项目均采用 EPC 建设管理模式。截至目前,采用 EPC 建设管理模式共完成 10 个项目,中标单位均为设计单位。其中全部投产项目 7 个,正在实施的项目 3 个。

## 1 采用 EPC 建设管理模式的优势

### 1.1 解决建设管理人员不足问题

公司成立之初,新员工占比较大,具有工程建设经验的人少,建设管理力量薄弱。若采用自建管理模式,则每个项目至少需要 7~8 人以上的管理团队,公司每年同时在建项目 6~8 个,人员状况无法满足建设需要。采用 EPC 总包建设管理模式,由总包单位进行现场管理。初期每个建设项目现场公司只派 2~3 名人员,解决了当时建设管理人员的不足的问题。

### 1.2 提升了主要设备质量

公司经过调研,初步确定设备短名单范围,通过专家评审形成主要设备短名单。设备采购由总包单位按照短名单招标。并针对风机、塔筒、组件、SVG 等主要设备单独召开技术交流会议,细化技术指标、明确重要附件要求等措施,从源头圈定了招标范围,确保了设备总体质量。公司项目上采用的主要设备均为国内一线产品,如果设备公开招标,无法确保项目全部使用一线品牌,如齐岳山二三期、三峡利川一二期风机均通过公开招标,一线品牌均未中标。

目前已经投产项目设备各类指标均达到或超过设计要求,发电量均超过设计发电量,未出现一般以上的设备质量事故。

### 1.3 促进了项目整体推进

1) 提高了招标效率。在 EPC 建设管理模式的情

收稿日期:2019-10-18

作者简介:郭子臣,男,高级工程师,主要从事新能源项目建设方面的研究。

况下,公司对每个在建项目只需要进行2~3个工程招标(EPC总承包、监理、外送线路),总承包单位确定后可快速组织施工,缩短了招标时间。如随县岩子河/广水吴店光伏项目从EPC总承包招标开始至该项目并网投产仅用半年时间,争取到了较高的结算电价。

采用自建管理模式,如通城黄龙山项目分解为16个招标项目,投入了大量人力,仅招标就需要花费半年以上时间。

2)提高了项目整体效率。在EPC建设管理模式下,合同数量一般为5~10个,合同关系简单明了,对比自建的通城黄龙山项目59个合同,项目的协调效率提高,建设管理成本降低,纠纷事件减少。同时项目过程付款、竣工结算等管理工作量大幅减少,更有助于项目风险控制,项目整体实施效率得到提高。

#### 1.4 投资控制成效显著<sup>[1]</sup>

在EPC招标之前,向主要设备厂家询价,并就现场资源、系统方案、价格及发电量进行充分沟通,为设置合理的EPC招标控制价提供依据。已实施完成的项目,在使用最好设备的前提下,已投产项目在概算基础上平均降低10%以上。EPC中标价格也呈现逐步降低趋势,项目投资控制较为理想,投资收益较项目设计大幅度提高,公司整体利润快速增长。

#### 1.5 充分利用总包单位的资源优势

EPC管理模式,将项目建设过程中协调、征地、手续办理等工作转交总包单位完成,减少了建设单位的工作量,避免了项目延期的索赔风险,也充分发挥了总包单位的资源优势,如地方政府、电网公司资源等。

#### 1.6 安全管理形势总体平稳

公司按照湖北能源安全生产管理的各项要求和工作部署,紧紧围绕工程建设细化安全目标管理,不断完善质量安全管控体系;以强化相关方管理为突破口,引进第三方技术支持,狠抓工程建设质量安全;以开展标准化建设、并网安全性评价、安全“三同时”工作为途径,完善隐患排查体系,规范安全生产管理,近年来,公司安全生产形势总体平稳。

#### 1.7 有效规避廉洁风险

EPC建设管理模式,固定总价,在执行中有效规避了因大量招标采购、现场签证、工程变更、验收等可能引起的廉洁风险。目前,公司已累计完成投资超过46亿元,未发现一起不廉洁事件。

公司成立之初,装机容量为11.54万kW,从2016年开始,新能源项目快速投产,近3年投产容量分别为

36.95、9.88、10.92万kW(预计全年投产20万kW)。风电项目装机容量达到59.59万kW,光伏项目装机容量达到26.3万kW,总装机容量为85.89万kW,预计年底接近100万kW的装机。另外从约2亿度的年发电量、2600万元的利润,到2019年底达到14亿度发电量和4.4亿元利润,主要指标均实现了快速增长。实践证明,EPC建设模式促进了公司的快速发展。

## 2 EPC建设管理模式的改进

EPC建设管理模式在执行过程中也存在合同内容不清、安全质量现场管理不够深入等一些问题,在进行逐步完善后,效果明显。主要体现在以下几个方面。

### 2.1 项目招标范围和合同要求逐步完善

公司成立之后,EPC建设管理模式很快从成本加酬金模式过渡到总价包干模式。并针对项目实施过程中出现的问题,不断改进和完善招标文件条款。将总包单位的承包范围、技术要求等内容以清单形式列入到招标文件,后续项目实施过程中双方争议越来越少,规避了合同风险。

近年来也与三峡新能源华东分公司和重庆能源等同行企业就EPC建设管理模式进行了沟通探讨,已经形成了比较成熟的EPC项目招标格式文件。

### 2.2 EPC项目招标前的准备工作更加充分

EPC招标文件均是在可研基础上进行编制的,项目研究深度不够,对项目的了解程度相对较低。后期很可能因地质条件、资源状况、现场环境等因素,导致重大方案变更,甚至带来建设规模的调整。另外前期准备工作不充分,项目招标后再进行微观选址、道路设计、林业调查等工作将严重影响项目实施进度。

针对以上情况,在项目核准前,建设单位工程人员提前介入,完成地形图测绘,林地、国土性质调查。风电项目则同步开展风机微观选址和设备选型。项目招标后,总包单位可迅速进行土地和林业手续办理,提前完成开工前大部分准备工作。

目前已经实施完的7个项目和正在实施的3个项目均未出现重大方案变更,项目风险均得到有效控制。

### 2.3 EPC项目的过程管理更加严格

初期EPC项目管理,公司管理力量投入不足,随着项目推进,公司逐步加强过程管理,公司出台《加强EPC管理模式的实施方案(试行)》的文件,针对项目管理问题提出管理措施。公司对EPC建设项目的过程管理更加严格,主要表现在以下几个方面。

1)健全组织机构。业主人员配置到位,明确业主最低人员配置 5 人,分别为 1 名负责人、1 名专职安全员、1 名综合专责和 2 名工程师(技术和质量)。目前在建项目实际业主人员均多于 5 人,实行全面项目管理模式。

对总包单位和监理单位均明确要求配置人员和数量,按月进行考核,板桥项目和荆门二期项目均对总包和监理因人员不到位进行了考核,总包和监理已非常重视。

2)推行标准化设计方案。EPC 建设模式特点,招标在前、设计在后,设计方案评审和设计方案标准化尤为重要,因此方案评审作为关键管理环节,纳入公司审查重点。公司明确升压站及总平、微观选址、风机基础等 7 个设计方案的评审要求,设计方案必须经公司评审通过后,方能开始实施。将升压站构筑物、装饰装修、风机基础、集电线路、标识标牌等做成标准化设计。

3)发挥项目分包的主导作用。施工单位直接影响现场安全、质量及工程进度,为确保施工队伍质量,公司审查总包单位的分包方案和招标文件,包括项目标段划分、资质要求、机械设备数量等;施工队伍由总承包人组织招标,将招标结果报公司审核,公司有权否决招标结果。

利川安家坝项目,在升压站土建执行过程中进度不满足现场要求,在进行发函、约谈、处罚等措施之后仍无明显改善后,要求总承包单位清退分包单位。更换之后现场进度及安全文明施工明显增强,2018 年 5 月项目提前全部投产。

利川中槽风电项目,总包单位将首次施工招标结果报公司审核时,公司查询到该中标单位被列入失信被执行人名单,随即发函否决本次招标结果。在项目执行过程中,公司根据现场实际情况再次要求总包单位将升压站设备安装及风机安装内容切出,分包至实力更强的施工单位,最终该项目 2018 年 7 月顺利完工投产。

4)加强现场质量管控。通过增加现场技术管理人员,一方面严格进行施工图、施工方案的评审,从源头上对工程质量把关。另一方面会同监理现场旁站、过程抽查及交工验收等程序,加强了项目整体工艺和质量管控。

## 2.4 有效控制了现场安全风险

公司修编了《各级人员安全生产职责》、《外包工程考核管理办法》等安全管理制度,制定了《安全管理

手册(试行)》、《监理工程安全管理档案》、《风电、光伏安全设施配置标准》等安全管理清单,完善了安全管理体系。

根据中华人民共和国住房部关于《危险性较大的分部分项工程安全管理》的规定,对风险较大的分部分项工程进行清单式管理。针对大件运输、风机吊装、升压站倒送电等重点环节、重点工序推行标准化施工方案管控模式,重点审查人员、大型机械设备资质,强化工程建设过程管控。落实班前、班后会、安全告知、安全技术交底等基础管理工作,夯实工程安全管理基础。

## 3 EPC 建设模式实施中的不足及对策

### 3.1 存在的不足

1)以设计院为总包单位的 EPC 模式,现场管理力量较弱,对施工单位管控能力不足。

2)EPC 总承包单位对项目设计优化过度,存在为节省投资而降低标准的情况。

3)EPC 总承包单位安全意识不到位,安全管理人员专业技能、职业素养有待提高。

### 3.2 采取的对策

1)针对总包单位对施工单位管控能力弱的问题,提高施工单位准入条件,发挥施工单位的优势,弥补总包单位的不足。加强对总承包单位的招标管理,审查招标文件,标段划分、资质条件、分包价格,充分行使否决权。

2)针对总包单位设计过度优化的问题,招标文件中进一步完善项目设计标准,技术要求、主要参数,推行标准化设计。加大设计方案评审力度,降低设计自由度。

3)针对安全意识问题,加大对总包及施工单位安全管理人员培训考核力度,提高全员现场安全意识,摒弃侥幸心理,将安全行为贯穿到日常工作中。

总之,新能源公司 EPC 建设项目管理模式是结合公司实际情况,适应市场形势,在磨合和探索中不断完善。国内市场可借鉴的案例不多,存在缺陷和问题也在所难免,重要的是在项目实施过程中吸取教训、总结经验、不断完善,逐步成熟。

### 参考文献:

[1]NB/T31011-2011, 陆上风电场工程设计概算编制规定费用标准[S]

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.002

# 光伏建筑一体化屋面系统研究与实践

王强,洪艺然

(长江三峡集团福建能源投资有限公司,福建福州 350003)

**摘要:**通过福建三峡海上风电产业园光伏建筑一体化屋面系统运用实践,重点研究了钢结构厂房光伏建筑一体化屋面系统(BIPV),相较于传统后置式光伏发电屋面系统(BAPV),BIPV系统可有效解决BAPV系统存在的问题,在经济、建筑外观、设计寿命、工程施工、屋面维护等方面具有的独特优势。

**关键词:**光伏建筑一体化;经济投资;维护;实践

**中图分类号:**TU271.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1671-3354(2020)01-0004-03

## Building Integrated Photovoltaic Roof System: Research and Practice

WANG Qiang, HONG Yiran

(Fujian Energy Investment Co., Ltd., China Three Gorges Corporation, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** The application of the building integrated photovoltaic (BIPV) roof system in Fujian Three Gorges Offshore Wind Power Industrial Park is introduced. It is shown that the BIPV system is of distinctive advantages over the traditional building attached photovoltaic (BAPV) system in economy, architectural appearance, designed service life, engineering construction, and roof maintenance.

**Key words:** building integrated photovoltaic; economic investment; maintenance; practice

钢结构厂房运用传统后置式光伏发电屋面系统(BAPV)需采用分期建设和分期投资模式,即先完成建筑物的钢结构土建施工,后期在建筑物的屋面安装光伏发电系统支架配件、光伏发电组件单元板和其他电气设备。该施工方式有利于分期建设和管理。但是,将该系统运用在已规划同步建设屋面光伏的钢结构厂房屋面,增加了不必要的投资,在建筑美观、施工难度、以及后期维护等方面都存在诸多的不足。相较于BAPV系统,光伏建筑一体化屋面系统(BIPV)可有效解决传统后置式光伏发电屋面系统存在的问题,既能够降低投资成本,也提高了建筑物的各项技术指标。因此,光伏建筑一体化屋面系统作为一种替代方案在国内外逐步得到认可和运用<sup>[1-3]</sup>。

## 1 光伏建筑一体化屋面系统

BIPV即 Building Integrated PV 是光伏建筑一体

化。PV即 Photovoltaic。BIPV技术是将太阳能发电(光伏)产品集成到建筑上的技术。区别于目前大规模应用的后置式光伏发电屋面系统(BAPV)采用特殊的支架将光伏组件固定于原有屋顶结构的结合模式,光伏建筑一体化屋面系统(BIPV)采用一次性建设和投资模式,在建筑屋面施工时直接在屋面安装光伏发电系统支架配件、光伏发电组件单元板和其他电气设备。它除了具有发电功能外,还将具有建筑物自身的结构和使用功能,替代了建筑物原有屋面的构件,成为建筑不可分割的组成部分。作为建筑构件,光伏发电部件不但需要满足发电及建筑功能要求,还需要满足材料的耐候性、安全性,结合方式的牢固性和密闭性等物理化学特性。

光伏建筑一体化屋顶发电系统,通过由“几”字型支架、横截面呈倒U形的横向水槽及横截面呈W形的纵向水槽构成的整体支撑系统及岛式支撑安装固定,

收稿日期:2019-12-19

作者简介:王强,男,高级工程师,主要从事市场开发及管理方面的工作。

采取环环相扣的方式进行紧固和密封,不仅整体结构重量轻、用材省,而且太阳能发电组件的安装结构极为稳定、使用寿命长,易于安装、拆卸、维修。

## 2 BIPV 系统与 BAPV 系统技术对比

### 2.1 经济性成本对比分析

根据实际工程数据,钢结构厂房屋面按照

表 1 BAPV 系统与 BIPV 系统经济性成本对比表

对比项	BAPV 系统	BIPV 系统
铝镁锰屋面板	包括直立锁边铝镁锰屋面板和铝合金 T 型支座, 约 200 元/m <sup>2</sup>	无
系统支架配件	包括夹具、导轨、固定件等, 约 0.3 元/W × 120 W/m <sup>2</sup> = 36 元	包括配套轻钢檩条、铝合金压条、橡胶密封条、 固定件等,约 0.6 元/W × 120 W/m <sup>2</sup> = 72 元
光伏发电组件单元板	包括光伏发电板和铝合金边框, 约 120 W/m <sup>2</sup> × 2.8 元/W = 336 元	包括光伏发电板和铝合金边框, 约 120 W/m <sup>2</sup> × 2.8 元/W = 336 元
综合造价(材料价)	铝镁锰屋面板 + 系统支架配件 + 光伏 发电组件单元板 = 572 元/m <sup>2</sup>	系统支架配件 + 光伏发电组件 单元板 = 408 元/m <sup>2</sup>
使用寿命	20 年更换一次	使用寿命 ≥ 50
结论	采用光伏建筑一体化屋面系统可节约材料 164 元/m <sup>2</sup>	

### 2.2 建筑外观对比

传统钢结构后置式光伏发电屋面在彩色压型金属板上后期安装支架和光伏电池板,屋面较凌乱,整体性较差。

光伏建筑一体化屋面系统(BIPV)把太阳能利用纳入建筑的总体设计,把建筑、技术和美学融为一体,把光伏发电组件单元板和检修走道板直接作为屋面板,在 BIPV 建筑中,可通过相关设计将接线盒、连接线等隐藏在组件和踏板下方。这样既可防阳光直射和雨水侵蚀,又不会影响建筑物的外观效果,完美的实现了将太阳能光伏发电与建筑相结合。屋面美观,简洁大方,具有鲜明的现代工业建筑特征。

### 2.3 设计寿命对比

传统钢结构后置光伏发电屋面的光伏发电组件因为全部处于露天环境,长期风吹雨打,寿命一般在 20 年,最多不超过 25 年。光伏建筑一体化屋面的光伏发电组件只有屋面暴露在外,有良好的密封环境,BIPV 光伏组件封装用的胶为 PVB,而 PVB 膜具有透明、耐热、耐寒、耐湿,机械强度高特性,并已经成熟应用于

120 Wp/m<sup>2</sup> 产出容量计算,对比采用两种不同的光伏安装方式综合造价,采用光伏建筑一体化屋面系统可节约材料 164 元/m<sup>2</sup>(如表 1 所示),而且大大延长屋面的使用寿命。

建筑用夹层玻璃的制作,能达到 50 年甚至更长的使用寿命。

此外,在 BIPV 系统中,选用光伏专用电线(双层交联聚乙烯浸锡铜线),选用偏大的电线直径,以及选用性能优异的连接器等设备,都能延长 BIPV 光伏系统的使用寿命。

### 2.4 屋面受力对比

传统钢结构后置式光伏发电屋面的压型金属板(彩钢板或铝镁锰板)与后置的光伏电池板的受力复杂,金属板和光伏电池板既有风载正压也有负压,光伏电池板受力通过支架传递到压型金属板,长期的风载作用和变形会产生疲劳效应,影响结构安全。

光伏建筑一体化屋面只是单纯的屋面,结构受力清晰,结构安全性高。另外,该系统采用双面玻璃组件,钢化玻璃的厚度符合国家建筑设计规范,是通过严格的力学计算得出,能够满足屋面安全性要求。

### 2.5 防水可靠性对比

传统钢结构后置式光伏发电屋面在压型金属板(彩钢板或铝镁锰板)屋顶安装完毕后,后期屋面二次



上人安装光伏组件等设备,会因为吊装、施工踩踏、长期光伏自重荷载和局部设备超载,从而造成彩钢板或铝镁锰板永久沉降形变,造成后期隐患性漏水并且难于检修和发现漏点;伴随使用年限越长漏水隐患会越来越多。

光伏建筑一体化屋面系统主要采用憎水性玻璃面板与主水槽、防水密封等形成屋面防排水系统,屋面构造、泛水包边、采光带等采用模块化组合构成,主水槽等受力构件采用卡扣式零穿孔连接,组件与组件(或踏板)间使用可靠的密封扣条进行固定和密封,泛水包边采用对焊连接,系统设计带有防震动体系,可有效防止海边高频次风荷载作用,有效消化伸缩变形、温度变形。整个屋面表面的无穿孔连接技术,避免了漏水的隐患。

## 2.6 施工难度和速度对比

传统钢结构后置式光伏发电屋面分二期施工,施工周期长。直立锁边铝镁锰屋面板施工难度大。光伏建筑一体化屋面施工难度小,安装速度快,工程进度有保障。在完成支架和水槽施工后,每人每天至少安装40平(25块组件),以10 000 m<sup>2</sup>主屋面为例,20人15 d左右即可完成组件安装和屋面的整体密封工作。

## 2.7 屋面运营维护对比

传统钢结构后置式光伏发电屋面在施工检修中多次踩踏,屋面变形大,漏水隐患多,维修难度大。光伏建筑一体化屋面同步设计、施工,对屋面构件形成保护,不造成二次施工踩踏破坏。屋面以单块电池组件为单元模块化(160 cm × 100 cm)设计安装,可随意拆卸、修葺,检修维护方便;屋面根据合理运维半径设置的检修走道踏板,对屋面和组件都不造成破坏,大大保护了屋面的完整性。

## 3 光伏 BIPV 系统的运用

福建三峡海上风电产业园分布式屋顶光伏项目属于产业园智能微网的重要组成部分。在充分调研分析后,确定了采用光伏建筑一体化屋面系统方案。其中,中水四局工厂屋面面积达40 560 m<sup>2</sup>,光伏组件安装数量达16 522块,属国内钢结构厂房单体面积最大的BIPV光伏工程运用实践。

福建三峡海上风电产业园内采用光伏发电一体化屋面的钢结构厂房的面积达6.765 7万m<sup>2</sup>(如表2所示),其中金风科技工厂、中车工厂、室内运动场已完成施工并网发电,中水四局工厂和东方风电工厂正在施工开展阶段。根据屋面材料造价节约164元/m<sup>2</sup>计算,产业园分布式屋顶光伏项目因采用了BIPV安装方式,仅施工材料节约投资成本达1 109万元。对本项目各项施工技术指标分别进行确认,均达到了预期的效果。

表2 风电产业园光伏建筑一体化屋面统计汇总表

序号	单体名称	屋面面积 /m <sup>2</sup>	实际安装组 件数量/块	实际安装 容量/Wp
1	东方风电工厂(BIPV)	10 000	3 576	1 108 560
2	室内运动场(BIPV)	1 825	850	263 500
3	中水四局工厂(BIPV)	40 560	16 522	5 121 820
4	金风科技工厂(BIPV)	11 600	3 722	1 153 820
5	中车工厂(BIPV)	3 672	1 518	470 580
总计		67 657	26 188	8 118 280

需要补充说明,因为钢结构厂房消防设计要求,光伏建筑一体化屋面系统不能应用于火灾危险性分类为甲类、乙类的建筑和储存物品的火灾危险性分类为甲类、乙类的建筑,所以福建三峡海上风电产业园内LM叶片厂(乙类)未采用光伏发电建筑一体化屋面系统。

## 4 结 语

光伏发电建筑一体化屋面系统主要优点是造型美观、投资节省、光伏组件寿命高、防水性能好、维修方便。基于以上分析,福建三峡海上风电产业园的光伏发电建筑一体化屋面系统实际工程案例具有良好的示范性和可复制性。

### 参考文献:

- [1]王宁宁,袁万强.浅谈光伏建筑一体化(BIPV)的设计安装[J].绿色安装,2017(1):63-64
- [2]中翔.BIPV新技术在住宅建筑中的应用[J].住宅产业,2010(9):63-65
- [3]季强.太阳能薄膜发电在BIPV技术方面的应用[J].中国科技信息,2015(13):111-112

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.003

# 基于BP神经网络模型的 黄龙滩电厂下游水位流量关系分析

袁林山,张 力

(国网湖北黄龙滩水力发电厂,湖北 十堰 442000)

**摘要:**丹江口大坝加高后,回水顶托对黄龙滩电厂产生了一系列不利影响,在分析这些不利影响的过程中,需要计算丹江口大坝到黄龙滩电厂的水位流量关系。而传统的水力学方法计算量大,且过程复杂。为了能够简单高效地进行水位流量关系的计算,提出了一种基于BP神经网络模型的方法,将丹江口水库到黄龙滩电厂的河道分为两段,构建两个BP神经网络模型分别进行模拟计算。结果表明:丹江口水库至堵河口的模型的水位模拟结果最大偏差为0.011 m,均方根误差为0.003 3 m;堵河口至黄龙滩电厂的模型的水位模拟结果最大偏差为0.246 9 m,均方根误差为0.084 1 m。两个模型的模拟精度都较高,证明该方法具有可行性。

**关键词:**BP神经网络模型;水位流量关系;黄龙滩电厂

中图分类号:TV697.1<sup>+</sup>1

文献标志码:A

文章编号:1671-3354(2020)01-0007-05

## Analysis of the Stage-discharge Relationship for River Channel Downstream Huanglongtan Hydropower Plant based on BP Neural Network Model

YUAN Linshan, ZHANG Li

(State Grid Hubei Huanglongtan Hydropower Plant, Shiyan 442000, China)

**Abstract:** Since the heightening of Danjiangkou Dam, backwater of the reservoir has caused a series of negative effects on Huanglongtan Hydropower Plant. To analyze those effects, it is necessary to get the stage-discharge relationship of the river channel between Danjiangkou Dam and Huanglongtan Hydropower Plant. Considering that the traditional hydraulic method is usually of large amount and complicated computation work, a simple and efficient method based on BP neural network model is proposed. The channel between Danjiangkou Dam and Huanglongtan Hydropower Plant is divided into two sections, and two BP neural network models are built and simulated. The results show that the maximum deviation and root mean square error of the first model of the river channel from Danjiangkou Dam to Duhekou are 0.011 m and 0.0033 m respectively. For the second model of the river channel from Duhekou to Huanglongtan Hydropower Plant, they are 0.2469 m and 0.0841 m respectively. It shows that the proposed method is feasible and effective as the results are satisfactorily accurate.

**Key words:** BP neural network model; stage-discharge relationship; Huanglongtan Hydropower Plant

黄龙滩水电厂位于汉江支流——堵河上,是堵河干流梯级开发的最下游梯级,位于其下游152 km左右的丹江口水利枢纽,是汉江干流上最大的水利工程。丹江口水库属于大型水库,库区面积巨大,对黄龙滩水电厂产生了一定的顶托作用。2013年丹江口大坝加

高后,对黄龙滩电厂的回水顶托作用进一步加强,这造成了一系列不利影响<sup>[1]</sup>。顶托作用使黄龙滩电厂坝下水位抬高,导致水轮机水头降低,影响水轮机的正常运行;而且下游水位抬高使大坝受到的浮托力增加,对主要依靠自重保持稳定的黄龙滩大坝产生了严重的安

收稿日期:2019-12-23

作者简介:袁林山,男,高级工程师,主要从事水库调度、水文水资源研究与应用。

全隐患。

为了评估丹江口大坝加高对黄龙滩电厂的影响,需要计算丹江口大坝到黄龙滩电厂的水位流量关系,传统的计算方法是将天然河道的水流近似地视为稳定流,采用伯努利能量守恒方程进行分段试算,最终求得整个河段的水位流量结果<sup>[2]</sup>。但该方法要处理河道断面、糙率等大量数据,计算量大,过程复杂,在实际应用中操作难度较高。

近年来,人工神经网络模型得到了广泛的应用。人工神经网络模型无需事先确定输入输出之间映射关系的数学方程,仅通过给定训练数据,算法自动学习某种规则,优化内部关系之间的参数,即可在给定输入时得到最接近期望的输出。而BP神经网络是其中一种应用非常广泛的模型,它是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络,具有很强的非线性映射能力和柔性的网络架构,在函数逼近、模型识别分类、数据压缩和时间序列预测等方面都取得了较好的效果,在水利行业也得到了越来越多的应用。王伟伟<sup>[3]</sup>将BP神经网络用在水利工程综合效益评价分析上,得到的结果和基于多层次模糊评价法基本吻合;赵群<sup>[4]</sup>构建了基于AHP理论的BP神经网络评价模型,该模型误差范围符合要求,具有良好的适用性和可靠性;金修鹏等人<sup>[5]</sup>将优化的PSO-BP神经网络模型应用在水利定额编制领域中,补充和发展了神经网络应用于定额编制领域的空间;张同君<sup>[6]</sup>在原有水利发电优化控制系统中引入BP神经网络方法,通过对系统的最优化建模和控制达到提高工作效率和电能质量的效果;罗显枫等人<sup>[7]</sup>基于BP神经网络建立了溃坝生命损失分级评定模型,结果表明该模型完全可以满足溃坝生命损失严重程度评价的要求。

本文利用BP神经网络算法在处理回归问题方面的优势以及这种“黑箱”模型的简单易操作性,提出基于BP神经网络算法来进行水位流量关系计算的方法,利用丹江口水库-黄龙滩电厂河段的计算数据进行模型的训练,并检验该模型的精度,验证该方法的可靠性,从而为黄龙滩电厂水位流量关系的计算提供一种简单高效的方法。

## 1 工程概况

### 1.1 黄龙滩电厂

黄龙滩水利枢纽位于鄂西北山区、汉江支流堵河

的下游,是堵河干流梯级开发的最下游梯级,是1座以发电为主,兼有防洪、供水、航运等综合效益的大型水利水电工程。工程坝址距堵河口约25 km,距丹江口大坝约152 km,控制面积11 892 km<sup>2</sup>,占堵河流域的95%,库区范围如图1所示。库区所属的堵河流域属副热带季风气候区,雨量丰沛,多年平均年降水量约990 mm,年径流深约500 mm,黄龙滩大坝坝址处多年平均流量191 m<sup>3</sup>/s。水库正常蓄水位247 m,死水位226 m。大坝按照100年一遇洪水设计,2 000年一遇洪水校核,设计洪水位248.27 m,校核洪水位252.6 m,总库容9.45亿m<sup>3</sup>。黄龙滩电厂于1969年开工建设,1974年投产发电,之后又进行扩机增容,现总装机容量510 MW,多年平均发电量10.298亿kW·h,是湖北电网的主要电厂,在系统中主要担负调峰、调相的任务。

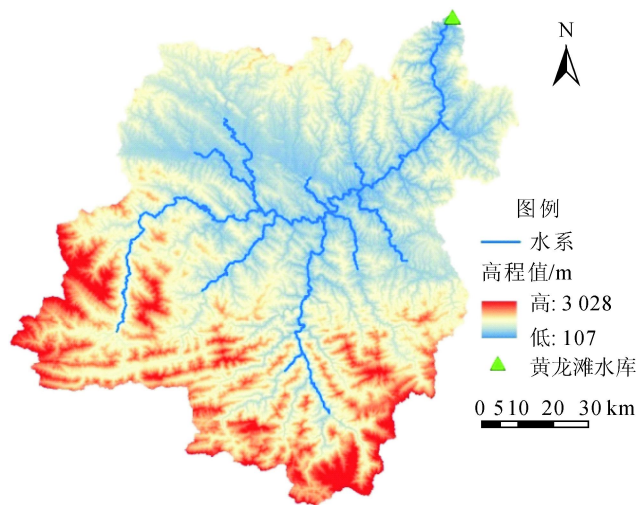


图1 黄龙滩库区图

### 1.2 丹江口水利枢纽

丹江口水利枢纽位于湖北省西北部丹江口市,在汉江与其支流——丹江汇合口下游800 m处,它是新中国成立后我国自行设计、自行建造和自行管理的具有防洪、供水、灌溉、发电、航运等综合利用效益的大型水利枢纽工程,是汉江综合利用开发治理的关键性水利工程,也是南水北调中线的供水水源工程。丹江口大坝初期工程于1958年9月开工,1974年全部完工。坝顶高程为162 m,正常蓄水位为157 m。二期工程于2005年9月开工,2013年完工。坝顶高程增加至176.6 m,正常蓄水位抬高至170 m,总库容由209.7亿m<sup>3</sup>增至339.1亿m<sup>3</sup>,通航能力由150 t级提升至300 t级。2017-10-29日,丹江口水库蓄至167 m历

史最高水位。

## 2 研究数据

由于丹江口水库到黄龙滩电厂的河段中间有其他汇流点,两者之间的水位流量关系受其他方向来流的影响,故分成两个河段进行计算:丹江口大坝至堵河口河段及堵河口至黄龙滩电厂河段。

### 2.1 基础资料

1)河道断面数据。丹江口大坝至堵河口河段共68个断面,平均断面间距1.88 km;堵河口至黄龙滩大坝河段共9个断面,平均断面间距2.8 km。

2)糙率。丹江口大坝至堵河口的糙率为经审定的《丹江口水利枢纽大坝加高工程初步设计报告》中的综合糙率;丹江口至油房沟为0.026 12,油房沟至堵河口为0.029 9。堵河口至黄龙滩电厂大坝的糙率参考已审查通过的《丹江口水利枢纽大坝加高工程初步设计报告》和《南水北调中线工程丹江口水库回水复核报告》,校核验证后确定为:1~4断面为0.051 5,4~5断面为0.046 7,5~6断面为0.040 6,6~7断面为0.033 7,7~8断面为0.027 8,8~9断面为0.026 2。

3)水位和流量。在丹江口大坝至堵河口河段的计算中,丹江口坝前水位取153.23 m到168.23 m,间隔1 m,共16种情况;堵河口流量取200 m<sup>3</sup>/s到30 000 m<sup>3</sup>/s,共16种情况,如表1所示。在堵河口至黄龙滩电厂河段的计算中,堵河口水位取153.23 m到168.23 m,间隔1 m,共16种情况;黄龙滩电厂下泄流量取17.7 m<sup>3</sup>/s到15 000 m<sup>3</sup>/s,共15种情况,如表2所示。

表1 堵河口流量取值表 m<sup>3</sup>/s

流量	200	400	600	800	1 000	2 000
流量	4 000	6 000	8 000	10 000	12 000	15 000
流量	18 000	20 000	25 000	30 000		

表2 黄龙滩电厂下泄流量表 m<sup>3</sup>/s

流量	17.7	50	100	200	400	600
流量	800	1 000	2 000	4 000	6 000	8 000
流量	10 000	12 000	15 000			

### 2.2 计算方法

采用下式进行分段试算,最终求得整个河道的水位流量关系:

$$D_i = Q^2 n^2 \left( \frac{1}{K} \right) DL \quad (1)$$

$$H_{\text{上}} = H_{\text{下}} + \frac{4 \times \Delta L \times Q^2 n^2}{\left( \frac{A_{\text{上}}^{5/3}}{X_{\text{上}}^{2/3}} + \frac{A_{\text{下}}^{5/3}}{X_{\text{下}}^{2/3}} \right)^2} \quad (2)$$

式中: $D_i$ 为河段落差,m; $Q$ 为河段流量,m<sup>3</sup>/s; $n$ 为糙率; $K$ 为断面特性; $\Delta L$ 为上下断面的间距,m; $H_{\text{上}}$ 和 $H_{\text{下}}$ 分别为上、下断面的水位,m; $A_{\text{上}}$ 和 $A_{\text{下}}$ 分别为上、下断面过水面积,m<sup>2</sup>; $X_{\text{上}}$ 和 $X_{\text{下}}$ 分别为上、下断面湿周,m。

## 3 研究方法

BP神经网络算法,即反向传递神经网络算法,由输入层、隐含层和输出层三部分组成,如图2所示。图2中圆圈各代表一个神经元模型,每个神经元模型都可以进行输入,计算和输出操作。相邻层之间的各神经元相互连接,连接线代表信号的传递路径,每条线上包含一个权重系数,算法训练的目标就是找到一套使计算结果最接近期望值的权重系数。算法的训练过程分为两个阶段:第一阶段是信号的前向传播。数据从输入层经隐含层逐层处理,到达输出层;第二阶段是误差的反向传播。将误差信号沿原来的连接通路返回,通过调节各神经元的权重和偏置,使误差函数沿负梯度方向下降,逐步逼近期望输出,直至误差满足要求为止。

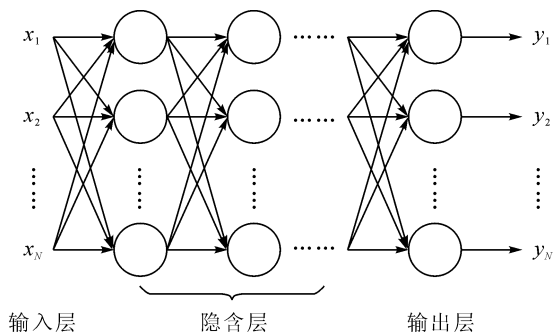


图2 BP神经网络结构图

模型构建的主要内容如下。

1)输入和输出层的设计。在第一个河段中,以丹江口坝前水位和堵河口流量为输入,堵河口水位为输出;在第二个河段中,以堵河口水位和黄龙滩电厂下泄

流量为输入,黄龙滩电厂坝下水位为输出。故两个模型都有两个输入项,一个输出项。

2) 隐含层的设计。研究表明:三层的 BP 神经网络模型就可解决一般函数的回归问题<sup>[8]</sup>,因此本研究中的隐含层取一层。而隐含层的神经元个数并没有明确的选择方法,本文参照以下经验公式<sup>[9]</sup>,将两个河段模型的隐含层神经元个数都设置为 9。

$$n = \sqrt{a + b} + c \quad (3)$$

式中: $n$  为隐含层的神经元个数; $a$  为输入层神经元个数; $b$  为输出层神经元个数; $c$  为 $[1, 10]$ 之间的常数。

3) 数据的归一化处理。数据归一化是将数据映射到 $[0, 1]$ 或 $[-1, 1]$ 区间或其他区间,该步骤的原因如下:①输入数据中包含水位和流量数据,两者单位不一样,范围差距较大,导致范围小的数据作用偏小;②目标数据的范围必须和模型输出层激活函数的值域相对应才便于分析模拟结果。

本文选择将数据归一化到 $[0, 1]$ 区间。

4) 激活函数的选择。激活函数是神经网络模型中神经元上运行的非线性函数,可以使模型拟合非线性关系,如果没有激活函数,神经网络模型的输出只是输入的线性组合,无法进行非线性关系的逼近。常用的激活函数有 Sigmoid 函数、Tanh 函数、ReLU 函数等。本文在做归一化的时候,将所有数据都归一到 $[0, 1]$ 范围内,为了使激活函数的值域和目标数据的范围保持一致,激活函数选择 Sigmoid 函数:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (0 < f(x) < 1) \quad (4)$$

确定好以上方案后,在 MATLAB 上搭建模型,并设置最大迭代次数为 1 000,训练目标为 0.001,学习率为 0.01。将数据的前 2/3 用来训练模型,后 1/3 用来检验模型,并以最大偏离值,均方根误差,相关系数和决定系数为指标来检验模型的模拟结果。

## 4 结果与讨论

### 4.1 丹江口大坝 - 堵河口河段

丹江口大坝 - 堵河口河段测试集的模拟结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出:测试集中 76 个数据的模拟值与真实值的一致性非常好,决定系数为 1,结果点全部与直线  $y = x$  重合,无偏离现象。

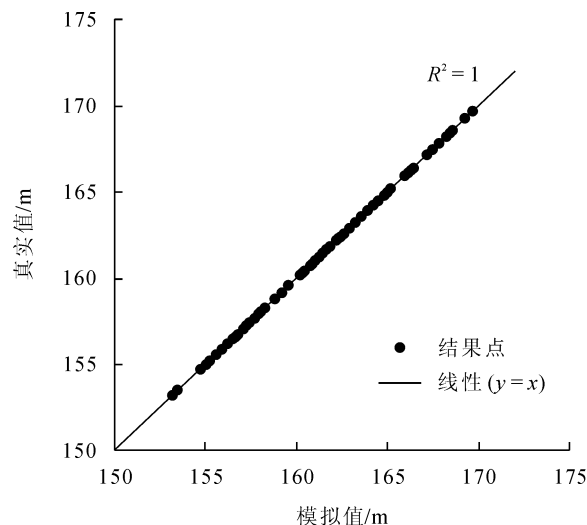


图 3 丹江口大坝 - 堵河口河段测试集模拟结果散点图  
该河段模型的各项指标如表 3 所示。

表 3 丹江口水库 - 堵河口河段模型结果表  $m$

	最大 偏离值	均方根 误差	决定 系数	相关 系数	显著性 检验结果
训练集	0.011 0	0.003 3	1	1	0.000 18
检验集	0.009 9	0.003 4	1	1	0.000 18
全集	0.011 0	0.003 3	1	1	0.000 18

由表 3 数据可得:三种数据集的指标结果相差不大,在 256 个数据中,最大偏离值为 0.011 m,即 1 cm,均方根误差为 0.3 cm 左右,误差非常小。而且模拟值与真实值的相关性系数和决定系数为 1,相关性非常显著。这说明在该河段上,BP 神经网络模型可以正确识别丹江口坝前水位,堵河口流量和堵河口水位之间的关系,用 BP 神经网络模型来计算该河段的水位流量关系可以得到和水动力方程几乎一致的结果。

### 4.2 堵河口 - 黄龙滩电厂河段

堵河口 - 黄龙滩电厂河段测试集的模拟结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出:测试集中 60 个数据的模拟值与真实值的一致性非常好,所有结果点都与直线  $y = x$  大致重合,无明显偏离现象。

该河段模型的各项指标如表 4 所示。

由表 4 可以看出:训练集中的最大偏差为 0.24 m,检验集中的最大偏差为 0.2 m,误差相对于上一个模型稍微有所增大。分析结果可以得到:在 240 个模拟结果中,偏差在 20 cm 之内的占比 96%,偏差

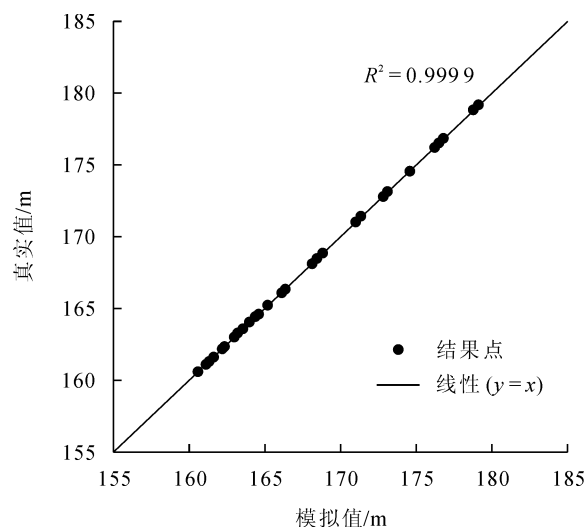


图4 堵河口-黄龙滩电厂河段测试集模拟结果图

在 10 cm 之内的占比 78.3%, 偏差在 5 cm 之内的占比 54.2%。模拟值和真实值的相关系数和决定系数接近 1, 相关性非常显著。因此, BP 神经网络模拟取得了较好的模拟结果。

表4 堵河口-黄龙滩电厂河段模型结果表

	最大 偏离值	均方根 误差	决定 系数	相关 系数	显著性 检验结果
训练集	0.246 9	0.088 0	0.999 7	0.999 9	0.000 18
检验集	0.200 7	0.070 8	0.999 9	0.999 9	0.000 18
全集	0.246 9	0.084 1	0.999 8	0.999 9	0.000 18

该河段的模拟结果相比于上一河段的模拟结果误差更大, 考虑到在堵河口河道中央存在的河心洲将汉江水流分割, 水流流态复杂化, 使得该点水位流量关系愈加复杂、水位变幅增大, 因此模型在此处的计算误差较大。

## 5 结 语

本文构建了一套 BP 神经网络模型, 利用丹江口水库-黄龙滩电厂的水位流量数据进行训练, 取得了

较好的模拟结果, 得到以下几点结论:

1) BP 神经网络模型经过训练之后, 模拟结果精度较高, 可以用来进行水位流量关系的计算;

2) BP 神经网络模型相较于传统的水力学方法有很大优势, 不必处理大量数据以及分段试算, 训练完成后输入任意水位或流量值即可直接得出结果, 操作简单, 计算速度快, 可以作为黄龙滩电厂计算水位流量关系的一种简单高效的方法。

但是, BP 神经网络模型仍存在部分不足: 该方法需要提供大量的训练样本, 且需要对实测数据进行预处理, 在缺资料或无资料地区无法得到很好的应用。如何仅利用较少的数据, 或容易获取的其他相关数据来得到相同的模拟结果还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 樊明哲. 丹江口大坝加高后对黄龙滩水电厂的影响[J]. 华中电力, 1998(1): 62-65
- [2] 廖庆龙. 桂江旺村至河口水面线计算[J]. 广西水利水电, 2019(4): 29-31
- [3] 王伟伟. 基于多层次模糊和 BP 神经网络的水利工程项目综合效益评价分析[J]. 水利科技与经济, 2019, 25(10): 65-69
- [4] 赵群. 基于 AHP 与 BP 神经网络的辽宁省农村水利现代化评价[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(9): 186-190
- [5] 金修鹏, 李春生. PSO-BP 神经网络在多输出水利定额编制中的应用[J]. 人民长江, 2018, 49(5): 84-88
- [6] 张同君. BP 神经网络在水利发电控制系统中的应用[J]. 河北科技师范学院学报, 2016, 30(1): 62-67
- [7] 罗显枫, 周晶, 赵利, 等. 基于 BP 神经网络的溃坝生命损失评价研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(12): 18-19
- [8] Hsu K L, Gupta H V, Sorooshian S. Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process[J]. Water resources research, 1995, 31(10): 2517-2530
- [9] 刘芑麦, 朱家明, 高正帅, 等. 基于 BP 神经网络的脱氧合金化配料问题分析[J]. 齐鲁工业大学学报, 2019(5): 74-80

欢 迎 投 稿      欢 迎 订 阅

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.004

# 碾盘山水利水电枢纽工程河道采砂论证浅析

林江武, 廖明

(湖北省水利水电规划勘测设计院, 湖北 武汉 430064)

**摘要:**碾盘山水利水电枢纽工程是国务院确定的172项节水供水重大水利工程之一。为减少工程投资,确保工程建设质量和进度,筑坝砂石料通过汉江河道采砂解决。采砂量在湖北省工程性采砂中最大。为减少不合理采砂给河势、防洪、通航、水生态环境等带来的不利影响,科学、合理、有序和可持续开采江砂资源,通过分散采区、优化可采区控制性指标、合理安排作业方式、加强采砂监管、采取航道维护和水上交通安全等补救措施,确保了河道砂石资源的可合理利用,取得了良好的社会、经济、环境、生态效益。

**关键词:**河道型水库;采砂;汉江中游;碾盘山

**中图分类号:**TV698

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-3354(2020)01-0012-04

## Instream Sand Mining in Nianpanshan Water Conservancy and Hydropower Project

LIN Jiangwu, LIAO Ming

(Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** Nianpanshan Water Conservancy and Hydropower Project is one of the 172 major water conservancy and water supply projects determined by the State Council. In order to reduce the project investment and ensure the construction quality and progress, the sand and stone materials of the dam are planned to be mined from the Hanjiang River, and the sand mining amount of this project is the largest among the engineering sand mining works in Hubei Province. In order to reduce the adverse effects of improper sand mining on river regime, flood control, navigation and water eco-environment, scientific, proper, orderly and sustainable instream sand mining should be ensured. Remedial measures such as scattering of the mining areas, control index optimization of the mining areas, reasonable arrangement of operation modes, strengthening of the supervision work, navigation channel maintenance and water traffic safety management are proposed and implemented, which ensure a reasonable and sustainable utilization of the instream sand resources and achieve satisfactory social, economic, environmental and ecological benefits.

