



www.viserdata.com

水电科技

HYDROELECTRIC SCIENCE & TECHNOLOGY

月刊

■ 主办单位：Viser Technology Pte.Ltd.

■ ISSN: 2630-5291(online) 2717-5383(print)

中国知网（CNKI）收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊

2025 10

第8卷 总第58期

COMPANY INTRODUCTION

公司简介

维泽科技文化有限公司(Viser Technology Pte. Ltd.)成立于新加坡，是一家科技与文化高度融合的创新型企业。我们拥有一支具有较高文化素质、管理素质和业务素质的团队，聚焦于国际开源中英文期刊、体现文化含量与学术价值图书的出版发行。秉承“传播科技文化，促进学术交流”的理念，与国内外知名院校，科研院所及数据库建立了稳定的合作关系。坚持开拓创新，实施“跨越-融合”的发展战略，立足中国、新加坡两地，辐射全球，并于中国设立河北和重庆两个分部。我们将紧紧围绕专业化、特色化的发展道路，不断营造“有情怀，有视野，有梦想”的企业文化氛围，独树一帜，做一家“有血、有肉、有温度”的创新型出版企业。

Viser Technology Pte. Ltd. was founded in Singapore with branch offices in both Hebei and Chongqing, China. Viser focuses on publishing scientific and technological journals and books that promote the exchange of scientific and technological findings among the research community and around the globe. Despite being a young company, Viser is actively connecting with well-known universities, research institutes, and indexation database, and has already established a stable collaborative relationship with them. We also have a group of experienced editors and publishing experts who are dedicated to publishing high-quality journal and book contents. We offer the scholars various academic journals covering a variety of subjects and we are committed to reducing the hassles of scholarly publishing. To achieve this goal, we provide scholars with an all-in-one platform that offers solutions to every publishing process that a scholar needs to go through in order to show their latest finding to the world.



水电科技

Hydroelectric Science & Technology

2025年·第8卷·第10期（总第58期）

主办单位：Viser Technology Pte. Ltd.

I S S N：2630-5291(online)

2717-5383 (print)

发行周期：月刊

出版时间：10月

数据库收录：中国知网收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊

期刊网址：www.viserdata.com

投稿/查稿邮箱：viser-tech@outlook.com

地 址：195 Pearl's Hill Terrace, #02-41,

Singapore 168976

学术主编：余 亮

责任编辑：金 星

学术编委：丁 飞

罗 超

杜永纯

古彦华

王 超

美工编辑：李 亚 Anson Chee

印 制：北京建宏印刷有限公司

定 价：SGD 20.00

本刊声明

本刊所载的所有文章均不代表本刊编辑部观点；作者文图责任自负，如有侵犯他人版权或者其他权利的行为，本刊概不负连带责任。

版权所有，未经许可，不得翻译、转载本刊所载文章。

警告著作权人：稿件凡经本刊使用，如无电子版或书面的特殊声明，即视为作者同意授权本刊及本刊网络合作媒体进行电子版信息网络传播。

目 录

CONTENTS

水利工程

- 水闸工程施工质量监督与验收标准化研究..... 薛晶晶 1
- 水库水流运动规律的研究现状分析.....
-刘江浩 吕新利 崔琳琳 马 龙 高 健 5
- 乡镇级农田水利工程简易测量管理模式的实践与优化建议.....张思龙 谭春游 8
- 水泵安装参数对水利输水系统运行效能的影响及协同调试策略..... 郑 嘉 11
- 丁坝对弯道水流流态影响的研究现状.....
- 韦欣欣 曾媛媛 刘政昕 四郎巴登 14

水文水资源

- 基于数字孪生的水资源优化调度管理方法及系统研究....
- 吾尔古丽·吐送尼亚孜 17

能源动力工程

- 330MW 亚临界机组汽轮机热力系统能效分析与优化研究.....靳海峰 周 磊 20
- 330MW 中调供热机组再热器安全阀动作分析.... 周 磊 24

水电建设

- 水利水电工程跨汛期施工的进度动态管控与风险应对机制研究..... 章燕子 27
- 振温多维感知融合 AI 算法的水电站主变压器智能诊断与预警系统构建..... 边怡心 31
- 地下厂房第Ⅶ层提前开挖施工技术 ..彭固生 冀春辉 35

电力工程

- 电力工程技术在智能电网建设中的应用的研究.....
- 张 滨 王云鹏 夏 智 39
- 供电公司电力负荷管理与虚拟电厂模式创新.....
- 琚洁华 夏世超 朱彬斌 42
- 电力工程及其输电线路设计与施工的技术分析.....
- 王石兴 45