**Key words:** channel type reservoir; sand mining; the middle reach of Hanjiang River; Nianpanshan Project

碾盘山水利水电枢纽位于汉江干流湖北省钟祥市境内,坝址距上一级雅口枢纽58 km,距下一级兴隆枢纽116 km,是国务院批复的《长江流域综合规划》的重要组成部分,也是汉江中下游最大水利水电枢纽,已纳入国务院确定的172项节水供水重大水利工程。该枢纽水库属于平原河道型水库,工程开发任务以发电、航运为主,兼顾灌溉、供水,为汉江干游中下游水能利用总体开发方案丹江口(170 m)、王甫洲(86.23 m)、新集(76.23 m)、崔家营(62.73 m)、雅口(55.23 m)、碾

盘山(50.72 m)及兴隆(36.23 m)的第6级。碾盘山水利水电枢纽正常蓄水位为50.72 m,相应库容8.77亿 $m^3$ ,校核洪水位50.84 m,总库容9.02亿 $m^3$ ,电站装机容量180 MW<sup>[1]</sup>,多年平均发电量6.16亿 $kW\cdot h$ 。该工程地处汉江平原,耕地保护任务较重,所需筑坝砂石料较多,而汉江河道砂石资源丰富,能满足工程对砂石的数量和质的要求,筑坝砂料拟通过河道采砂解决。汉江发源于陕西秦岭南麓,流域面积15.9 km<sup>2</sup>,全长1 577 km,为长江最长支流<sup>[2]</sup>,碾盘山

收稿日期:2019-03-27

作者简介:林江武,男,高级工程师,主要从事湖北规划防洪及设计方面的工作。

采砂区位于汉江中游干流的转斗湾河段,为弯曲多分汉型河道,河道左岸为钟祥市,右岸为宜城市。汉江中游上起丹江口,下至钟祥,全长270 km,集水面积4.68万 km<sup>2</sup>,流经丘陵及河谷盆地,平均比降0.19‰,平原占51.6%,山地占25.4%,丘陵占23%<sup>[3]</sup>。

## 1 可采区控制性指标分析

碾盘山水利水电枢纽工程对天然建材砂石料需求量为465万 t,天然建筑材料需求量见表1,天然砂砾石料场分布详见表2。

表1 天然建筑材料需求量表

年份	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	合计
项目	第1年	第2年	第3年	第4年	第5年	
混凝土/万 m <sup>3</sup>	5	40	32	13	2	92
防渗墙/万 m <sup>3</sup>	3.7	2.3			0.8	6.8
临时工程/万 m <sup>3</sup>	5	4				9
砂砾石料需求/万 t	39	136	90	37	8	310
砂砾石料开采量/万 t	58.2	204	135.6	55.1	12	464.8

表2 天然砂砾石料场分布表

建材类别	料场名称	岸别	距坝址/km	交通条件	储量/万 m <sup>3</sup>	主要质量说明	备注
砂砾石料	转斗采区	左	40	沿汉江水路	205	前锋1、郭安砂砾石料场砾石含量大于60%,前锋2砂砾料场砾石含量约40%,含泥量小于1%,开采条件较好。根据现场钻探揭示,砾、卵石磨圆度较好,主要呈次圆~浑圆状,原岩岩性为砂岩、灰岩等	混凝土细、粗骨料
	前锋1采区	左	40	沿汉江水路	180.3		
	前锋2采区	右	41	沿汉江水路	157.5		
	郭安采区	左	43	沿汉江水路	527		

按照《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》中混凝土粗细骨料质量技术指标要求,对砂砾料场粗细骨料进行质量评价。前锋(关山)1、前锋(关山)2、郭安和转斗采区砂砾料场细骨料细度模数小于2.0~3.0,不能满足规范要求,需对细骨料进行掺合人工破碎料,调整满足规范要求后,再作为混凝土细骨料,其余质量技术指标均满足要求。前锋(关山)1、前锋(关山)2、郭安和转斗采区砂、砂砾料场可利用水路运输,沿汉江而下,交通较便利。

为避免不合理的开采和过度开采江砂对河势、防洪、通航等方面带来不利影响,确保江砂资源的可持续开发利用,碾盘山水利水电枢纽工程从量、质等方面对

砂石料场进行比选,确定前锋(关山)1、前锋(关山)2、郭安共3个可采区和转斗1个备用采砂区,采砂控制总量465万 t,年度控制开采总量155万 t。其中,前锋(关山)1采区的年度控制开采量为30万 t,控制开采高程38 m,采砂船控制数量1艘,前锋(关山)2采区的年度控制开采量为25万 t,控制开采高程39 m,采砂船控制数量1艘,郭安采区的年度控制开采量为100万 t,控制开采高程39 m,采砂船控制数量4艘,采砂船只功率控制在720 kW以下,禁采期为警戒水位以上及3月1日至10月15日(其中禁渔期为3月1日至6月30日),年度开采量分配见表3,采区控制性指标见表4。

表3 各采区年度开采量分配表

可采区名称	储量/万 m <sup>3</sup>	实际可采量/万 m <sup>3</sup>	实际可采量/万 t	2018年 第1年 /万 t	2019年 第2年 /万 t	2020年 第3年 /万 t	2021年 第4年 /万 t	2022年 第5年 /万 t	合计 /万 t
前锋(关山)1采区	180	150	248	30	30	30	12.5	12.5	115
前锋(关山)2采区	35	30	50		25	25			50
郭安采区	527	527	869.55	50	100	90	60		300
转斗采区	205	205	338.25						
合计				80	155	145	72.5	12.5	465



表4 可采区控制指标表

m

编号	可采区名称	可采区范围 (长×宽)	控制开采 (高程/深度)	开采方式	采砂船控制 数量/艘	禁采期
1	前锋(关山)1采区	1 500×400	38/3	水采	1	警戒水位以上 及3月1日 至10月15日
2	前锋(关山)2采区	1 400×300	39/3			
3	郭安采区	3 000×700	39/3			
4	转斗采区	2 400×800	39			

## 2 开采方式分析

碾盘山采砂可采期为每年10月16日至次年3月28日,采砂船应严格按照许可规定的时间、地点、采砂控制量、开采范围、开采高程和作业方式进行开采,严格控制采砂船开采功率和数量,禁采期采砂船舶集中停靠。采砂作业前沿水流方向合理划分采砂区域,通过分层、分段自上而下的施工方法进行科学、有序的开采,并严格控制开采深度,避免形成局部的深坑或者深槽。为减少对通航安全的影响,应将采砂作业计划上报航道和海事管理部门,按照交通部门的要求采取相应的通航安全保障措施。为保护良好的生态环境,在河岸规划一定数量的堆砂场,且采砂作业必须以水面开挖、岸上筛分即“水采岸分”的方式进行。采砂作业中,以一定的方法和设备将采挖的泥沙送到岸上的砂场,再由砂场采用一定的方式进行筛分、冲洗、分类、堆放,同时设置冲洗废水沉淀池,循环利用水源<sup>[4]</sup>。采砂船配备卫星定位、视频监控系統,对采砂进行实时监控和信息数据共享。采砂作业过程中,生活污水采用生化处理达标后排放,砂石筛分和装卸采用湿式作业,

船上施工人员生活垃圾由垃圾桶统一收集,交由当地环卫部门清运处理,废柴油、含油污水等危险废物,由专用桶回收存放于专用储藏室,并由有资质的单位回收处理。通过划定禁采期、控制采砂数量、控制采砂范围、控制开采深度、减少采砂船数量、优化开采方式,并采取生态恢复、人工增殖放流等措施,对水环境、水生态将不会产生明显不利影响。

## 3 采区河道演变及泥沙补给分析

丹江口建库后,宜城-碾盘山河段河道演变特点主要表现为:深泓线横向摆动频繁,断面趋于单一,深泓趋于顺直,但也有开阔河段浅滩断面向宽浅方向发展的现象,洲滩消长、流路多变。宜城~碾盘山河段1978~2016年沿程深泓高程基本上以冲刷为主,详见图1。采砂区附近横断面变化,郭安采区、前锋(关山)1采区、转斗备用采区多年来地形冲淤变化不大,前锋(关山)2采区以淤积为主,最大淤积深度2m。碾盘山水利水电枢纽工程建成以后,雅口至碾盘山河段成为库区,水流变缓,水深增大,泥沙在库区河道落淤。

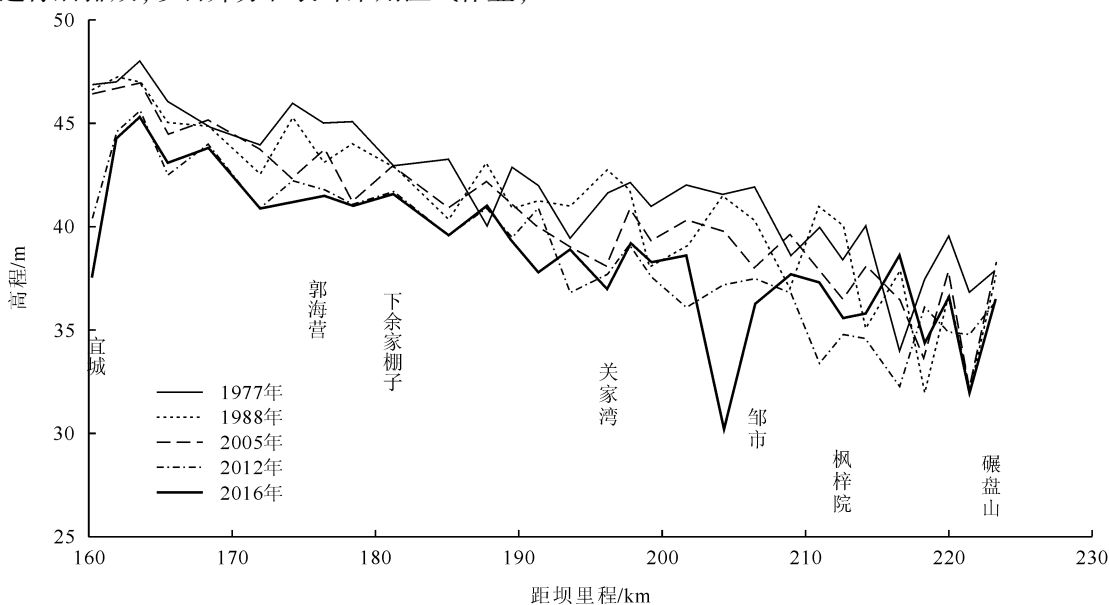


图1 宜城-碾盘山河段沿程深泓高程变化图

碾盘山泥沙主要来自丹江口以下干流河床冲刷与唐白河、南河、蛮河等支流汇入,并受水库回水影响。碾盘山水库各频率回水选取相应频率洪水调洪过程中多组库水位对应入库流量分别计算取外包,经计算20年一遇干流洪水回水末端距坝址40.2 km<sup>[5]</sup>,采区位于库区回水末端,也有利于河流所挟带泥沙的落淤。碾盘山水库建成运行后50年间,库区泥沙淤积量5 745万m<sup>3</sup>,年均淤积量115万m<sup>3</sup>。其中雅口至涑河口42.9 km河段50年泥沙淤积总量为5 399万m<sup>3</sup>,占总淤积量的94%,年均淤积量108万m<sup>3</sup>。转斗湾采砂河断属于雅口至涑河口河段,采区河段的泥沙补给较为充分,采砂后采砂槽可以得到较快恢复,库区淤积量及排沙比见表5,库区泥沙分段冲淤量情况见表6。

表5 碾盘山库区泥沙淤积量及排沙比表

时间/年	总淤积量/万m <sup>3</sup>	10年淤积量/万m <sup>3</sup>	淤积速度/(万m <sup>3</sup> ·年 <sup>-1</sup> )	排沙比/%
10	1 185	1 185	118.5	79.17
20	2 343	1 158	115.8	79.41
30	3 479	1 136	113.6	79.62
40	4 613	1 134	113.4	79.73
50	5 745	1 132	113.2	79.81

表6 碾盘山库区泥沙分段冲淤量统计表 万m<sup>3</sup>

序号	河段	河段长/km	10年 20年 30年 40年 50年				
			10年	20年	30年	40年	50年
1	雅口-蛮河口	20.3	176	172	207	198	232
2	蛮河口-丰乐河口	10.5	222	742	1 294	1 789	2 240
3	丰乐河口-涑河口	12.1	897	1 526	2 016	2 508	2 927
4	涑河口-坝址	15.1	-110	-97	-38	117	346
合计			1 185	2 343	3 479	4 613	5 745

## 4 采砂影响分析

1)对河势的影响分析。项目采砂区划分为前锋(关山)1、前锋(关山)2、郭安共3个可采区和转斗1个备用采砂区,采区个数较多、采区位置较分散、开采战线较长,采区远离两岸堤防,采区结合河道整治工程布置在顺主流方向,受两岸丁坝控导工程的限制,采砂对河势及航道整治工程的影响较小。碾盘山水利枢纽建成以后,雅口至碾盘山河段成为库区,水流变缓,水深增大,库区泥沙落淤,工程采砂对河势的不利影响将逐渐减弱。

航道水域内,两侧丁坝众多,施工期采砂船与通航船只交错,对局部河段通航有一定的影响,为减少施工期采砂对航道和通航安全的影响,作业实施前,应征求航道和海事部门意见,施工单位应主动接受航道、海事部门的监督管理,在采取工程河段航道维护和水上交通安全保障措施后,对航道和通航安全影响较小。碾盘山水利枢纽建成蓄水后,雅口至碾盘山58km天然航道变成库区航道,航道等级由Ⅳ级提升到Ⅲ级,采砂作业结束船只撤离作业区,采砂对航道和通航安全的不利影响将逐渐减弱。

3)对水生态环境影响分析。通过分散采区、减少每个采区采砂量、优化采砂作业方式,采用水采岸分、分层、分段自上而下的开采方式,并采取生态恢复、人工增殖放流等措施,减少对河床的扰动和水生态环境影响,在工程施工作业过程中,各类施工作业船舶应严格按照《中华人民共和国水污染防治法》和《中华人民共和国防治船舶污染内河水域环境管理规定》,对船舶废污水和生活垃圾进行收集处理,施工作业船只需配备油水分离器,含油废水经处理后达标排放,将不会对本工程河段水生态环境质量造成明显不利影响。

## 5 结语

筑坝砂石料的开采直接影响碾盘山水利水电枢纽工程建设质量、进度和投资。项目采取分散采区、控制每个采区年度采砂量、水采岸分、分层、分段自上而下的开采方式,严格控制开采范围、深度和作业时间,控制采砂船功率,减少采砂船只。采砂作业避开鱼类产卵期,避让鱼类产卵场、索饵场和越冬场“三场”,并采取生态恢复、人工增殖放流措施,采砂对河势稳定、防洪安全、通航安全、水生态环境、各类涉水工程影响较小,碾盘山水利水电枢纽工程采砂是可行的。碾盘山水利水电枢纽工程采砂项目节约了大量工程投资,促进了沿江经济社会和资源环境协调发展,确保了防洪、通航、水生态环境安全,实现了人与自然和谐共生,取得了明显的社会、经济、环境、生态效益。

### 参考文献:

- [1]陈雷,宾洪祥,别大鹏,等.碾盘山水利水电工程枢纽布置设计[J].水利水电技术,2016,47(8):1-4
- [2]张欧阳,熊明.汉江中下游近60年最小流量变化及影响因素分析[J].人民长江,2017,48(2):89-98
- [3]陈雷,黄秀英,宾洪祥,等.湖北汉江碾盘山水电站洪水标准分析[J].人民长江,2014,45(16):42-44
- [4]王瑞,吴浪.浅析河道采砂对水生态环境的影响[J].水利建设与管理,2010(9):68-69
- [5]涂澜涛,李航,陈雷.碾盘山水利水电枢纽洪水调度运行方式与回水计算研究[J].水利水电技术,2016(8):29-37

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.005

# 国外小水电设计要点 ——以印尼 Bone 水电站为例

翟晓斌, 游志纯, 王桂林

(中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014)

**摘要:**以印尼 Bone 水电站为实例,介绍了国外小水电设计中常遇到的一些技术难题和解决思路。在基础资料较为匮乏的情况下,通过分析该工程概念设计阶段的设计要点,结合搜集到的设计资料及现场勘测成果,采取合理的补救方法,从工程水文、地震、边坡处理、枢纽布置等方面进行综合比较分析,最终较好的确定了工程设计参数,为项目设计的顺利完成创造了条件。

**关键词:**国外;小水电;设计

**中图分类号:**TV631

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-3354(2020)01-0016-03

## Key Design Points of Small Overseas Hydropower Projects —— A Case Study of the Bone Hydropower Station Project in Indonesia

ZHAI Xiaobin, YOU Zhichun, WANG Guilin

(Powerchina Zhongnan Engineering Corporation, Changsha 410014, China)

**Abstract:** Taking the Bone Hydropower Station Project in Indonesia as an example, in which the basic design data is scarce, some technical issues and corresponding solutions frequently encountered in the design of small overseas hydro-power projects are introduced. Based on the analysis of the key design points in the conceptual design stage of the project and the collected design data and field survey results, reasonable remedial measures are proposed and implemented. Analysis and comparison are carried out from the aspects of engineering hydrology, earthquake, slope treatment and project layout. Finally, the engineering design parameters are well determined, which ensures the successful completion of the design work.

**Key words:** overseas; small hydropower projects; design

近些年来,由于我国国内的水电开发几近饱和,水电市场转向国外发展,如东南亚、非洲等地,而因为对所在国的设计习惯、设计理念和审查制度缺乏了解,导致设计中出现许多问题,影响了设计进度和设计质量,所以在承接设计任务前,有必要理清所在国的外部条件,掌握较为切实可靠的设计资料并加以消化吸收并认真分析,以较好的完成设计工作。

### 1 工程概况

印尼 Bone 水电站位于印度尼西亚哥伦打洛省(Gorontalo) Bone Bolango 县 Bone 河上,工程开发任务为发电,以缓解该地区的电力供需矛盾。初拟坝址位

于 Suwawa Timur 镇 Poduwoma 村上游 1.0 km 处,距离哥伦打洛市大约 28 km 左右。印尼通常采用国际大坝委员会标准、美标或日标进行大坝工程设计,根据合同要求,该工程按中国标准设计完成概念设计,并需满足当地审查要求。

本工程原有印尼当地公司作的可研报告,概念设计阶段对其进行了复核,确定坝址多年平均径流量为  $46.9 \text{ m}^3/\text{s}$ (测流复核值),200 年一遇校核<sup>[1]</sup>洪峰流量为  $1\ 172 \text{ m}^3/\text{s}$ ,OBE 设计动参数为  $0.25 g$ 。枢纽主要由拦河坝、左岸坝式进水口及河床式厂房、输出线路等组成,采用河床式开发,最大坝高 26.5 m,坝轴线长 177.1 m,正常蓄水位 95.0 m,总库容  $177.58 \text{ 万 m}^3$ ,为

收稿日期:2019-12-03

作者简介:翟晓斌,男,高级工程师,主要从事水工结构设计方面的工作。

IV等小(1)型工程<sup>[2]</sup>,泄水建筑物采用2孔 $6.6\text{ m}\times 8.5\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)泄洪兼拉沙闸,机组引用流量 $83.6\text{ m}^3/\text{s}$ ,河床式厂房装机2台,总装机容量 $9.9\text{ MW}$ 。

## 2 设计要点

国外水电设计中,受制于所在国的社会政治、经济条件,合理外围参数的确定较为困难,但因其对设计成果影响较大,需要慎重对待。概念设计阶段,结合现场水文、地质地形条件、水文调查及现场测流成果,对印尼当地公司先前作的可研报告进行认真评估分析,尤其是对工程影响较大的为水文、地震及边坡条件等重新进行研究评价,以期获得较为合理的设计资料。

### 2.1 水文

1)径流。径流流量关系到电站的规模和经济指标,是水电站设计中的重要参数,其数据主要来自于对实测成果的分析整理。经调查,坝址以上流域内无水文、气象测站,坝址下游设有Tulabolo水文站、Alale水文站和Talumolo水文站,但收集到的水文资料时段较短,一致性较差。印尼原可研成果采用的坝址多年平均流量(中值流量)为 $150.3\text{ m}^3/\text{s}$ (为测流复核值的约3倍),其来源系按新加坡DHI公司在2012年作的小水电评估报告进行分析,考虑山地迎坡雨、季风等影响,对坝址下游水文站由水深推得的流量成果做了较大修正。根据Bone河道实际流量初步分析,该值偏差较大,可信度较低。

概设阶段经对收集到的水文资料相关性、合理性及代表性进行进一步分析,结合水文站流量率定、实际测流成果,对坝址流量予以复核,以确定合理的径流流量。经分析,Bone坝址控制集水面积为 $1\,000.9\text{ km}^2$ ,Tulabolo水文站在坝址下游,控制集水面积为 $1\,003\text{ km}^2$ ,2007~2016年多年平均降雨量为 $2\,307\text{ mm}$ ,同时通过现场调查及相关资料,按Tulabolo水文站降雨资料的径流系数为0.7,确定多年平均流量为 $51.3\text{ m}^3/\text{s}$ ,该值与后来现场测流取得的成果较为接近且相互印证,最终选用现场测流成果 $46.7\text{ m}^3/\text{s}$ 为坝址多年平均流量。

2)洪水。洪峰流量取值合适与否直接影响到坝体安全及防洪建筑物规模,并对坝体枢纽布置和电站经济指标有重要影响,需认真分析。根据印尼原可研成果,洪峰流量系根据Tolabolo水文站3年的逐日平均流量推得,100年一遇洪水的洪峰流量 $682\text{ m}^3/\text{s}$ ,200年一遇的洪峰流量为 $765\text{ m}^3/\text{s}$ ,取值偏小,可靠性偏低且不安全。因该流域无实测洪水资料,经收集并

结合该岛临近水电工程(Lasolo水电站、Sembakung水电站、Tandung水电站)设计成果,考虑多年平均降雨因素,进行洪峰模数类比,推得100年一遇洪水的洪峰流量 $989\text{ m}^3/\text{s}$ ,200年一遇的洪峰流量为 $1\,172\text{ m}^3/\text{s}$ ,作为坝址设计特征流量。

### 2.2 设计地震

根据《2017年印尼地震风险图》,工程区100年重现期地震动峰值加速度为 $0.2\sim 0.25\text{ g}$ ,200年重现期地震动峰值加速度为 $0.25\sim 0.3\text{ g}$ 。本工程为低坝,结合工程实际情况并参考国际类似工程经验<sup>[3]</sup>,地震设防采用运行基本地震(OBE)标准<sup>[4]</sup>,地震动峰值加速度取 $0.25\text{ g}$ ,抗震设防类别为丁类。

### 2.3 枢纽布置

印尼原可研成果采用引水式开发,左岸滚水坝+右岸冲沙闸+右岸引水系统+地面厂房的布置方案。枢纽滚水坝顶高程 $93.0\text{ m}$ ,坝轴线长 $57.0\text{ m}$ ,建基面高程 $74.0\text{ m}$ ,最大坝高 $19.0\text{ m}$ ;冲沙闸采用2孔 $2.5\text{ m}\times 3.0\text{ m}$ (宽 $\times$ 高);引水渠全长 $440.0\text{ m}$ ,压力前池长 $54.0\text{ m}$ 。因场区河床天然落差较小,引水式开发优越性不明显,且右岸为覆盖层边坡,自身稳定性较差,引水明渠施工时开挖支护工程量显著,同时压力前池占地及混凝土工程量亦相当可观,该方案投资较大,经济性较差。

概设阶段,经优化分析,拟采用河床式开发。由于场址拟选坝址处右岸覆盖层较厚,边坡稳定性较差,而左岸地势相对较缓,适合布置厂房,故采用左岸河床厂房+泄洪拉沙闸+右岸非溢流坝的枢纽布置格局,各建筑物布置紧凑,管理运行方便。坝顶高程 $98.0\text{ m}$ ,坝轴线长 $177.5\text{ m}$ ,建基面高程 $73.0\text{ m}$ ,最大坝高 $26.0\text{ m}$ ;泄洪拉沙闸采用2孔 $6.6\text{ m}\times 8.5\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)。枢纽平面布置见图1。

### 2.4 边坡处理

坝址左坝肩边坡现为自然边坡,现状稳定;右坝肩边坡高程 $105\text{ m}$ 以上为2015年前后由人工开挖形成,边坡坡角 $40\sim 50$ ,高程 $105\text{ m}$ 以下为自然边坡,边坡坡角 $30\sim 40$ ,人工开挖边坡现状基本稳定,原开挖断面大多完好,局部由于暴雨的冲刷发生塌滑,坝址现状见图2。

结合边坡分析软件计算成果,拟定的边坡处理方案为:左岸设两级边坡,每级坡高 $15\text{ m}$ ,坡比1:1,马道宽 $2\text{ m}$ ,坡面设间、排距 $2.5\text{ m}$ 系统锚杆( $\phi 28$ , $L=9\text{ m}$ );右岸设两级边坡,第一级坡高 $15\text{ m}$ ,第二级坡高 $20\text{ m}$ ,坡比均为1:1.5,马道宽 $2.0\text{ m}$ ,坡面设间、

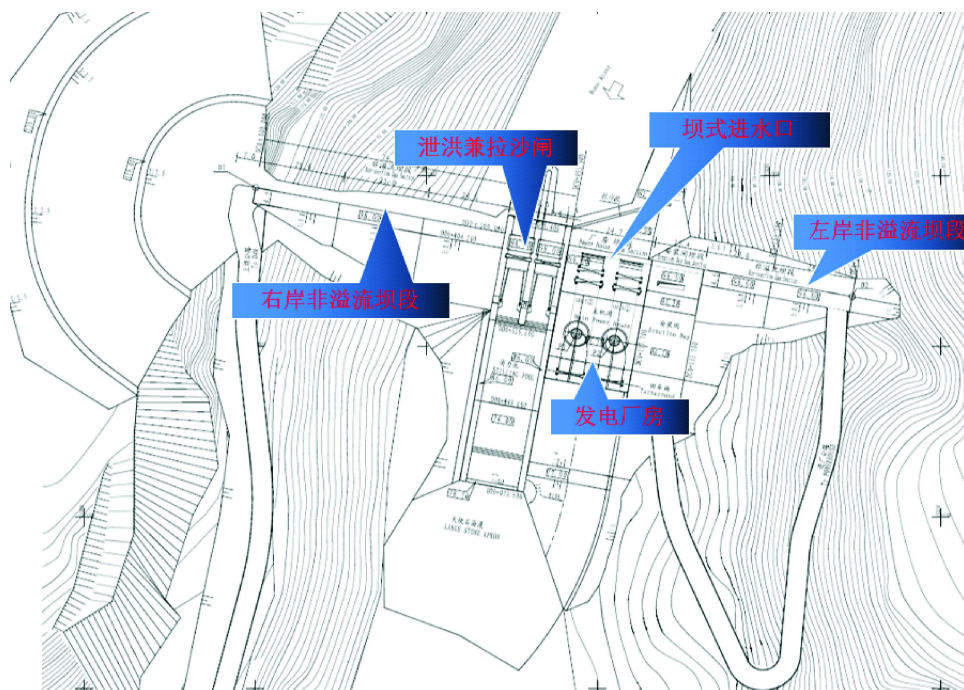


图1 枢纽平面布置图



图2 坝址现状图(上游视)

排距 2.5 m 系统锚杆 ( $\phi 28, L=6$  m)。经计算,边坡按此处理后,各工况下均能满足稳定要求。

## 2.5 送出问题

本工程拟新建 20 kV 架空线路约 2 km(出线至电网接入点),改造升级 20 kV 架空线路约 20 km(原设计容量 6 MW),该部分工程已由承包商委托当地企业设计、施工。经分析,若按中国标准采用  $240 \text{ mm}^2$  导线,线路年损耗电量高达 8%,线损较高。后期需进一步根据附近高电压等级接入变电站情况及容量,研究加大导线截面、采用多回路输电线路、新建高等级变电站及升降压输电线路等方案,择优选定经济合理的送出方式。

## 3 印尼大坝安全委员会审查要求

印尼大坝安全委员会是印尼大坝工程的管理和审

批机构,根据该委员会的规定,从基底起算,坝高超过 15 m 均被界定为大坝,需要提交行政要求和技术要求两部分文件进行审查,审查通过方能开工建设。行政要求主要涉及设计批准书及施工实施许可证,技术要求主要涉及可行性研究报告、详细设计报告等。通常审批需要 8~12 个月,时间较长,工程投资建设时需提前作好准备。

## 4 结语

国外小水电常常基础资料较为匮乏,外部条件复杂,在进行建设时,往往需要根据工程自身特点及所在国的条件及实际经验,在保证工程安全的条件下,尽最大可能提高工程效益。本文以印尼 Bone 水电站为实例,通过分析该工程概设阶段的设计要点,结合搜集到的设计资料及现场勘测成果,从工程水文、地震、边坡、枢纽布置等多个方面进行综合比较分析,最终较好的确定了工程外部参数,为项目的顺利推进创造了条件,也为类似工程设计提供了经验参考。

### 参考文献:

- [1] GB 50201-2014, 防洪标准[S]
- [2] DL 5180-2003, 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准[S]
- [3] NB 35047-2015, 水电工程水工建筑物抗震设计规范[S]
- [4] 黄向春. 国内外水利水电工程抗震标准初探[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(4): 573-578

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.006

# 向家草坝节制闸牛腿拆除后弧形闸门的安装技术

牛爱军, 李新华, 陈崇德

(湖北省漳河工程管理局, 湖北 荆门 448156)

**摘要:** 在向家草坝节制闸的加固中, 为适应9扇弧形钢闸门及支铰的更换, 原牛腿混凝土需凿除, 且必须在一个枯水季节完成, 提出了先安装门叶再安装支铰的施工方法。通过精心研究施工、安装方法及工艺, 对门叶安装进行受力分析, 并严格控制质量与安全管理等, 既缩短了工期, 又保证了工程质量, 是一次成功的探索。

**关键词:** 弧形闸门; 牛腿; 安装; 向家草坝节制闸

中图分类号: TV663+.2 文献标志码: A 文章编号: 1671-3354(2020)01-0019-04

## Radial Gate Installation Technology of the Control Gates in Xiangjiacao Dam while Re-casting the Concrete Brackets Simultaneously

NIUAijun, LI Xinhua, CHEN Chongde

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

**Abstract:** During the reinforcement work of the control gates in Xiangjiacao Dam, the old concrete brackets need to be removed and re-casted to install new radial gates and supporting hinges. Considering that the work must be completed in one dry season, an installation scheme of the gates that installing the gate leafs first and then supporting hinges is proposed and implemented. The construction and installation technologies including the quality and safety management measures are summarized. A stress analysis of the gate leaf during the installation is also carried out. It shows that the proposed installation technology is successful, which not only guarantees the construction schedule, but also ensures the installation quality.

**Key words:** radial gate; bracket; installation; control gate of Xiangjiacao Dam

向家草坝节制闸位于长江一级支流沮漳河的西支, 地处当阳市玉泉办事处焦堤村, 是1座灌溉节制闸。节制闸设计洪水  $P = 3.3\%$ , 校核洪水标准  $P = 1\%$ , 节制闸设计洪水位 89.24 m, 校核洪水位为 91.38 m, 节制闸由拦河闸、左右岸连接土坝、调节泄水渠等建筑物组成。节制闸弧形工作闸门 9 孔, 新设计弧形闸门孔口尺寸 12 m × 8.5 m (宽 × 高)。根据现场道路情况, 为方便安全运输, 弧形闸门横向分成 3 节, 单节重 9.5 t, 弧形闸门门叶重 26 t; 弧形闸门支臂分直段与靴板段 2 节, 重 6 t; 支铰单重 3.8 t。

由于在施工中, 老闸门同时还要承担汛期的挡水工作, 因而闸门安装只有一个枯水季节的时间, 且这个枯水季节还要完成老闸门的拆除工作, 由此可见工期十分紧张。又由于新设计弧形闸门支铰与老闸门牛腿

尺寸不相符, 老牛腿必须凿除, 重新立模板浇筑, 如按常规施工方法 (即先装支铰、支臂, 再装门叶) 已经不能满足项目工期的要求, 故参建各方经过多次讨论, 采用先装门叶再装支铰的施工方法。

### 1 闸门安装施工工艺流程及操作要点

#### 1.1 闸门安装施工工艺流程

闸门安装施工工艺流程见图 1。

#### 1.2 闸门安装施工操作要点

##### 1.2.1 施工准备

施工准备主要工作有:

1) 吊装车道是否满足吊装车辆通行要求, 路面是否坚实;

收稿日期: 2019-11-15

作者简介: 牛爱军, 男, 高级工程师, 主要从事水利水电工程管理方面的研究。

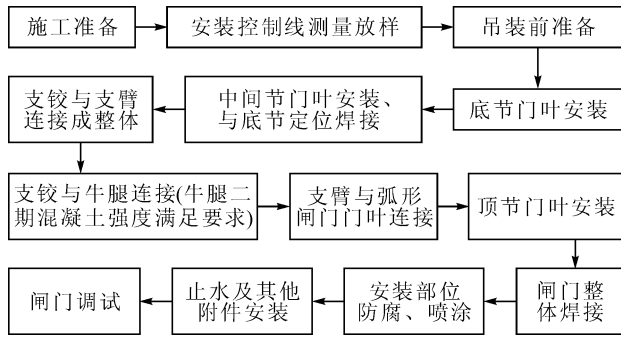


图1 闸门安装施工工艺流程图

2) 妨碍吊装工作的障碍物是否已经清除;

3) 闸门吊装前, 闸室内门槽埋件表面的混凝土残渣和其他杂物是否清除;

4) 检查埋件各部相关尺寸是否符合图纸尺寸;

5) 对制作的闸门门体按编号逐一检查、核对;

6) 对吊装或运输过程中造成的变形, 及时予以矫正<sup>[1]</sup>。

### 1.2.2 安装控制线测量放样

1) 闸门安装根据闸孔中心线、底槛中心线和支铰中心线进行控制, 高程统一由坝体高程控制, 面板弧度根据支铰中心及曲率半径控制。

2) 安装基准线根据支铰中心线和孔口宽度确定, 支铰中心线在安装铰座前精确测定。

3) 基准线放样过程中应做到测量工具尽可能统一、测量人员基本固定、测量时间相对一致。

4) 吊装利用原闸门启闭机, 1台25t的汽车起重机。并在交通桥上布置2台5t卷扬机, 用吊车将构件从交通桥与启闭机房空隙处吊至闸室, 再利用卷扬机吊至安装位。

### 1.2.3 吊装前准备

1) 闸门从上游围堰新建的临时便道进入, 车道宽5m, 截止于上游铺盖。利用铺盖地板加垫枕木作为吊装平台, 安装采用25t汽车吊, 将分节闸门调入门槽

内。吊装流程见图2。

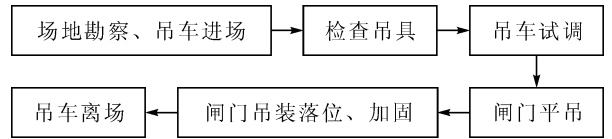


图2 吊装流程图

2) 吊装设备参数。选用25t汽车吊, 工作半径5m, 仰角 $64.6^\circ$ ; 查相关资料(25t吊车参数表), 当工作幅度5m, 吊臂伸展长度17.6m时, 额定起重量为13.5t。

实际起吊能力计算:

$$Q_1 = \cos\alpha Q \quad (1)$$

按式(1)计算,  $Q_1$  为13.02t, 吊装总荷重 $P$ 为9.5t, 而 $13.02t > 9.5t$ ; 实际起吊能力满足要求。

3) 吊车吊装能力校核计算:

$$A = P/Q_1 \quad (2)$$

式中: $P$ 为吊装总荷重,t; $Q$ 为起吊能力,t。

按式(2)计算, 吊车吊装能力校核计算为73%, 选用的主吊车能够满足吊装要求。

4) 吊索选用。吊索与构件的夹角一般不应小于 $30^\circ$ , 通常采用 $45^\circ \sim 60^\circ$ , 以减小吊索对构件产生的水平压力。吊装时按 $60^\circ$ 考虑使用2根直径为28mm钢丝绳吊装。

### 1.2.4 门叶安装

1) 门叶分三节制造完毕后, 运输至工地, 闸门组装焊接在闸槽内进行。

2) 第一节使用25t吊车吊入闸槽后, 利用老闸门卷扬机启闭机、手拉葫芦配合调整门叶的安装位置, 并用定位板将闸门与底槛、侧轨固定。

3) 第二节按照第一节的吊装方法吊入闸槽, 与最底部一节进行焊缝焊接, 焊接完成后同样用定位板在侧轨处加固焊接(见图3)。

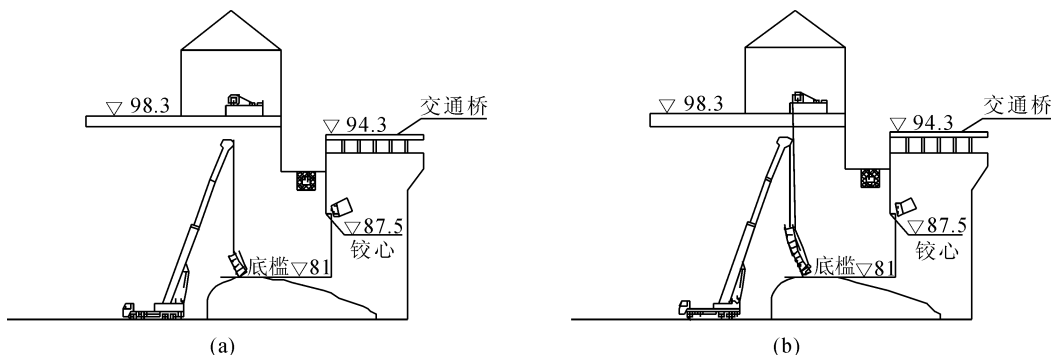


图3 吊装方式示意图

### 1.2.5 支铰安装

1)第一、二节弧形闸门安装固定,牛腿处二期砼强度达到要求,开始进行铰座的安装。

2)吊装方式,通过交通桥将25 t的吊车放入闸室,配合老闸门卷扬启闭机、交通桥上的卷扬机与手拉葫芦,调整闸门位置并与牛腿埋件相连接(见图4)。

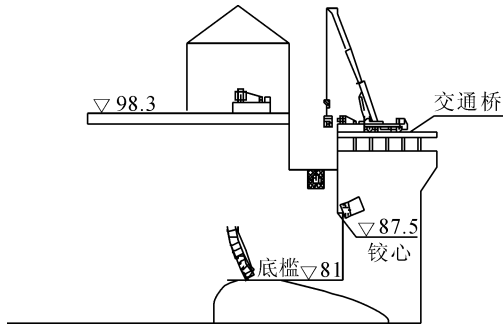


图4 支铰安装示意图

### 1.2.6 支臂及顶节闸门安装

1)铰座安装完成后,用同样的吊装方式,将支腿靴板段吊放入闸室内与铰座连接。

2)调整支臂位置后,将门叶下节与支臂下节(靴板段)用螺栓准确连接。

3)加固好后再将水平段支臂放入闸槽后与中间门叶及靴板段现场焊缝焊接。

4)焊接好后,顶部一节吊装方法同底下两节相同。

5)焊接完成后进行焊缝质量检查,最后安装闸门止水结构,调试闸门(见图5)。

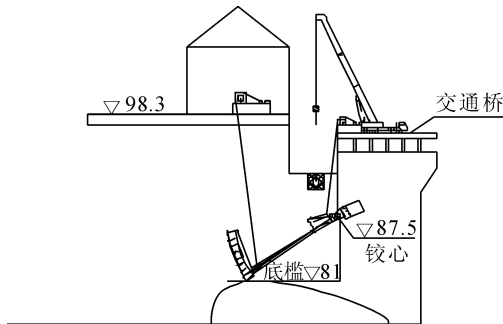


图5 支臂及顶节闸门安装图

## 1.3 门叶安装受力分析

1)底部两节闸门对接过程中,会出现闸门向迎水面倾倒的问题(见图6)。

2)受力分析。

$$G = mg \quad (3)$$

$$F = G \times \cos 59^\circ \quad (4)$$

$$\tau = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_Q^2} \quad (5)$$

$$\tau_M = M/W = 6F_{\max}L/0.75kh^2 \quad (6)$$

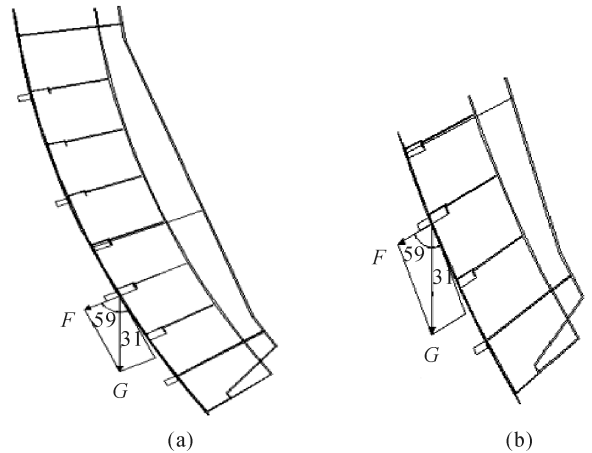


图6 底部两节安装示意图

$$\tau_M = F_{\max}/A = F_{\max}/0.7kh \quad (7)$$

$$F_{\max} = \tau / \sqrt{(6L/0.7kh^2)^2 + (1/0.7kh)^2} \quad (8)$$

式中: $G$ 为闸门重力,kN; $m$ 为闸门质量,kg; $g$ 为重力加速度9.8 N/kg; $F$ 为闸门向前倾力,kN; $\tau$ 为钢板许用应力,kN/cm<sup>2</sup>; $\tau_M$ 为弯矩 $M$ 作用下垂直于焊缝方向的剪应力,kN/cm<sup>2</sup>; $M$ 为弯矩,kN/m; $W$ 为截面抵抗矩; $\tau_Q$ 为 $F_{\max}$ 作用下平行于焊缝方向的剪应力,kN/cm<sup>2</sup>; $A$ 为焊缝计算截面积,cm<sup>2</sup>; $L$ 为钢板宽度,cm; $F_{\max}$ 为单块加固钢板承受拉力,kN。

单节闸门重9.5 t,二节闸门取20 t。采用10 mm的Q345B的钢板加固,每块钢板尺寸为10 mm × 60 mm × 120 mm,焊缝长度 $h$ 为40 mm,焊缝焊高 $k$ 为10 mm,Q345B钢板许用应力参数查表为 $\tau = 345 \text{ MPa} = 34.50 \text{ kN/cm}^2$ 。

将上述数据代入式(3)~(8)计算, $F_{\max} = 10.68 \text{ kN}$ ,在弧门安装过程中共有12块加固钢板,即总焊接力计算公式为

$$F_{\text{总}} = 12F_{\max} \quad (9)$$

按式(9)计算, $F_{\text{总}}$ 为128.16 kN  $\geq F = 101 \text{ kN}$ ,加焊定位块完全满足闸门受力要求。

## 2 质量控制与安全管理

### 2.1 质量控制

1)工程质量控制标准。弧形闸门安装施工质量控制标准《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准 SL635-2012》、《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL74-2013)、《水电水利工程钢闸门制造安装及验收规范 DL/T5018-2004》、《水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范》(GB/T14173-2008)。

2)质量管理制度与主要措施。①按ISO9002质量标准,建立健全质量保证、控制体系,编制质量管理手



册;②施工质量须符合技术条款规定和有关规程规范的技术规定;③及时收集施工原始记录、说明、报表等资料,分析质量控制管理的动态信息,制定改进施工质量的措施,提高质量管理水平;④配备专职的质量检查员对金属结构安装的质量进行跟踪检验,各班组配备兼职质量检查员对本班组施工质量进行控制;⑤认真落实监理例会、专题会议中议定的事项,对有关单位巡视检查中发现的各种问题,及时组织整改,并制定防止类似问题再次出现的措施;⑥做好图纸会审和技术交底工作,加强技术培训,坚持特殊工种持证上岗制度,提高全体员工的质量意识<sup>[2]</sup>。

3)施工准备的检查。①钢材、电焊条、电焊机、油漆等主要材料必须具有出厂合格证,其技术参数符合设计要求,严禁使用不合格的原材料;②测量控制网点的精度符合设计要求;③门叶面板焊缝焊接前,制定焊接工艺措施并经有关部门审查批准<sup>[3]</sup>,施工中严格按批准的工艺措施实施。

4)施工过程中的质量控制。①施工过程中严格按设计图纸及文件施工,如遇有与设计图纸不相符时,及时书面报告有关单位,待取得文字依据后再继续施工<sup>[4]</sup>。②加强施工工序的衔接,每道工序按照“三检制”进行检查。隐蔽工程和关键部位的检查,在监理工程师终检后进行覆盖或进入下一道工序。施工中坚持工序质量传递卡制度,不合格的产品决不传入下一道工序。③在施工过程中发生质量缺陷或事故时,坚持“三不放过”的原则,认真分析,严肃处理。④贯彻质量与经济挂钩的原则,对施工质量作出贡献的单位和个人给予奖励,对造成的质量事故须认真调查、分析,找出事故原因,对事故的责任人或单位给予处罚。

5)开展质量活动。成立质量活动(QC)小组,加强质量教育,进行质量分析、交流、总结,定期召开质量现场会,进行质量评比,形成质量竞赛。不断优化施工工艺,采用新技术、新方法提高质量水平。

6)做好质量档案管理工作。设立专人负责质量资料保管,保存好原始记录,材料证明书、设备合格证、质量返修记录等<sup>[5]</sup>,按规定格式如实填写施工质量检查报告,提供详实的施工记录报告,绘制竣工图,竣工资料及时送监理工程师审定认可。

## 2.2 安全管理

1)施工中坚持“安全第一,预防为主”的方针,认真贯彻“安全生产,人人有责”的原则,坚决执行国家有关安全生产的法律、法规和政策。

2)配置专职安全员对现场各个施工部位的安全施工进行监督、检查和管理,发现问题及时处理,并做

好各项记录。

3)经常检查施工场所、施工机械的安全与完好情况,并做好记录;对易燃、易爆等化工危险品的运输及保管制定相应的规程,并严格执行,杜绝事故发生<sup>[6]</sup>;在场内行驶和进行运输作业的车辆必须遵守机动车辆安全管理与施工安全的规定。

4)金属结构设备吊装前,根据其参数,制订安全可靠可靠的吊装方案,报送监理机构审查批准后实施<sup>[7]</sup>;起吊设施处于良好使用状态,钢丝绳满足规范要求,焊接的吊耳符合设计要求、且布置合理、并经过强度计算;使用的卷扬机、吊车、滑车组等吊装工具,均需进行计算分析,并满足起重规范要求;吊装过程中,专人指挥,整个过程缓慢进行,在不同部位有专人监护,保证设备平稳吊装;吊装就位后,在确认其已落实或已可靠固定后,才允许摘钩。

5)闸门焊接时上、下层间搭设牢固且密闭效果好的隔离层,防止施工人员受伤。

6)加强施工人员的安全监护管理,电焊机、电源、开关等电器设备均需设置防雨罩,工作场所搭设雨棚或采取其他防雨措施。高温天气需采取可靠的防暑降温等劳动保护措施。

## 3 结语

向家草坝节制闸弧形闸门于2016-01-03日开始安装施工,2016-04-03日安装完成,总安装9扇弧形工作闸门,与常规安装方案相比较,提前了近1个月时间,确保了在汛期前完成闸门安装工作,并具备挡水条件。9孔弧形工作闸门安装完成后,经施工单位自检,监理单位复核,质量评定合格,经过3年时间的检验,9孔弧形工作闸门运行正常。实践证明,向家草坝节制闸弧形闸门采用先装门叶再装支铰的施工方法是可行的。

### 参考文献:

- [1] SL74-2013, 水利水电工程钢闸门设计规范[S]
- [2] GB/T 14173-2008, 水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范[S]
- [3] 刘景涛, 杜庆恩, 张鹏飞. 大型弧形钢闸门质量控制难点工艺浅析[J]. 山东水利, 2018(4): 12-13
- [4] 刘征辉. 弧形钢闸门构件可靠性研究与结构优化设计[D]. 长春: 长春工程学院, 2014
- [5] 黄春平. 弧形闸门安装中常见问题及处理措施[J]. 广东水利水电, 2012(6): 63-64
- [6] 冉龙平. 弧形闸门的焊接措施及焊接变形的矫正方法[J]. 贵州水力发电, 2012, 26(3): 64-67
- [7] 王定苍, 赵文芳. 某弧形闸门门叶焊接变形控制技术[J]. 施工技术, 2012, 41(367): 67-69

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.007

# 水电企业经济运行管控模式探讨与实践

陈媛<sup>1</sup>, 寇立夯<sup>2</sup>, 李永利<sup>2</sup>

(1. 国家能源集团大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041; 2. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100034)

**摘要:** 在理清不同类型水电站经济运行管控重点的基础上, 提出以考核利用小时完成差异率为核心指标的集团公司水电经济运行评价体系, 并列出了该评价体系在多年调节性、季调节性、径流式电站, 以及集团公司三级企业星级考评的应用。应用结果表明, 该管控模式能够直观反映经济运行的优劣及其影响因素, 有效地指导水电站、水电企业优化经济运行策略, 实现了对所有水电站、水电企业的统一标准化管理, 经济运行水平大幅提高, 总体成效显著。

**关键词:** 考核利用小时完成差异率; 水电企业; 经济运行; 管控评价

**中图分类号:** F406.14      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-3354(2020)01-0023-06

## Study and Practice of an Economic Operation Management and Control Mode in Hydropower Enterprises

CHEN Yuan<sup>1</sup>, KOU Lihang<sup>2</sup>, LI Yongli<sup>2</sup>

(1. Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., China Energy Investment Corporation, Chengdu 610041, China;  
2. China Energy Investment Corporation, Beijing 100034, China)

**Abstract:** Firstly, key management and control points of the economic operation of hydropower enterprises are determined. Then, an economic operation evaluation system is proposed, in which the utilization hour completion difference rate is adopted as the key assessment index. The practice of this evaluation system in multi-year regulation, seasonal regulation and runoff hydropower stations in China Energy Group and the active effect on their evaluation performance are summarized. The results show that the proposed management and control mode can directly reflect the economic operation performance and its influencing factors, effectively guide the hydropower stations and enterprises to optimize their economic operation strategies, realize a unified standardized management of all stations and enterprises, greatly improve the economic operation level and achieve significant overall benefits.

**Key words:** assessment of utilization hour completion difference rate; hydropower enterprise; economic operation, evaluation of management and control

截至2017年底,国家能源投资集团有限责任公司(以下简称集团公司)拥有水电共18498.9MW,其中300MW以上大型水电站仅11座,50MW以下小型电站169座,中小水电比重大;季调节及以上性能水电站30座,日调节及径流式水电站数量多;且有11条流域形成梯级联合调度模式。面对这种中小水电占比大,调节性能差异性大,单站与流域梯级并存的复杂局面,集团公司经济运行考核评价难度较大。因此,集团公司一直致力于寻找能够全面综合考虑各电站特性的经济运行指标,实现所有电站、下属单位统一考核评价的

标准体系。

本文理清不同类型水电站管理思路,基于弃水分类标准,提出一个全新的综合考评指标,完成水电站日常运行情况的统一监督、评价,直接剖析运行管理不足,实现了对所有水电站、水电企业的统一标准化管理和闭环管理。

### 1 管控目标

水电经济运行管控,是指通过挖掘水电站设备、建筑物和水库潜力,合理编制和实施水电站的运行方式,

收稿日期:2019-11-26

作者简介:陈媛,女,工程师,主要从事梯级水电站经济运行方面的工作。

充分利用水能资源、提高企业经济效益的管理活动<sup>[1-2]</sup>。集团公司在经济运行管控过程中主要担任监督、评价以及技术指导职责,明确在保证安全的基础上以企业效益最大化为根本目标,根据来水、市场做好厂内厂间经济运行,提高水能利用率的总体管控目标<sup>[3]</sup>。

结合水电站调节能力、市场环境等特点,集团公司针对性地提出经济运行管控要点。季调节以下水电站应结合中短期来水预报降低发电水耗;年、季调节水电站应结合中长期来水预报,寻求平枯期降水耗、汛前消落、汛中抢发、汛末蓄满的最优水库调度方案;多年调节水电站应结合年度际来水预报,科学制定年度间调度策略,合理控制水位,杜绝弃水<sup>[4]</sup>;流域梯级水电站应以流域效益最大化作为统一调度的根本目标,同步开展厂间与厂内经济运行<sup>[5-6]</sup>。非限电地区水电站应以提高水能利用率为根本目标;限电地区水电站应以减少调度弃水损失为主要目标,季调节及以上水电站的调度方案制定应充分考虑所在地区电力市场环境。

## 2 水电经济运行评价体系

### 2.1 传统经济运行评价体系

长期以来,影响水电站经济运行的因素概括起来分为内因和外因两大类<sup>[7]</sup>,很多学者和单位在评价方法研究、考核体系建设等方面做了大量研究<sup>[8-10]</sup>,但是归结到量化指标仍主要以耗水率和水量利用率为主:耗水率越低越好<sup>[11]</sup>,水量利用率越高越好<sup>[12]</sup>。实际运行过程中往往存在矛盾:若降低耗水率,则需要高水位运行,导致调节库容减小,弃水风险增大,水量利用率降低,反之亦然。因此从集团公司角度出发,全面反映各类型电站经济运行重点、平衡两个指标,形成一个同一标准、面面俱到的评价体系是亟待解决的。

### 2.2 集团经济运行考评体系

在传统评价体系的基础上,集团公司提出了新指标“考核利用小时差异率(以下简称差异率)”<sup>[13]</sup>,智慧解决了耗水率最优与水量利用率最大化的平衡问题,建立经济运行分析系统。集团公司通过该系统,反向核算电站运行实况,结合调度弃水、泄洪弃水等弃水分类细化,精细化理清经济运行影响因素,反馈子分公司以此指导后续经济运行工作。

#### 2.2.1 考核利用小时差异率指标

差异率是度量电站实发与应发电量差异情况,理

论利用小时应扣除经集团认定的区域平均限电损失利用小时,计算公式如下:

$$\alpha = \frac{h - h_{sw} - h_r}{h - h_{sw}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为差异率; $h$ 为理论利用小时,等于理论电量除以平均装机容量; $h_{sw}$ 为区域平均限电损失利用小时(指电网原因); $h_r$ 为实际利用小时。

#### 2.2.2 理论电量计算方式

理论电量指水电站有效来水(天然来水扣除未经发电直接从水库引走的供水、灌溉、生态等水量)按集团认定的水库调度方案、耗水率等基本参数,计算的应发电量。针对不同类型水电站管控重点的不同,集团公司将理论电量计算模型分为“季调节以下”、“年季调节”和“多年调节”三种类型。

##### 1) 季调节以下水电站

考察重点:优化水位及发电效率,降低发电水耗。

计算思路:这类电站采取定水头定耗水率方式计算,耗水率取历史最优值。根据逐日有效出库水量和装机容量,计算最大发电能力。

##### 2) 季调节及以上、多年调节以下电站

考察重点:调度方案执行是否到位,经济调度灵活性及管控水平。

计算思路:这类电站采取变水头方式计算,按照经集团认定的水库水位控制计划,取有效出库水量(有效入库水量扣除库容变化量)除以耗水率(当日水头对应耗水率)所得电量与当日水头下最大发电能力中的最小值为当日发电量。若计入最大发电能力后仍存在弃水风险,优先考虑按照水位上限留存水量。时段理论发电量还应考虑时段初、末实际水位与控制计划不一致而导致的库容差电量。

##### 3) 多年调节电站

考察重点:是否通过年度间科学调度,合理控制水位,降低发电耗水率,要求杜绝弃水。

计算思路:这类电站选用固定耗水率(一般取50%调节库容对应水位下的耗水率)计算理论电量。此处不扣除防洪弃水。

#### 2.2.3 差异率主要影响因素

影响差异率的主要因素仍是耗水率和水量利用率。不弃水时期,在发电用水量一定时,降低发电耗水率,可提高发电量;汛期可能弃水期间,通过洪水过程管控(洪前腾库、尾洪拦蓄)<sup>[14]</sup>,充分利用可调库容增加发电水量。实际运行过程中,可以通过抬高水头(抬高上游水位、降低下游水位)和优化机组负荷分配

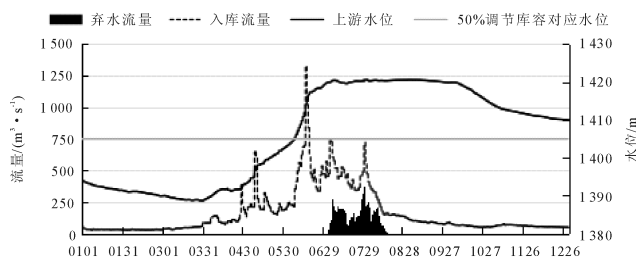
方式(减少空载和低效率运行)等方式来降低耗水率<sup>[15]</sup>;而调节性水库在提高水量利用率方面可以发挥较大优势。

#### 2.2.4 弃水认定

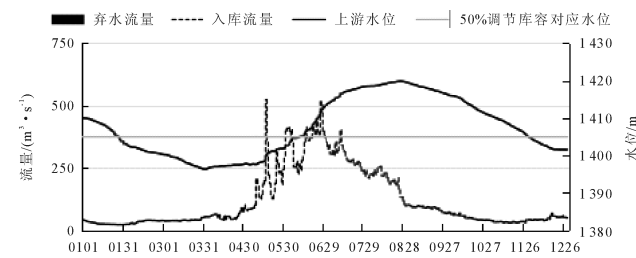
在经济运行考评体系中,电站出库水量根据其下泄方式、用途可细分为发电用水、生态及灌溉用水、泄洪弃水、调度弃水、检修弃水五类。其中生态及灌溉用水是指用于保持生态流量或者满足下游灌溉、供水等通过非机组渠道下泄的水量,不计入有效来水;检修弃水是指因站内设备检修而导致无法达到最大出力时的弃水量,反映了设备检修时间安排不妥等主观管理因素,全部计入有效来水;调度弃水是指电站在电网线路检修、线路断面送出有限或区域消纳有限等外部客观因素下未达到最大出力时的弃水量,全部计入有效来水,但评价中可根据电站所在区域平均限电情况对部分调度弃水损失进行认定;泄洪弃水是指超过电站满发或调节能力时下泄的水量,其量的多少与电站运行方式密切相关,因此按照表1进行调增。

表1 集团泄洪弃水损失电量调增标准表

调增比例	偏丰			偏枯		
	<10%	10%~20%	>20%	<10%	10%~20%	>20%
限电地区	2.0%	2.5%	3.0%	5.0%	7.5%	10.0%
非限电地区	2.0%	3.5%	5.0%	5.0%	10.0%	20.0%



(a)2016年来水及水位过程



(c)2017年来水及水位过程

#### 2.2.5 评价标准

系统认定理论利用小时为最优运行成果,实际利用小时与理论利用小时越接近,差异率越小,说明运行过程越经济高效。对差异率指标进行分级评价,共分为五个等级:五星( $\alpha \leq 3\%$ )说明科学高效开展经济运行管控,成效显著;四星( $3\% < \alpha \leq 8\%$ )说明科学开展经济运行管控,达到预期成效;三星( $8\% < \alpha \leq 15\%$ )说明合理开展经济运行管控,基本达到预期成效;二星( $15\% < \alpha \leq 25\%$ )说明经济运行管控成效一般;一星( $\alpha \geq 25\%$ )说明经济运行管控成效较差(见表2)。

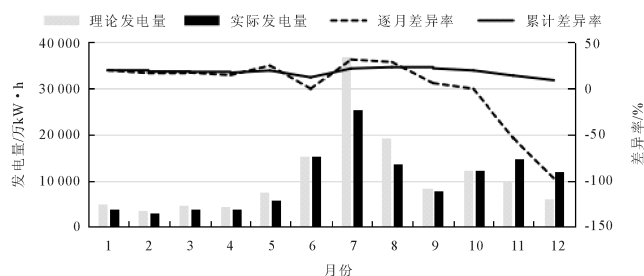
表2 集团考核利用小时完成差异率评价标准表

等级	五星	四星	三星	二星	一星
标准	$\alpha \leq 3\%$	$3\% < \alpha \leq 8\%$	$8\% < \alpha \leq 15\%$	$15\% < \alpha \leq 25\%$	$\alpha \geq 25\%$

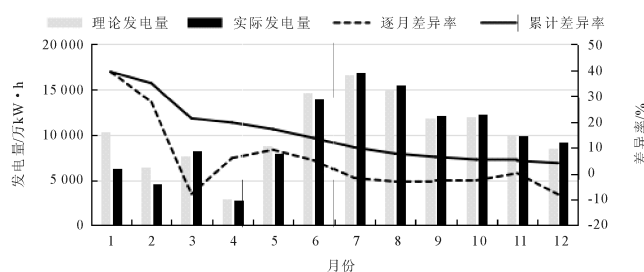
### 3 应用示例

#### 3.1 多年调节性水电站

以吉林台一级水电站为例,电站位于新疆伊犁州喀什河,为不完全多年调节性水库,年径流量36.9亿 $m^3$ ,装机容量500 MW。2016、2017年电站差异率分别为8.79%和4.08%,分别对应三星和四星,2016年汛期因区域限电产生调度弃水损失,按照区域平均限电水平调整利用小时数,调整后差异率为-1.62%,认定为五星(见图1)。



(b)2016年发电量及差异率情况



(d)2017年发电量及差异率情况

注:图1中逐月差异率为理论差异率,未减扣区域限电小时数。

图1 吉林台一级水电站2016年和2017年运行情况图

2016年经济运行亮点:①利用5-11、6-17两场洪水快速回蓄至正常蓄水位;②充分利用汛前消落库容拦蓄洪水,提高水量利用率。不足:年初水位较低,若预报失误,来水偏枯将导致后期持续低水位风险增大。

2017年经济运行亮点:①应对来水偏枯,主动减少汛前消落程度,较2016年汛前水位高7.7m;②6月利用来水增加的机会快速回蓄。不足:①1~2月份

因发电负荷安排稍差,导致耗水率偏高;②9~10月加大发电导致水位快速降低,缩短了维持高水位运行的时间;③年末水位控制偏低(见表3)。

2016、2017年属于典型的丰水年和平水年,差异率反映出:对于多年调节性电站来说,提高水量利用率是丰水年经济运行的关键,而平水和枯水年的运行重点应该转变为以降低耗水率为主。

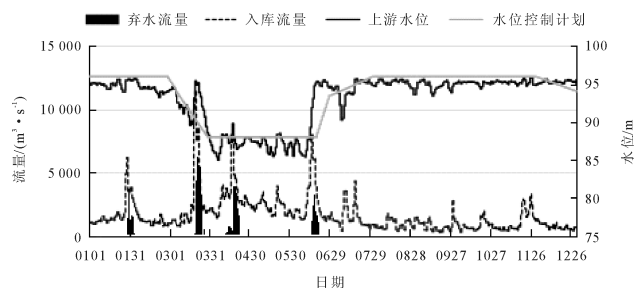
表3 吉林台一级水电站经济运行指标对比表

年份	来水量 /亿 m <sup>3</sup>	发电量 /亿 kW·h		耗水率 /(m <sup>3</sup> ·(kW·h) <sup>-1</sup> )		实际水 量利用 率/%	限电弃水 利用小时 数调减/h	泄洪弃水 利用小时 数调增/h	调整后		调整后	
		理论	实际	理论	实际				差异率 /%	等级	差异率 /%	等级
2016年	50.19	13.38	12.20	3.22	3.33	87.22	278	-	8.79	三星	-1.62	五星
2017年	37.39	12.51	12.00	3.22	3.32	100.00	-	-	4.08	四星	4.08	四星

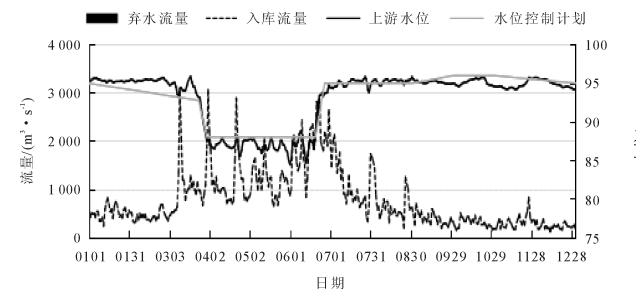
### 3.2 季调节性水电站

以万安水电站为例,电站位于江西省万安县赣江

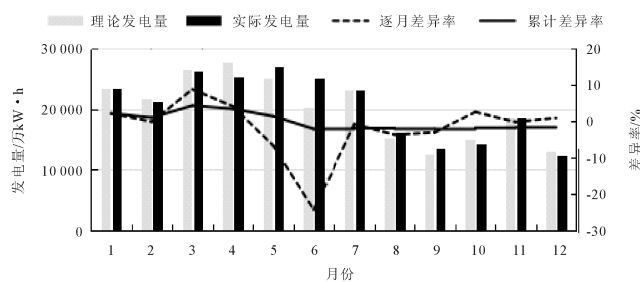
中游,为季调节性水库,年径流量297亿m<sup>3</sup>,装机容量533MkW。2016、2017年电站差异率分别为-0.76%和-0.69%,均为五星(见图2)。



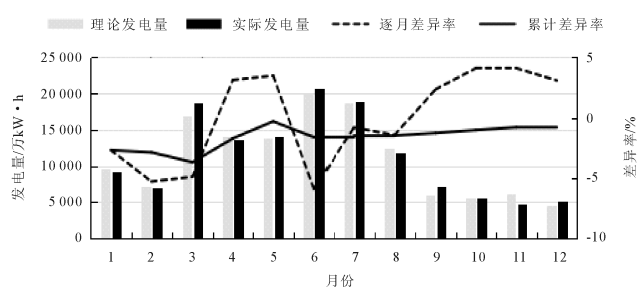
(a)2016年来水及水位过程



(c)2017年来水及水位过程



(b)2016年发电量及差异率情况



(d)2017年发电量及差异率情况

图2 万安水电站2016年和2017年运行情况图

2016、2017年经济运行亮点:①实际水位与控制计划基本一致,说明来水预测和水位控制计划制定较成功;②平枯期持续高水位运行,有效降低耗水率;③多场洪水调度工作到位,有效提高了水量利用率;

④2016年3月利用中小洪水快速回蓄消落、抢发电量,2017年3月持续高水位运行、降低水耗;⑤6月快速回蓄。不足:①2017年10~11月来水偏枯,水位持续偏低、水耗偏大;②2年实际年均水耗均低于计划,

说明水库调度方案仍有优化空间。

2016、2017年属于典型的丰水年和平水年,差异率反映出:对于季调节性电站来说,提高水量利用率和降低耗水率都是重点。2017年差异率指标略差于2016年,一个主要原因是设定的2017年目标高于

2016年,比如:①汛前集中消落:将3月均匀消落8m调整为枯水期均匀消落2.2m后5d内快速消落4.8m;②汛末集中回蓄:将6月均匀回蓄7.5m调整为月底10d内快速回蓄7m。若以同一标准,2017年差异率指标将优于2016年4.37%(见表4)。

表4 万安水电站经济运行指标对比表

年份	来水量 /亿 m <sup>3</sup>	理论发电量 /亿 kW·h	实际发电量 /亿 kW·h	理论耗水率 /(m <sup>3</sup> ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	实际耗水率 /(m <sup>3</sup> ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	实际水量 利用率/%	泄洪弃水调增 利用小时数/h	差异率 /%	等级
2016年	510.11	24.35	24.72	18.68	18.29	88.83	34	-0.76	五星
2017年	242.98	13.59	13.69	17.83	17.71	100.00	-	-0.69	五星

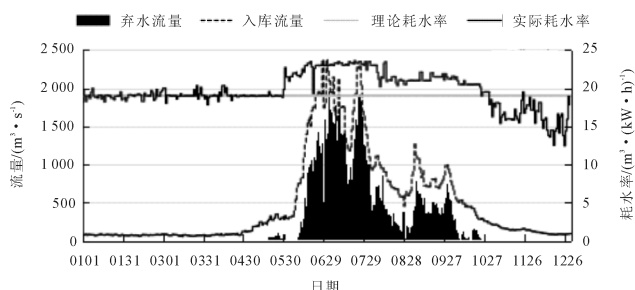
### 3.3 径流式水电站

以多布水电站为例,电站位于西藏林芝市尼洋河流域,为日调节性水库,年径流量152亿m<sup>3</sup>,装机容量120MW。2016、2017年电站差异率分别为29.69%和29.97%,按照西藏地区平均限电水平调整利用小时数,调整后差异率分别为4.43%和4.62%,均为四星(见图3)。

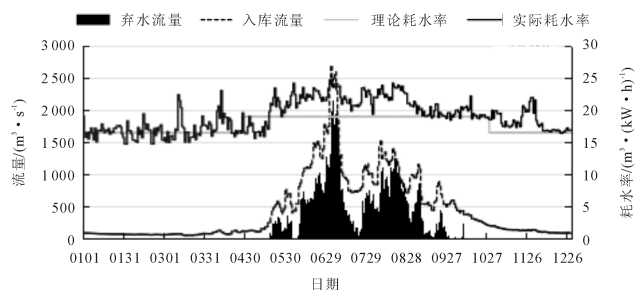
2016年经济运行亮点:平枯期耗水率控制较优,11~12月耗水率明显优于目标值。不足:5~10月水位持续低于死水位,耗水率大幅偏高。2017年经济运

行亮点:较2016年,水量利用率提高4.76%,耗水率降低2.43%。不足:11~12月耗水率明显较2016年偏高。

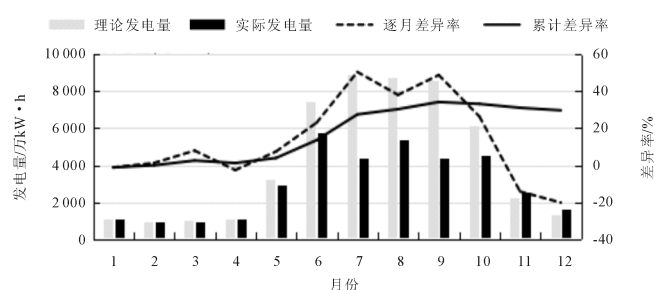
2016、2017年都属于平水年,2017年略偏枯10%左右,差异率反映出:对于径流式电站来说,由于可调库容有限,水量利用率提高有限,降低水耗是控制经济运行的重要手段。2016年运行情况反映出最优耗水率存在较大调节空间,依据11~12月实际耗水率调节2017年最优耗水率目标为分段水耗(平枯期16.6m<sup>3</sup>/kW·h、汛期19m<sup>3</sup>/kW·h),见表5。



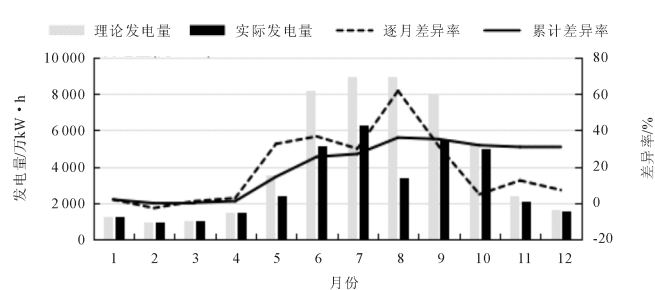
(a)2016年来水及水位过程



(c)2017年来水及水位过程



(b)2016年发电量及差异率情况



(d)2017年发电量及差异率情况

注:图3中逐月差异率为理论差异率,未减扣区域限电小时数。

图3 多布水电站2016年和2017年运行情况图

表5 多布水电站经济运行指标对比表

年份	来水量 /亿 m <sup>3</sup>	发电量 /亿 kW·h		耗水率 /(m <sup>3</sup> ·(kW·h) <sup>-1</sup> )		实际水 量利用 率/%	限电弃水 利用小时 数调减/h	泄洪弃水 利用小时 数调增/h	调整后		调整后	
		理论	实际	理论	实际				差异率 /%	等级	差异率 /%	等级
2016年	154.48	5.07	3.57	19.00	20.67	46.85	1 198	80	29.69	一星	4.43	四星
2017年	140.68	5.17	3.62	18.59	20.18	51.63	1 211	119	29.97	一星	4.62	四星

### 3.4 水电企业

差异率是集团公司评价三级单位经济运行的重要指标,2017年,集团公司三级单位五星占比同比增长14.66%,四星占比同比增长1.75%,二星和一星单位占比下降为0,各单位水库调度、经济运行工作成效不断提升(见表6)。

表6 集团公司三级单位经济运行情况评价统计表

等级	五星	四星	三星	二星	一星
2016年	64.29%	16.67%	9.52%	7.14%	2.38%
2017年	78.95%	18.42%	2.63%	0	0

## 4 结 语

本文理清了不同类型水电站管控重点,综合考虑了限电与非限电地区市场环境带来的水电运行差异性,创新提出经济运行考核指标差异率,实现了所有水电站、所有水电企业在同一标准下的经济运行评价。该评价体系作为国家能源集团对三级水电企业考评的主要方式,已完整试用2年。在该体系的指导下,各企业经济运行水平大幅提高,总体上成效显著。

同时,随着实际应用的开展,也暴露出该评价指标存在的问题。后续工作中应在以下方面持续改进。

1) 差异率建立的基础是追求发电量最大化,没有考虑电价的影响。对于针对存在丰枯电价的地区,以及流域梯级电站(各电站电价不一致),需要进一步考虑电价对调度策略的影响。

2) 现有评价体系主要以单站为主,后续需要进一步开展流域梯级联合调度评价体系。

3) 季调节及以上、多年调节以下电站差异率指标与年初制定的水库调度方案密切相关,而水库调度方案又是基于来水预测开展,在目前年度来水预测准确度不高的情况,极有可能出现实际调度过程与年度预测过程偏差极大的情况,因此建议下一步开展水库调

度方案滚动测算及评价。

### 参考文献:

- [1] 陈森林, 高仕春, 万飏, 等. 水电站水库运行与调度[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008
- [2] 凌世河. 清江流域梯级水电厂联合优化调度的探讨[J]. 水电厂自动化, 2003(4): 1-6
- [3] 卢洁. 关于加强水电经济运行的探讨[J]. 企业改革与管理, 2017(19): 209
- [4] 肖江帆. 略论水库的兴利运用[J]. 农业与技术, 2015, 35(20): 65
- [5] 柴方福. 水电站经济运行及评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012
- [6] 田华, 梁卫, 简永明. 乌江流域梯级水电站联合优化调度的探讨[J]. 贵州水力发电, 2009, 23(1): 11-17
- [7] 靳少波, 沈延青. 水电站经济运行考核指标改进研究[J]. 西北水电, 2014(3): 105-107
- [8] 赵宇, 李崇浩, 赵晓兰, 等. 水电经济运行考核评估系统设计[J]. 水电与新能源, 2014(5): 1-5, 14
- [9] 周佳, 马光文, 黄炜斌, 等. 流域梯级水电站经济运行效益评价新体系研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(5): 145-147
- [10] 冯树臣, 全声, 朱世武. 基于水电能量平衡分析模型的水电企业管控模式研究[J]. 中国水运, 2017, 17(7): 117-119
- [11] 陈新, 徐刚磊, 赵定林, 等. 枯水期降低水耗、提升发电量运行管理模式[J]. 云南水力发电, 2018, 34(3): 107-108
- [12] 肖杨, 邝录章, 王也. 水电站水库经济调度考核评价方法[J]. 水利科技与经济, 2018, 24(11): 66-71
- [13] 中国国电集团公司. 中国国电集团公司星级企业考评管理办法[S]. 2016
- [14] 李继成, 张雪源, 王立刚, 等. 基于预报调度规则的云峰水库特大洪水调度研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(6): 16-22
- [15] 张士军. 提升水电站经济运行有关措施探讨[J]. 小水电, 2011(6): 112-114

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.008

## GIS、CFD 软件在风电场中的应用

王文中,陈海峰,王旭,杜尚尚,许田琦

(陕西科技大学机电工程学院,陕西西安 710021)

**摘要:**为了风电场精细化流场分析研究,提出一种基于GIS技术与CFD的分析方法。以中国陕北某风电场为例,通过获取目标风电场的地形数字高程模型(DEM),在逆向软件IMAGEWARE里进行地形模拟,将模拟结果导入CFD软件中进行流场分析,得到目标风电场区域的流场速度矢量图;为风电场测风塔、风机的合理布局以及风电超短期预测提供技术支持。经对比本方法的研究精度更高,采用免费版软件,性价比高,更具有普适性。

**关键词:**风电场精细化流场分析;GIS;CFD;逆向软件;流场速度矢量图

中图分类号:TK81;P404

文献标志码:A

文章编号:1671-3354(2020)01-0029-04

### Application of GIS and CFD Software in Sind Farm

WANG Wenzhong, CHEN Haifeng, WANG Xu, DU Shangshang, XU Tianqi

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** A fine flow field analysis method for wind farms based on GIS and CFD technologies is proposed. In the analysis of a wind farm example in Shaanxi Province of China, the digital elevation model (DEM) of the target is obtained and the topography is simulated in a reverse engineering software IMAGEWARE. The simulation results are then imported into CFD software for flow field analysis and the velocity vector diagram of the target wind farm area is obtained, which provides useful technical support for the reasonable layout of the wind towers and wind turbines and also the ultra-short term prediction of wind power. It shows that the proposed method with free software is of higher accuracy, better cost performance and greater universality.

**Key words:** fine flow field analysis of wind farms; GIS; CFD; reverse engineering software; velocity vector diagram of flow field

近年来,由于技术的进步,风力发电飞速发展,平坦地形风资源已逐渐开发完全,风电正向着复杂地形方向开发。根据《中国风电发展路线图2050》,中国今后将继续推进风电的规模化开发。按照第四次全国风能资源详查和评价,得到我国陆上(不包括青藏高原海拔高度超过3500m以上的区域)可供风能资源技术开发量为20~34亿kW<sup>[1]</sup>。目前,在风电场风资源评估中,丹麦RISO国家实验室基于线性模型开发的WAsP软件,适用于地形平坦的风场,以及近几年发展起来的法国Meteodyn公司开发的风流自动测算软件WT,其采用计算流体力学方法,能反映出复杂地形下风场的流动情况,适合复杂地形下风电场风资源评估,

具有更好的发展前景<sup>[2]</sup>,但这类软件一般费用昂贵。

目前,对地形上流场的研究分析大都是在中高尺度气象方面的研究,主要集中在农业、气象等方面,应用在具体小尺度风电场方面的研究不是很多。在国外,SOM, MUN DA<sup>[3]</sup>利用CFD(计算流体力学)模型和GIS(地理信息系统)研究了城市再开发和建筑施工对位于建筑密集区的国立釜庆大学校园周边细流场的影响,从16个来流方向进行了模拟分析。Christoph Schulz<sup>[4]</sup>对西班牙北部一处复杂地形风电场在极端风况条件下的风力涡轮机功率、负荷和尾流发展进行了数值分析,仅仅是个别风机、局部区域的模拟分析。国内也有不少学者进行了研究,如文献[5]基于CFD开

收稿日期:2019-11-08

作者简介:王文中,男,在读硕士研究生,研究方向:垂直轴风力发电机设计、风能预测与评估。



发了一种风电短期预测方法,文章主要集中于风电场风机如何聚类、模型如何建立对风功率短期预测进行了研究,缺乏风电场地形高程数据的获取和地形模拟等方面的知识。祝志文<sup>[6]</sup>对桥址峡谷地貌进行风场特性的 CFD 模拟分析,但技术路线不够详细。刘敏<sup>[7]</sup>利用地理信息系统(GIS)理论基础和技术手段,为风电场选址、产业数据库建立、风功率预测提供技术支持,只是提出这类设想,缺乏具体实践。李磊<sup>[8]</sup>对比了 RAMS 与 FLUENT 的模拟结果,表明 FLUENT 完全可以用于小尺度复杂地形上风场的精细模拟,但缺乏地形获取及模拟过程。

本文以陕北某风电场为例,对风电场地形进行建模,将模型导入 CFD 软件进行模拟分析,得到流场云图,探讨复杂地形对风速的影响,得到通过 GIS、CFD 软件在研究复杂地形下风场的流动情况的思路,降低风电场技术开发的成本。其中,选用的湍流模型为 FLUENT 里面的  $k-\varepsilon$  模型。

## 1 研究对象

该风电场位于中国陕北,经度在东经  $108^{\circ}29'30'' \sim 108^{\circ}36'55''$  之间,纬度在北纬  $37^{\circ}21'40'' \sim 37^{\circ}25'43''$  之间,属于大陆性温带季风气候,场区南北宽约 6 km,东西长约 9 km。场址区海拔高度在 1 500 ~ 1 750 m 之间,为黄土高原北部的黄土丘陵地带。主导风向为西风,次主导风向为东南风。风电场风机额定发电功率为 2 MW,轮毂中心高度为 80 m。

## 2 研究方法及过程

风电场区域较大、地形复杂,很难利用一般的软件对这种复杂的丘陵地形曲面进行模拟,需要采用一系列专业的地形提取与绘制软件才能得到风电场区域地形的三维曲面。首先根据风电场区域范围在水经注万能地图下载器中截取下载范围,选择合适精度下载数字高程地形坐标点,然后在 Global Mapper 里面进行坐标转换,将转换结果导入到 IMAGEWARE 里面拟合三维曲面并建立流体域,将流体域导入到 ICEM 划分网格,最后运用 FLUENT 对流体域进行流场分析。

## 3 地形下载及三维建模

### 3.1 软件简介

水经注万能地图下载器是国内一款地形下载软件,依托 Google earth,最高精度能达到分米级别,远高于

于 WT 软件自带的 SRTM90 m 精度地图,具有更精确的地形模拟,支持下载各种卫星地图、历史影像、电子地图、地形图、高程等地图数据,与 Auto CAD、Arc GIS、Global Mapper 等软件兼容。Global Mapper 是一款免费的地图绘制软件,能够生成等高线、矢量数据,可以对地形坐标进行转换,支持北京 54、西安 80、大地 2000 等格式。由于地形复杂且建模范围比较大,传统的正向建模工程任务量巨大,IMAGEWARE<sup>[9]</sup> 作为一款逆向造型软件,功能强大,满足要求。

### 3.2 地形下载

在水经注万能地图下载器中下载长 11 km、宽 7 km 的三维经纬度高程坐标,由于区域较大,高精度的高程坐标占据空间很大,增加后续模拟分析对设备的要求,而且本研究主要目的是分析空气的宏观流动,对精度的要求也不是很高。因此本次地形下载选择 13 级精度,分辨率 38 m。图 1 为风电场区域的地形图。

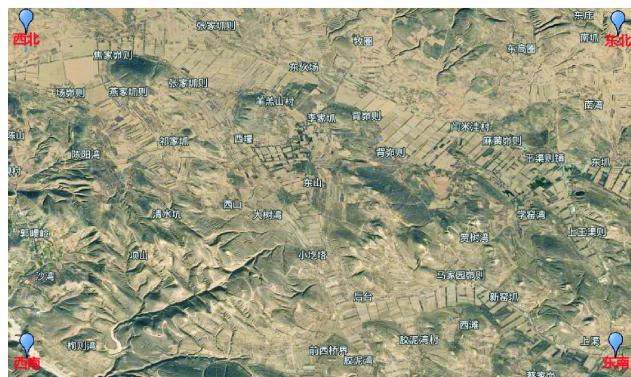


图 1 风电场地形图

下载的高程地形为三维经纬度坐标,首先要进行坐标转换。将三维经纬度坐标导入到 Global Mapper 里面转换为北京 54 空间三维坐标,纵向(纬度)  $4\ 136\ 845 \sim 4\ 144\ 135$  m 之间,横向(经度)在  $36\ 543\ 548 \sim 36\ 554\ 487$  m 之间。图 2 为风电场区域高程离散点。

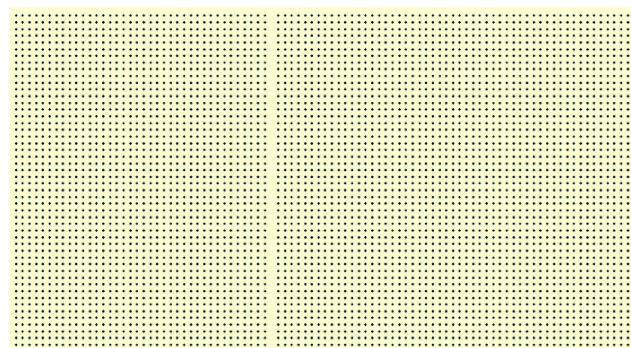


图 2 风电场离散点图

### 3.3 地形三维建模

将空间三维坐标导入到 IMAGEWARE 里面,可以采用调整控制点的方法对地形进行拟合,本文采用  $200 \times 150$  控制点拟合。由于实际地形不规则,没有适

合不规则地形的建模方法,因此分块逐步对模拟地形进行调整,图 3 为拟合地形与高程地形点云的彩色矢量图,由图 3 可知,本次模拟地形在竖直高度上误差范围在  $\pm 20$  m 之间。