数字化技术在电力营销服务创新中的应用 陈维镜 陈维辉 48

城区典型配电电缆故障案例分析..... 丁 楠 吕 爽 52

电气工程

生物质能在电气系统中的集成与应用研究陈 祎 58

自动化技术与应用

电力系统自动化实现技术与发展趋势研究 杨 帅 61

水力发电厂自动化监控系统在运行管理中的应用..... 王 伟 64

变电站自动化监控系统的常见问题及改进措施 张 鸽 67

技术解决方案

水轮机过流部件的修复技术与研究..... 车成龙 71

电厂锅炉燃烧效率影响因素及简易优化措施..... 郝乐杨 李亚川 刘玉洁 74

GIS 耐压调试局部放电干扰抑制及灵敏度优化 陈福红 78

发电厂发电机励磁系统的常见问题与解决..... 刘玉洁 郝乐杨 李亚川 82

气动调节阀常见故障原因分析及对策研究..... 王 青 86

数字化变电站系统调试误差控制策略研究..... 夏晨祺 90

运行维护

水力发电厂机组运行优化与经济性分析 岳雄伟 94

泵站设备故障预测与预防性维护管理..... 刘扬飞 97

浅谈风险管控“六项机制”在卡拉贝利工程的应用研究 汪 飞 101

综合研究

城乡供水一体化进程中农村自来水“同质同服务”实现路径与挑战研究 郑培玉 105

水闸工程施工质量监督与验收标准化研究

薛晶晶

新疆小海子水利建筑安装工程有限公司, 新疆 图木舒克 843900

[摘要]文章着眼于高海拔地区水闸工程施工质量监督与验收标准化这一方面展开系统探讨,考虑到特殊地理气候条件会对工程质量产生较为明显的影响,构建起了一套全过程质量监督标准化体系,其中囊括监督组织职责分工、施工过程关键环节监督要点、质量检测与数据记录规范以及问题整改与反馈机制等内容,与此还制定出了完整的验收标准化流程,包含了验收依据与标准制定、分部分项工程验收内容、验收资料整理与归档要求以及验收结果评价与后续处理等方面。

[关键词]水闸工程;质量监督;验收标准;高海拔地区;标准化体系

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18064

中图分类号: TV5

文献标识码: A

Research on the Standardization of Construction Quality Supervision and Acceptance of Sluice Projects

XUE Jingjing

Xinjiang Xiaohaizi Water Conservancy Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Tumushuke, Xinjiang, 843900, China

Abstract: This article focuses on the systematic exploration of construction quality supervision and acceptance standardization in high-altitude water gate projects. Considering that special geographical and climatic conditions will have a significant impact on project quality, a whole process quality supervision standardization system has been constructed, which includes the division of responsibilities of supervision organizations, key supervision points in the construction process, quality inspection and data recording standards, and problem rectification and feedback mechanisms. In addition, a complete acceptance standardization process has been developed, including acceptance basis and standard formulation, sub project acceptance content, acceptance data sorting and archiving requirements, as well as acceptance result evaluation and subsequent processing.

Keywords: sluice engineering; quality supervision; acceptance criteria; high altitude areas; standardization system

引言

水闸工程作为水利水电工程的关键组成部分,其施工技术与管理水平直接关系到工程的整体效益和安全性。近年来,随着国家对水利基础设施建设的投入不断增加,水闸工程的数量和规模也在不断扩大,但在实际施工过程中,由于施工技术与管理水平参差不齐,导致工程质量问题频发,严重影响了水闸工程的正常使用和效益发挥。

1 水闸工程施工质量特点分析

1.1 地理气候条件对施工质量的影响

高海拔地区有着独特的地理位置以及气候方面的特征,这使得水闸工程在施工质量上面临着不少的挑战。在这些地区,水工建筑物会长期处于一种特殊的环境当中,该环境呈现出高海拔的特点,还有着强烈的紫外辐射,冬季的时候极为严寒,并且昼夜的温差也比较大。强烈的太阳辐射会让混凝土表面的水分蒸发速度加快起来,如此一来就容易出现塑性收缩裂缝的情况^[1]。与此紫外线要是长时间地照射,那么就会使高分子材料的老化进程加速,进而对其防护材料的使用寿命产生影响。在严寒的气候条件下,混凝土结构会面临十分严重的冻融循环所造成的破坏风险。