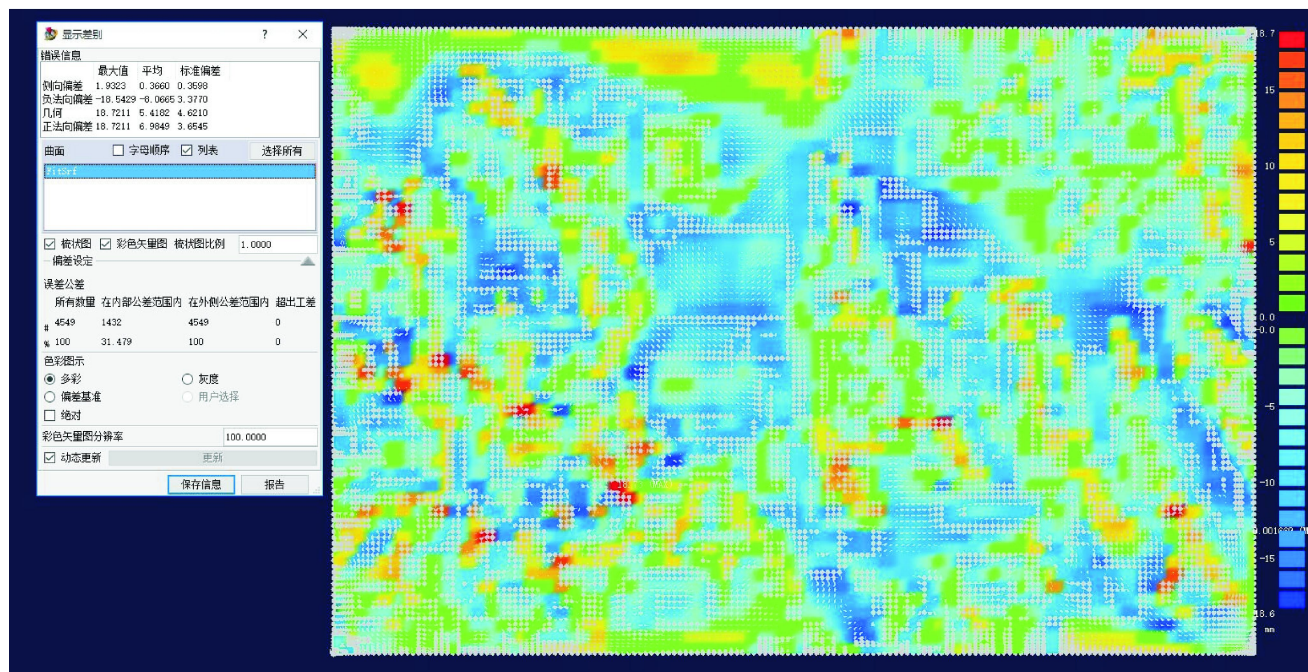


图 3 地形彩色矢量图

随着海拔高度的增加,地形对气流的影响越来越小。本研究在海拔高度 2 600 m 处建立流体域上表面,对模拟地形建立流场域,地面离顶面高度在 850 ~ 1 100 m 之间,图 4 为模拟地形及流体域壁面。

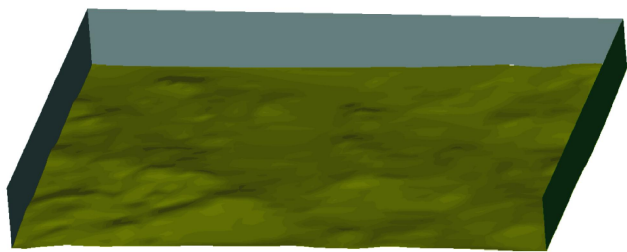


图 4 流场域图

## 4 流场分析

### 4.1 软件介绍

流场分析是在 ANSYS15.0 上完成的。ICEM<sup>[10]</sup> 是 FLUENT 的前处理软件,具有强大的网格划分功能,能应对求解域内的各种复杂几何形状。FLUENT<sup>[11]</sup> 软件经过数十年发展,具有更强大的 CFD 计算功能,主要用于传热、传质等流场分析,主要采用有限体积法 (Finite Volume Method, FVM),可以用于结构化网格、

非结构化网格体系的数值求解。

### 4.2 流场分析

将建立的流场域导入 ICEM 里划分网格,最大尺寸设置 80 m,划分非结构化网格 1 700 000 个,如图 5 所示。

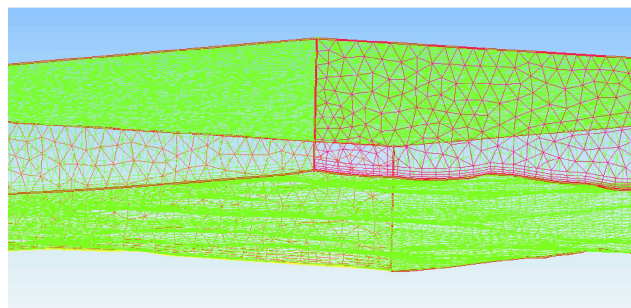


图 5 非结构化网格图

将网格导入到 FLUENT 里面进行流场分析,采用  $k-\varepsilon$  模型,进口速度设置为 3 m/s,根据风电场所在地理位置全年主导风向为西风,进口风向选取 270° (西风)。计算完毕后,随机在流体域内截取  $y=4\ 140\ 000$  m 处的 XZ 截面,得出速度云图,如图 6 所示。

由图 6 可知,在山脊位置上风速有明显的加强效果,这是由于迎风坡的加速效应造成的;根据风机轮毂

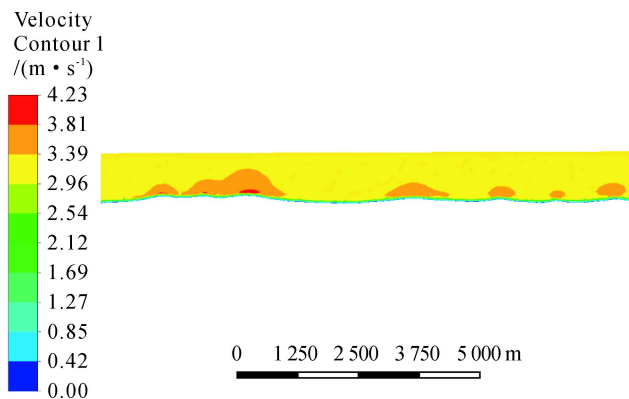


图6 y 4 140 000 截面速度云图

高度截取距离地面高 80 m 处的风速矢量图 7, 图 7 右侧为框选位置的放大图, 分析发现, 在经过高度落差较大的位置时, 气流流向有明显的改变, 这是由于山体的阻挡造成的, 但总体风向变化不大, 在 240 ~ 300 之间, 紊流较少, 说明风电场所处位置地形对风向影响较小, 较适合建风电场。

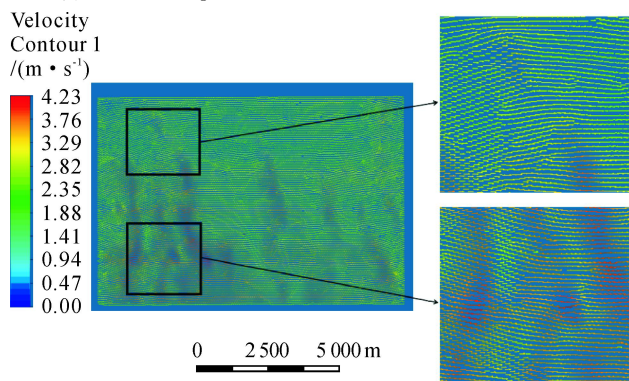


图7 地面高度 80 m 速度矢量图

## 5 结语

在风电场选址中, 本文采用一些常用软件, 基于 GIS 技术和 CFD 方法, 得到相关计算参数的一般调整方法以及过程, 能在中小尺度上对风电场地形进行精确建模, 为具体风电场的建设提供技术支持; 经过模拟分析, 达到了预期效果, 为更复杂地形的风电场建设提供预可研。同时, 研究技术路线在风电场的规划、运行、验收方面具有应用价值, 能减少风电场前期风能评

估、后期风能预测的建设成本, 特别是随着风电装机占比的增加, 为减小不稳定能源对电网稳定运行的冲击, 超短期预测的研究越来越受重视, 本研究可以为超短期预测中测风塔布置提供精确的分析。在未来研究中, 也将尽量选取有多测风塔的案例研究项目, 可以通过多测风塔的数据以及相关因素的分析, 再进行确认与验证。

致谢: 本文风电场资料以及实测数据是由华电陕西能源有限公司提供的, 在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国风电发展路线图 2050[R]. 北京, 2011
- [2] 冯长青, 杜燕军, 包紫光, 等. 风能资源评估软件 WAs P 和 WT 的适用性[J]. 中国电力, 2010, 43(1): 61-65
- [3] SOM, MUN DA, Kim, Jae - Jin. A Study on the Flow Changes around Building Construction Area Using a GIS Data [J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2018, 34(6): 879-891
- [4] Christoph Schulz, Patrick Letzgus, Pascal Wehling, et al. Numerical simulation of the impact of atmospheric turbulence on a wind turbine in complex terrain [A]. 7th Conference on Science of Making Torque from Wind (TORQUE) [C]. Milan, ITALY. JUN 20-22, 2018
- [5] Yimei Wang, Yongqian Liu, Li Li 1, et al. Short - Term Wind Power Forecasting Based on Clustering Pre - Calculated CFD Method[J]. Energies 2018, 11(4)
- [6] 祝志文, 张士宁, 刘震卿, 等. 桥址峡谷地貌风场特性的 CFD 模拟[J]. 湖南大学学报, 2011, 38(10): 13-17
- [7] 刘敏. 地理信息系统在风电中的应用[J]. 科技资讯, 2017, 6(10): 19-20
- [8] 李磊, 张立杰, 张宁, 等. FLUENT 在复杂地形风场精细模拟中的应用研究[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 621-628
- [9] 单岩, 李兆飞, 彭伟. Imageware 逆向造型基础教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013
- [10] 丁源, 王清. ANSYS ICEM CFD 从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013
- [11] 朱红钧. FLUENT15.0 流场分析实战指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015

热烈祝贺

长江三峡枢纽工程荣获国家科技进步奖特等奖

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.009

# 波浪能发电现状及关键技术综述

陈映彬, 黄 技, 赖寿荣, 赖佳亿, 林樾荣

(广东海洋大学海洋工程学院, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 当今世界煤炭以及石油等传统能源日渐减少, 节能减排及将广阔大海里超过 25 亿 kW 的可再生清洁波浪能转化成高效的电能, 是对波浪能行之有效的利用。研究波浪能发电的国内外现状、常见波浪能发电装置的工作原理与基本技术, 以期改进装置对各种海况的适应能力, 迅速提高波浪能发电效率。

**关键词:** 波浪能; 发电; 现状; 技术

中图分类号: TM619

文献标志码: A

文章编号: 1671-3354(2020)01-0033-03

## Current Situation and Key Technologies of Wave Power Generation

CHEN Yingbin, HUANG Ji, LAI Shourong, LAI Jiayi, LIN Yuerong

(College of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** With the decrease of traditional energy such as coal and oil, the development of renewable energy is getting more and more attention. As a kind of renewable energy, wave power generation technology can convert this clean and renewable energy of more than 2.5 billion kW in the sea into electricity, which is thus of incomparable development potential. In this paper, the current situation of the wave power generation, and working principles and key technologies of common wave power generation equipment are introduced. In the future, it is expected to improve the adaptability of the equipment to different sea conditions and also the efficiency of wave power generation.

**Key words:** wave power; power generation; current situation; technology

随着全球不可再生资源的逐渐枯竭和环境问题的日渐突出, 人类亟需探索清洁可再生能源来替代日渐枯竭的化石能源。在当今能源逐渐枯竭的形势下, 如何利用好波浪能这一丰富的可再生能源显得十分重要。波浪能实际是来源于风能, 风把能量传递给海洋从而产生了波浪能, 其之间的转化效率和风速及风区有关。波浪发电技术就是在现有波能研究的基础上, 将当下已经相对成熟的发电原理和精密精准的机械制造工艺进行高效的融合, 将广阔大海里超过 25 亿 kW 的波浪能转化成清洁、高效、可供人类直接使用的电能<sup>[1]</sup>。对波浪能行之有效的利用不仅可以对海洋能源进行合理开采, 也是解决当下能源短缺的一种正确措施。作为一种可再生能源, 波浪能发电不仅符合当下国家所提倡的可持续发展理念, 还具有无可比拟的

开发潜能。利用好波浪能不仅能够缓解当下化石能源日益减少的窘况, 还可以对环境进行有效地保护。

## 1 国内外现状

全球约 70% 的面积是海洋, 储存着巨大的海洋能。据估算, 约有 25 亿 kW 的波浪能。当前美国、日本、中国以及欧洲等国家均在沿海建造了或多或少的波浪发电装置。位于太平洋西部的我国坐拥着非常丰富的海洋能源。有关数据表明, 我国波浪能开发的潜力超过 1 亿 kW。随着环境问题的日益突出, 当下各国也都在加快波浪能发电方面的研究。

位于英国苏格兰北部海域的 Oyster 装置是当前最为成功的浮力摆波浪能发电装置。第一代 Oyster 发电装置的摆宽为 26 m, 高为 12 m, 装机功率为 315 kW,

收稿日期: 2019-12-12

作者简介: 陈映彬, 男, 本科在读, 主要研究方向为船舶与海洋工程。

通讯作者: 黄 技, 男, 讲师, 主要研究方向为船舶与海洋结构设计。

基金项目: 大学生创新创业训练项目(CXXL2019210), 广东海洋大学本科生创新创业团队(CCTD201812)。

装置在 2009 年进行了测试。在成功研发了第一代 Oyster 发电装置后, Aquamarine Power 公司拟开发了一个大型波浪力电站, 总装机的功率为 2.4 MW。该发电站由 3 座第二代 Oyster 发电装置组成。该第二代装置摆宽为 26 m, 高为 12 m, 装机功率为 800 kW<sup>[2]</sup>。

美国作为波浪能发电领域技术的领先者, Power Buoy 波能转换装置是美国波浪能发电领域的一项代表作。Power Buoy 拥有高 9 m 的晶石固定浮标以及高和直径为 1.5 m 的运动浮标。浮标随着波浪所做的上下运动会带动液压活塞做拉伸和压缩运动, 从而使发电机发电, 并输送到岸上供当地居民使用。Power Buoy 波能发电装置为了适应不同的海况, 还采用计算机来智能调节发电装置的阻力, 很大程度上提高了波浪能量利用率。

近年来, 我国在波浪能发电研究领域也取得了不少成就。譬如我国自主研发的“10 kW 级组合型振荡浮子波能发电装置”于 2014 年 1 月投入使用<sup>[3]</sup>。无独有偶, 一款由中国电科 38 所自主研发制造的波浪能发电装置在 2017 年通过了海洋局的验收并投入了运营<sup>[4]</sup>。而福建智盛能源科技有限公司在 2018 年第二届中国国际高新技术成果交易会上也向大众展示了一款采用“能量集”新技术的波浪发电装置。该技术将波浪能量集中在 1 台发电机上, 这样的发电机成功将发电能量进行了几何级倍增。

## 2 波浪能发电技术

当前各国都在研究波浪发电, 而海浪能发电装置的种类也是不可胜数, 但这些发电装置均源于几种基本的原理: 将波浪作用下物体的上下左右运动转化为电能; 将波浪压力变化转化为电能; 将波浪的势能转化为动能等<sup>[5]</sup>。以下是当前几种常见发电装置的发电原理。

1) 摆式波浪能发电装置(见图 1)。摆式发电装置的主要部件是浮力摆, 浮力摆下方与液压装置相接。在波浪的推动作用作用下, 浮力摆不停地做往复的前后摆动, 在压缸加以收集后, 再由发电机将机械能转换成可直接利用的电能, 从而实现波浪能的转化。

2) 筏式波浪能发电装置(见图 2)。筏式波浪能转换装置主要是利用其铰接处的液压能来转化为电能的, 此类装置主要有液压系统和铰接阀体, 铰接处安置有液压转化系统, 包括活塞杆、液压缸以及液压控制柜。当有波浪时, 波浪会带动筏体上下运动进而使铰接处往复弯曲, 往复运动产生的机械能经液压装置收集后用于发电机发电, 实现波浪能量的转化。

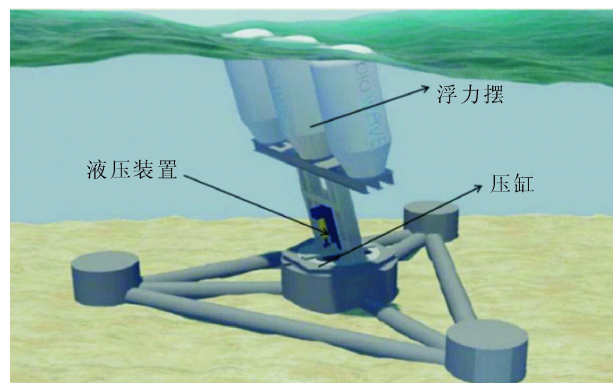


图 1 摆式波浪能发电装置图

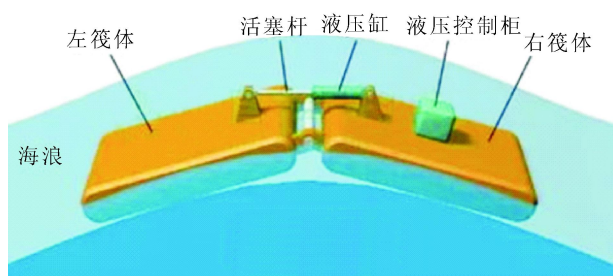


图 2 筏式波浪能发电装置图

3) 振荡浮子式波浪能发电装置(见图 3)。振荡浮子式发电装置由振荡水柱式发电装置发展演变而来, 主要结构包括浮体、质量体和发电机等<sup>[6]</sup>。其工作原理主要是通过波浪能的运动, 带动浮子不断进行上下垂荡, 与质量体产生相对运动, 再通过液压装置等将收集到的动能和势能储存起来进行发电。

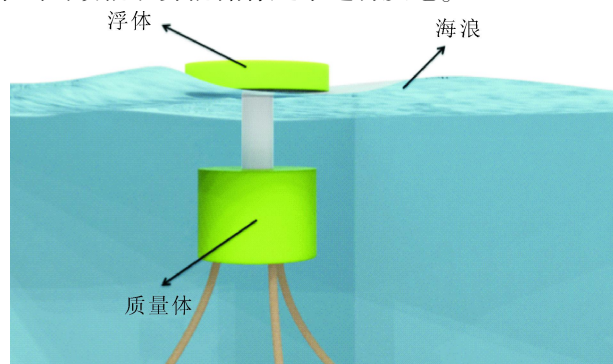


图 3 振荡浮子式波浪能发电装置图

4) 点头鸭式波浪能发电装置(见图 4)。顾名思义, 点头鸭式波浪能发电装置的形状和工作状态类似鸭子的运动。该类装置主要是利用波浪运动来促使浮子绕装置回转轴旋转, 利用旋转运动来进行发电的。在波浪入射波的作用下, 浮子鸭嘴部分产生了水平位移, 而在入射波过去后, 鸭嘴又回到了垂直状态。浮子绕回转轴往复摇摆运动的能量经液压装置收集后, 通过电力系统转化为可直接利用的电能, 从而实现能量的转化。

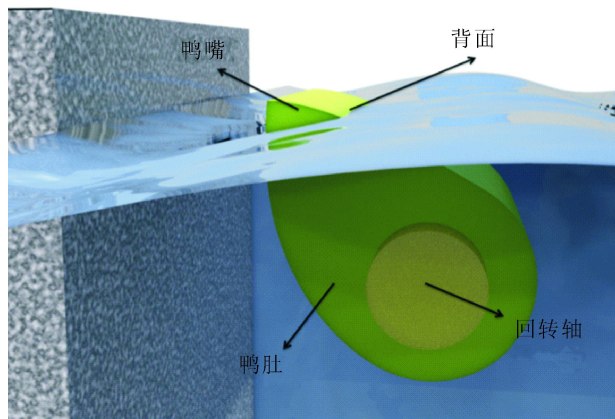


图4 点头鸭式波浪能发电装置图

5) 振荡水柱式波浪能发电装置(见图5)。该装置主要是由气室和空气涡轮机组成,通过波浪的运动来使得气室中的水柱上下运动,水柱的上下运动挤压了气室内部的空气,进而转换为发电机的转动实现发电的。装置内部的空气涡轮机在空气的作用下来回正反转运动,实现波浪能量较为高效的转化。

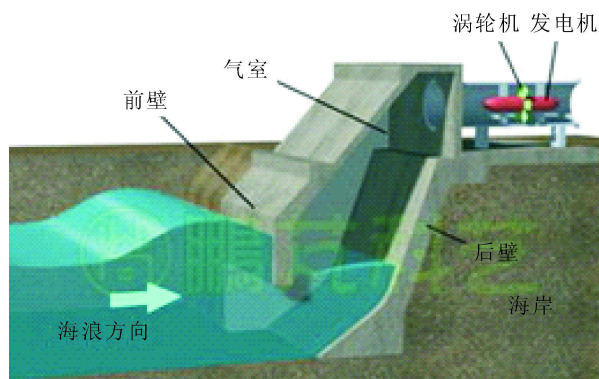


图5 振荡水柱式波浪能发电装置图

6) 越浪式波浪能发电装置(见图6)。越浪式波浪能发电装置的工作原理和堤坝水利工程的很相似,主要是利用水面高度差产生的势能进行发电。越浪式波浪能发电装置通常建立在岸边上,使用多个蓄水池放在彼此的顶部,波浪入射波迎来的方向上设有特殊开口用以捕捉入射波,波浪从开口涌进蓄水装置中与自由水平面产生高度差,接着利用涡轮机将水的势能转化为电能。越浪式波能装置主要包括收缩波道技术(tapered channel)、槽式技术(seaslot - cone generator)和波龙(wave dragon)<sup>[7]</sup>。

7) 海蛇式波浪能发电装置(见图7)。海蛇式波浪能发电装置属于一种半潜式系统,此类发电装置由数个圆柱体衔接组成。相互连接的圆柱体间安装有液压缸和发电机等结构。当圆柱体随波浪作相对运动时,圆筒间将会产生扭矩来驱动装置里面的活塞杆做拉伸和压缩运动。接着液压缸里的压力油在液压缸的高压

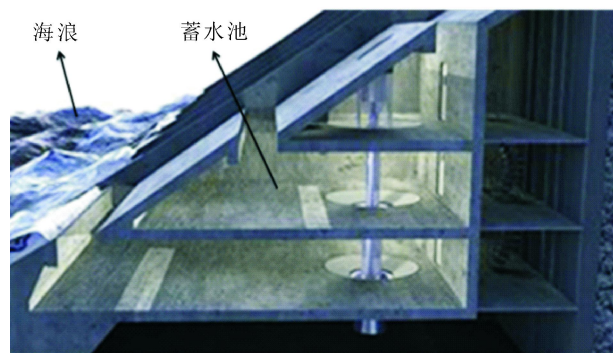


图6 越浪式波浪能发电装置图

作用下将泵出推动液压马达旋转,进而实现能量的转化<sup>[8]</sup>。该类发电装置的系统以及整流电路都位于结构内部,封闭性较好。



图7 海蛇式波浪能发电装置图

8) 海上发电船(见图8)。海上发电船是将发电结构和海上船舶结合在一起的新型发电装置。该类发电装置常采用液压发电的形式,在船的两边安装有多个吸收波浪能的浮体和液压杆。当有波浪时,波浪会带动浮体上下运动进而拉伸压缩液压杆,液压能经液压装置收集后促使发电机发电,实现能量的转化。发电船舶必须从港口低能区行驶到高能量区,产生的电能将被送入电网。这种发电形式提高了发电能力,但也增加了燃料成本,且船员在发电期间不能随意离开发电船。

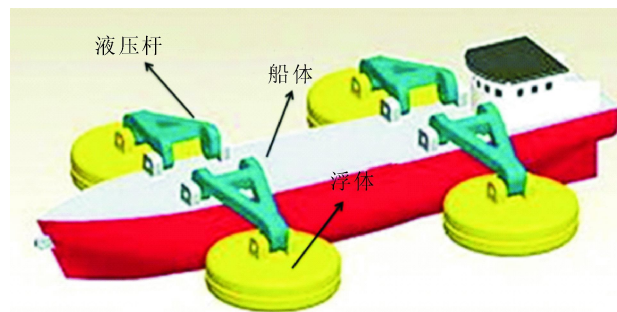


图8 海上发电船图

(下转第43页)

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.010

# 海上风力发电及相关技术

林 盛, 罗天怡

(福清海峡发电有限责任公司, 福建 福清 350309)

**摘要:** 围绕海上风力发电及其控制技术进行了探讨, 阐述了目前海上风电的状况及风力发电的优势, 分析了海上风力发电的技术, 梳理了海上风电机组的主要机型和控制特点, 旨在不断提高我国风力发电的技术水平, 提高风能的利用率。

**关键词:** 海上风力发电; 风力发电技术; 控制技术

中图分类号: TM614      文献标志码: B      文章编号: 1671-3354(2020)01-0036-02

## Current Situation and Technology of Offshore Wind Power Generation

LIN Sheng, LUO Tianyi

(Fuqing Haixia Power Generation Co., Ltd., Fuqing 350309, China)

**Abstract:** The current situation and specific advantages of the offshore wind power generation are introduced. Then, the offshore wind power generation technology is analyzed. Also, the major types and control characteristics of the offshore wind power generation unit are discussed. The purpose is to improve the technical level and utilization rate of wind power generation in China.

**Key words:** offshore wind power generation; wind power generation technology; control technology

海上风能不仅可以节约土地资源,同时也属于无公害能源,符合生态环保发展的理念,因此越来越被市场所接受和认可。近年来,我国海上风力发电产业也有了突飞猛进的发展,不仅体现在风力发电技术能力的提高,同时还体现在装备制造水平的更新升级上。本文围绕海上风力发电技术谈一下自己的一些思路和看法。

### 1 海上风电现状及优势

与陆上风力发电相比,从 2016 年起,我国海上风电规划和建设速度实现了明显的加快,而未来几年,建设数据将继续保持,根据能源局发布的《风电发展“十三五”规划》得知,下一阶段的风电建设目标是:到 2020 年全国海上风电开工建设达到 1 000 万 kW 的规模,争取累计并网容量达到 500 万 kW 以上。目前我国海上风电场的风机基础基本上实现了无过渡段单桩

基础技术的全覆盖,不仅大幅度降低了海上风电工程的成本,同时也促进了我国海上风电行业技术的进步。随着海上风电工程项目的建设 and 运营,海上风电的评价和审核速度也在不断提升。发展势头良好的一个主要原因就在于海上风电相比于陆上发电具有独特的如下优势<sup>[1-3]</sup>。

1) 海面上的风况在大多数时间比陆地风况要稳定,而且海上的风速随高度的变化较小,因此可以降低塔架高度,节省了成本。

2) 因为海上风湍流强度小,主导风向稳定,所以机组所承受的疲劳度低,可以相对使风机的使用寿命延长。

3) 离岸 10 km 的海上风速比沿岸陆上的风速大约高 25%,在同样发电机组的情况下,电量产出增加。另外由于海上环境在噪音方面不受限制,所以可以采用较高叶尖速比,这样就可以增加发电量,降低转矩,

收稿日期: 2019-10-30

作者简介: 林 盛,男,助理工程师,主要从事海上风电运维工作。

不仅提高了产能,同时也降低了由传动系统造成的成本。

4)海上风力发电可以与波浪能、温差能、盐能等其他海洋能源有效结合起来,构建海洋能源系统,为海洋资源的利用提供了更多的可能。

## 2 海上风力发电技术分析

1)通过结构力学的计算分析,需要得出各部分电机的受力和变化情况,然后对电机的结构进行合理的设计。在永磁同步发电机的质量、尺寸等方面进行优化,主要技术手段一个是对轴向长度和间隙的比值进行合理配置,另一个是在保证性能的基础上将过去的设备材质替换为更轻的材质。同时在运输与安装环节利用膜化结构来简化流程,提高安装效率。

2)在实现高叶尖速度比的技术上,目前大多采用大型的叶片来提高能力采集的能力。叶片的型号和材质对于发电机的整体质量和强度有着至关重要的作用。一些新型的高强度轻质材料不断填补市场的空白,比如环氧碳纤维树脂材料,不仅满足强度的要求,同时在质量上可以比传统的叶片质量降低1/3;高性能的环氧乙烯基酯树脂不仅可以达到环氧树脂的性能水平,同时实现了更低的生产 and 安装成本,同类降低10%。

3)在冷却系统的设计上,为了防止因温度引起的电机结构变形,永久磁体去磁,通常选择强制风冷或是液冷的形式来降温冷却,但是由于风冷过程需要极大的风量,同时海风中含无机盐等物质,容易引发风机设备的腐蚀,所以在冷却技术上,采用导热性能好的液体冷却方式。冷却液的性能与发电机的工作效率及寿命有着密切的关系,对此,环保无毒的循环冷却液被广泛应用,在电导率控制、酸碱控制、金属保护、氟离子消除等方面实现了较好的效果。

4)输电并网技术的发展也随着海上风力发电规模的扩大而加快。星型连接的风机可以减少变压器的数量,但是这种技术的稳定性比串联型连接风机的技术稍差,同时需要多重集电平台来支持,因此施工的工作量会加大。目前在海上风力发电项目中大多采用串联型的连接技术,在风机连接时,对海底电缆的设计和布置同时予以考虑,尽量将变电站建设的基点坐标靠近风场的几何中心,降低成本,提高输电效率。

## 3 海上风电机组的主要机型及其控制特点

1)风电机组的机型。过去,我国海上风电机组主要向国外厂家采购,如丹麦 Bonus 公司的 2.3 MW 机组、美国 GE 公司的 3.6 MW 机组、德国 Repower 公司的 5 MW 机组。目前,我国自主研发的大型海上风电机组也不断问世。风电机组的单机容量在 3 MW 和 6 MW 之间,同时很多核心的零部件如发电机、变流器、叶片等也已经能够同步生产。其中,2.5 MW 到 4 MW 之间的海上风电机组技术已经比较成熟并得到制造生产和推广应用,在 5 MW 到 6.5 MW 之间的风电机组制造技术上已经初步具备,但是仍处于试验阶段,在大范围应用方面还需进一步完善。比如,中国海装研制的 5 MW 海上风电机组,包括 H128 型、H151 型、H171 型等多种型号已经得到应用和推广。

2)风电机组的控制。风电机组是复杂的动态系统,其控制技术的优化主要关键点在于:一方面要追求风能捕获的最大化;另一方面要同时兼顾到风能最大转换效率与风电机组动态负荷的平衡。海上风电机组主要从以下两个方面来控制:首先,对机组的每个设备都配备传感器,远程监控系统,实现在线监测和实时诊断,避免局部疲劳载荷现象引发事故;其次,综合考虑各种环境因素的动态变化,如低温、风少、台风、潮湿、盐腐蚀、雷击等因素,结合在线监测,预先做出反应,避免故障发生,实现智能化控制。

## 4 结 语

英国能源机构对海上风电能源做过研究,未来 12 年内,海上风电会成为全球能源供给结构的重要支柱。在新的能源形势下,风力发电产业将迎来新的发展机遇,同时风力发电技术和设备也将进入一个快速发展时期。

### 参考文献:

- [1]吴佳梁,李成峰.海上风力发电技术[M].北京:化学工业出版社,2010
- [2]高坤,李春,高伟,等.新型海上风力发电及其关键技术研究[J].能源研究与信息,2010,26(2):111-116
- [3]宋海辉.风力发电技术及工程[M].北京:中国水利水电出版社,2009



DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.011

# 海上漂浮式风机发展调研及分析

陈明亮, 杨朋飞, 常璐, 徐洋洋

(华锐风电科技(集团)股份有限公司, 北京 100872)

**摘要:** 经调研全球各地海上漂浮式风机的发展历史、现状, 总结分析了现有不同漂浮式风机基础平台型式的结构特点及相关特性, 对已经开发、正在开发和将要开发的漂浮式风电场进行了汇总分析, 通过技术进步和削减建造成本提高竞争力, 加强浮式风机领域的技术研究, 以期在漂浮式技术方面跻身世界前列。

**关键词:** 深远海; 风力发电机组; 海上风电; 漂浮式风机

**中图分类号:** TK83      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-3354(2020)01-0038-06

## Development of Offshore Floating Wind Turbine Unit

CHEN Mingliang, YANG Pengfei, CHANG Lu, XU Yangyang

(Sinovel Wind Group Co., Ltd., Beijing 100872, China)

**Abstract:** The development history and current situation of offshore floating wind turbine around the world are investigated. The structural characteristics of different foundation platforms of the floating wind turbine unit are analyzed. Also, floating wind farms that have been developed, being developed and will be developed are summarized. It shows that we should strengthen the research work on floating wind turbine and improve the competitiveness through technical progress and cost reduction, so as to get a leading position of the floating wind power generation in the world.

**Key words:** deep sea; wind turbine unit; offshore wind power; floating wind turbine

上世纪70年代,美国马萨诸塞大学教授 Heronemus 提出海上大型漂浮式风力机概念;2009年挪威石油公司在挪威海岸附近的北海220 m水深环境中试运行第一台漂浮式机组 Hywind;2017年第一个海上风电场 Hywindii 在英国诞生,实现了浮式风机商业化的突破。漂浮式风电走过近50年的历程,这期间,漂浮式风机早已走出概念设计和实验室研究的阶段,出现了许多各式各样的漂浮式风机。漂浮式风电场示范项目和风电场近几年也不断涌现,随着海上漂浮式技术的快速成熟,相信漂浮式海上风电将很快实现大规模、商业化的目标。

目前,世界上建成的海上风电场绝大多数为近海风电场,相对于传统的海床固定式海上风电机组,漂浮式海上风电机组可以安装到具有强风的远洋深处,因此风能利用大幅提升<sup>[1]</sup>。全球80%的海上风资源位

于水深超过60 m的海域,这对固定式基础风机是巨大的挑战,海上风电势必会向深远海发展。深远海范围更广、风能资源更丰富、风速更稳定,且不会与海上渔场、航线等发生冲突,发展海上风电具有得天独厚的优势<sup>[2]</sup>。

据欧洲风能协会预测,到2030年底全球的漂浮式海上风电装机容量将达到15 000 MW;英国碳信托(Carbon Trust)则直接给出2021年前将会建设的260 MW漂浮式海上风电项目。DNV GL指出,到2050年,12%的全球主要能源供应将来自风能,其中20%来自离岸风电。到2050年,离岸风电将较2016年增长85倍。虽然大多数的漂浮式海上风电技术处于计划样机工程、实验室研发或概念设计阶段,仍旧面临着证明技术可靠性和经济可行性的风险和压力,但海上风电向深远海发展已是必然趋势<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2019-10-11

作者简介:陈明亮,男,工程师,主要从事风电科技研究工作。

基金项目:上海市科学技术委员会项目“深远海半潜式基础的漂浮式风机一体化仿真研究”(项目(课题)编号:18DZ1202305)。

## 1 漂浮式风机主要结构形式及特点

深远海风电通常水深超过 50 m,与近海相比,深海环境更加恶劣,对风机基础、海底电缆、海上平台集成等技术无疑提出了更严苛的要求<sup>[4]</sup>。在这样的海域,以固定基础的方式建设风电场,不具备经济性优势。与近海风电场相比,深海风力发电主要区别和难点更在于机组基础型式<sup>[5]</sup>。因此,要走向风大浪高的深远海,必须改变技术路径。

漂浮式风机的分类主要依据基础平台的样式。浮式基础结构组成要素主要包括锚链、锚、浮箱。每种要素的不同形式能组合成很多种浮式基础形式,相关统计表明,当前全世界有 30 多种浮式风机概念,基本分为以下几类:半潜形式基础 (semi)、Spar 形式基础 (Spar)、张力腿式基础 (TLP)、驳船式基础 (Barge) 以及混合概念式基础<sup>[6-7]</sup>,外观形状如图 1。

Semi 半潜式平台主要利用不同浮筒的吃水体积来获得复原力矩以维持平台的稳定性。Spar 平台主要

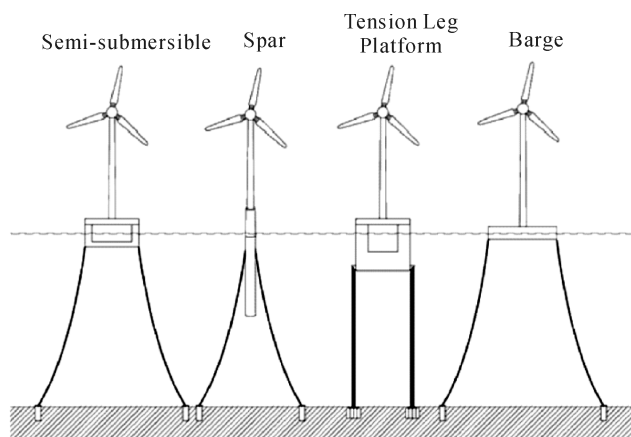


图 1 常见基础型式图

是通过压载舱使整个系统的重心低至浮心之下来保证整个风机在水中的稳定,再通过悬链线来保持整个风机的位置。张力腿式钻井平台 (TLP) 是利用绷紧状态下的锚索产生的拉力与平台的剩余浮力相平衡的钻井平台,通过系泊缆的张力获得稳定性。Barge 平台靠调节吃水线来维持平台的稳定,力学方面和半潜平台有相似之处<sup>[8-9]</sup>。它们的动力及安装等特性如表 1。

表 1 常见漂浮式基础特性表

	Semi	Spar	TLP	Barge
优势	稳定系数好,运动性能好,电缆适应性好	无条件稳性,运动性能好,对电缆适应性好	运动性能好,电缆适应性好	稳定性好,安装方便
劣势	设计具有挑战,建造复杂	安装不方便	设计难度大,安装不方便	运动性能差,复杂系泊系统设计
典型固有周期	>20 s	>20 s	2~5 s	5~20 s

目前,全球已有的漂浮式基础如表 2,具体样式特点见图 2~图 13。

表 2 已有漂浮式基础型式统计表

基础平台名称	类型	开发公司
Hywind spar 单柱式	Spar	Technip
Naval Energies 的漂浮式基础	半潜	Naval Energies
WindFloat 漂浮式基础	半潜	PPI
Ideol 的阻尼池漂浮式基础	半潜	Ideol
SBM 的漂浮式基础	TLP	SBM
Cobra 的 Semi-spar (半潜单柱式) 基础	Semi-spar	Cobra 公司
SATH 旋转双体船	驳船	saitec
P80 混合动力漂浮平台	混合	未知
SOT Tetraspar	混合	SOT
Hexicon 的双风机半潜式基础	半潜	Hexicon
Nautilus	半潜	Nautilus

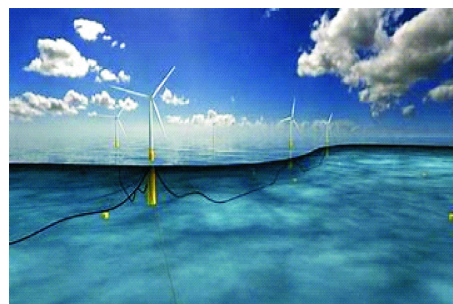


图 2 Hywind spar 单柱式基础图



图 3 WindFloat 漂浮式基础图

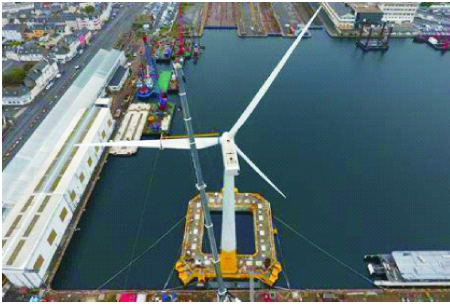


图 4 Ideol 的阻尼池漂浮式基础图



图 5 Hywind spar 单柱式基础图



图 6 Hexicon 的双风机半潜式基础图



图 7 Naval Energies 的漂浮式基础图

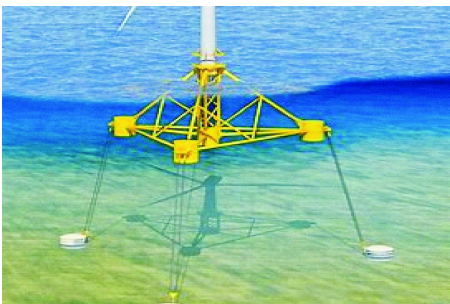


图 8 SBM 的漂浮式基础图



图 9 Nautilus 图

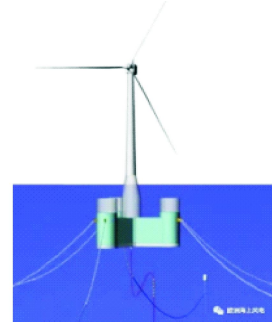


图 10 Cobra 的 Semi-spar(半潜单柱式)基础图



图 11 SATH 基础图

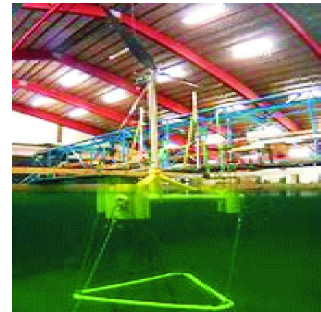


图 12 SOT Tetrospar 基础图



图 13 P80 基础图

## 2 全球漂浮式风机发展现状

目前,除了由挪威国家石油公司开发的 Hywind 单柱式漂浮技术已实现小规模商业化之外,即将开工建设的小规模预商业化项目的还包括由 PPI 开发的 Windfloat 半潜式漂浮基础,由 Ideol 开发的阻尼池半潜

式漂浮基础等。2021 年前估计约有 5~6 种基础概念设计跨入商业化阶段。

### 2.1 欧洲漂浮式风机

在全球已建成和正在开发的漂浮式项目中,欧洲占据了 3/4 以上。表 3 是已经投产和即将投产的漂浮式风电场项目统计。

表 3 欧洲漂浮式风电场装机统计表

项目名称	装机容量/单机容量	基础形式	国家地区	MW (预计)投产时间
Hywind scotland	30/6	Spar(单柱式)	英国	2017
Windfloat Atlantic	25/8	Semi(半潜)	葡萄牙	2019
Flocan 5 Canary	25/5~8	Semi-spar(半潜单柱式)	西班牙	2020
Nautilus	5/5	Semi(半潜)	西班牙	2020
SeaTwirls2(垂直轴)	1/1	未知	瑞典	2020
Kincardine	48/8	Semi/Semi-spar	英国	2020
Forthwind Project(两叶片)	12	双体船	英国	2020
EFGL	24/6	Semi(半潜)	法国	2021
Groix-Belle-Ile	24/6	Semi(半潜)	法国	2021
FLG Wind Farm	24/8	TLP	法国	2021
EolMed	25/6.2	Semi(半潜)(Ideol 阻尼池)	法国	2021
Katanes Floating Energy Part-Array	32/5~8(风能波浪能)	未知	英国	2022
Hywind Tampen	88/8	Spar(单柱式)	挪威	2022
Rennesoy-Marine Energy Test Centre	3.6/3.6	Semi-spar-tlp	挪威	2019 样机
Dounreay Tr	10/5	Semi(单基础两风机)	英国	核准

英国全球首个商业化运行的大型海上漂浮式风电项目“海温德苏格兰漂浮式风 30 达式 MW 电场”已在英国海域投入运行。苏格兰金卡丁 50MW 漂浮式海上风电项目提供 5 台 9.5 MW V164 风机,西班牙合资公司 Navantia-Windar 正在为金卡丁项目制造漂浮式基础,其设计概念与葡萄牙 WindFloat 24 MW 漂浮式项目基本类似。Dounreay Tri 将采用 Hexicon 概念,单个结构支撑 2 台风机,风机由中国船舶重工集团海装风电股份有限公司提供,项目处于实施中。Atlantis 项目预计采用 Ideol 的 damping-pool,先做样机,再做商业化,目前项目处于样机建设阶段。

目前,西班牙安装了 1 台歌美飒 5 MW 的海上风机;第 2 台则是 EnerOcean 正在开发的漂浮式小型 2 叶片样机,已在大加那利岛附近的加那利群岛海洋平台测试场(PLOCAN)安装。Flocan 5 Canary 约在 2020 年投产 25 MW 漂浮式风电场,基础将采用 semi-spar 型式。

法国目前也计划建造 4 座 24 MW 漂浮式示范项目,预计将在 2020 年至 2021 年之间安装。一个项目位于大西洋,其余三个在地中海,它们分别是:由中广核参与开发的 Groix Belle Ile,安装 GE 6 MW 风机,采用 Naval Energies 的漂浮式基础;由 ENGIE、EDPR 等

开发的 Golfe du Lion, 安装 GE 6 MW 风机, 采用 PPI 的 WindFloat 漂浮式基础; 由 Quadran 等开发的 EolMed, 安装 Senvion 6.2 MW 风机, 采用 Ideol 的阻尼池漂浮式基础; 由 EDF 等开发的 Provence Grand Large, 安装西门子 8 MW 风机, 采用 SBM 的漂浮式基础。

葡萄牙 WindFloat Atlantic 漂浮式海上风电项目, 全球首个半潜漂浮式海上风电商用项目正在建设中, 基础采用半潜式基础。挪威在 2009 年部署了挪威石油的 Hywind I 样机, 瑞典在 2015 年部署了 SeaTwirl 样机, 随后两国的动作不大。荷兰 SBM Offshore 公司设计的漂浮式风机基础, 连同其设计的系泊系统和商业化海上风机, 一起获得了美国船级社 (ABS) 的原则性批准。该基础是法国 Provence Grand Large 项目的基础型式。

西班牙漂浮式技术公司 X1 Wind 获得 400 万欧元资金支持, 将其创新的漂浮式设计 PivotBuoy 推向市场, 希望这项技术能在全世界广泛应用。X1 Wind 将领导一个由 9 个合作伙伴组成的联盟, 其中包括 EDP、ESM、WavEC、IntecSeA、丹麦技术大学、DNV GL 和 Degima, 在加那利群岛测试站点海洋平台 PLOCAN 进行为期三年的试验。这笔推广资金主要来源于欧盟委员会的“Horizon 2020”项目, 将用于确保在 2020 年对这种新型漂浮式模型进行测试, 模型大约为实物的 1/3 大小。其样式如图 14。



图 14 X1 wind 示意图

## 2.2 亚洲漂浮式风机

中国大陆在 2022 年之前可能有至少 3 个浮式风机项目, 它们分别在上海、福建、汕头, 但不确定性较大。Eolfi 和 Cobra 计划为台湾建设 5 个 500 MW 漂浮式项目, 包括计划在 2022 年投产的 W1N 海上风电场, 部署 Ideol damping - pool 基础平台的可行性较大。

韩国国家石油公司在今年早些时候也启动其漂浮式海上风电业务, 计划在其已有的东海油气平台附近建设 200 MW 漂浮式项目; 另外, 蔚山市也与多家国内

外开发商签订了开拓漂浮式海上风电项目机会的协议。

日本 2014 年投产第一个漂浮式海上风电场 (福岛 14 MW) 后, 福岛先锋项目共安装了 3 台形式不一的漂浮式风机和 1 座浮式变电站, 包括 1 台 2 MW、1 台 5 MW 和 1 台 7 MW 容量风机, 总容量 14 MW, 是当时世界上最大的漂浮式海上试验风场。其三种基础形式包括 2 MW 紧凑型半潜式基础 Compact Semi - Sub, 5 MW 先进柱体式平台基础和 7 MW V 型半潜式基础, 如图 15 所示。



图 15 福岛项四种基础型式图

近期, 日本新能源和工业技术发展组织 NEDO 开发 Hibiki 漂浮式风电项目, 该示范项目采用法国 Ideol 阻尼池漂浮式基础, 顶部安装 1 台德国 Aerodyn 3.2 MW 2 叶片风机, 如图 16。Ideol 和 Acacia 正计划在 2023 年投产大型商用漂浮式海上风电项目, 与此同时 PPI 也与三井造船株式会社合作开发该领域的项目。



图 16 日本 Hibiki 项目图

## 2.3 美洲、澳洲、非洲漂浮式风电开发情况

美国葡电新能源 (EDPR) 准备在加利福尼亚附近海域开发一个漂浮式海上风电项目; 在夏威夷, Alpha Wind 也计划开发 2 个 400 MW 的漂浮式海上风电场, 并将采用 8 MW 风机及 Windfloat 半潜式基础。

澳大利亚政府刚刚有意开发“南部之星”近海风电场, 深远海风电场的开发还没有计划。

非洲各国目前暂无开发漂浮式风机计划。

### 3 结语

1)第一个商业化运行的漂浮式风电场苏格兰海温德风力发电场的运行经验将为后续漂浮式海上风电项目提供重要的参考价值,将推动全球漂浮式海上风电快速发展。

2)一些漂浮式基础平台技术应用进入成熟阶段,如 Hywind - spar、Windfloat 和 Ideol damping - pool,并将在多个漂浮式风电场中应用。

3)目前欧洲是全球浮式风机发展最迅速,漂浮式海上风电技术最为领先地区。

4)欧洲许多漂浮式风机已经进入商业化运营阶段;亚洲的日本进入样机示范阶段,其他地区还在计划当中;美国漂浮式风电场的建设同样在计划当中;全球其他地区暂无计划。

5)全球漂浮式风机的技术的发展与当地的经济发达程度密切相关;当地经济水平同样影响着漂浮式风电场的发展计划,这主要是目前漂浮式风电场高昂的建设成本所致。由于深远海漂浮式风机现在开发成本巨大,所以对于经济比较落后的地区,对漂浮式风电场的开发还是相当谨慎。海上漂浮风电场面临的真正挑战不是机组规模,而是通过技术进步和削减建造成本来提高竞争力,促进漂浮式风机的发展。

6)现阶段,我国的海上风电规划大都位于水深 < 50 m 的区域内,个别项目已经达到了固定式基础

(上接第 35 页)

### 3 结语

全球约 70% 的面积是海洋,海洋能源十分丰富。据有关统计,全球储存着超过 25 亿 kW 的波浪能。在传统能源日益耗尽的现状下,波浪能的开发具有十分巨大意义和前景。当下波浪能发电技术相对国外而言还不够成熟,发电效率普遍不够高,装置对各种海况的适应能力也较低。波浪能如果开发得当,不仅可以缓解当下化石能源日益减少的窘况,还具有巨大的战略意义及经济效益。

#### 参考文献:

[1]王灏,王广大,赵尚.我国波浪能发电现状及未来发展探究[J].现代商贸工业,2018,39(7):188-189

和漂浮式基础经济性的临界点,未来海上风电必将向更深更远的海域发展。现在,中国在浮式风机领域的技术水平和研发能力还较低,因此漂浮式技术将必须攻克。我国科技部和地方政府目前也在对漂浮式技术方面的课题项目给予支持和资助,以期在漂浮式技术方面跻身世界前列。

#### 参考文献:

- [1]时蓓玲.国外漂浮式风电现状对我国发展深远海域风电的启示[J].太阳能,2018(6):26-30
- [2]俞晓峰,李子林,施岐璘.浅谈深远海域风电发展前景[J].风能,2018(6):31-34
- [3]俞晓峰,唐征歧,周彬,等.海上风电发展及其技术研究概述[J].风能,2018(6):11-16
- [4]俞晓峰,王倩.深远海域海上风电工程风险和不确定因素研究[J].风能,2018(2):52-55
- [5]俞晓峰,李辉.适用于过渡水深的漂浮式风电机组的研究[J].太阳能,2018(6):61-69
- [6]张开华,陈云巧.深远海域漂浮式海上风电场基础形式综述[J].太阳能,2018(6):17-18
- [7]段金辉,李峰,王景全,等.漂浮式风电场的基础形式和发展趋势[J].中国工程科学,2011(11):66-70
- [8]高伟,李春,叶舟.深海漂浮式风电机组研究及最新进展[J].中国工程科学,2014,16(2):79-87
- [9]高伟,李春,刘全.深海漂浮式风电机组的概念设计与气动-水动力耦合特性评述[J].能源研究与信息,2011,27(3):168-173

- [2]胡珊,何宏舟.振荡浮子式波浪能采集装置研究概述[J].能源与环境,2016(4):6-8
- [3]赵伟国,刘玉田,王伟胜.海洋可再生能源发电现状与发展趋势[J].智能电网,2015,3(6):493-499
- [4]吕银铃.我国海洋能商业化应用取得突破[J].能源研究与利用,2017(5):8-9
- [5]刘延俊,贾瑞,张健.波浪能发电技术的研究现状与发展前景[J].海洋技术学报,2016,35(5):100-104
- [6]李思超,王世明,胡海鹏,等.海洋能发电装置的分析 and 展望[J].科技视界,2017(20):109-111
- [7]胡聪,毛海英,尤再进,等.中国海域波浪能资源分布及波浪能发电装置适用性研究[J].海洋科学,2018,42(3):142-148
- [8]张国贤.海蛇式波浪发电装置[J].流体传动与控制,2015(4):61-63

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.012

# 高心墙堆石坝蓄水变形和裂缝机理分析

柯 虎

(国家能源大渡河公司库坝管理中心,四川 乐山 614900)

**摘要:**我国高堆石坝建设正处于高潮期,其中高心墙堆石坝的坝高已达300 m级。结合实际监测资料的坝体变形分析对大坝变形机理的研究和工程设计具有重要的指导意义。结合某电站大坝的实际监测资料,分析初蓄水坝体各部位变形的变化趋势,并就此得出初蓄水对坝体变形的影响区域,分析了各部位变形的影响机理和坝体裂缝发生的机理及发生过程,并利用有限元方法进行了蓄水变形及裂缝的验证。

**关键词:**高心墙堆石坝;蓄水变形;变形分析;裂缝分析

中图分类号:TV641.3

文献标志码:A

文章编号:1671-3354(2020)01-0044-08

## Analysis of the Impoundment Deformation and Cracking Mechanism of a High Core Wall Rockfill Dam

KE Hu

(Reservoir and Dam Management Center, China Energy Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Leshan 614900, China)

**Abstract:** The construction of high rockfill dams is booming in China, and the height of core wall rockfill dams has reached the level of 300 m. Deformation analysis of the dam body based on practical monitoring data is of great significance for the study of the dam deformation mechanism and the engineering design. Based on the in-situ measurement data of a core wall rockfill dam, the deformation trends of different part of the dam body during the initial impoundment period are analyzed and the effect of the initial impoundment is determined. Then, the crack initiation and development mechanism of the dam body is summarized. At last, the impoundment deformation and the cracking mechanism are verified with finite element analysis.

**Key words:** high core wall rockfill dam; impoundment deformation; deformation analysis; cracking analysis

土石坝由于具有可充分利用当地天然材料、能适应不同的地质条件、施工方法简便、抗震性能好等优点,而成为世界坝工建设中应用最广泛、发展最快的一种坝型。土石坝的高度已由过去的几十米发展到100 m级、200 m级,乃至300 m级<sup>[1]</sup>。高土石坝主要包括高心墙堆石坝和高面板堆石坝两种类型。表1所示为我国已建、在建和拟建的200 m以上的高土石坝统计。可以发现,在建和拟建的300 m级高土石坝均为心墙堆石坝<sup>[2]</sup>。

心墙堆石坝变形观测资料表明,在蓄水过程中,上游坝壳在浮力作用下并未发生上台现象,而是出现了下沉,这是由于上游堆石料湿化变形的存在,这也使得

上游堆石区应力状态更加复杂,研究难度较面板坝堆石体更加复杂。初蓄水由于湿化变形的影响产生坝体不均匀变形,从而产生坝体裂缝的事例常有发生,如墨西哥148 m高的Infinele心墙堆石坝<sup>[3]</sup>、土耳其169 m高的Ataturk心墙堆石坝<sup>[4]</sup>,国内154 m高的小浪底斜心墙坝<sup>[5]</sup>、186 m高的瀑布沟心墙堆石坝<sup>[6]</sup>和79 m高的观音岩混合坝<sup>[7]</sup>等。因此,分析心墙堆石坝初蓄水变形特性和裂缝产生的变形机理具有重要的意义。

本文结合某电站大坝的实际监测资料,对其初蓄水坝体各部位变形的变化趋势和蓄水对变形的影响进行了分析,并利用有限元方法进行了蓄水变形及裂缝的验证。

收稿日期:2019-10-08

作者简介:柯 虎,男,工程师,主要从事大坝安全管理方面的工作。

表1 中国已建、在建和拟建坝高大于200 m的高土石坝统计表

序号	工程名称	最大坝高/m	主坝类型	备注
1	水布垭	233	面板堆石坝	已建
2	猴子岩	223.5	面板堆石坝	已建
3	糯扎渡	261.5	心墙堆石坝	已建
4	江坪河	219	面板堆石坝	在建
5	长河坝	241	心墙堆石坝	在建
6	上寨	253	心墙堆石坝	在建
7	两河口	295	心墙堆石坝	在建
8	双江口	314	心墙堆石坝	在建
9	茨哈峡	254	面板堆石坝	拟建
10	玛尔挡	211	面板堆石坝	拟建
11	古水	240	面板堆石坝	拟建
12	班达	222	面板堆石坝	拟建
13	岗托	229	面板堆石坝	拟建
14	叶巴滩	240	面板堆石坝	拟建
15	拉哇	234	面板堆石坝	拟建
16	马吉	270	面板堆石坝	拟建
17	同卡	205	面板堆石坝	拟建
18	怒江桥	240	面板堆石坝	拟建
19	罗拉	243	面板堆石坝	拟建
20	如美	315	心墙堆石坝	拟建
21	日冕	346	心墙堆石坝	拟建
22	其宗	356	心墙堆石坝	拟建

## 1 工程概况与监测布置

### 1.1 工程概况

该水电站是以发电为主,兼有防洪、拦沙等综合效益的特大型水利水电枢纽工程。水库死水位 790.0 m,正常蓄水 850.0 m,总库容 53.9 亿  $\text{m}^3$ ,调洪库容 10.56 亿  $\text{m}^3$ ,电站装机容量 3 600 MW,多年平均发电量 147.9 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。枢纽工程拦河大坝为砾石土心墙堆石坝,大坝断面分为 5 个区域,即砾石土心墙、反滤层、过渡层、主堆石区和下游坝体内部的次堆石区。坝顶高程 856.0 m,最大坝高 186.0 m,坝顶宽 14 m,长 540.5 m。大坝坝基防渗采用防渗墙与帷幕灌浆相结合的措施,上下游各设一道防渗墙,两墙间距 14.0 m,墙厚 1.2 m。砾石土心墙顶部高程 854.0 m,顶宽 4 m,上下游侧坡度均为 1:0.25,底部高程 670.0 m,底宽 96.0 m,心墙底部、心墙与岸坡接触带、防渗墙顶和混凝土廊道周围设高塑性粘土。心墙上下游两侧各设两层反滤层,上游宽 4.0 m,下游宽 6.0 m。反滤层与坝壳堆石间设过渡层,过渡层与坝壳堆石接触面坡度为 1:0.4。上游坝坡 795.0 m 高程处设一宽 5.0 m 的马道,马道以上坝坡坡度为 1:2.00,以下为 1:2.25。下游坝坡坡度均为 1:1.80,表面设上坝之字形马道。大坝坝轴线横剖面图和典型剖面图如图 1 和图 2 所示。

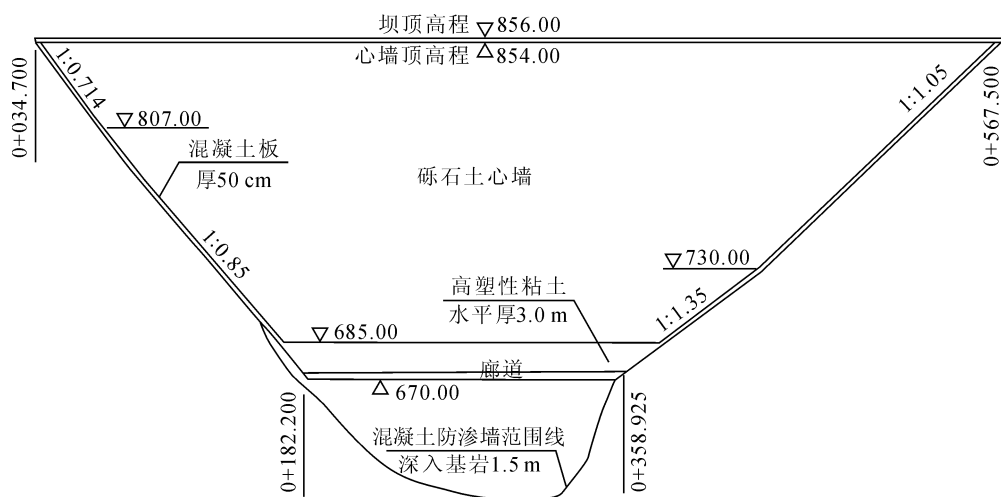


图1 坝轴线横剖面图

工程于 2004-03-30 日正式开工,2005 年 11 月下旬截流,2006 年 3 月开始填筑上下游堆石,2007 年 4 月开始全断面施工,2009-09-20 日填筑至坝顶。2009-11-01 日至 2009-12-13 日首次蓄水至死水位 790.0 m,2010-05-08 日至 2010-10-13 日再次

蓄水至正常蓄水位 850.0 m。水库于 2010-08-26 日上午蓄水至 842.2 m 左右时,在坝顶处发现了纵向裂缝,裂缝位于坝轴线下游约 5.5~6.0 m,基本平行于坝轴线,裂缝长约 230 m,最大缝宽约 5 cm,通过探坑检查,裂缝深度约 1.0~2.5 m。



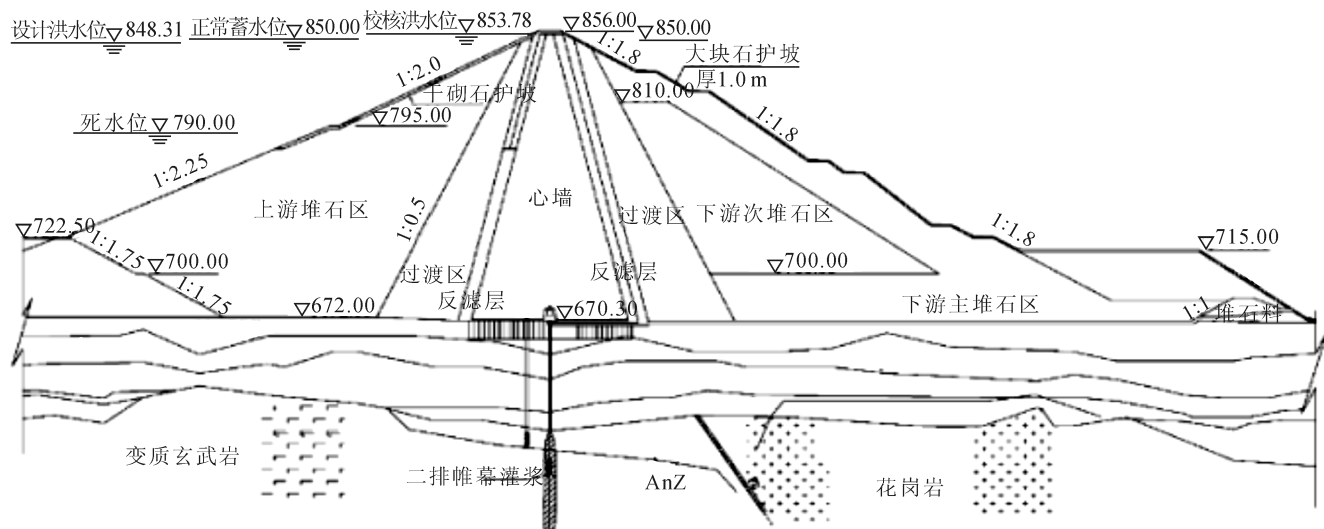


图2 典型剖面图

### 1.2 变形监测布置

大坝变形监测主要包括大坝表面变形监测和坝体内部变形监测。坝体表面布设7条平行于坝轴线的监测系统点,分别位于上游马道795.0 m高程处、坝顶上游侧距坝轴5.0 m处、坝顶轴线上、坝顶下游侧距坝轴5.0 m处和下游坝面高程806.0 m、756.0 m和

731.0 m处,共104个测点。坝体内部在4个断面上布设了监测系统,桩号分别为0+128.0 m、0+240.0 m、0+310.0 m和0+431.0 m,各断面除了在心墙轴线布设了沉降仪和测斜管之外,还分别在806.0 m、758.0 m和731.0 m高程的下游反滤层、下游过渡层和堆石体中布设水平位移计和水管沉降仪,其中桩号0+240.0 m断面的监测布置图如图3所示。

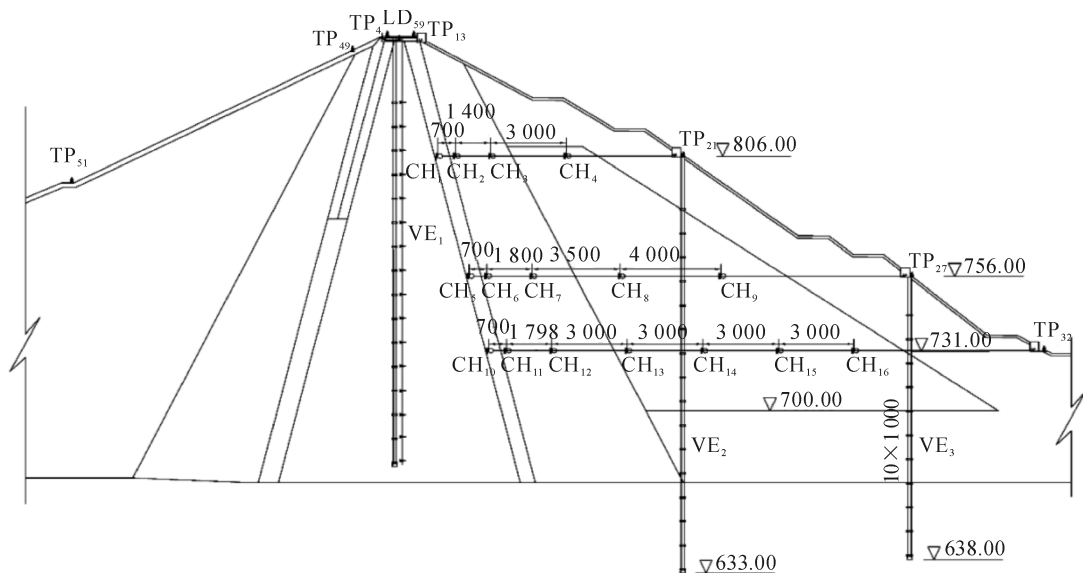


图3 0+240断面监测布置图

## 2 变形监测成果整理和分析

大坝在初蓄水时坝顶处产生了平行于坝轴线的纵向裂缝,产生此种现象的原因主要为坝壳的沉陷和水平位移过大所致<sup>[8]</sup>。为详细分析初蓄水时坝体沉降和水平位移的变化趋势,本文将对桩号0+240.0 m断面的监测位移进行分析。

### 2.1 心墙沉降

图4所示为心墙沉降变化过程,初期蓄水至死水位过程中,心墙沉降发生了明显的突变增量;初期蓄水至二期蓄水之间,心墙沉降比较平缓;二期水位由死水位蓄水至正常水位过程中,心墙沉降亦产生了明显的加快趋势;在后续水位升降的过程中,心墙沉降无明显波动。从图4可以看出初蓄水对心墙的沉降影响表现为从底部到坝顶逐渐增强。

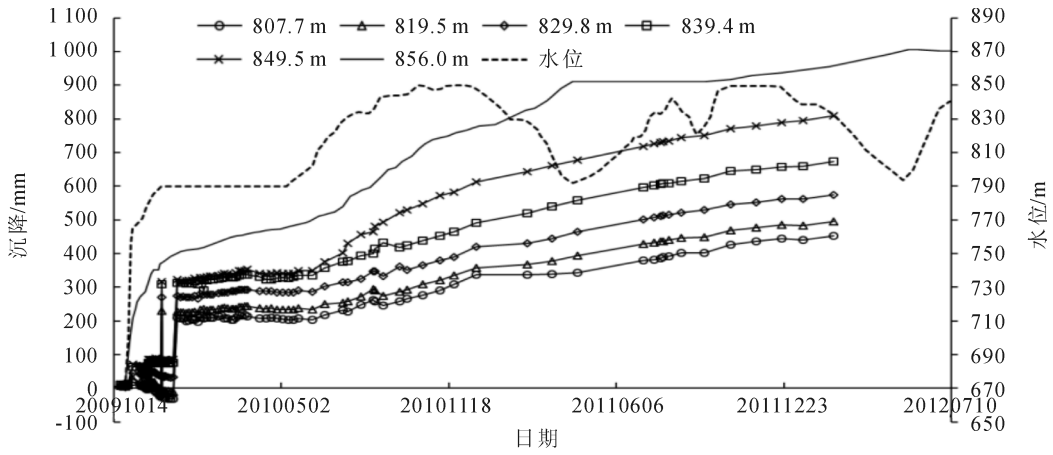
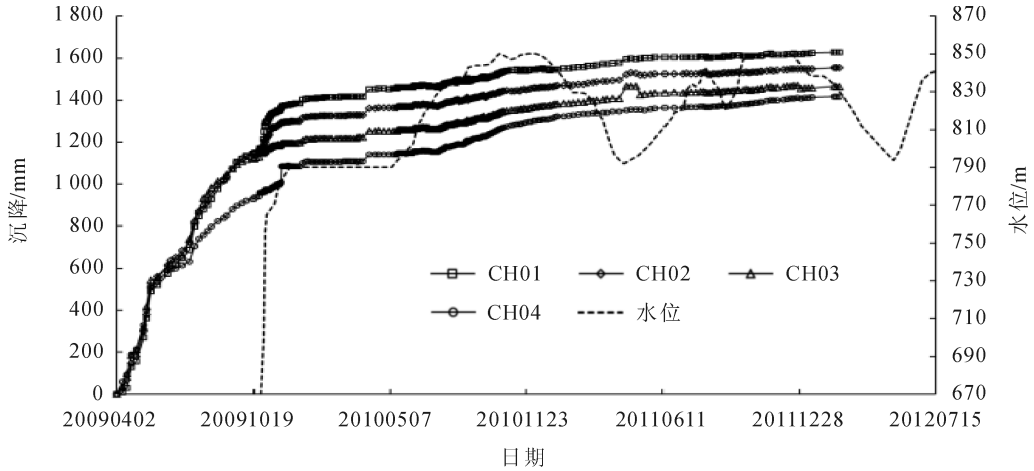


图 4 心墙沉降图

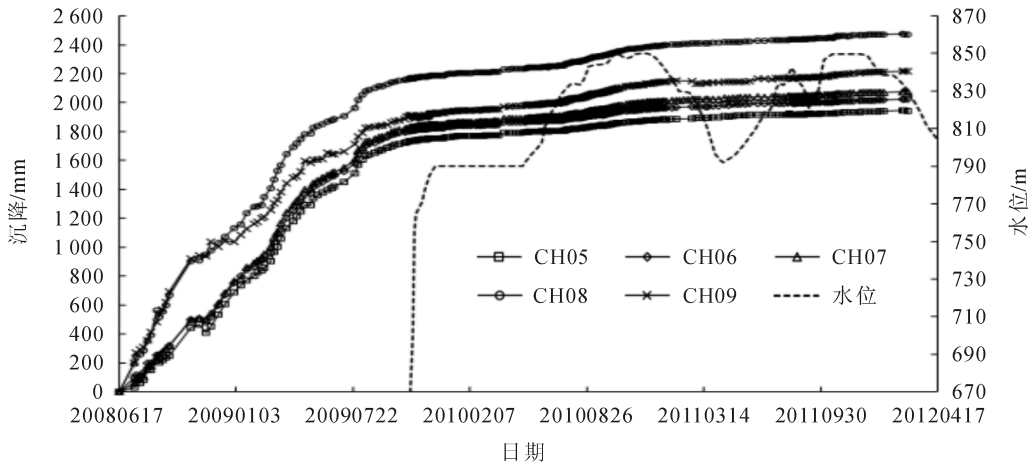
### 2.2 下游堆石体沉降

图 5 所示为下游堆石区沉降变化过程,初期蓄水至死水位过程中,806.0 m 高程处下游反滤区(CH01)和过渡区(CH02)的沉降有突变增量,而堆石区(CH03,CH04)则没有,沉降增量由心墙下游面向下游

坝坡呈递减趋势;二期水位由死水位蓄水至正常水位过程中,沉降无明显变化;756.0 m 高程处沉降在初期和二期蓄水中都无明显变形。可见初蓄水对下游堆石区沉降的影响从坝顶往下和从心墙处往下游侧都呈减弱趋势。



(a)806.0 m 高程



(b)756.0 m 高程

图 5 下游堆石体沉降图

## 2.3 坝体表面变形

图6(a)所示为坝体表面沉降变化过程,初期蓄水至死水位过程中,上游马道及坝顶处沉降均发生明显的突变增量,且坝顶上游侧、坝轴线、坝顶下游侧的沉降增量差异不明显;二期水位由死水位蓄水至正常水位过程中,坝顶上游侧和坝轴线上的沉降亦产生了明显的加快趋势,而上游马道处和坝顶下游侧沉降无明显突变;在后续水位升降的过程中,上游马道和坝顶处沉降无明显波动,坝顶上下游侧沉降变化协调发展。

图6(b)所示为坝体表面水平位移变化过程,初期

蓄水至死水位过程中,上游马道及坝顶处水平位移均发生明显的突变增量,且水平位移增量与沉降处于同一量级,上游马道处发生向下游方向的水平位移增量,而坝顶处则发生向上游向的水平位移,同时,坝顶下游边的水平位移增量大于坝顶上游侧;初期蓄水至二期蓄水之间,上游马道处、坝顶处水平位移变化比较平缓;二期蓄水和后续水位升降过程中坝顶处的水平位移亦随着变化,基本表现为水位上升坝顶处发生向下游向的水平位移,水位下降则水平位移向上游。

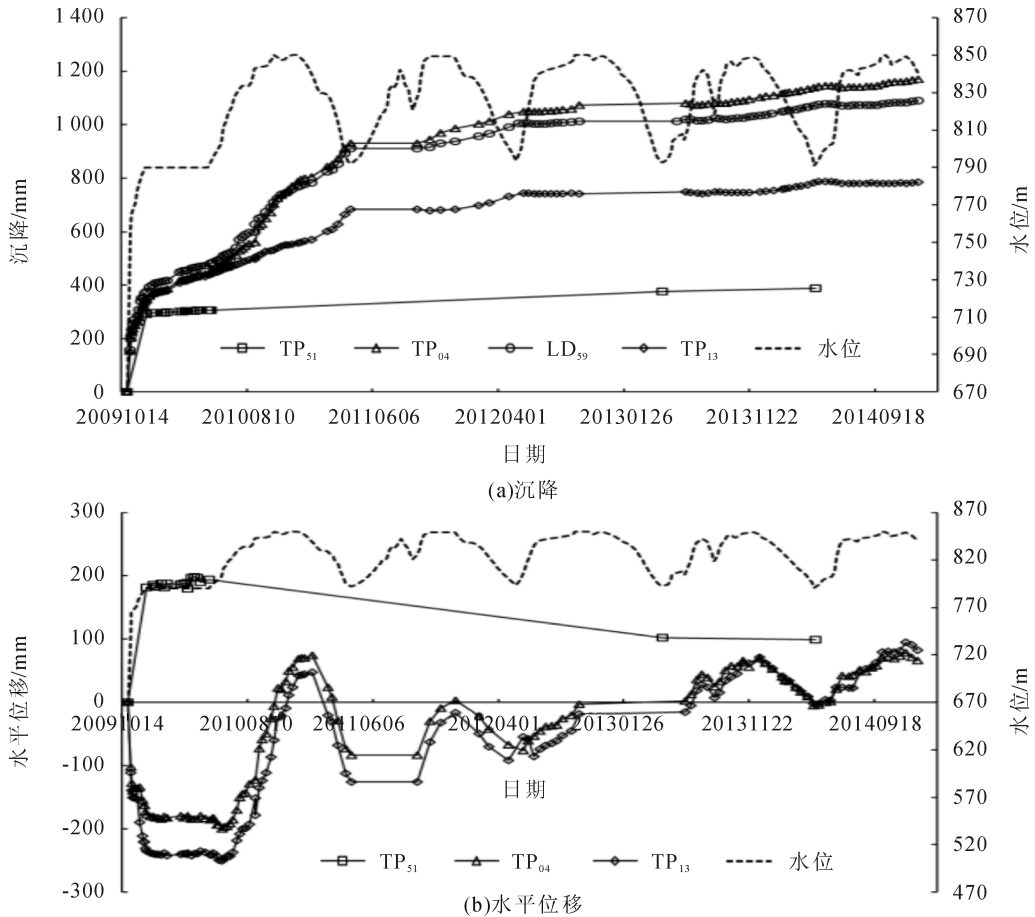


图6 坝体表面变形图

综上所述,该大坝在运行期,水位变化对坝顶沉降影响较小,主要影响坝顶水平位移,分析其原因应为水压力在心墙上游面的作用产生的水平位移。所以水压力主要影响坝顶处的水平位移变化。初期蓄水过程中上游堆石和坝顶沉降发生明显突变现象,其原因为上游堆石体的湿化变形所致,最大沉降变化达0.4 m,最大水平位移达0.25 m,二者处于同一量级,因此初蓄水产坝体的水平位移也应当给予重视。二期蓄水使得坝顶上游侧和坝轴线处沉降速率变快,坝顶下游侧不受影响。因此,大坝初蓄水变形需要重点分析和研究。

## 3 初蓄水坝体变形和坝顶裂缝机理分析

根据上述坝体各部位沉降数据整理结果可大致得出初期蓄水对坝体沉降的影响区域,如图7(a)所示。可见,初期蓄水由于上游堆石料的湿化变形而引起坝体沉降的区域不止包括上游堆石区,还有心墙区、坝顶部位及靠近坝顶处的下游堆石区。结合初期蓄水引起的上游马道处、坝顶上下游边的沉降和水平位移增量,可得三点处的位移增量矢量,如图7(a)。可以发现,

坝体上部均朝着坝底靠近心墙上游侧部位发生位移,究其原因是这个部位应力较大,发生的湿化变形较为严重。初期蓄水不仅对坝顶上游侧沉降产生较大影响,对坝顶下游侧亦产生较大影响,而且坝顶下游侧发生向上游方向的水平位移大于坝顶上游侧。本文认为产生此种情况的原因是初期蓄水使得坝体底部靠近心墙上游面的部位产生较大的湿化变形,一方面使得坝体上部在此湿化沉降影响下产生向此部位的变形,另一方面由于心墙上游面堆石料的湿化变形使得原本由于心墙料和堆石料的不协调变形产生的拱效应在心墙上游面减弱甚至消失,故而激发了心墙料由于拱效应而未发展的沉降变形,因为此现象只发生在心墙上游面,因此坝顶表现出较为明显的水平位移。在二期蓄水过程中,坝顶沉降只是速率加快,而没有沉降突变,而且坝顶下游边的沉降没有受到明显的影响。分析初期和二期蓄水发生湿化变形的区域,如图 7(b) 所示。二期蓄水对坝顶变形的影响小于初期蓄水,主要在于

二期蓄水发生湿化变形的区域的应力小于初期蓄水对应区域的应力,同时二期蓄水发生湿化变形的区域的变形对心墙的变形影响较小,因此坝顶下游边基本不受影响。

虽然初期蓄水对坝顶变形影响较大,但是坝顶部位的沉降和水平位移表现为整体的突变,因此并未出现裂缝,分析初期蓄水变形影响区域可以发现,初期蓄水坝体表面变形梯度较大的部位是靠近坝顶处的下游坝坡,因此很多心墙坝在初蓄水时往往是靠近坝顶处的下游坝坡首先发生裂缝。

随着水位的进一步升高,坝顶部位的变形受到的影响变小,但是坝顶下游边几乎不再受其影响,而坝顶上游侧依旧受其影响,这使得坝顶部位的变形梯度增大,坝顶处容易出现裂缝,该大坝便是这种类型。同时,水位到达一定的高度后,受水压力的作用,心墙发生向下游侧的水平位移,而堆石区则不受水压力的作用,因此在靠近坝顶上游侧的坝坡容易发生张拉裂缝。

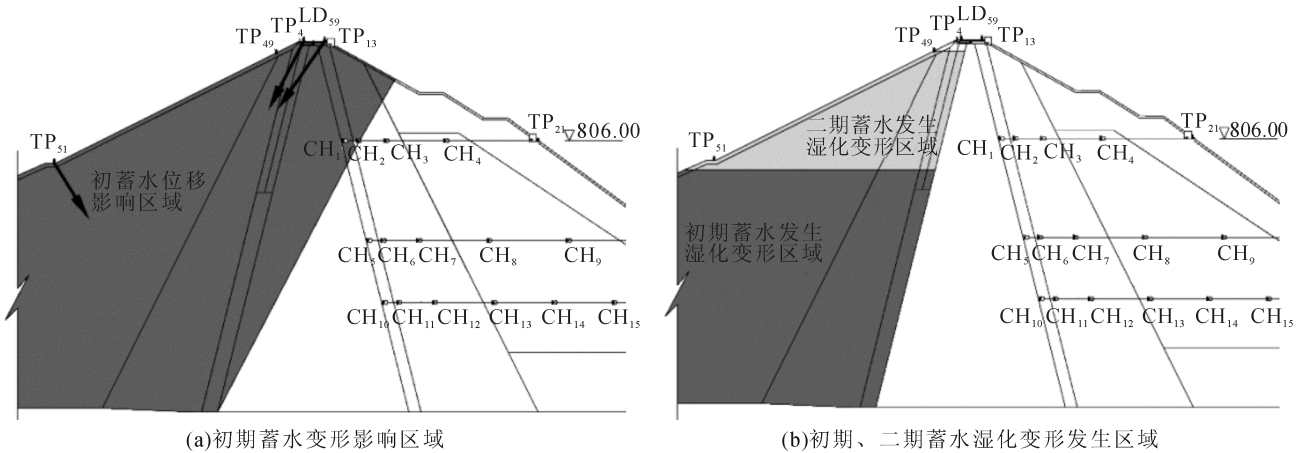


图 7 变形区域分析图

#### 4 初蓄水坝体变形的有限元模拟及裂缝分析

为了分析坝体初蓄水时的变形及裂缝,本文结合大坝实际填筑蓄水过程进行了大坝的有限元数值模拟,模拟中,将水荷载直接施加到心墙上游侧,考虑了所有坝料的流变变形及上游堆石料的浮力及湿化变形。有限元模拟模型如图 8 所示,共有 15 967 个单元和 16 682 个节点。为精确模拟大坝填筑、蓄水过程,每个填筑、蓄水荷载步最多模拟一层网格。

采用 Morn - Coulomb 强度准则和 EB 本构模型,使用设计模型参数,如表 2 所示<sup>[9-10]</sup>。

采用七参数流变模型,流变模型中采用 Merchant 方程描述流变曲线。

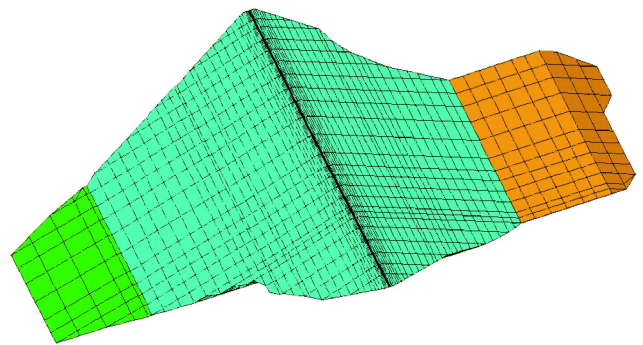


图 8 有限元模型图

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_i + \varepsilon_f(1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 是时刻  $t$  发展的流变应变; $\varepsilon_i$ 与  $\varepsilon_f$ 为初始流变应变和永久流变应变; $e$ 为自然指数; $\alpha$ 是代表初始相对变形率或第一天发展的流变应变的参数。永久流变体变  $\varepsilon_{ef}$ 和剪变  $\gamma_f$ 由式(2)计算

表 2 大坝主要坝料的强度、EB 模型参数表

坝料	$\gamma$	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\phi/^\circ$	$\Delta\phi/^\circ$	$c$
心墙	2.36	550	0.42	0.76	240	0.29	35.0	0.0	0.12
反滤	2.03	790	0.59	0.81	400	0.30	35.5	0.0	14.1
过渡	2.15	986	0.36	0.74	550	0.32	38.8	0.0	11.5
主堆石	2.10	1 000	0.52	0.68	420	0.34	54.0	10.0	0.0
次堆石	2.10	800	0.50	0.70	318	0.30	51.0	10.0	0.0

表 3 坝料流变模型参数表

坝料	$b_1/\%$	$c_1/\%$	$d_1/\%$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$\alpha$
心墙	0.107 5	0.385	0.717	0.936	0.679	0.518	0.003 00
主堆石	0.057 5	0.140	0.454	0.383	0.365	0.482	0.006 49
次堆石	0.097 5	0.160	0.612	0.797	0.455	0.542	0.006 00

采用李国英等<sup>[11]</sup>改进的沈珠江湿化变形模型

$$\begin{cases} \Delta\varepsilon_v^w = C_w \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^{n_w} \\ \Delta\gamma^w = D_w \frac{S_L}{1 - S_L} \end{cases} \quad (3)$$

参数参考 Guo 等<sup>[12]</sup>在模拟瀑布沟大坝湿化变形时所采用的参数,如表 4 所示。

表 4 瀑布沟大坝堆石料湿化模型参数表

参数	$C_w/\%$	$n_w$	$D_w/\%$
数值	0.054 7	1.367	0.265

采用变形倾度法对坝顶裂缝进行分析,图 9 所示为变形倾度法的基本原理,A、B 两点的水平距离为  $\Delta x$ ,分别发生沉降  $S_A$  和  $S_B$ ,移动到  $A'$ 、 $B'$  处,二者的沉降差为  $\Delta S = S_A - S_B$ ,则两点间的变形倾度  $\gamma$  为

$$\gamma \approx \tan\gamma = \frac{\Delta S}{\Delta x} \quad (4)$$

根据工程经验确定开裂时的临界倾度  $\gamma_c$ ,如果  $\gamma > \gamma_c$ ,则认为裂缝发生,反之则不发生裂缝。临界倾度一般取 1%,或者更小<sup>[13-15]</sup>。单元位移可以根据形函数及单元节点位移计算,因此可以将(4)式嵌入土石坝有限元计算程序,对应的变形倾度为

$$\begin{cases} \gamma_x = \sum_{i=1}^k \frac{\partial N_i}{\partial x} u_{i,y} \\ \gamma_z = \sum_{i=1}^k \frac{\partial N_i}{\partial z} u_{i,y} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $x, y, z$  为三个方向; $k$  为单元节点个数; $N_i$  为单元第  $i$  个节点对应的形函数; $u_{i,y}$  为单元第  $i$  个节点在  $y$  方向的位移。可以直接根据土石坝竣工、蓄水后坝体位移计算出变形倾度。

大坝实际填筑过程和填筑模拟如图 10 中左边实线和虚线(带标记)所示,实际蓄水过程和其模拟过程如图 10 中右边实线和虚线(带标记)所示。由图 10 可知,2009 年 11 月初,40 d 快速蓄水至高程 790.0 m,

$$\begin{cases} \varepsilon_{vf} = b_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^{m_1} + c_1 \left(\frac{q}{P_a}\right)^{m_2} \\ \gamma_f = d_1 \left(\frac{S}{1 - S}\right)^{m_3} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $b_1, c_1, d_1, m_1, m_2, m_3$  为参数。模型参数由南京水利科学研究院和长江科学院根据室内流变试验得出,如表 3 所示<sup>[9]</sup>。

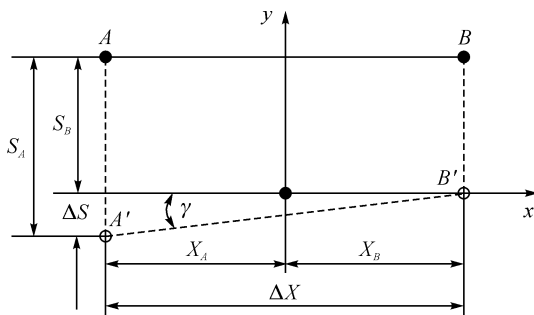


图 9 变形倾度法图

之后 5 个月未蓄水。而 2008 年 11 月初,坝体已经填筑至 790.0 m 高程,因此可以考虑将蓄水过程整体提前 1 年,从而通过提前蓄水释放上游堆石区的湿化变形,如图 10 中部虚线所示的蓄水方案。分别对这两种蓄水方案进行模拟,大坝蓄水过程中将水压力直接作用于心墙上游侧,不考虑坝体内的渗流,考虑处于水位变化区的上游堆石料的浮力和湿化变形。

利用 35 个和 25 个荷载步来模拟大坝填筑和蓄水过程,模拟中考虑了填筑、蓄水过程中的流变变形,在填筑、蓄水过程中插入对应的流变荷载步。

大坝于 2010-08-26 日上午蓄水至 842.2 m 左右时,在坝顶处发现了裂缝。因此研究此时刻由于蓄水产生的变形增量,并计算坝体的变形倾度。

图 11 和图 12 分别为此时刻大坝典型剖面的水平位移和沉降图,可见蓄水使得坝体中部产生了明显向下游的水平位移,而坝顶处水平位移较小,甚至偏向上游侧;上游堆石区发生明显沉降,最大值达 60 cm 以上。模拟得到的坝体位移及趋势与实际监测结果基本吻合,坝体向下游的水平位移主要由水荷载作用产生,而坝顶向上游的水平位移及上游区的沉降则主要由湿化变形产生,验证了第三节中的观点。

图 13 为计算得到的坝顶变形倾度图,实际情况中坝顶的变形倾度接近 0.7,与林道通等<sup>[6]</sup>利用监测资料分析的结果一致,认为坝顶发生裂缝。

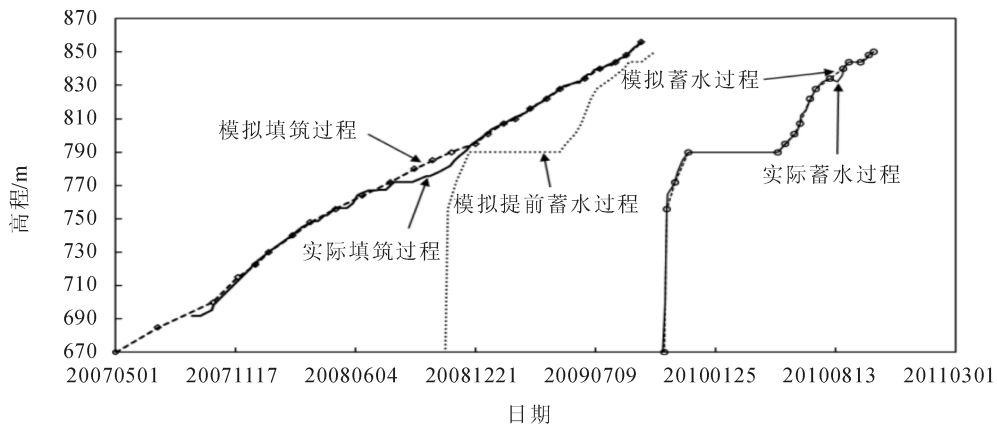


图10 大坝填筑、蓄水过程图

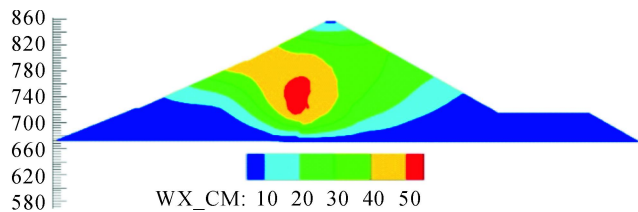


图11 水平位移增量图

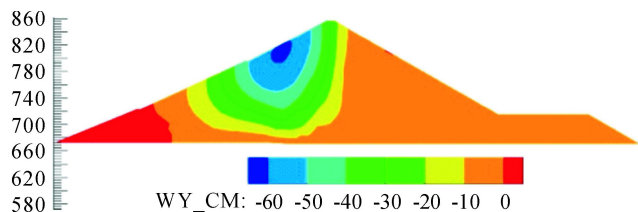


图12 沉降增量图

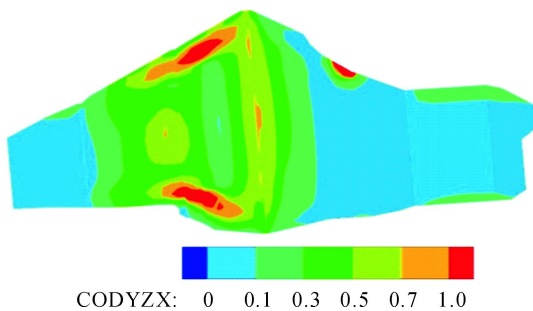


图13 变形倾向图

## 5 结 语

初蓄水过程中,受上游堆石的湿化变形影响,上游堆石和坝顶表现为明显的突变变形,沉降和水平位移处于同一量级。上游堆石料的湿化变形不仅影响上游堆石体的变形,还影响心墙和靠近坝顶的下游堆石体的变形。随着水位的上升,湿化变形对坝体变形的影响逐渐减弱,大坝容易发生裂缝的部位依次是靠近坝顶的下游坝坡、坝顶、靠近坝顶的上游坝坡。通过有限元分析,发现模拟得到的坝体位移及趋势与实际监测结果基本吻合,而且判断出坝顶发生裂缝。所以,本文高心墙堆石坝蓄水变形和裂缝机理的分析是合理的。

## 参考文献:

- [1] 张宗亮. 高土石坝筑坝技术与设计方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018
- [2] 孔宪京, 邹德高. 高土石坝地震灾变模拟与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016
- [3] 张丙印, 于玉贞, 张建民. 高土石坝的若干关键技术问题[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003: 163-186
- [4] Cetin H, Laman M, Ertunc A. Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Ataturk Dam in Turkey[J]. Engineering Geology, 2000, 56(3-4): 225-242
- [5] 屈楚杰, 朱晟, 罗坤. 小浪底斜心墙堆石坝坝顶纵向裂缝数值仿真分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(10): 50-53
- [6] 林道通, 朱晟, 邬铭科, 等. 瀑布沟砾石土心墙堆石坝初次蓄水期坝顶裂缝成因分析[J]. 水力发电, 2017, 43(10): 56-61
- [7] 周雄雄, 迟世春, 贾宇峰, 等. 高土石坝填筑过程的精细化模拟方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(s2): 443-450
- [8] 顾淦臣. 土石坝的裂缝和压实质量[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 56-67
- [9] 李少林, 王朝晴, 周伟, 等. 高心墙堆石坝瞬变一流变参数解耦反分析方法及变形预测[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(9): 86-91
- [10] 郭德全, 严军, 杨兴国, 等. 瀑布沟高土石坝三维非线性有限元分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(5): 93-95
- [11] 李国英, 刘玉年. 砂石料浸水变形三维有限元分析[C]//岩土力学的理论与实践——第三届全国青年岩土力学与工程会议论文集. 南京, 1998
- [12] Guo Q, Pei L, Zhou Z, et al. Response surface and genetic method of deformation back analysis for high core rockfill dams[J]. Computers & Geotechnics, 2016, 74: 132-140
- [13] 水利电力部交通部南京水利科学研究所. 土坝裂缝及其观测分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1979
- [14] 李君纯. 土坝裂缝的简捷估算方法[J]. 水利水运科学研究, 1983(3): 1-10
- [15] 彭翀, 张宗亮, 张丙印, 等. 高土石坝裂缝分析的变形倾度有限元法及其应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1453-1458

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.013

# 层状岩体横观各向同性劣化模型研究

潘洪月<sup>1</sup>, 张丽<sup>2</sup>, 宛良朋<sup>1</sup>, 王坤<sup>1</sup>, 赵代鹏<sup>1</sup>

(1. 中国三峡建设管理有限公司乌东德工程建设部, 云南昆明 651500;  
2. 中国长江三峡集团有限公司科技管理部, 北京 100089)

**摘要:**层状岩体呈现出明显的横观各向同性力学特征,为此,将层状岩体视作层间岩石与层面组成的复合材料,分别就层间岩石力学性质建立相应的力学模型,并提出了劣化模型的弹模裂化极限取值统一限定条件。可考虑层状岩体强度及弹性模量在峰后随塑性应变增大而减小的现象,更能准确地模拟层状岩体洞室开挖的力学响应。在乌东德水电站陡倾层状岩体洞室的围岩开挖稳定性分析的应用中,计算结果与现场监测结果吻合,证明该模型适用性。

**关键词:**层状岩体;横观各向同性;弹塑性;岩体劣化;围岩稳定

中图分类号: TU443 文献标志码: A 文章编号: 1671-3354(2020)01-0052-06

## A Transversely Isotropic Deterioration Model for Layered Rock Mass

PAN Hongyue<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>, WAN Liangpeng<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>, ZHAO Daipeng<sup>1</sup>

(1. Wudongde Project Construction Department, China Three Gorges Corporation, Kunming 651500, China;  
2. Technology Management Department, China Three Gorges Corporation, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Layered rock mass shows an obvious transversely isotropic mechanical characteristic. In this paper, a transversely isotropic deterioration model is proposed for layered rock mass. In this model, layered rock mass is regarded as a composite material which is composed of interlayered rocks and bedding planes. Corresponding mechanical models are then established for the interlayered rocks and bedding planes, and a unified limit condition of the deteriorated moduli is applied. As the strength weakening and the Young's modulus deterioration with the increase of plastic strains in the post-peak phase of layered rock mass are all considered in this model, it can accurately simulate the mechanical response of layered rock mass during excavation. Practical application of the model in the stability analysis of the rock mass around the underground powerhouse in Wudongde Hydropower Project proves its applicability, as the predictions of the model agree well to the field monitoring results.

**Key words:** layered rock mass; transverse isotropy; elasto-plasticity; rock mass deterioration; stability of surrounding rock mass

层状岩体作为人类工程活动最密切的地质体之一,岩层是由一系列层间岩石和层面组成的一种天然复合材料。大量试验研究结果都表明,层状岩体的强度、破坏模式<sup>[1-3]</sup>和变形<sup>[4]</sup>均具有高度的层面依赖性。此外,大量现场试验研究结果表明,深部洞室开挖后其周边岩体会出现一个损伤松动区,该区域内岩体力学性质会较开挖前明显变差,即开挖引起的应力重分布

导致围岩在屈服后的力学性质产生了明显劣化。因此,建立反映深部层状岩体的变形破坏特征及其损伤松动圈内岩体力学参数的劣化规律的力学模型并预测损伤松动圈的范围和深度,成为涉及层状岩体的深部地下工程实践中亟待解决的一个重要课题。

本研究在将层状岩体视作层间岩石与层面组成的复合材料的基础上,分别就层间岩石和层面的力学性

收稿日期:2019-10-09

作者简介:潘洪月,男,工程师,主要从事岩石力学方面的研究。

质建立相应的力学模型,并考虑横观各向同性条件下弹性参数的劣化对岩体力学性质的影响;最后将该模型应用于乌东德水电站层状岩体洞室群的围岩开挖稳定性分析,并与现场监测结果对比分析,以证明该模型的工程适用性。

## 1 层状岩体劣化模型

### 1.1 坐标系

模型将层状岩体视作层间岩石与层面组成的复合材料,分别就层间岩石和层面的力学性质建立相应的力学模型。其中层间岩石力学模型在全局坐标系下建立,层面力学模型在局部坐标系下建立。模型所采用的坐标系如图1所示。图1中, $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为层面走向角和倾向角。 $\alpha$ 为层面北向夹角, $\beta$ 为层面东向夹角,以此定义层面空间位置。

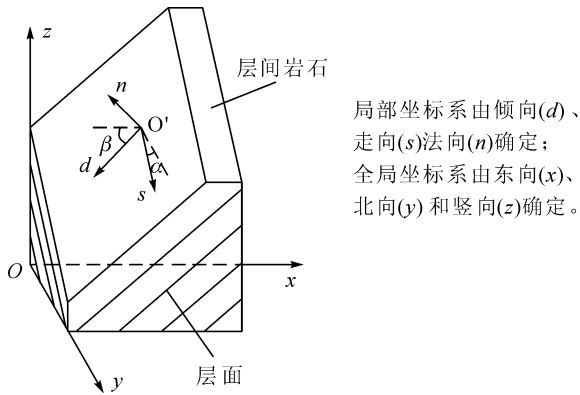


图1 层状岩体坐标系图

### 1.2 应力-应变关系

横观各向同性条件下在局部坐标空间内的应力-应变关系<sup>[5]</sup>为

$$[\Delta \varepsilon'^e] = [D'] [\Delta \sigma'] \quad (1)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2m_1n_1 & 2n_1l_1 & 2l_1m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2m_2n_2 & 2n_2l_2 & 2l_2m_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2m_3n_3 & 2n_3l_3 & 2l_3m_3 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & m_2n_3 + m_3n_2 & n_2l_3 + n_3l_2 & l_2m_3 + l_3m_2 \\ l_3l_1 & l_3l_1 & n_3n_1 & m_3n_1 + m_1n_3 & n_3l_1 + n_1l_3 & l_3m_1 + l_1m_3 \\ l_1l_2 & l_1l_2 & n_1n_2 & m_1n_2 + m_2n_1 & n_1l_2 + n_2l_1 & l_1m_2 + l_2m_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $l_1 = \cos\alpha\cos\beta$ ;  $l_2 = -\sin\alpha$ ;  $l_3 = -\cos\alpha\sin\beta$ ;  $m_1 = \sin\alpha\cos\beta$ ;  $m_2 = \cos\alpha$ ;  $m_3 = \sin\alpha\sin\beta$ ;  $n_1 = -\sin\beta$ ;  $n_2 = 0$ ;  $n_3 = \cos\beta$ 。

式中: $[\Delta \varepsilon'^e]$ 和 $[\Delta \sigma']$ 分别为局部坐标系下的应变增量和应力增量; $[D']$ 为局部坐标系下的柔度矩阵,其具体表达式为

$$[D'] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_3} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $E_1$ 和 $E_3$ 分别为平行于和垂直于层面方向的层状岩体的弹性模量; $G_{12} = E_1/2(1 + \nu_{12})$ 和 $G_{13}$ 分别为平行于和垂直于层面方向的层状岩体的剪切模量; $\nu_{12}$ 和 $\nu_{13}$ 分别为平行于和垂直于层面方向的层状岩体泊松比。

式(1)可以进一步表达为应力增量由应变增量确定的形式,即

$$[\Delta \sigma'] = [K'] [\Delta \varepsilon'^e] \quad (3)$$

式中, $[K']$ 为局部刚度矩阵,等于局部柔度矩阵 $[D']$ 的逆矩阵。

全局坐标系下的应力-应变关系为

$$[\Delta \sigma] = [K] [\Delta \varepsilon^e] \quad (4)$$

式中: $[\Delta \varepsilon^e]$ 为全局坐标系下的弹性应变增量; $[K]$ 为全局坐标系下的刚度矩阵,它可以由下式确定:

$$[K] = [Q][K'][Q]^T \quad (5)$$

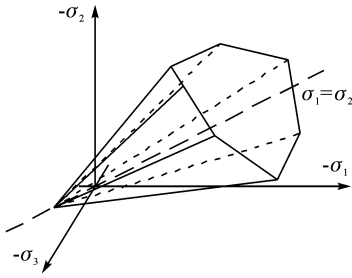
式中, $[Q]$ 为坐标转换矩阵,其表达式为

### 1.3 屈服函数和塑性势函数

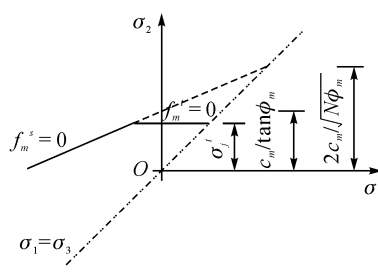
层间岩石的屈服函数采用线性 Mohr - Coulomb 准则(见图2)建立。层间岩石的塑性势函数为剪切屈服



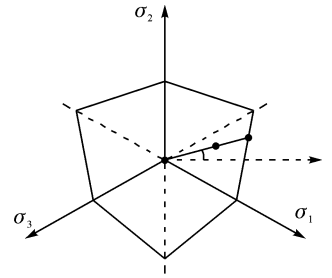
函数  $f_m^s$  和拉伸屈服函数  $f_m^t$  组成:



(a)主应力空间的Mohr-Coulomb剪切屈服面



(b)子午面



(c)π平面

图2 层间岩石的复合屈服准则图

$$f_m^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_{\phi_m} + 2c_m \sqrt{N_{\phi_m}} \quad (7)$$

$$f_m^t = \sigma_3 - \sigma_m^t \quad (8)$$

式中:  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为大主应力和小主应力;  $c_m$  和  $\phi_m$  分别为层间岩石的粘聚力和内摩擦角; 且  $N_{\phi_m}$  为

$$N_{\phi_m} = \frac{1 + \sin\phi_m}{1 - \sin\phi_m} \quad (9)$$

式中,  $\sigma_m^t$  为层间岩石的抗拉强度, 其最大值为

$$\sigma_{m\max}^t = \frac{c_m}{\tan\phi_m} \quad (10)$$

层间岩石的塑性势函数为考虑抗剪和抗拉的复合函数形式 ( $g_m^s$  和  $g_m^t$ )。剪切塑性势函数  $g_m^s$  和拉伸塑性势函数  $g_m^t$  形式如下:

$$g_m^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_{\psi_m} \quad (11)$$

$$g_m^t = \sigma_3 \quad (12)$$

式中,  $\psi_m$  为层间岩石的剪胀角, 且  $N_{\psi_m}$  为

$$N_{\psi_m} = \frac{1 + \sin\psi_m}{1 - \sin\psi_m} \quad (13)$$

层面的塑性势函数由剪切屈服函数  $f_j^s$  和拉伸屈服函数  $f_j^t$  组成 (见图3)。

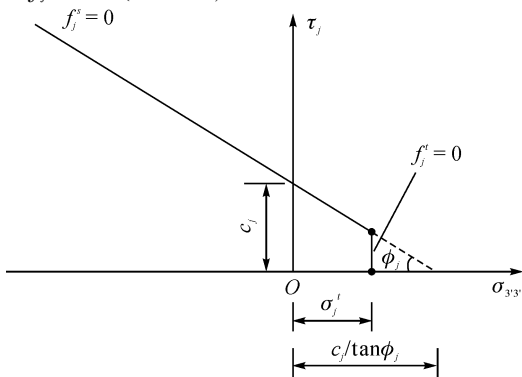


图3 层面的复合屈服准则图

$$f_j^s = \tau_j - c_j + \sigma_{3'3'} \tan\phi_j \quad (14)$$

$$f_j^t = \sigma_{3'3'} - \sigma_j^t \quad (15)$$

式中:  $c_j$  和  $\phi_j$  为层面的粘聚力和内摩擦角;  $\tau_j = \sqrt{\sigma_{1'3'}^2 + \sigma_{2'3'}^2}$ ;  $\sigma_{1'3'}$  和  $\sigma_{2'3'}$  为层面方向上的剪切应力;

$\sigma_{3'3'}$  为垂直于层面方向上的拉应力;  $\sigma_j^t$  为层面抗拉强度。

层面的塑性势函数为考虑抗剪和抗拉的复合函数形式 ( $g_j^s$  和  $g_j^t$ )。剪切塑性势函数  $g_j^s$  和拉伸塑性势函数  $g_j^t$  形式如下:

$$g_j^s = \tau_j + \sigma_{3'3'} \tan\psi_j \quad (16)$$

$$g_j^t = \sigma_{3'3'} \quad (17)$$

式中,  $\psi_j$  为层面剪胀角。

## 2 力学参数演化规律

### 2.1 弹性模量劣化规律

考虑弹性模量为层状岩体的全局力学参数, 因此这里弹性模量的劣化规律取为  $E_1$  和  $E_3$  随层间岩石和层面等效塑性应变中的最大值变化, 其变化规律如图4所示。图4中,  $E_1^0$  和  $E_1^F$  为层状岩体平行于层面方向的初始弹性模量和残余弹性模量;  $E_3^0$  和  $E_3^F$  为层状岩体垂直于层面方向的初始弹性模量和残余弹性模量;  $\bar{\epsilon}_{E_1}^p$  和  $\bar{\epsilon}_{E_3}^p$  为对应  $E_1^F$  和  $E_3^F$  的等效塑性应变。

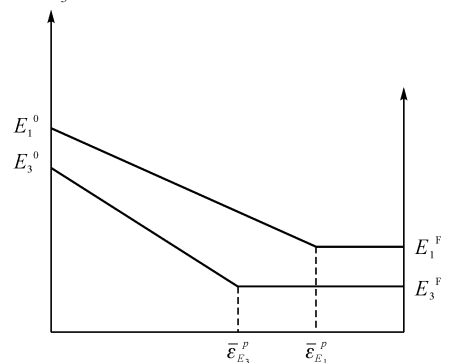


图4 弹性模量随等效塑性应变变化示意图

为有效解决模型中弹性模量劣化极限随意取值导致出现加卸载线相交从而违背 Drucker 公设的问题, 确保岩体弹塑性耦合模型理论的严密性, 这里采用 Zhang 等<sup>[6]</sup> 提出的各向同性同性岩体弹塑性耦合模型的弹模劣化极限取值统一限定条件, 即认定和的劣化

极限值要满足下式

$$E^F/E^0 \leq \zeta \quad (18)$$

式中,  $\zeta$  为临界值,其基于线性 Mohr - Coulomb 准则的具体表达式为

$$\zeta = \frac{[(1 + \sin\phi_d/1 - \sin\phi_d) - 2\nu]\sigma'_1 + 2c_d \cos\phi_d / (1 - \sin\phi_d)}{[(1 + \sin\phi_0/1 - \sin\phi_0) - 2\nu]\sigma_1 + 2c_0 \cos\phi_0 / (1 - \sin\phi_0)} \xi \quad (19)$$

式中:  $\sigma'_1$  为残余强度阶段对应的最大主应力;  $\xi = \varepsilon_v^e / \varepsilon_d^e$  为峰值强度 ( $\varepsilon_v^e$ ) 对应的弹性应变和残余强度对应的弹性应变 ( $\varepsilon_d^e$ ) 之比。  $\xi$  可以通过室内岩样的全应力 - 应变曲线并结合工程经验确定。

## 2.2 强度参数弱化规律

层间岩石和层面的强度参数均考虑随各自的等效塑性应变变化,其变化规律如图 5 所示。图 5 中,  $c_{m0}$  和  $c_{md}$  为层间岩石的初始和残余粘聚力;  $\phi_{m0}$  和  $\phi_{md}$  为层间岩石的初始和残余内摩擦角;  $\varepsilon_{c_m}^p$  和  $\varepsilon_{\phi_m}^p$  为  $c_{md}$  和  $\phi_{md}$  对应的等效塑性应变;  $\phi_{j0}$  和  $\phi_{jd}$  为层面的初始和残余内摩擦角;  $c_{j0}$  和  $c_{jd}$  为层面的初始和残余粘聚力;  $\varepsilon_{c_j}^p$  和  $\varepsilon_{\phi_j}^p$  为  $c_{jd}$  和  $\phi_{jd}$  对应的等效塑性应变。

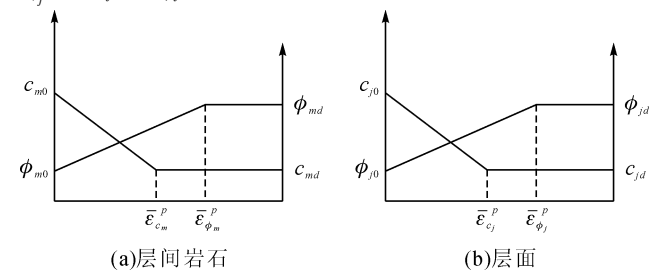


图 5 强度参数随等效塑性应变的变化规律图

## 3 工程应用

### 3.1 工程背景

乌东德水电站厂区地层主要由褶皱基底浅变质岩及盖层沉积岩构成,褶皱基底左岸分布在高程 1 000 ~ 1 200 m 以下,右岸分布在高程 1 400 ~ 1 600 m 以下,上部为不整合接触缓倾盖层。褶皱基底地层陡倾,岩层走向与河流走向大角度相交,岩性主要为中厚层 ~ 厚层变质灰岩、大理岩和白云岩,地下厂房围岩稳定总体条件优良。空间地应力测试成果表明,左岸厂房开挖区岩体内第一主应力皆属中等地应力水平,量值较集中,范围为 11.3 ~ 14.9 MPa,平均值为 13.3 MPa,方位多集中在 40° ~ 70° 和 210° ~ 270°;倾角较多集中在 30° ~ 60°。右岸厂房开挖区岩体内第一主应力皆属低 ~ 中等地应力水平,范围为 5.6 ~ 13.0 MPa,平均值为 7.2 MPa;方位角相对较多集中在 290° ~ 340° 和

120° ~ 180°;倾角较多集中在 30° ~ 80°。水电站地下厂房洞室群区域层状岩体分布广泛,具有工程规模大、洞室布置密集、挖空率较高等特点,因此在洞室群的施工过程中遭遇较为突出的大跨度、高边墙洞室稳定问题。

### 3.2 分析与验证

图 6 为根据实际地质勘查资料和施工开挖组织设计建立的乌东德左右岸地下厂房围岩稳定分析模型。模型在设定初始地应力场时以自重应力为主,并考虑了地表剥蚀的影响(图 6a),同时为降低模型的总体网格数量在厂房开挖周边一定范围内网格进行了精细剖分(图 6c、d),其他区域则粗分。图 6 中,  $Pt_{21}^{2-2}$  为互层灰岩夹大理岩化白云岩;  $Pt_{21}^{2-3}$  为互层夹中厚层、薄层的大理岩化白云岩;  $Pt_{21}^{3-1}$  为厚层 - 巨厚层灰岩;  $Pt_{21}^{3-2}$  为巨厚层白云岩夹薄层灰岩;  $Pt_{21}^{3-3}$  为厚层夹中厚层灰岩;  $Pt_{21}^{3-4}$  为厚层白云岩夹中厚层石英岩;  $Pt_{21}^{3-5}$  为中厚层夹薄层灰岩;  $Pt_{21}^{4-1}$  为极薄层 - 薄层大理岩化白云岩。

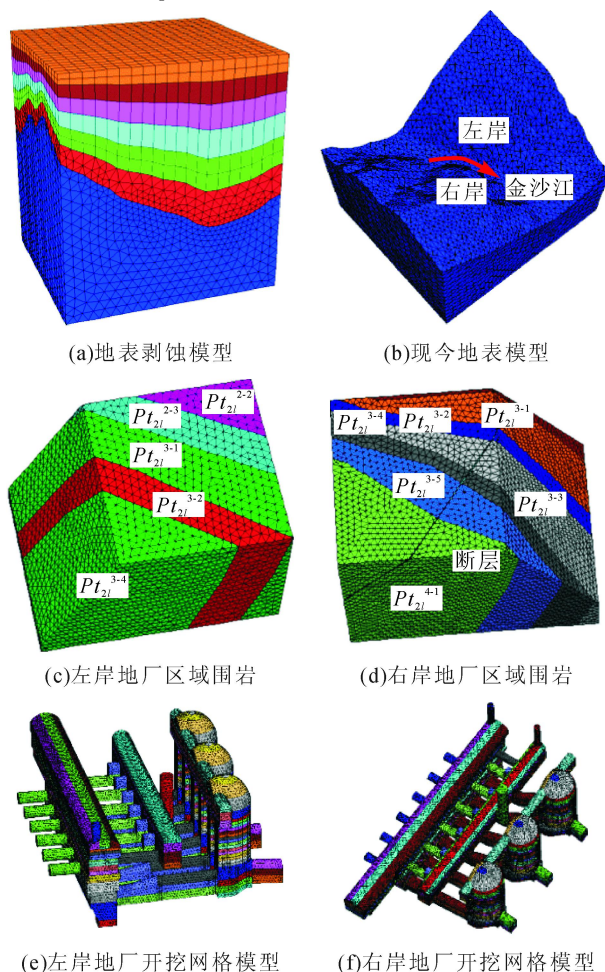


图 6 乌东德地下厂房围岩稳定分析模型图

地应力根据文献[7]的地应力测试结论,采用自重应力场。力学模型采用本文提出的横观各向同性劣化模型,其力学参数采用文献[8]提供的反演参数。为验证计算结果合理性,将计算获得的松动圈与现场实测松动圈结果进行对比。数值计算中的围岩松动圈主要以 Xu 等<sup>[9]</sup>等提出的基于该模型的层状岩体破坏接近度指标 *FAI* 来划定,该指标认定在大于 1.0 时岩体屈服;对于围岩开始松动所对应的 *FAI* 值需根据现场实测信息和工程经验予以确定。这里以 1.05 作为围岩开始松动所对应的 *FAI* 值。

图 7 为典型机组断面(1、3、5、7、10 号和 12 号机

组断面)在第 V 层开挖后松动圈分布云图。从图 7 中可以看出围岩松动圈的大小与洞室开挖尺寸密切相关,洞室尺寸越大,松动圈相对而言更大。不过,总体而言,围岩松动圈深度不大,在 0~3.5 m 之间。图 8 为乌东德水电站左、右岸地下厂房 V 层开挖后各典型剖面围岩松动圈深度的计算结果与监测结果对比。从图 8 中可以看出,地下厂房各监测点测试获得松动圈深度与计算获得的松动圈深度比较接近。这表明采用层状岩体的横观各向同性弹塑性耦合模型并结合与之配套的层状岩体破坏接近度指标,预测层状岩体洞室的围岩松动圈分布特征是可行的。

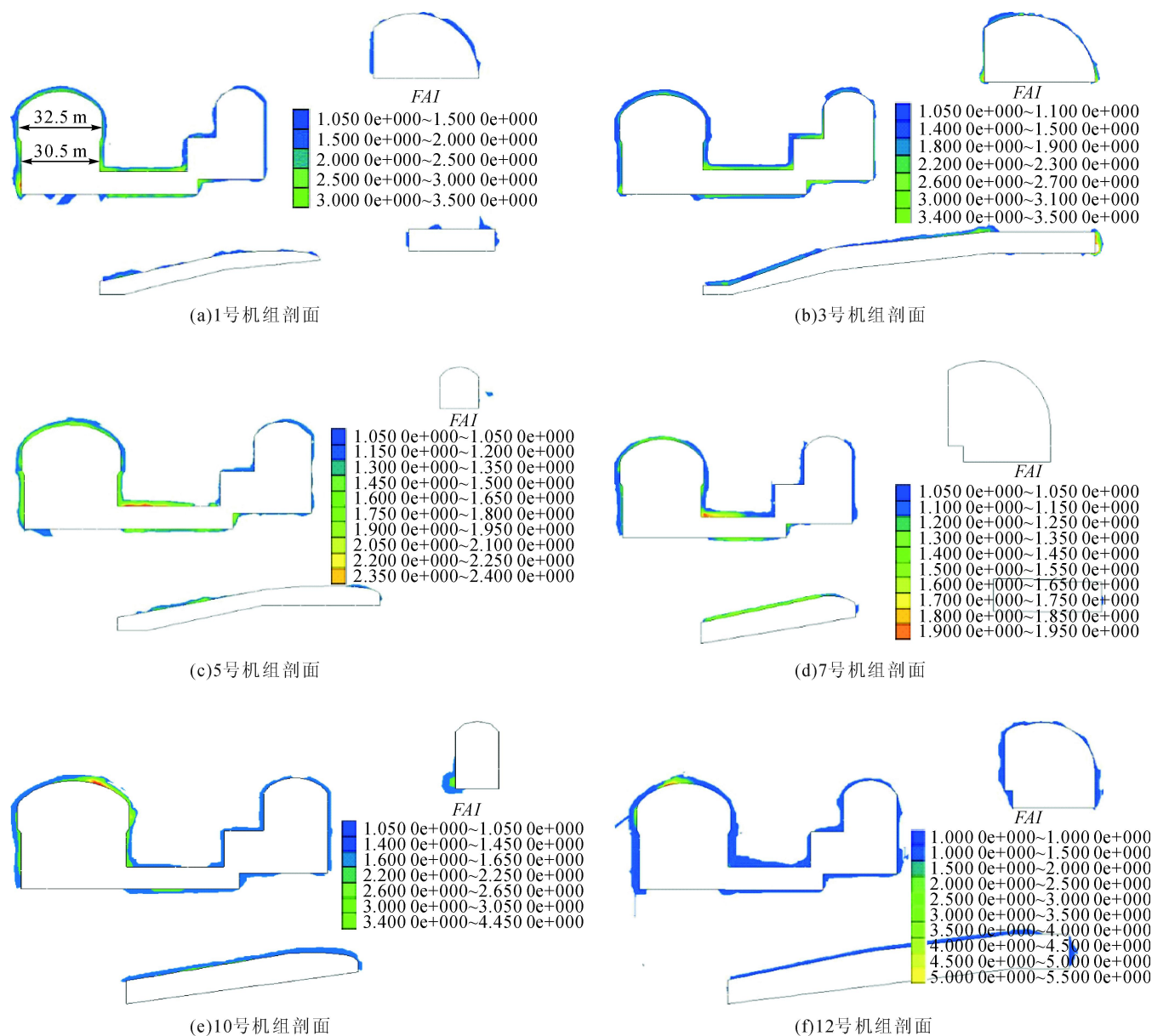


图 7 典型机组剖面第 V 层开挖后松动圈分布云图

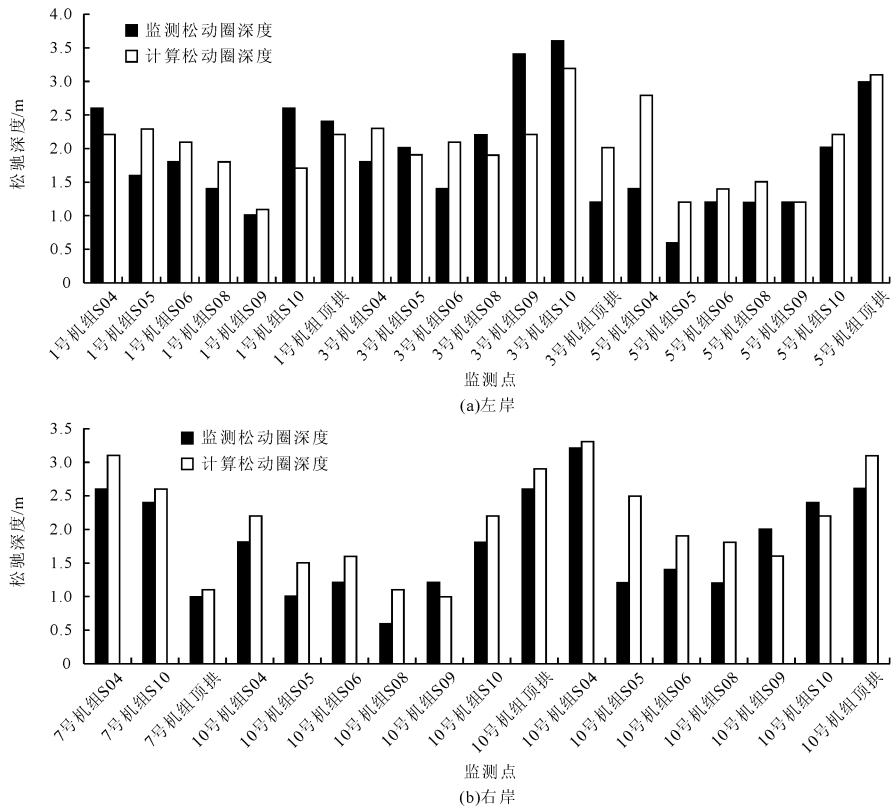


图8 主厂房典型机组剖面监测点处第V层开挖后监测松动圈深度与计算松动圈深度对比图

## 4 结 语

将层状岩体视作层间岩石与层面组成的复合材料,分别就层间岩石和层面的力学性质建立相应的力学模型,并考虑横观各向同性条件下强度参数弱化和弹性参数劣化规律,最终建立了一个可描述层状岩体力学特性的横观各向同性弹塑性耦合模型.将该模型应用于乌东德水电站陡倾层状岩体洞室的围岩开挖稳定性分析,并与现场监测结果进行了对比分析,证明了该模型的工程适用性,最终得到如下结论:

1)层状岩体的横观各向弹塑性耦合模型抓住了层状岩体破坏的实质,即层状岩体的破坏由当前状态下的层间岩石或层面的破坏引起,因而可有效表征层状岩体在开挖扰动下的破坏模式;

2)层状岩体的横观各向弹塑性耦合模型既可以考虑层状岩体强度在峰后随塑性应变增大而减小的情况,也能描述其弹性模量在峰后随塑性应变增大而不断劣化的现象,可为更准确地模拟层状岩体洞室开挖的力学响应提供了理论模型支撑;

3)基于层状岩体的横观各向同性弹塑性耦合模型和破坏接近度指标的乌东德地下厂房围岩稳定分析结果显示,地下厂房V层开挖后各监测点测试获得松动圈深度与计算获得的松动圈深度比较接近,表明采用层状岩体的横观各向同性弹塑性耦合模型并结合与之配套的层状岩体破坏接近度指标,预测层状岩体洞室的围岩松动圈分布特征是可行的。

## 参考文献:

- [1] Tien Y, Kuo M. A failure criterion for transversely isotropic rocks [J]. *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38 (3): 399 - 412
- [2] Nasser M H B, Rao K S, Ramamurthy T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists [J]. *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(1): 3 - 23
- [3] Tien Y, Kuo M, Juang C. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks [J]. *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43 (8): 1 163 - 1 181
- [4] Amadei B, Savage W Z, Swolfs H S. Gravitational stresses in anisotropic rock masses [J]. *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1987, 24(1): 5 - 14
- [5] Lekhnitskii S G. *Theory of elasticity of an anisotropic body* [M]. Moscow: Mir Publishers, 1981
- [6] Zhang Q, Jiang B, Wu X, et al. Elasto - plastic coupling analysis of circular openings in elasto - brittle - plastic rock mass [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2012, 60(1): 60 - 67
- [7] 钮新强, 石伯勋, 翁永红, 等. 金沙江乌东德水电站可行性研究报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2011
- [8] 徐鼎平, 陈东方, 周扬一. 金沙江乌东德水电站大型地下厂房洞室群施工期围岩稳定性动态反馈分析与风险评估中期总结报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2015
- [9] Xu D, Feng X, Chen D, et al. Constitutive representation and damage degree index for the layered rock mass excavation response in underground openings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 64: 133 - 145

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.014

# 水布垭电厂调速器液压控制管路密封问题分析

杨俊

(湖北清江水电开发有限责任公司,湖北宜昌 443000)

**摘要:** 液压控制管路是水电厂调速器的重要组成部分,其密封可靠性直接影响机组运行的稳定性和经济性。通过对水布垭电厂液控管路接头密封结构和工作原理的研究表明,卡套式管接头因其结构简单、使用方便、无需焊接等特点而得到广泛应用,但若忽视对其材料、制造、检验、安装、维护、检查等方面的管理,就很容易引起渗漏;同时,配管及安装精度、管路振动、温差变化、反复拆装等也都会引起渗漏。

**关键词:** 水电厂;调速器;液压控制管路;密封

中图分类号:TM312

文献标志码:A

文章编号:1671-3354(2020)01-0058-04

## Analysis on Sealing Problem of the Hydraulic Control Pipeline for Governor in Shuibuya Hydropower Plant

YANG Jun

(Hubei Qingjiang Hydroelectric Development Co., Ltd., Yichang 443000, China)

**Abstract:** Hydraulic control pipeline is an important part of the governor in hydropower plants. Its sealing reliability directly affects the operation stability and economy of the unit. Taking Shuibuya Hydropower Plant as an example, the joint sealing structure and its working principles of the hydraulic control pipeline of governor are analyzed. It shows that the tube fitting joint is widely used because of its simple structure, convenience and welding-free characteristics. However, if the management of its material, manufacturing, inspection, installation, maintenance and checking is ignored, leakage problem is commonly encountered. Leakage can be also caused by the pipeline installation accuracy, pipeline vibration, temperature variation and repeated disassembly.

**Key words:** hydropower plant; governor; hydraulic control pipeline; seal

水布垭电厂位于湖北清江中游巴东县境内,总装机 184 万 kW,设计年发电量 39.84 亿 kW·h,是清江流域梯级滚动开发的最上一级龙头工程,是华中电网骨干调峰调频电厂。工程于 2002 年 1 月开工,同年 10 月实现截流,2007 年 7 月首台机组发电,2008 年 8 月 4 台机组全部投产。

调速器是保证机组频率稳定,维持系统负荷平衡的基础控制设备。液压控制管路是调速器油压传输的重要通道,其密封可靠性直接影响机组运行稳定性。水布垭电厂 4 台机组调速器液控管路接头均存在不同程度的渗漏情况,且检修后仍有复漏现象。本文从液

控管路所用卡套式管接头的密封结构和工作原理出发,对其密封性能进行了分析,并结合管路现场实际工作情况,对出现接头渗漏问题的原因进行了分析和探讨。

### 1 液控管路覆盖范围

水布垭电厂调速器采用的是 GE 公司的 FC5000 阀组,机械液压回路由比例伺服阀、手/自动切换阀、液动停机阀、手动紧急停机阀、电动紧急停机阀、主配压阀等组成,如图 1 所示。液压控制管路主要为双精过滤器至主配压阀之间的管件部分,管路连接采用卡套

收稿日期:2019-10-08

作者简介:杨俊,男,工程师,主要从事调速器检修方面的工作。

式管接头。

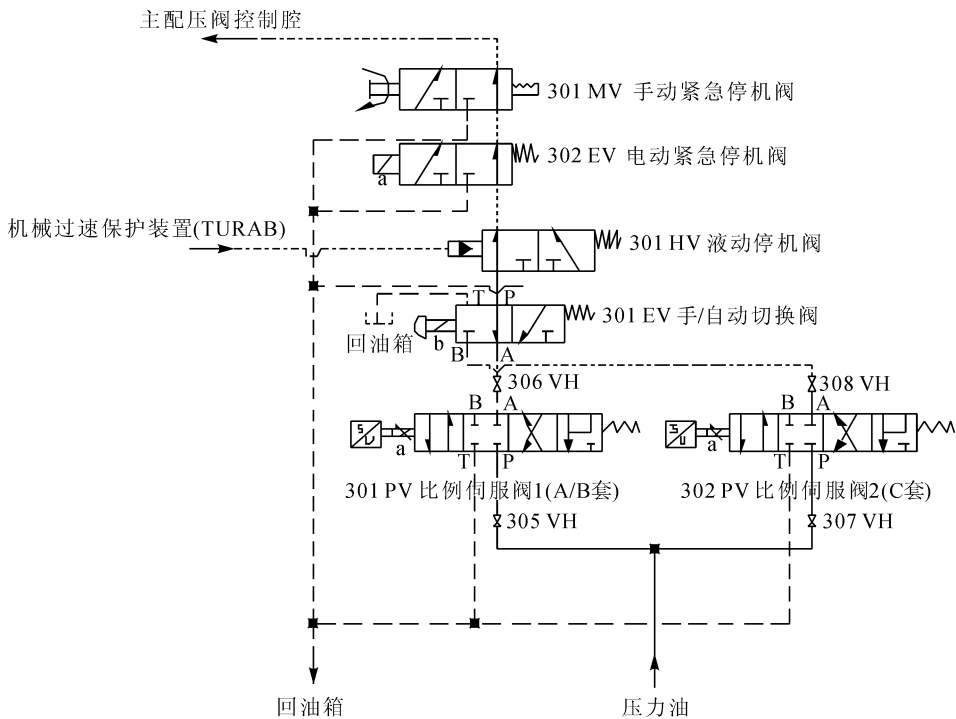


图 1 液控管路系统图

## 2 接头密封原理及性能要求

卡套式管接头适用于接管外径为 4 ~ 42 mm、最大工作压力为 10 ~ 63 MPa 的液压流体传动和一般用途的管路系统<sup>[1]</sup>。目前卡套式管接头主要分为单卡套和双卡套,两者在结构和原理上均有所不同,前者是线密封,后者是面密封。水布垭液控管路接头采用的是单卡套式管接头。

### 2.1 密封原理

单卡套式管接头主要由具有内锥面的接头体、带尖锐内刃的卡套以及起压紧作用的螺母三部分组成,结构如图 2 所示。

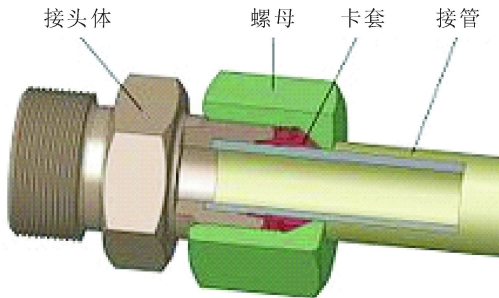


图 2 单卡套式管接头示意图

在接头结构中,卡套是最关键的零件,外观呈现为一个在内圆端带有刃口的金属环,它具有良好的刚性、硬度和韧性。卡套的表面硬度一般在 HRC 58.5 ~ 63

之间,硬层深度为 0.03 ~ 0.05 mm, 基体硬度在 HB 91 ~ 96 之间<sup>[2]</sup>。当旋紧螺母时,卡套受到螺母螺旋力的作用,沿接头体内锥面轴向前进,紧贴内锥面径向收缩,产生形变。卡套的内刃刃口向内收缩,在接管外壁压出一道环形凹槽,刃口嵌入环槽内,起到扣紧和密封作用。同时卡套的外锥面在挤压力的作用下向上拱起成龟背,与接头体内锥面紧密接触,形成刚性线密封。卡套的尾端给接管一定的径向作用力夹紧接管,防止其松动。

单卡套式管接头按刃口数目分为单刃式和双刃式(又称渐进式多刃卡套)。单刃式卡套管接头虽然对材质及装配要求高,但其结构简单,在国内应用最为广泛,水布垭电厂液控管路均采用此结构。

双刃式卡套接头以增加内刃的方式加强卡套与接管的紧固性和密封性,其结构如图 3 所示。

国外对小管径的管路系统,多采用双卡套式管接头,卡套由前、后卡套组合而成,结构如图 4 所示,提高了接头的抗震性和温差补偿等功能,在此不着重介绍。

### 2.2 技术要求

接头体内锥面角度要求为  $24^\circ \pm 30'$ , 锥面的表面粗糙度  $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ , 其材质根据工作条件可以是不锈钢等,详细技术要求参见 GB/T3733 - 2008<sup>[3]</sup>。

卡套的尺寸、形位公差、表面粗糙度等技术要求参

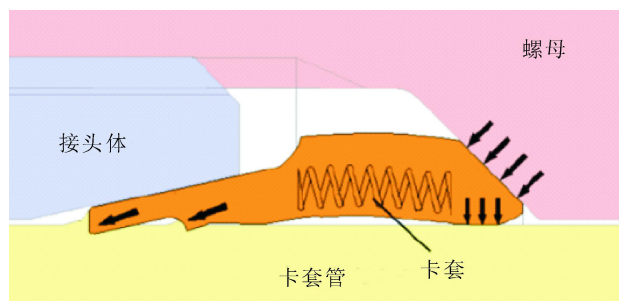


图3 双刃式单卡套管接头示意图

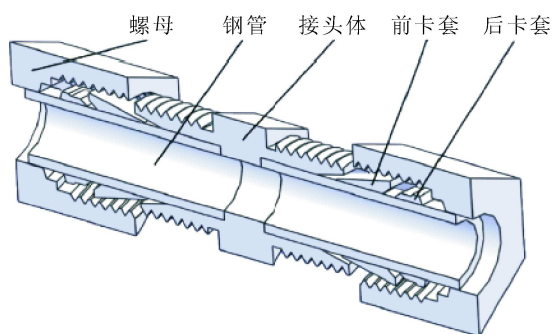


图4 双卡套管接头示意图

见 GB/T3764-2008<sup>[4]</sup>。

压紧螺母内锥应与卡套尾端的外锥吻合,以确保旋转压紧螺母时,能有效推动卡套轴向前进变形。压紧螺母的材料可选择碳钢、不锈钢等,详细技术要求参见 GB/T3759-2008<sup>[5]</sup>。

接管外径应有一定的精度,否则将直接影响到卡套式连接的密封效果,详细技术要求参见 GB/T3090-2000、GB/T8163-2018、GB/T14976-2012 等<sup>[6-8]</sup>。

所有接头体和配件不应有裂纹、气孔、毛刺和锐边等。不进行机械加工的零件表面允许有不超过其尺寸公差 1/2 的凹陷和压痕。未标注要求的所有机械加工表面的粗糙度  $Ra \leq 6.3 \mu\text{m}$ 。所有未注棱边应倒钝角,倒角尺寸不应大于  $0.15 \text{ mm}$ <sup>[1]</sup>。

### 3 液控管路接头密封问题分析

#### 3.1 渗漏点调查

对液控管路接头近 3 次检修情况进行调查,发现检修前后存在重复渗漏点,且复漏率偏高,如表 1 所示。

#### 3.2 正常工作压力下连接失效计算

接管内压力轴向力可通过以下公式计算:

$$F = \frac{\pi P \phi_i^2}{4} \quad (1)$$

表 1 检修前后渗漏点调查汇总表

机组	检修时间	渗漏点个数		重复渗漏点	复漏率 /%
		修前	修后		
1F	2016.10	6	3	3	50.0
	2017.03	5	3	3	60.0
	2017.12	5	3	3	60.0
2F	2016.09	7	4	4	57.1
	2017.01	6	3	3	50.0
	2017.10	6	3	3	50.0
3F	2015.12	6	4	4	66.7
	2016.11	6	3	3	50.0
	2017.09	6	3	3	50.0
4F	2016.03	4	3	3	75.0
	2017.02	4	2	2	50.0
	2018.01	4	2	2	50.0

式中:  $F$  是管内压力轴向力, N;  $P$  是管内压强, MPa;  $\phi_i$  是接管内径, mm。

卡套刃口对接管的单位挤压应力可通过以下公式计算:

$$\sigma_j = \frac{F}{\pi \phi_0 h} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_j$  是刃口对接管的单位挤压应力, MPa;  $\phi_0$  是接管外径, mm;  $h$  是刃口咬入接管的深度, mm。

水布垭调速器液控管路工作压力为 6.3 MPa, 接管规格为  $\phi 10 \times 1.5$ , 接头规格为 JB/T966-1977 10/G3/8, 根据现场测量, 刃口咬入接管的深度最浅处不小于 0.09 mm, 代入公式(1)、(2)可得:

$$F = \frac{\pi P \phi_i^2}{4} = \frac{3.14 \times 6.3 \times 7^2}{4} = 242.33 \text{ N}$$

$$\sigma_j = \frac{F}{\pi \phi_0 h} = \frac{242.33}{3.14 \times 10 \times 0.09} = 85.75 \text{ MPa}$$

由于接管材料的名义屈服极限  $\sigma_{0.2}$  为 210 MPa<sup>[9]</sup>, 所以:

$$\sigma_j < \sigma_{0.2}$$

可见, 在正常工作压力下, 卡套刃口的单位挤压应力远小于接管材料的名义屈服极限, 所以接头在正常紧固状态下不会出现接管拔脱而导致的密封失效问题, 这与现场渗漏的实际情况吻合。

#### 3.3 渗漏原因分析

##### 3.3.1 配管精度不够

按照标准, 接头体旋入端的支撑面对旋入螺纹轴

线的垂直度公差为 0.10 mm;压紧螺纹端面对螺纹轴线的垂直度公差为 0.10 mm;卡套端内锥座对其外螺纹中径的圆跳动公差应为 0.25 mm;卡套与内锥面轴线、卡套与接管轴线的同轴度公差均为 0.20 mm<sup>[1]</sup>。现场测量发现,管路部分接头处两端明显不同心,同轴度超过公差范围。接管长度无法满足足够的变形余量,接头在装配后受到持续横向拉扯力,导致卡套密封面受力不均匀,刃口局部嵌入接管表面凹槽深度不一致,长期运行产生间隙。卡套外锥面与接头体内锥面挤压力不均匀,无法形成有效密封。接头处螺纹配合精度不够,螺帽丝扣长度过短,管路配合自我调整能力不足。

同时,接头部分密封面存在毛刺和高点,影响密封有效性。这可能是因为原配件加工精度不够,在初次装配时就存在,也可能是由于后期拆装过程中造成,其具体形成原因无法确定。

### 3.3.2 初次装配要求高,装配效果直接影响后续使用密封可靠性

卡套式管接头的密封结构决定了对初次安装的要求很高。卡套要产生形变并嵌入接管表面一定深度,需要适当的装配力矩。当拧紧力过小时,卡套刃口与接管外壁之间只形成缩颈而不能形成切口,或是切口深度太浅,达不到密封效果,卡套外锥面与接头体也无法形成有效接触。当拧紧力过大时,尽管切口凹槽成型较好,但卡套本身失去弹性,产生了塑性变形,卡套与接头体内锥面无法再次形成可靠密封带,甚至会破坏内锥面,产生凹槽,改变密封线,不能再次使用,如图 5 所示。同时卡套对压紧螺母的防松作用降低,当系统管路振动时易引起压紧螺母的松动。



图 5 接头体内锥面损坏实物图

根据有关资料显示,管路所用  $\phi 10$  卡套式管接头对应拧紧力矩参考理论值为 115 N·m,如此大的力矩在施工现场很难稳定操作,因此在装配之前必须先

专用的卡套预装器上进行预装,然后进行装配,否则一次装配合格率不超过 60%。预装切入后,剖面检验,卡套的刃口不得变钝,接管被切的刃痕要规整。卡套尾部沿径向收缩应抱住接管,允许卡套在接管上稍转动,但不得松脱。预装后的卡套外圆不得因中部拱形凸起过大,而被接头体内锥面卡出痕迹,卡套的刃口部外圆也不应损伤接头体内锥面<sup>[1]</sup>。

单卡套式管接头大多靠手工预装,对装配要求高,工人的工作态度和技能水平直接影响装配质量和密封可靠性。

### 3.3.3 管路振动对密封造成影响

水布垭电厂调速器在动作时,各部位操作管路和控制管路会出现轻微振动,在检修后的第一次动作时最为明显,正常运行时振幅变小。控制管路流经很多电磁阀,电磁阀快速换向时对管路也会造成冲击压力。

管路接头采用 3/8" 英制管螺纹,具有一定自锁能力,但在振动、冲击或系统有脉冲的环境中长期使用时,部分接头体与螺母自锁性能可能会受到影响,造成连接松动,密封失效,引起渗漏。设备运行现场并没有固定支撑、卡扣或锁片等固定管路的装置,我们在历次检修中,也曾多次发现过螺母连接松动的现象。

### 3.3.4 温差变化影响金属材料的密封性

水布垭电厂地下厂房环境温度波动不大。但作为调峰调频电厂,调速器操作频繁,运行期间油罐压油泵经常动作,系统油温升高;控制管路中电磁阀动作频繁,温度上升,热传递给管路接头;同时油路切换产生热能,油温升高。这些都对管路接头造成一定的温差影响。

接头加工精度不高,热处理水平有限,装配时很难保证卡套外锥面与接头体内锥面均匀有效地接触,同时卡套刃口也不一定能够按照设计要求均匀地嵌入接管外壁形成环形凹槽。加上卡套与接管、接头体、压紧螺母的材质不同,热膨胀系数不同,在温差变化大时,经过热胀冷缩,很可能在各个密封面产生间隙,造成渗漏。

### 3.3.5 反复拆装影响密封性能

每个接头渗漏情况有所不同,每次检修时,现场处理多以紧固为主,部分拆后重新装配。时间一长,大部分接头都经过多次重复拆装。

接头在初次装配后,卡套、接头体和接管间产生永久性变,拆下后再次装配时,很难产生二次变形量,多

(下转第 65 页)



DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.015

# 局部硫化技术在三峡水利枢纽 深孔弧门水封更换中的应用

余洪斌, 魏丹, 朱全平, 胡毅力

(中国长江电力股份有限公司, 湖北宜昌 443002)

**摘要:**三峡水利枢纽泄洪深孔弧形工作门已安全运行20多年。闸门水封虽未到更换年限,但由于各种原因导致局部破损伤水严重。通过研究水封的制作工艺,成功探索了局部硫化粘结更换水封破损段的技术。在硫化粘结过程中严格控制加热温度在130~160℃,时间在60 min以内,使硫化的接头粘结牢固,无裂口,无海绵,凸凹面不超过0.5 mm。局部硫化粘结更换方案的人工、工期是传统更换方案的1/15,省料,且效果良好。

**关键词:**局部硫化;弧门;橡胶;水封更换

中图分类号:TV633+.2

文献标志码:B

文章编号:1671-3354(2020)01-0062-04

## Application of Local Vulcanization Technology in the Replacement Work of Water Seals for Radial Gates of Deep Outlets in Three Gorges Project

YU Hongbin, WEI Dan, ZHU Quanping, HU Yili

(China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China)

**Abstract:** The radial gates of deep outlets in Three Gorges Project has operated safely for more than 20 years. Although the water seals of the gates are still under the replacement age, local damages are found due to various reasons, which lead to serious water jetting. Based on an analysis of the manufacturing process of the water seals, a technology of replacing the damaged section of the water seals with local vulcanization bond is proposed and successfully implemented. During the vulcanization bonding process, the heating temperature is strictly controlled within 130~160℃, and the time within 60 minutes. Thus, the vulcanized joint is firmly bonded without crack and sponge, and the convex-concave surface within 0.5 mm. The proposed local vulcanization technology is of satisfactory performance as the labor requirement and construction period are only 1/15 of traditional replacement scheme.

**Key words:** local vulcanization; radial gate; rubber; water seal replacement

泄洪深孔是三峡水利枢纽最重要的泄洪设施,共23个,采用有压短管接明流泄槽跌坎掺气型式,鼻坎挑流消能,进口底高程90 m,水平布置,有压段出口尺寸为7 m×9 m(宽×高)。进口顶曲线和侧曲线均为椭圆曲线,有压段出口压坡长8 m,坡度1:4。共设三道闸门,分别在进口设一道反钩叠梁检修门,尺寸为9.6 m×14.53 m;有压段中部设平板事故检修门,尺寸为7 m×11 m,事故门槽宽1.95 m,深1.1 m,错距0.11 m,圆弧半径0.1 m,退坡1:12;有压段出口处设弧形工作门(简称“弧门”),尺寸7 m×9 m。由于反钩叠梁检修门与平板事故检修门仅在深孔弧形工作门

检修时挡水使用,而弧形工作门汛期频繁启闭,常常造成闸门水封部分受损而产生射水,既影响闸门的正常运行又浪费了宝贵的水资源<sup>[1]</sup>。故此次仅研究泄洪深孔弧形工作门橡胶水封局部硫化更换。

深孔弧形工作门位于坝体内部,在坝体中形成大空腔结构,工作弧门操作室布置在高程117.5 m,操作室尺寸定为7.0 m×5.5 m×13.5 m(长×宽×高)。操作室顶部设一3.25 m×2.5 m(宽×长)的吊物井,直通坝顶。深孔工作弧门启闭采用液压单吊点启闭机,根据运用要求,每3~4台启闭机设一油泵室,启闭机室后设长10.85 m、宽5.5 m油泵室。

收稿日期:2019-09-29

作者简介:余洪斌,男,工程师,主要从事水电站水工金属结构检修方面的研究。

橡胶水封具有结构简单、弹性好、封水严密可靠、安装方便、耐老化、使用寿命长等优点。一般采用天然橡胶或氯丁橡胶制造。橡胶水封可分为纯橡胶水封和复合材料水封两类。纯橡胶水封中加入专用防老化剂、补强剂、硫化助剂、硫化促进剂、增塑剂以及工业碳黑等十多种原料,经过炼胶机反复挤压混合后制成的半成品,再置入模具中经硫化压机于高温、高压条件定型所生产出的止水元件,且又符合水工钢闸止水技术

性能的称为普通水封<sup>[2]</sup>。三峡工程常用的橡胶水封有<sup>[3]</sup>:加高强尼龙帆布又加增强聚四氟乙烯薄膜的水封称为夹高强尼龙帆布橡塑复合水封。工作中为减小低摩阻又耐磨的水封称为橡塑复合水封;只加帆布的水封称为高强帆布水封;不加帆布和增强聚四氟乙烯薄膜的称为普通水封等。此类水封的使用年限为5~10年,具体要结合闸门设备状态分析定是否需更换(见表1)。

表1 1扇弧门水封材料清单表

序号	名称	型号规格	数量
1	深孔弧门顶止水橡皮垫/条	20 mm × 110 mm × 6 890 mm,防100号	1
2	深孔弧门顶止水橡皮/条	L=6 250 mm,防100号 P60A	1
3	深孔弧门底止水橡皮/条	30 mm × 200 mm × 6 890 mm,防100号	1
4	转角止水橡皮/个	图号02E511-1.07.04.2,橡塑,包四氟厚度1~1.2 mm,防100号	2
5	侧止水橡皮/条	L=11931mm,P60B	2

## 1 现状

泄洪深孔是三峡水利枢纽最重要的泄洪设施,每年运用时间长,启闭操作频繁,运用水头高。水位变幅大,最大流速超过35 m/s,且水中挟带泥沙,磨蚀问题较为突出,故造成水封全面性及局部性的破损(见图1)。



图1 破损水封在侧面钢衬上产生的射水印记图

泄洪深孔弧形工作门水封分为顶水封、顶水封橡皮垫、侧水封、转角水封及底水封。

自2005年起,每年针对性的进行泄洪深孔弧形工作门水封更换工作。10多年的时间,泄洪深孔弧门水封基本上都需整体进行更换消除闸门漏水或射水现象,同时有的孔位弧门水封并未到达使用年限而再次进行了更换。而此现象实际上常常为水封局部损坏造成,为此进行的弧门全水封更换导致耗费了更多的人力、工期与材料消耗。

鉴于上述原因,此次引进局部硫化技术对破损的

三峡水利枢纽泄洪深孔弧门水封进行更换。

## 2 施工工艺

三峡泄洪深孔弧门水封破损处常常发生P型方头侧水封(P60B-11931mm)上,P型圆头顶水封及其橡皮垫为一整套(一般很少漏水),底水封为普通平型水封(更换较易),故局部硫化更适用于侧水封局部更换。故此次以弧门侧水封局部粘结工艺做说明。

### 2.1 材料、工器具等准备

由于三峡泄洪深孔弧门侧水封局部粘结需在深孔弧门侧墙空腔与门体背水面格梁之间搭设硫化平台,属于高空临空作业,同时光线较暗,故需配备安全防护及照明措施。故需安全带6付、安全网2张、照明灯具布置、剪刀1把、锉刀1把、手锤1把、生胶片1公斤、95号汽油5L、备用水封1条、简易硫化机1台<sup>[4]</sup>、木板若干。

### 2.2 施工过程

1)首先需将破损处水封上下多放200 mm长的量进行切除,将新的侧水封按切除下来的尺寸进行取样。

2)搭设好硫化平台,接好简易硫化机电路线(见图2~图3)。

3)进行局部硫化粘结,新侧水封需进行与旧侧水封上、下段共2次粘结。粘结过程中需严格控制温度,

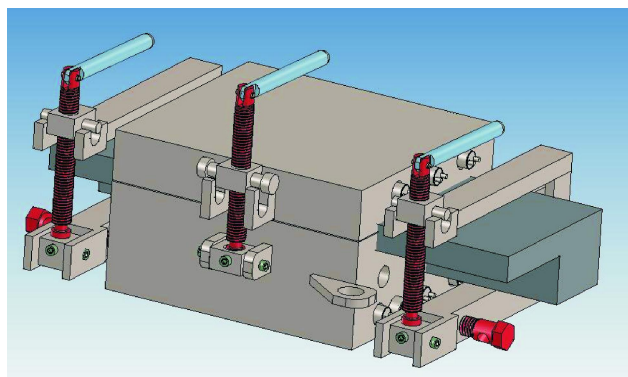


图2 简易硫化机三维模型图



图3 简易硫化机现场电线搭接图

加热温度一般控制在  $130 \sim 160^{\circ}\text{C}$ ，硫化时间控制在  $60 \text{ min}$  以内。加热硫化粘结后接头部位应粘结牢固，无裂口，无海绵，凸起、凹面不得超过  $0.5 \text{ mm}$ ，见图4、图5。



图4 水封粘前

图5 水封粘后

### 3 橡胶水封更换方案对比

因三峡水利枢纽泄洪深孔弧门橡胶顶水封及侧水封由拐角水封粘结连接，故若整条水封更换的话常常需顶水封、侧水封及拐角水封一起粘结成门型水封后更换，其更换流程如图6。

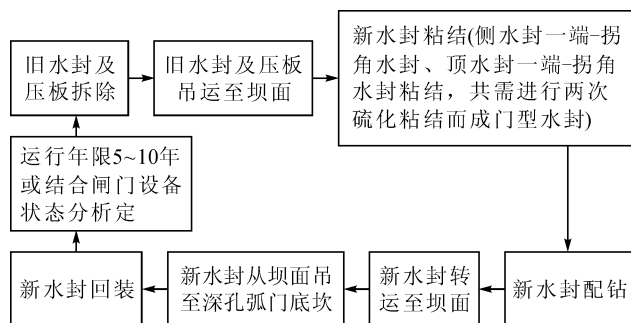


图6 更换流程图

旧水封及压板拆除→旧水封及压板吊运至坝面→新水封粘结(侧水封一端-拐角水封、顶水封一端-拐角水封粘结，共需进行两次硫化粘结而成门型水封)→新水封配钻→新水封转运至坝面→新水封从坝面吊至深孔弧门底坎→新水封回装。

整个工作工期为  $30 \text{ d}$ ，每天需工人  $6$  人，总消耗人工  $180$  人。局部旧水封切除、局部硫化工作  $1 \text{ d}$  内完成，回装需  $1 \text{ d}$ ，每天需工人  $6$  人，总消耗人工  $12$  人。局部硫化更换方案人工、工期是传统更换方案的  $1/15$ ，备用水封可多次使用，减少了整套门型水封的消耗。

局部硫化更换近年来实行过，取得了良好的效果，详细比较见表2。

由于三峡泄洪深孔弧门水封为高水头高强度橡胶水封，局部硫化技术在泄洪深孔弧门水封更换中也是有适用条件的。由于侧水封长有  $11\,931 \text{ mm}$ ，由  $4$  到  $5$  块压板压在门体上进行止水，同时由于汛期弧门启闭频繁，故侧水封中段及底段拐角处最容易产生漏水或射水。更换前需统计弧门射水或漏水点，如有些射水点或漏水点为螺栓松动造成，仅需拧紧螺栓即可消除。若为水封破损或变形造成漏水或射水，且部位比较多的话，此时较多部位进行局部硫化粘结更换会造成水封各处受力不均，粘结处容易撕裂，从而造成水封漏水或射水，达不到水封修复的效果。故此种情况需进行整条水封更换。

### 4 结语

三峡电站泄洪深孔是三峡-葛洲坝水利枢纽的重要组成部分，担负着防洪、航运、调度等功能。水电站水工钢闸门漏水量较大时，若长时间不处理，则高压水柱会对过水流道及侧墙等造成一定冲蚀，同时也造成水资源浪费。若在泄洪等过水流道检修过程中，闸门水封漏水，则会严重影响泄洪等过水流道检修施工质量及施工安全，故三峡水利枢纽泄洪深孔破损水封及

表2 橡胶水封更换方案的优势与劣势比较表

更换方案	优势	劣势
局部硫化	①无需整条水封拆装,仅局部破损段切除后进行粘结更换;②整条水封更换常常影响到拐角处,故需重新进行粘结拐角后回装;③节省人力、工期与材料损耗;④操作灵活多变,针对性强,无需受大面积水封吊装作业等条件的限制	①局部粘结受到加热温度、加热时间等的影响,粘结时需实时监控;②由于三峡泄洪深孔弧门水封为高水头高强度橡胶水封,故局部粘结技术更多适用于局部有少量破损变形的侧水封,若破损变形处多,需进行整条更换
整条更换	①拆装、整体粘结成门型水封工艺成熟、可操作性强;②适用于泄洪深孔弧门全水封更换	①需整条水封拆装,整条水封更换常常影响到拐角处,故需重新进行粘结拐角后回装;②需更多人力、工期与材料损耗;③需受大面积水封吊装作业、汛期抢修等条件的限制

时的更换对保证电站安全运行有着十分重要的作用。此次结合工程实际,选择对破损水封进行局部硫化更换的方案。方案实施以来,整体止水效果好,质量满足要求,为以后泄洪深孔弧门水封更换工作提供了很好的借鉴意义。通过方案实施总结出以下建议:

1) 三峡泄洪深孔弧门水封破损处常常发生P型方头侧水封(P60B-11931 mm)上,P型圆头顶水封及其橡皮垫为一整套(一般很少漏水),底水封为普通平型水封(更换较易),故此局部硫化更适用于侧水封局部更换;

2) 由于三峡泄洪深孔弧门水封为高水头高强度

(上接第61页)

次拆装后各密封面由于缺乏装配补偿量,易造成渗漏。反复拆装也会在接头体内锥面产生压痕,影响密封性。同时,反复拆装也容易造成接头体外螺纹与压紧螺母脱丝、变形等影响连接的不利情况发生。

为减少渗漏风险,重新装配时应注意在拆前标记接头体与压紧螺母的相对位置;使用扳手把压紧螺母旋转到原先的位置;用扳手慢慢拧紧,感到扭矩略微增加即可。

## 4 结 语

卡套式管接头因其结构简单、使用方便、无需焊接等特点,广泛地应用于水电厂液压系统管路中,但在使用时,如果忽视对其材料、制造、检验、安装、维护、检查等方面的管理,就很容易引起渗漏。本文从水布垭电厂液控管路所用卡套式管接头的密封结构和工作原理出发,对其密封性能进行了分析,并结合管路现场实际

水封,故若整条侧水封中破损或变形处较多,此时局部硫化更换不适用,建议需进行整条侧水封更换;

3) 局部硫化更换破损水封取得了良好的效果,可积累经验应用于相似情况的水电站。

### 参考文献:

- [1] DL/T 5018-2004, 水电水利工程钢闸门制造安装及验收规范[S]
- [2] HG/T 3096-2011, 水闸橡胶密封件[S]
- [3] 艾绪根, 张易, 徐鑫. 浅谈三峡水利枢纽深孔弧门水封现场粘结及安装工艺[J]. 中国三峡, 2013, 9(1): 73-76
- [4] 万刚, 等. 一种水工闸门橡胶水封粘接硫化机[P]. 中国, CN201520554873.7. 2015-07-29

工作情况,在配管精度、初次安装、管路振动、温差变化、反复拆装等方面对接头出现渗漏问题的原因进行了分析,有利于后续管路密封改造工作的顺利进行,也为其他电厂液压管路在卡套式管接头的选型、安装、维护等方面提供了借鉴。

### 参考文献:

- [1] GB/T3765-2008, 卡套式管接头技术条件[S]
- [2] 吴健. 高压卡套接头在液压系统中的应用[J]. 江苏船舶, 1996, 13(6): 38-39
- [3] GB/T3733-2008, 卡套式端直通管接头[S]
- [4] GB/T3764-2008, 卡套[S]
- [5] GB/T3759-2008, 卡套式管接头用连接螺母[S]
- [6] GB/T3090-2000, 不锈钢小直径无缝钢管[S]
- [7] GB/T8163-2018, 输送流体用无缝钢管[S]
- [8] GB/T14976-2012, 输送流体用不锈钢无缝钢管[S]
- [9] GB150-2011, 压力容器[S]

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.016

# 三峡库区城镇移民安置区社区管理方式研究

许凯<sup>1</sup>, 樊连生<sup>2</sup>

(1. 扬子江工程咨询有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 长江工程监理咨询有限公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 三峡库区百万移民已搬迁安置完成近 10 年, 在社会转型的新的历史背景下, 库区城镇移民安置区社区管理方面也出现了新的问题, 需要不断改革和创新管理方式。从健全移民安置区社区组织结构、推进移民安置区社区管理的社会化进程等入手, 对改革和创新库区城镇移民安置区社区管理方式进行了研究和探讨, 提出了一些有针对性的政策建议。

**关键词:** 三峡库区; 城镇移民; 社区管理

中图分类号: F406.14      文献标志码: C      文章编号: 1671-3354(2020)01-0066-02

## On the Community Management Method of Urban Resettlement Region in Three Gorges Reservoir Area

XU Kai<sup>1</sup>, FAN Liansheng<sup>2</sup>

(1. Yangtze River Engineering Consulting Co., Ltd. (Hubei), Wuhan 430010, China;

2. Changjiang River Engineering Supervision and Consulting Co., Ltd. (Hubei), Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The resettlement of millions of migrants in Three Gorges Reservoir area is completed for nearly 10 years. Under the current social transformation conditions, new problems are encountered in the community management of urban resettlement region, which can only be solved by continuous reform and innovation of management methods. From the aspects of the improvement of the community organization structure and the promotion of the socialization process of the community management, some corresponding policy suggestions are made for the reform and innovation of community management methods of urban resettlement region.

**Key words:** Three Gorges Reservoir area; urban resettlement; community management

我国正处于社会转型的关键期, 三峡库区百万移民已搬迁安置完成近 10 年, 社会转型及社会秩序的重构对和谐库区的建设至关重要。由于库区内部各要素之间发展失衡、城镇与乡村发展失衡等原因, 库区在社会转型的过程中仍存在突出的一些困难和问题<sup>[1-2]</sup>。

目前, 三峡库区城镇移民安置区社区管理工作中, 主要参与者为移民管理部门、街道办事处、社区居民委员会等。由于在较多移民安置社区中, 既有搬迁过来的移民, 又有原来就居住在此的城镇居民, 所以移民管理部门也需要经常协助参与到移民社区管理工作中。三峡移民从搬迁开始至今已超过 20 年, 一方面, 由于年久失修等原因, 移民安置社区内部分基础设施和公共服务设施出现损坏, 影响正常使用; 另一方面,

由于未建立物业管理机制等原因, 维护管理机制不到位, 出现损坏问题的设施不能得到及时维修<sup>[3-4]</sup>。

党的十九届四中全会作出了要推进国家治理体系和治理能力现代化的重大决定, 提出要“构建基层社会治理新格局”, “健全社区管理和服务机制”, 也为三峡库区城镇移民安置区社区管理工作的改进指明了新的方向。因此, 在新的时代背景下, 对三峡库区城镇移民安置区社区管理方式进行研究, 具有重要的现实意义。

### 1 健全移民安置区社区组织结构

在三峡库区城镇移民安置区构建新型社区治理模式, 健全和完善的组织结构非常重要。城镇移民安置

收稿日期: 2019-12-09

作者简介: 许凯, 男, 工程师, 主要从事水利水电工程移民规划咨询及评估方面的研究。

通讯作者: 樊连生, 男, 工程师, 主要从事水利水电工程移民规划咨询及评估方面的研究。

区社区组织健全的目标则是建立以区行政组织支持为后盾的,以市场化服务组织为支撑的,以社区自治为纽带的,社会组织和居民积极参与的新型社区管理组织体系。

1)“一核三级多元”的社区管理模式。考虑三峡库区城镇移民安置区相对集中等现实特点和搬迁安置历史过程,移民安置区社区可按照“一核三级多元”的社区管理关系模式建立新型的社区管理组织体系。其中,“一核”是指社区体制责权利的核心关系,其派生出“三级多元”纵横体系架构中的权责利关系。“三级”是指纵向的管理关系,即县级政府职能部门、街道办事处、社区居委会各机构之间的关系;“多元”是指社区内多个参与主体之间的关系,包括基层党组织、社会组织、企业、社区居民、社区精英等多利益主体的横向协调及合作关系。

2)加强社区自治制度建设。支持和引导社区居委会等自治组织的制度建设,对现有社区居民委员会的权责利进行界定,健全议事规则,不断提高社区居委会“自我管理、自我教育、自我服务”的水平和能力,同时,充分发挥社区居委会妇女、残疾人等专业委员的重要作用;制定一些新的政策,鼓励和扶持其他有关社会组织,引导社会资源流向社区公益服务事业,提升社区公共服务水平。

3)探索试点物业管理模式。物业管理方式是现代化城市小区管理的普遍和有效方式,三峡库区城镇移民安置区也可探索和实施,可选择有条件的社区进行物业管理服务试点,逐步完善物业管理服务机制,以逐步提升移民安置区居住环境。第一,可推动有条件的社区成立业主委员会,明确业主的物业所有权的主体作用,发挥业主委员会在选聘物业管理公司、监督物业服务过程、组织业主大会活动和做出重大决策方面的作用。第二,地方政府可探索设立专门的维护基金,将移民安置区社区公共利益有重大影响的公共服务项目,如社区环保、治安、绿化、房屋维修等,采用政府购买服务的方式,建立物业管理服务机制。

4)增强社区成员的参与意识。公众参与能应对社区管理日益复杂化的需要,对社区自治和社区发展等方面均发挥着重要的作用。社区参与是实现社区自治和促进公民社会发育的有效途径,健全社区组织与管理制,培养社区居民的民主参与意识,为社区居民参与社区治理提供制度途径。政府、社区组织、居民、企业、非营利组织都是社区治理的参与者,政府应当通

过制度建设和组织建设,建设居民社区参与网络,增强社区信任和合作。可以先从小事做起,如先让居民参观社区管理场所,宣传社区管理的组织体系与办事流程,让居民充分了解社区与社区生活的规矩,了解了才能有效参与。

## 2 推进移民安置区社区管理的社会化进程

三峡库区城镇移民安置区社区管理方式的改革和转型,是一项系统工程,在这一过程中,不同社会组织的共同参与非常重要,同时,也需要不断创新有关社区管理制度。

1)鼓励和引导社会组织参与社区管理。创新三峡库区城镇移民安置区社区管理方式,既要发挥各级政府管理部门的作用,同时,还要鼓励和引导社会各界以及专业人士,多层次、立体化、全方位参与社区管理。可根据不同社区的实际情况,探索建立工商经济、公益慈善、群众生活等不同类型的社会组织,整合资源,共同参与社区管理,增强移民归属感。

2)创新社区管理制度。社区治理机制的完善,离不开社区管理制度的创新发展。第一,可适当营造创新管理的舆论氛围,通过不同层面的宣传教育,让社区居民充分认识到创新管理的现实意义,形成加强和创新社区管理的共识。第二,在探索设立业主委员会的同时,还可由各个楼栋推选,创新设立业主委员会顾问监督组,维护社区居民合法权益。第三,还可试点设立法律援助站,定期邀请有关专业律师为社区居民提供法律援助服务,切实维护社区居民的合法利益;与地方医院建立合作,邀请相关医务人员为社区内年满60周岁的居民进行义诊和宣传健康知识等<sup>[5-6]</sup>。

3)建设社区信息化平台。信息化技术的进步不断改变人们的生活方式,很多传统的工作方法已很难适应新时代移民安置区社区管理要求,在三峡库区城镇移民安置区社区管理中,引入信息化方式也是一种可以尝试的创新方式。第一,充分利用信息技术,逐步建立移民安置区社区信息化平台,促进不同社会组织信息交流和知识共享,推动移民安置区社区管理的科学化和社会化水平。第二,探索试点智能化移民安置区社区管理模式,方便社区居民随时查看社区公共收支、社区公告、工程招标等信息,还可进行报修处理、社区事务投票等,既提高管理透明度,又方便移民群众的日常生活<sup>[7]</sup>。

(下转第71页)

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.017

# 西藏光水互补发电研究现状与对策

刘 威

(华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司, 西藏 拉萨 850000)

**摘要:**通过分析国内外和西藏光水互补发电技术研究现状,建立光水互补物理模型,探索了光水互补运行模式,并对阿里地区水电站9.6 MW + 光伏电站10 MW进行光水互补经济效益可行性分析,针对西藏实际情况提出了建立联合工程技术中心、引进新能源技术人才、利用水电站回填渣场建立光伏电站、大力开发利用光水互补发电技术等建议。

**关键词:**西藏;光水互补;发电系统;现状与对策;运行模式;经济效益分析

**中图分类号:** TM619      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-3354(2020)01-0068-04

## Current Situation and Countermeasures of Photovoltaic Power and Hydropower Complementary Generation in Xizang

LIU Wei

(Huaneng Xizang Yarlung Zangbo River Electric Development Investment Co., Ltd., Lhasa 850000, China)

**Abstract:** Firstly, a review is presented on current situation of the photovoltaic power and hydropower complementary generation technology. Then, a physical model of the photovoltaic power and hydropower complementary generation system is established. The operation modes of the complementary generation system are discussed. Specifically, a complementary power generation system with a 10 MW photovoltaic power station and a 9.6 MW hydropower station is proposed for Ali District, and the economic feasibility of the system is analyzed. Finally, several suggestions are made considering the practical conditions in Xizang area, including the establishment of joint engineering technical center, introduction of talents with new energy technology, construction of photovoltaic power stations in waste backfill fields of hydropower stations, and further support of the research and application of the photovoltaic power and hydropower complementary generation technology.

**Key words:** Xizang; photovoltaic power and hydropower complementation; power generation system; current situation and countermeasures; operation mode; economic benefit analysis

西藏地区传统能源十分缺乏,电网覆盖率底,无法满足全区农牧民的生活用电问题,但全区太阳能与水电资源储量极为丰富。当前,西藏水电存在因季节性缺水问题,发电机组损坏严重,发电量少且不稳定等问题;全区光伏产品市场份额仍比较小。光水互补发电系统是双向互补系统,可根据外界环境变化、负载特性等灵活调动,承担电力系统调峰任务,提高电能输出质量,对缓解全区电力需求增长问题有重要意义。

### 1 光水互补发电研究现状

在光水互补上,杨清<sup>[1]</sup>建立了独立型水光储微电

网容量优化配置模型,以水电机组启停次数为优化评价指标,综合考虑各种约束条件及能量管理策略,利用粒子群优化算法验证了模型的有效性。邢健<sup>[2]</sup>验证了抽水蓄能电站可缓解光伏电站接入对局域电网的影响。杜俊<sup>[3]</sup>以来水量、光照强度为因子,采用遗传算法筛选出了最适合光水联合运营的调度策略。黄河公司提出了龙羊峡“光水互补电站”项目,共有4台320 MW的水电机组和1台320 MW光伏机组,使线路利用率提高到了5 019 h,该电站光水互补协调运行效果良好、运行稳定<sup>[4]</sup>。

针对西藏地区,当前没有大型光水互补电站,光水

收稿日期:2019-07-24

作者简介:刘威,工程师,主要从事高原水电及新能源开发利用方面研究。

互补发电技术也处在初期研究阶段。孟涛<sup>[5]</sup>、杨秀媛<sup>[6]</sup>针对适用于西藏阿里地区的光/水/储/柴互补独立电力系统进行了运行方式分析和仿真研究,提出了小容量独立电网中光伏电站储能装置的改进 PQ 下垂控制及两种功率外环控制策略。万久春<sup>[7]</sup>探讨了阿里地区风光蓄水互补开发方式的可行性。

## 2 西藏光伏与水电开发利用现状

### 2.1 太阳能利用

截至 2015 年年底,西藏全区光伏总装机容量达到了 199 MW,其中多数是由大型 MW 级光伏电站组成。微小型光伏发电系统主要推广应用的产品有太阳能热水器、太阳能手提式便携灯、太阳能户用系统等。此外,2~5 kW 的光伏通讯基站也广泛应用于青藏铁路、G318、G217 等主干道沿线。全区从事太阳能开发利用的企业达到了百余家,企业代表有国电投西藏公司、中源能源、金凯能源等。“光电计划”、“金太阳工程”等项目为西藏太阳能资源开发利用做了良好铺垫,但仍存在体制、人员不足,太阳能高效利用、光热利用、多能互补利用技术缺乏等诸多问题。

### 2.2 水电利用

截至 2015 年,西藏全区水电装机容量达到了 1 057 MW,输变电路总长度达到了 3 万 km。“十二五”期间,全区建成了昌都金河、拉萨直孔、林芝老虎嘴等多座水电站;建成了区内第一条 220 kV

输变电路;电网最高电压等级提升到了  $\pm 400$  kV(DC)、 $\pm 500$  kV(AC);青藏直流联网、川藏联网工程都纷纷建成投产。全区从事水电开发的企业主要有中国华能、华电、大唐等,主要开发片区有雅鲁藏布江、“三江流域”以及拉萨年储河和尼洋河等两河流域。西藏水电在政府和企业的带领下飞速发展,但主要以开发大型水电站为主,缺乏对光水互补发电的开发利用。

## 3 光水互补发电系统

### 3.1 光水互补发电系统原理

光水互补发电系统由水电站、光伏电站和 PID 策略控制中心三大部分组成,其系统构成如图 1 所示。工作原理是:光伏发电系统通过太阳能电池板吸收转化太阳能形成交流电 A,水电发电系统经过水轮机等水电站辅助设备将水能转化成机械能最终形成交流电 B,将交流电 A、B 分别输入到 PID 策略控制中心,通过控制中心的程序控制与反馈处理,对交流电 A/B 进行整合输出供给负载使用。其中,蓄电池组 2 作为整个光水互补系统的储能装置,需要大容量配置,其造价会比较高;但它具有调节电能质量和平稳电力输出的优越性。如有多余电量,可以上传到公共电网。也可以开展独立光伏发电系统、独立水电发电系统,各个影响因素对整个光水互补发电系统的影响等研究工作。

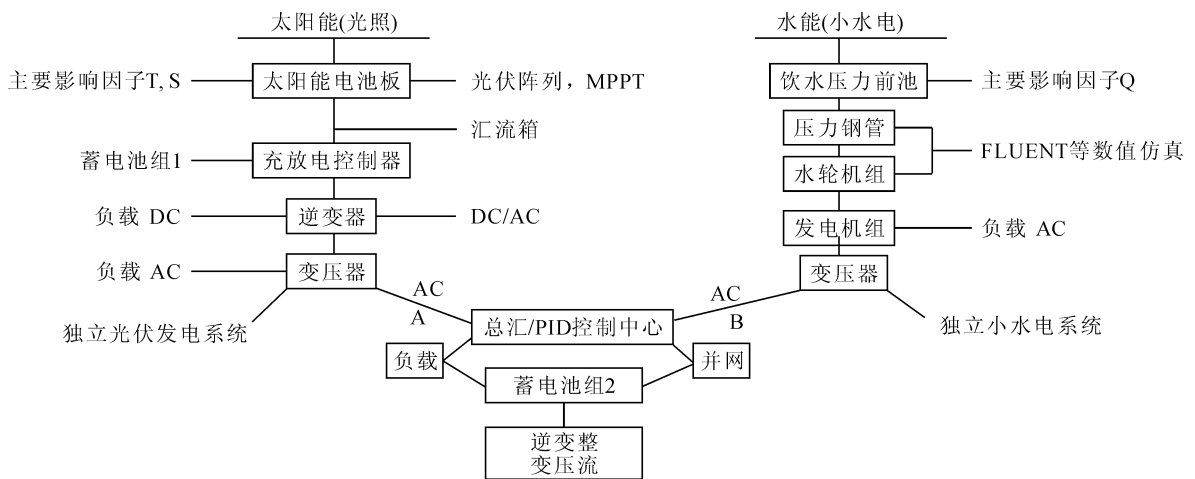


图 1 光水互补发电系统原理图

### 3.2 光水互补物理模型

根据光水互补的原理,搭建了光水互补的物理模型,如图 2 所示。其中水电站由引水系统、蓄水系统、

电动机启停机组、大坝闸门、压力钢、支墩、水轮机、发电机组、尾水管以及其他辅助设备组成;光伏电站由太阳能电池板阵列、汇流箱、充放电控制器、逆变器等组成。光伏发电与水力发电均输送至厂房内的中心调控



室,与互补控制中心进行数据处理与策略控制,再进行整流、滤波、储能、变电等处理,最后输变电给负载使用。其中,光伏电站的建设可以安装在厂房顶部或者

受光照面上,也可以安装在厂房附近通过电缆与中心控制进行连接,其他组成部分的建设安装依据相关标准和要求进行。

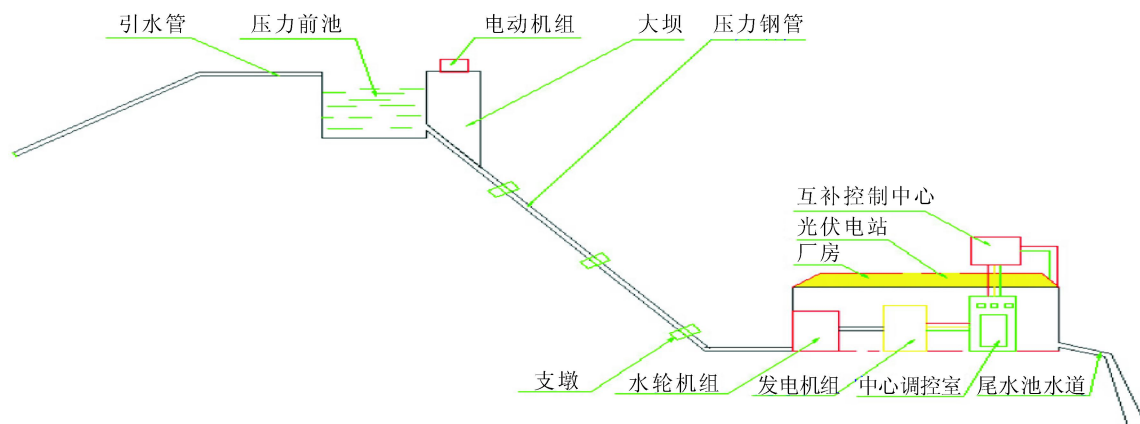


图2 光水互补的物理模型图

### 3.3 光水互补运行模式

根据装机容量和负荷分配情况,光水互补发电系统可分为主从式和对等式两种<sup>[8]</sup>。

主从运行方式可分为以“水电为主,光伏为辅”和以“光伏为主、水电为辅”两种。“光伏为主、水电为辅”模式、因其造价太高,投入与收益不成正比,在实际生产生活中不适用。“水电为主,光伏为辅”模式下,水电站为主电网,电网的频率与电压依靠水电站维持,光伏电站并网运行作为辅助电源,两者同时接受调度指令以满足变化的负载需求。该模式下水电站承担基荷较大,泄水量较大,需要坝前蓄水量足够充分。在白天光照辐射较强时,光伏电站出力水平较高,可以减小水电发电的出力。该模式是当前光水互补系统应用

最典型的模式,也是将来光水互补电站研究的重点。

对等模式是指光伏电站与水电站在装机容量中所占的比例对等。白天由光伏电站作为主要电源进行供电,供给负载使用或者上传至公共电网;夜间由水电站作为主要电源进行供电;当负载较大时,由光伏电站和小水电站同时供电。该模式下光伏发电及储能系统承担系统的调峰调频作用,需要较大蓄电池容量,建设成本较高。

## 4 案例应用与经济效益分析

吴迪<sup>[9]</sup>综合考虑水电、光伏以及柴油发电等因素,建立了10 MW阿里光/水/蓄/柴互补微网系统,其装机组成见表1。

表1 阿里地区微网建设方案表

方案	水轮机	光伏组网	光伏并网	柴油发电机	储能电池
装机/MW	9.6(6×1.6 MW)	6.5(13×0.5 MW)	3.5(7×0.5 MW)	5	9.6(100V×12AH×8000)

针对上述方案中的光水互补模块进行经济效益分析如下。

水电站装机为9.6 MW,光伏电站为10 MW。该电站主要含盖建设费用和后续电站维护费用。阿里地区建设成本较高,非常规值,本文以华能藏木水电站(1.88万元/kW)、加查水电站(1.77万元/kW)建设费用为参考,结合藏区其他水电建设费用,取水电站建设费用单价1.5万元/kW。那么,此方案建设费用为9.6 MW×1.5万元/kW=14 400万元。光伏电站的建设设备包括逆变器、汇流器、控制器、电池板、光伏支架及其配件、蓄电池、避雷装置、调控监控室、电缆等装

置。当前光伏建设成本逐年下降,市场均价(8~12)万元/kW,本文取10万元/kW为计算价格。那么,10 MW的光伏电站建设费用为10 000万元。所以,该方案总的建设费用为24 400万元。该方案后续的维护费用,以光伏电站的使用寿命为25年(为一次性投入)计算,维护费用主要集中在设备的跟换上,此处以项目25%作为维护费用;但水电站的维护费用较高,如水轮机的保养维护等,此处以项目30%进行计算。那么该方案的实际投入总费用为31 220万元。

针对该方案的效益分析,以光伏电站每天照射时间8h进行计算,光伏电站日发电量为10 MW×8 h×

$0.75 \times 0.8 = 48\ 000\ \text{kW} \cdot \text{h}$ ,其中0.75为光伏发电系统综合发电效率,0.8为每天光照的有效时间效率;水电站日发电量为 $9.6\ \text{MW} \times 24\ \text{h} = 230\ 400\ \text{kW} \cdot \text{h}$ 。那么,该方案中光水互补型电站日总发电量为 $230\ 400 + 48\ 000 = 278\ 400\ \text{kW} \cdot \text{h}$ ,折合成标准煤约 $111.36\ \text{t/d}$ 。按照西藏发改委给予的光伏发电单价补贴( $0.3\ \text{元/kW} \cdot \text{h}$ ),假设发电量全部被使用(民用电 $0.5\ \text{元/kW} \cdot \text{h}$ 、工业用电 $1.2\ \text{元/kW} \cdot \text{h}$ ),则光伏电站日发电经济效益为 $48\ 000\ \text{kW} \cdot \text{h} \times \{(0.3 + 0.5) \sim (0.3 + 1.2)\ \text{kW} \cdot \text{h}\} = (38\ 400 \sim 72\ 000)\ \text{元}$ ;水电站日发电经济效益为 $230\ 400\ \text{kW} \cdot \text{h} \times 0.3\ \text{元/kW} \cdot \text{h} = 69\ 120\ \text{元}$ 。那么,25年该方案光水互补型电站所产生的总经济效益总额为 $\{(38\ 400 \sim 72\ 000) + 69\ 120\}\ \text{元} \times 25 \times 365 = (98\ 112 \sim 128\ 772)\ \text{万元}$ ,为初期建设费用的(3.14~4.12)倍。根据计算,光水互补在经济效益上是完全可行的。

## 5 结 语

光水互补发电可满足在丰水期和枯水期用电量的周期性变化,减少昼夜变化的不稳定性;在建设和运营上,光伏电站和水电站在土建和电气部分的建设上较多相似之处,可利用水电站开挖渣场或回填地作光伏电站用地降低成本,还可以共用输变电装置;在对环境影响上,建设和运营阶段不产生新的“三废”排放。

1)当前,在藏光伏电站与水电站建设费用已经基本上持平,而太阳能源源不断、清洁无污染、不受库容、调峰等影响,优势明显,可大力发展光水互补电站。

(上接第67页)

## 3 结 语

在我国正处于社会转型的关键期这一新的历史背景下,三峡库区城镇移民安置区作为一个特殊的社区范围,社区管理方式也要随着时代的变迁而做出相应的改变。本文结合三峡库区城镇移民安置区搬迁历史过程、现实情况等,对其社区管理方式的改革和创新进行了研究的探讨,可为三峡库区及其他大型水利水电工程移民安置区社区管理方式的改革提供一些借鉴意义。

### 参考文献:

- [1]文军. 社会转型与转型社会:发展社会学的中国观照及其反思[J]. 中国社会科学评价, 2017(4): 25-31
- [2]周超,黄志亮. 三峡库区小城镇基本公共服务设施分布特

2)政府应提高对光水互补发电技术重视程度,挖掘光水互补发电巨大市场潜力,加大高原特色光水互补技术研究,建立地方政府、高校和企业联合工程技术中心和实验室,大力引进新能源技术人才。

3)建议地方政府出台有力新能源发电补贴政策,鼓励在藏企业大力发展光水互补发电技术的研究与投入,可以华能加查和藏木水电站回填渣场建立光伏电站,搭建光水互补发电系统和集控运行系统,攻克互补发电技术各个重难点。

### 参考文献:

- [1]杨清,袁越,王敏,等. 独立型水光储微电网系统容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 37-44
- [2]邢健. 抽水蓄能—太阳能系统联合运行可行性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012
- [3]杜俊. 光—水复合能源联合发电的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011
- [4]王信茂. “水光互补”创新可再生能源发展模式[J]. 中国电力企业管理, 2014(12): 81-83
- [5]孟涛. 多能互补独立电力系统控制策略及动态仿真分析[D]. 北京:华北电力大学, 2012
- [6]杨秀媛,黄丹,申洪. 多能源互补独立电力系统的控制策略仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 156-162, 21
- [7]万久春. 阿里地区能源利用方案及多能互补系统研究[D]. 成都:四川大学, 2003
- [8]连瑞娜. 独立光伏发电系统 MPPT 的模糊 PID 控制研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2011
- [9]吴迪. 微电网的运行模式及控制策略研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014
- 征研究——以三峡库区重庆段 385 个小城镇为样本[J]. 西部论坛, 2017(3): 96-105
- [3]王强,吴炳方,张磊,等. 三峡库区城镇移民家庭生活安置状况调查与分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011(3): 357-364
- [4]李庆,黄诗颖. 水库移民社会治理创新研究[J]. 人民长江, 2016, 47(14): 98-103
- [5]夏海鹰. 三峡库区移民社区教育模式的创建及价值研究[J]. 西南民族大学学报:人文社科版, 2016(2): 219-224
- [6]李虎,王九林. 论三峡库区城市空巢老人社区服务体系的构建——以重庆市万州区为例[J]. 三峡大学学报:人文社会科学版, 2019(1): 28-32
- [7]熊艳,樊连生,黄诗颖. 互联网背景下移民后期扶持监测评估创新探讨[J]. 人民长江, 2016(19): 115-117

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.018

# 一例干式变压器匝间短路故障分析

周平, 叶华松, 吴礼贵

(中国长江电力股份有限公司, 湖北宜昌 443133)

**摘要:** 在一例干式变压器损坏故障分析过程中, 高压侧故障电流为两相对称反向电流。经对变压器高压侧电压电流波形的分析, 结合变压器吊心检查, 排除了变压器低压侧存在单相接地故障的可能性。通过 Simulink 对高压侧小匝间短路故障进行仿真, 得到了与故障电流电压波形相吻合的结果。变压器高压绕组的解体结果, 确认了匝间短路故障的存在, 验证了仿真分析结合变压器解体方法在变压器匝间短路分析中的有效性, 为变压器匝间短路分析提供了一种分析方法。

**关键词:** 干式变压器; 匝间短路; 故障录波; 仿真

中图分类号: TM41

文献标志码: A

文章编号: 1671-3354(2020)01-0072-04

## Analysis of an Inter-turn Short-Circuit Fault of Dry-type Transformer

ZHOU Ping, YE Huasong, WU Ligui

(China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443133, China)

**Abstract:** An inter-turn short-circuit fault of dry-type transformer is analyzed. It is found that the fault current at the high voltage side is two-phase symmetric reserves current. With an analysis of the voltage and current fault waveforms at the high voltage side, and the core hanging-out inspection, we exclude the possibility of the single-phase grounding fault at the low voltage side. Then, Simulink toolkit is adopted to simulate the inter-turn short-circuit fault at the high voltage side. The results are consistent with the recorded fault current and voltage waveforms. Disassembly inspection of the high voltage windings confirms the existence of the inter-turn short-circuit. It shows that the combination of the simulation method and the disassembly inspection can effectively determine the inter-turn short-circuit fault of transformers.

**Key words:** dry type transformer; inter-turn short-circuit; fault recorder; simulation

目前国内干式变压器广泛地采用环氧树脂绝缘真空浇注工艺, 由于采用固体绝缘, 若变压器本体发生严重电气故障后, 可能故障起始点已完全烧毁, 此种情况仅靠外观检查, 难以判断故障的具体原因。因此对变压器的运行监测数据成为故障分析的主要依据, 如温度、电压、电流等, 特别是故障发展过程变压器绕组电压电流的波形变化, 成为最可靠最直接的原始资料, 本文通过一起干式变压器故障的分析过程, 以故障电流电压波形为基础、以仿真为工具, 通过变压器解体进行验证, 为变压器匝间短路分析提供了一种分析方法。

## 1 故障现象

有1台型号为 SCB10-1000/10.5, 额定电压为 10.5/0.4 ± 2.5% kV, 连接组别为 Dyn11 的干式变

器发生了电气故障, 整个过程有高压侧母线消谐装置告警和低压母线电压  $U_{uv}$  越高限报警信号。保护装置动作后, 停电检查发现变压器 U、V 相外观完好, W 相高压绕组浇注层外部完整, 靠首端有 4 根导线断裂弹出, 低压箔绕组上部呈波浪状严重变形, 疑似非对称短路故障。

## 2 原因分析过程

初步检查完后对故障变压器进行拆除, 并调阅了变压器一次侧 10 kV 开关录波数据, 该开关柜内仅 L1、L3 两相安装电流互感器, 因此仅有变压器 U、W 两相数据记录, 电压信号取自 10 kV 母线电压互感器。波形如图 1 所示, 从图 1 可知, 在保护装置启动时, U、W 相电流几乎对称反相, 启动时一次侧电压幅值和相

收稿日期: 2019-10-08

作者简介: 周平, 男, 高级工程师, 从事水电站电气一次设备技术管理工作。

位无明显变化,故障电流未达到保护定值。

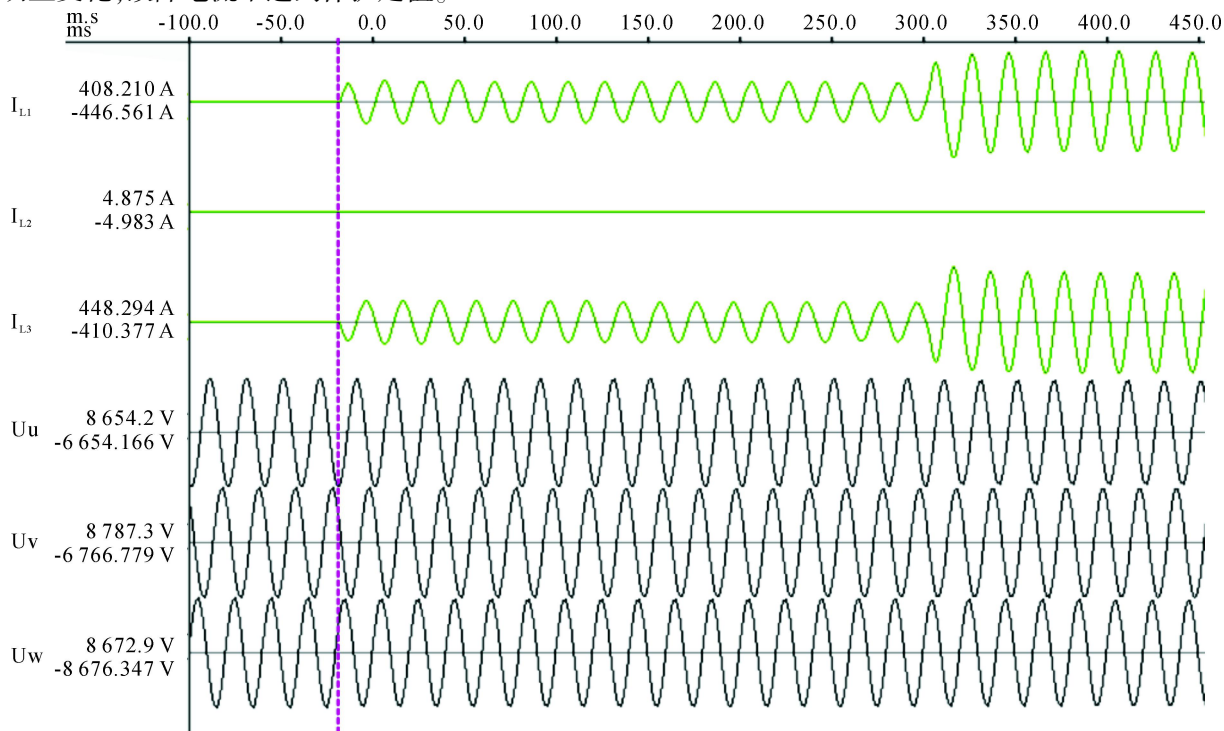


图1 变压器一次侧电流电压波形图

随后母线消谐装置告警,出现了零序过电压,从变压器故障情况看,此时应为变压器一次侧W相绝缘降低。

通过故障波形特征和变压器本体情况,初步判断为W相二次侧低压箔绕组发生单相接地引起一次侧短路故障。

以下从变压器低压侧发生单相接地短路故障进行理论分析。

在供配电系统中,变压器低压侧短路时,短路电流实际上是从电源通过变压器高压侧流到短路点的,将变压器二次侧短路时,其一次侧流过的短路电流称为变压器的短路穿越电流<sup>[1]</sup>,分析本台故障变压器发生低压接地时其短路穿越电流的情况,图2所示为Dyn11连接组的10/0.4 kV变压器低压侧W相发生单相接地的情况。

如图2所示,当W相低压侧发生单相接地时,二次侧的电流情况<sup>[2]</sup>:

$$\dot{I}_{w2} = \dot{I}_k; \dot{I}_{u2} = \dot{I}_{v2} = 0。$$

一次侧的短路穿越电流情况:

$$\dot{I}_{w1} = \frac{\dot{I}_{w2}}{\sqrt{3}K} = \frac{\dot{I}_k}{\sqrt{3}K}, K \text{ 为变压器变比;}$$

$$\text{由于 } \dot{I}_{u2} = \dot{I}_{v2} = 0, \dot{I}_{u1} = \frac{\dot{I}_{u2}}{\sqrt{3}K} = 0, \dot{I}_{v1} = \frac{\dot{I}_{v2}}{\sqrt{3}K} = 0, U$$

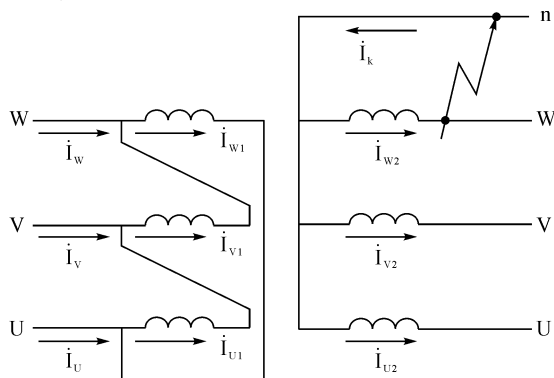


图2 变压器W相低压侧单相接地示意图

相末端与V相首端连接,在一次侧根据基尔霍夫电流定律  $\mathbf{KCL}$ ,  $I_v = I_{v1} - I_{v1} = 0$ ,即V相无穿越电流,因此单相接地短路时,高压侧有两相进线电流大小相同,另一相进线则无电流流过<sup>[3]</sup>,  $I_w + I_u = 0$ ,即U、W两相电流呈反相位。

从以上分析,故障电流波形与变压器低压侧单相接地理论分析一致,符合低压侧单相接地的情况,但监控系统曾报出低压侧  $U_{uv}$  高越限,此现象不符合低压侧单相接地情况,因此还需要对变压器故障进行进一步分析。为寻找低压侧对铁心的放电点,将低压绕组吊出。检查结果显示,低压绕组内侧完好,铁心四周完好,无电弧灼烧及放电点,因此排除低压侧单相接地的推断。

排除低压侧单相接地故障后,推断高压侧可能发生匝间短路。由于变压器高压侧匝间短路参考波形不多,根据仅有W相绕组受损、且初始故障电流不大等现象,将故障类型定位于W相高压侧内部小匝间短路。因高低压绕组粘连在一起,短时难以分解,为了解高压侧绕组小匝间短路故障下变压器高压侧电压电流

波形情况,对变压器的高压侧W相首端附近匝间故障进行了 Simulink 仿真,搭建的仿真模型如图3所示。

为与变压器真实故障进行对比,对变压器高压侧W相进行了匝间故障仿真,其电流波形如图4所示,故障电压波形如图5所示。

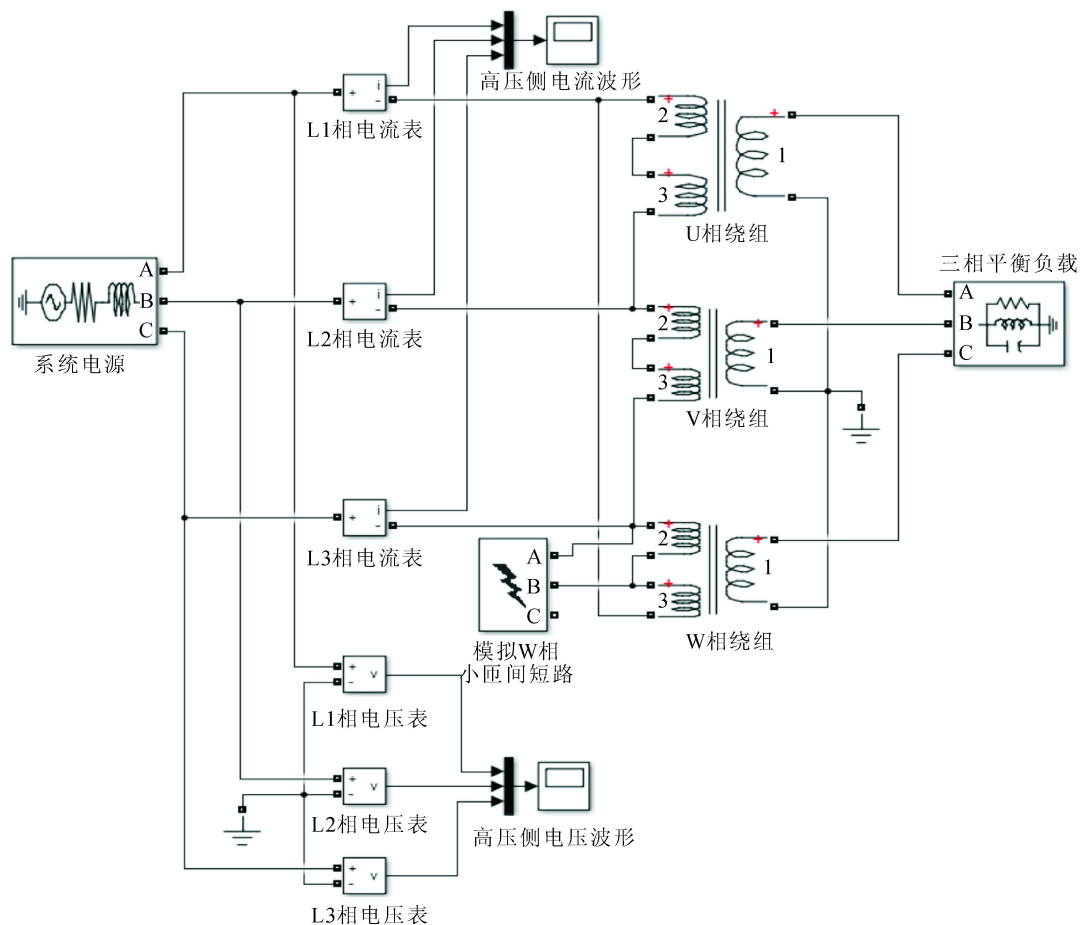


图3 高压侧W相匝间故障仿真模型图

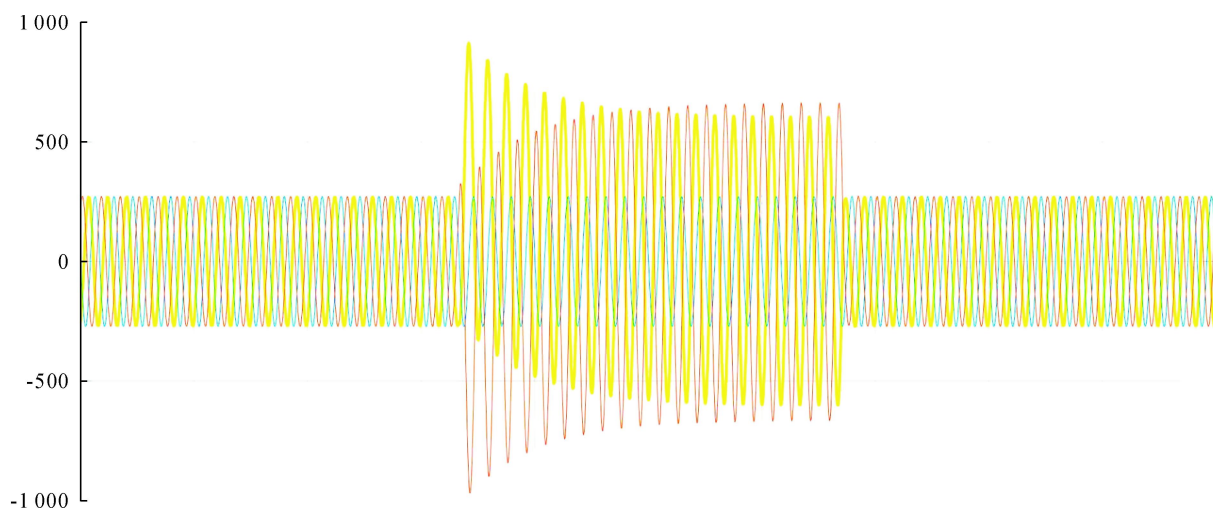


图4 高压侧W相小匝间故障时的三相电流仿真波形图

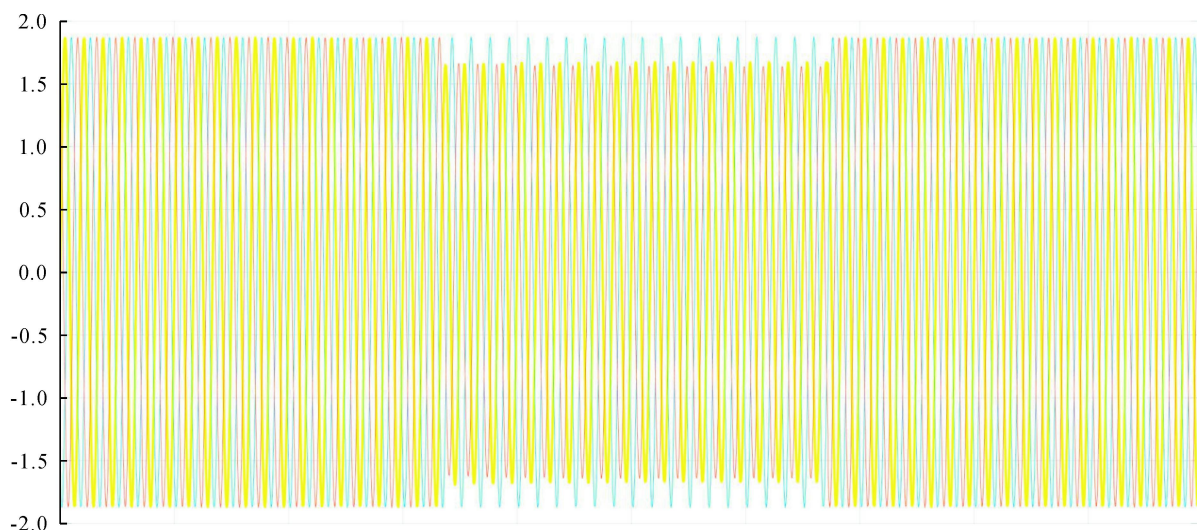


图5 高压侧W相小匝间故障时的三相电压仿真波形图

仿真图形显示匝间短路情况下,一次侧电流U、W相也呈对称反向状态,小匝间短路情况下电压无明显变化,与变压器故障波形一致吻合。

在变压器返厂进行高压侧绕组的检查过程中,在

高压绕组首段线圈中间层发现了匝间短路,变压器线圈共四段,只在首段发现问题,符合小匝间短路判断,具体短路情况如图6、7所示。



图6 高压线圈首段解体情况图

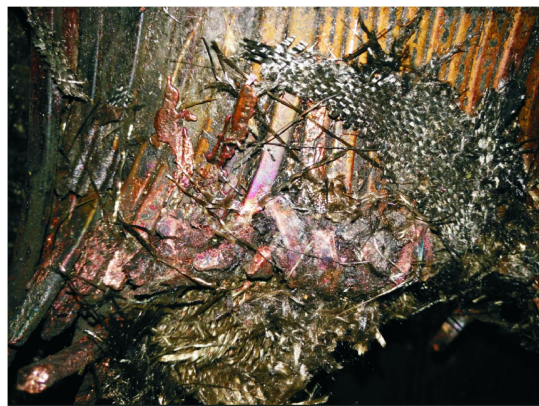


图7 高压线圈匝间细节图

根据故障仿真和变压器实际解体情况的一致性,最终确认高压线圈小匝间短路为变压器损坏的直接原因。

### 3 结 语

变压器近端电气短路故障往往造成变压器本体损坏,甚至烧毁,故障点难以辨识确认,故障录波成为判断发生故障原因的重要数据,但在分析过程中,应全面汇总相关信息,不能草率根据经验忽略一些蛛丝马迹,尤其是不完全符合故障现象的地方,以防失之毫厘,谬

之千里,得到相反的结果,本文以一起干式变压器故障的分析过程为例,为同类型变压器匝间短路分析提供了一种分析方法。

#### 参考文献:

- [1]杨岳. 供配电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [2]幸晓珂, 蒋炜栋. 图析 D,yn11 变压器低压侧不对称短路穿越电流[J]. 建筑电气, 2012, 31(8): 20-25
- [3]张玉起, 杨连起. D,yn11 结线组别变压器的特性和短路电流浅析[J]. 天津纺织科技, 2004, 42(4): 54-56

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.01.019

# 水电设备检修过程中运行管理的探索与优化

王彬<sup>1</sup>, 孙勇<sup>2</sup>

(1. 湖北能源集团股份有限公司, 湖北 武汉 430077; 2. 湖北清江水电开发有限责任公司, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:** 针对发电企业在水电设备检修过程中运行管理存在的一些问题, 基于标准化和信息化手段, 提出检修全过程运行管理的一些新方法, 将设备检修技术控制、进度控制、质量管理以及成本控制作为目标, 在现场检修过程中进行了一系列实践与完善。高水平的运行管理使企业设备检修技术经济特性得到了提高。

**关键词:** 检修过程; 运行管理; 探索与优化

中图分类号: TV737 文献标志码: B 文章编号: 1671-3354(2020)01-0076-03

## Exploration and Optimization of the Operation Management in Maintenance Process of Hydropower Equipment

WANG Bin<sup>1</sup>, SUN Yong<sup>2</sup>

(1. Hubei Energy Group Co., Ltd., Wuhan 430077, China;

2. Hubei Qingjiang Hydroelectric Development Co., Ltd., Yichang 443000, China)

**Abstract:** Some problems of the operation management in maintenance process of hydropower equipment are summarized. Then, several new methods of the operation management are proposed for the whole maintenance process based on standardization and information techniques, in which the technical control, progress control, quality management and cost control of the equipment maintenance are major objectives. Then, practice and improvement of the proposed methods are carried out in on-site maintenance process. With these high level operation management methods, the technical and economic characteristics of the equipment maintenance are effectively improved.

**Key words:** maintenance process; operation management; exploration and optimization

设备检修是指为保持、恢复以及提升设备技术状态进行的技术活动。根据《发电企业设备检修导则》将发电企业设备检修主要分为四种, 分别是定期检修、状态检修、改进型检修和故障检修<sup>[1]</sup>。目前, 虽然发电企业状态检修探索实践已取得不少进步, 但主要检修方式仍以定期检修为主。

设备检修作为发电生产活动重要组成部分, 对电网的安全经济运行都起着非常重要的作用。随着近些年电力企业标准化工作的不断推进, 发电企业设备检修基本也都实现了标准化管理, 其中项目管理的方法应用日趋成熟。通过项目管理方法进行设备检修管理, 将设备检修技术控制、设备检修进度控制、设备检

修质量管理以及设备检修成本控制作为控制目标, 有效地提高了企业设备检修技术经济特性, 实现企业设备检修工作水平的提高。

运行值班调度人员作为发电企业尤其是发电厂现场生产的中枢和各级电网调度的协调人员, 是发电企业设备检修过程中的安全协调中心。由于不同的水电厂管理模式不近相同, 各具特色, 为更有效地做好设备检修过程中的运行管理, 进行了一系列积极探索。

### 1 设备检修过程中运行管理存在的主要问题

目前, 很多发电企业设备检修过程应用项目管理

收稿日期: 2019-09-04

作者简介: 王彬, 男, 政工师, 主要从事国有企业群团建设等工作。

的方法,其检修过程一般会通过网络图、甘特图或关键路径法加以控制,使得设备检修顺利进行,尽管如此,由于发电设备检修专业涉及面广、技术要求高等原因,使得检修过程中运行管理存在诸如以下的一些问题。

1) 运行管理对检修过程中的细节掌握不足。设备检修运用项目管理的办法,多通过网络图等控制检修进程,但检修网络图中对运行管理往往涉及不多,加上专业的差异性,致使运行人员只能主要通过两票来掌控检修大致信息,对检修进行总体掌控,对检修过程中的各个专业面的细节掌控不足,在工作面交叉和后期试验时经常面临一定安全挑战。

2) 检修过程中发现的问题沟通及时性欠佳。设备检修一般会成立相应的检修组织机构控制检修的全过程,但由于运行管理人员尤其是运行值班调度人员多采用的是倒班制,对于各类检修信息的掌握主要是通过值长记录完成的,检修信息掌握的及时性欠佳。在具体的检修过程中,如发现新问题,运行人员往往很难第一时间掌握,这对后期与电网调度等相关部门沟通存在一定隐患。

3) 运行管理针对检修问题的技术力量相对薄弱。在检修过程中,运行管理人员尤其是现场值班调度人员负责与上级调度部门及相关机构的沟通协调工作,检修期间需要及时汇报沟通一些技术问题,但由于设备检修问题往往牵涉多个专业面,部分问题需要综合考虑,运行管理人员相对而言没有检修维护班组人员对设备接触更深入,这就对现场运行管理提出一定挑战。

4) 检修后质量评价重视不够。当前很多发电企业有自己的检修公司,多是采用计划检修的方式进行设备检修,检修过程一般都能按照计划完成,但往往对后期的评价重视不足,或者是评价内容过于宽泛,多为定性评价,可操作性不强,不能很好地起到逐步优化检修管理的作用。

## 2 运行管理新方法的探索与实践

针对检修过程中运行管理存在的主要问题,进行了一系列实践与探索,逐步形成了一套较为完整的问题解决方法。

### 2.1 创建检修流程执行卡

检修流程执行卡是结合运行岗位的特点,从运行管理的角度对发电企业设备检修的全过程进行逐项分

解<sup>[2]</sup>。检修流程执行卡从检修准备、向调度申报检修票、落门、调速器撤压、两票办理、分布试验等,直至检修设备恢复备用的全过程通过类似操作票的形式反映出来,这样使得运行人员尤其是调度值守人员很清楚的掌握设备检修的全过程和主要节点,执行卡对流程中的一些重要项目的细节也进行了重点说明,具体参见图1,使得相关人员更加明确重点步骤的注意要点,解决了运行管理对检修过程中的细节掌握不足的问题,有效地保障了设备检修流程的顺利执行。

### 2.2 建立检修工作微信群和日清日报制度

在设备检修过程中,运行人员主要是通过安全措施和两票来保障检修的顺利进行,由于所有检修工作是通过具体的工作票来完成,加上专业面的差异,除工作负责人外其他人很难详细掌控单项检修的工作进程,当多个工作面出现交叉和分布试验时,容易出现一些意外情况,甚至不安全事件。

微信群作为一种即时通讯工具,能实时传送图片和视频,能很好地解决检修过程中实时沟通问题,为此,我们在每次检修策划期间,建立当次检修工作微信群,并制定日清日报制度,即所有参与当次检修的相关人员都加入微信工作群,各个工作面的负责人包含运行值班调度人员,每日工作结束后简要汇报各自工作面当日工作要点及问题和次日工作计划,当发现异常情况时,可通过文字、图片或视频方式汇报,运行值班调度人员在工作群中及时通报各类调度指令和检修进程。通过检修工作群和日清日报制度,使得检修人员尤其是检修指挥人员和运行值班调度人员能及时了解和掌握检修进度和细节,对多工作面协调和后期各类试验的安全,都起到很好的积极作用。

### 2.3 设立专门的检修技术小组

针对在设备检修过程中的一些技术问题,尤其是一些较为复杂和跨专业面的技术问题,单个专业面很难独立解决,对运行管理也是很大挑战。针对此问题,在检修期间设立专门的检修技术小组,小组成员可以涵盖当次检修的各个专业面,当遇到一些技术难题时,集中进行讨论分析,形成一致意见,对保障检修质量和进度以及运行管理人员与上级调度的沟通,都起到非常有益的作用。

### 2.4 制定检修评价管理制度

根据设备检修的内容,针对不同等级的检修,规定



序号	流程内容	流程注释	
1	检修准备	检修项目、工期确认；同时注意收集设备检修前的相关数据	
2	向梯调申报检修票	1、申报检修票前，部室负责人应向检修指挥部的生产调度组组长确认检修主要内容和工期，必要时可向维护部相关人员进一步核实相关细节，同时告知当班值长 2、当班值长应根据检修内容，按照调度要求，在AMS系统仔细填写相关内容，并应熟悉检修策划书中本次检修的主要项目和内容 3、网局检修票中，工作内容部分应填写本次检修的主要改造项目或非标项目，注明继电保护措施变更情况和对其他设备的影响等 4、省局检修票中，工作内容部分应填写本次检修的主要改造项目或非标项目，注明申请停电范围和注意事项等 5、对自动化等其他相关检修票，相关班组应主动向中控室汇报，当班值长也应在值长记录中记录提，必要时可向相关部门领导沟通确认	
...	...	...	
22	分步试验 (1)	开机前分步试验一般包括下面表中的几部分，具体依据检修等级及实际情况有所差异，其中调速器静态试验以及保护联动试验需要单独开票完成，所有试验相关负责人均应在现场检查；涉及中控室监控的项目，一般宜在LCU的相关工作恢复后进行。	
		1、顶盖排水系统试验	1、注意顶盖泵的抽水效率
		2、技术供水及主轴密封水系统通水试验	1、通水前应打开滤水器和上风洞内空冷的复合排气阀，工作结束后关闭 2、水控阀打开和关闭不应过快，避免出现水锤现象对阀门造成损害 3、应注意检查技术供水X200阀全开
		3、主变喷淋	1、喷淋过程中应注意水压和喷雾，防止出现漏水等意外 2、注意主轴密封系统的水压
		4、调速器系统通油试验	1、通油开始前，应对锁链等部位进行检查，确保水车室无人工作、无杂物 2、注意检查总回油X111恢复全开状态 3、通油开始时，主供油应缓慢开启，尽量避免造成过大振动
...	...	...	

图1 检修流程执行卡示例图

不同的检修质保期,例如A级、B级检修为6个月,C级、D级检修为3个月。除了按期提交检修报告外,并对检修的目标、进度、安全、质量等进行综合评价,完成机组检修质量后评估报告,评估报告一般应关注检修后机组的日常运行状态,重点对比分析相关运行数据,评估检修项目的重点问题,对不合格(不符合)的,应制定科学的校正和预防措施,并持续跟踪实施和改进,保证检修机组后续正常可靠运行。针对整个检修过程,根据检修评估报告,建立各个层次的持续改进机制,在后续的检修中不断完善和持续改进,逐步提升企业的检修管理水平。

### 3 运行管理的完善与提升

通过采取新的方法和手段,使得检修过程中运行管理更加规范,并在实践中不断优化。

#### 3.1 规范化相关管理措施

针对检修过程中运行管理的问题,通过检修流程执行卡、微信工作群及日清日报制度、检修技术小组、检修评价制度等一系列的措施,使得检修过程规范有序,为了保证相关措施在后续的检修中有效落实,制定

单位的设备检修过程运行管理标准,明确从检修策划开始直至检修评价与改进的全过程运行管理的具体工作内容,有效地帮助企业运行管理人员开展检修管理工作,保障设备检修的安全顺利进行。

#### 3.2 优化和提升管理标准

随着检修实践的不断进行,对已有的管理标准制定了定期修编计划,即在每一年的年底各类检修工作结束后,收集各方面在使用管理标准中发现的可以进一步完善的问题,并进行集中讨论,完善提高。

### 4 结语

针对水电设备检修过程中运行管理所面临的一些问题,结合标准化和信息化方法,通过创建检修流程执行卡等一系列实践与探索,逐步形成了较为完善的管理标准,规范水电设备检修过程中的运行管理,有效地保障了检修工作的安全顺利进行。

#### 参考文献:

- [1]DL/T 838 - 2003, 发电企业设备检修导则[S]
- [2]孙勇. 水电厂运行值班技能培训手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018

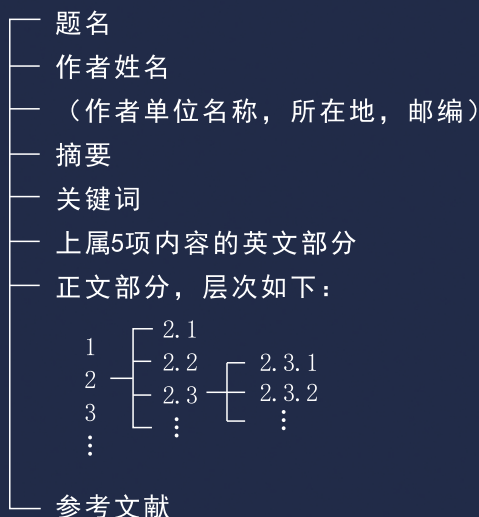
### 《水电与新能源》投稿须知

1、《湖北水力发电》由湖北省水力发电工程学会与中国长江三峡传媒有限公司主办，中国科学院院士夏军任主编，由五位国内外院士担任本刊顾问。编辑部由多位教授组成，编辑部设在武汉大学，本刊自2019年第11期以崭新面貌面世。

2、《水电与新能源》为向国内外公开发行的技术类期刊，月刊。服务于水电与新能源的开发利用，为水电与新能源工作者交流技术经验和沟通技术信息提供平台，促进我国水电与新能源科学技术的研究、开发与利用。刊物内容建设与管理并重，理论与实践齐收，主要有水电、核电、风力发电、太阳能发电、生物质能发电、垃圾发电、地热发电、潮汐发电、清洁煤技术、智能电网以及相关的生态环境等。热忱欢迎相关的专家、学者和生产一线科技工作者投稿。来稿请投E-mail: sdxny5429@163.com, 并附上作者电话，手机号。

3、稿件须论点鲜明、论据可靠、数据准确、文字精练，符合国家保密规定，赋有创新性，内容务必实事求是。

4、文章格式规范如下：



5、题名以20个汉字以内为宜；欢迎多作者共撰文章，多个作者不同单位的用阿拉伯数字在名字右上角标序；单位名称等按名字标序依次列出；各位作者均应注明单位详细地址、邮编。摘要按“目的、方法、结果、结论”四要素写出，控制在150字内为宜；关键词3~5个。

6、文章控制在6 000字（含图表）以内。前言中不宜有图、表及数学公式的推导证明。图、表在文中要有明确的交代。应有图序、图题，置于图的下沿；坐标图的标目、标值应清楚。图应清晰简练，不宜照搬设计图纸。表采用三线表，应有表序和表题，置于表的顶线以上，表注一般置于表的底线以下，多条内容宜编序。

7、参考文献著录

(1)参考文献按“顺序编码制”标注。应在文中引用处标注文献序号，其标序应与文后参考文献一一对应。

(2)只著录公开发表的文献；最新的文献；一般要求至少5篇。

(3)文献著录格式应符合规范要求。

8、本刊为适应信息化建设，扩大知识信息交流渠道，除发行纸质版外，已被CNKI中国知网、万方数据库等全文收录，凡投本刊的文章均视为同意。

本刊编辑部