1.2 工程材料与施工工艺的特殊要求

在高海拔地区那种极为苛刻的环境状况之下,水闸工程在材料选取以及施工工艺的应用上,得去满足性能方面更为严苛的要求。改性环氧砂浆这类特种防护材料,因为其具备相当不错的耐候性能,所以渐渐地获得了广泛的应用。就施工工艺来讲,得着重留意混凝土配合比的设计以及温控方面的举措。通过挑选那些发热量比较低的矿渣水泥,对配合比设计加以优化,以此来削减水泥的使用量,另外再掺入高效减水剂和微膨胀剂这两种双掺的技术手段,能够有效地把混凝土水化热降下来,并且还能延后水泥水化热峰值出现的时间,进而对温度裂缝的产生予以控制。在混凝土浇筑的过程当中,应当合理地去安排浇筑的季节,并且采取像用低温水来拌制这样的降温办法。与此要尽最大努力去缩短闸底板和闸墩之间浇筑时间的间隔,让底板跟闸墩的收缩应力基本上能够保持同步的状态,如此一来便能够较为妥善地对混凝土的贯穿裂缝加以控制。

2 质量监督标准化体系构建

2.1 监督组织与职责分工

水闸工程施工质量监督组织构建以及职责划分,需依照分级管理、全面覆盖、严格监督、尽职尽责、失职追责

这些基本原则来开展,进而构建起层级清晰明确、权责清楚明白的质量监督网络体系。各个层级的水行政主管部门连同其所属的质量监督机构,会依据工程规模以及特性来施行分级质量监督举措。其中,省级质量监督机构主要负责像新建扩建大型水库工程、新建大型水电站工程、新建大型水闸工程、新建大型泵站工程这类重要水利工程的质量监督相关工作。而市级质量监督机构,则负责那些处在省级监督范围之外的大中型水利工程,还有新建扩建小型水库工程的质量监督事宜^[2]。至于县级质量监督机构,其负责的是辖区内中小型水利工程的质量监督工作。质量监督机构得拥有一支数量以及专业结构配置都较为合理的专业技术人员队伍,要具备固定的办公场所,并且要有能够满足监督检查工作需求的各类仪器设备工具。还需建立健全质量监督工作的各项制度以及内部管理的各项制度。

2.2 施工过程关键环节监督要点

水闸工程施工过程中,对关键环节开展质量监督工作时,应当将目光聚焦在地基处理、闸室底板混凝土浇筑、闸墩施工以及永久缝止水设置等方面,这些环节均会对工程结构安全以及使用功能产生重要影响,所以需要实施严格的质量控制与监督举措。在地基处理这个环节当中,针对软基情况,应铺设厚度为八至十厘米的素混凝土垫层,如此一来既能对地基起到保护作用,又能实现基面的找平目的,等到垫层经过七天的养护之后,便可在其上面放出底板样线,并且着手开展扎筋以及立模等相关作业。就闸室底板混凝土施工而言,在对其实施质量监督的过程中,需格外留意钢筋安装以及模板固定方面的质量控制事宜。为了避免进料口处上层钢筋因浇筑而被砸变形,可以在刚开始浇筑混凝土的时候,暂时不对该处的上层钢筋进行绑扎,等到混凝土浇筑面快要接近上层钢筋所在位置时,再及时开展绑扎作业。在对永久缝橡胶止水设置进行质量监督的时候,其中的重点内容涵盖了橡胶止水嵌固的稳定性、搭接的可靠性以及混凝土振捣的密实性等方面。橡胶止水在固定方式上,应当采用模板嵌固的方式,切不可使用铁钉来固定,橡胶接头部分宜采用热接法,以此确保连接处能够牢固可靠,中间的伸缩圈务必得处于缝的中间位置,而在进行水平橡胶止水下方的混凝土施工时,务必要谨慎细致地进行振捣操作,务必保证其密实无孔隙。

2.3 质量检测与数据记录规范

水闸工程施工质量检测工作应当依照规范化的程序以及标准化的方法来开展。各级水行政主管部门连同其质量监督机构,在主体工程施工期间,原则上每年需要至少开展一次质量检测活动。此次检测的重点聚焦于那些会对主体结构安全产生影响的部位、原材料、中间产品以及主要设备等方面^[3]。质量检测能够通过政府采购的方式去委

托具备相应资质等级的检测单位来具体实施,并且要对检测单位的工作过程以及所取得的成果加以严格的管理。检测得出的结论会成为工程项目质量结论备案环节当中极为重要的一项依据。在数据记录规范这个层面上,施工单位以及监理单位得参照验收标准里所涉及的检验项目,依照规定好的检验方式方法以及检验数量来展开质量检验工作,同时还要妥善做好过程质量控制、检查以及检验记录等相关验收备查资料的整理,并且依据这些资料分别去制作单元工序工程施工质量检验表以及单元工序工程施工质量验收表。在填表的过程中,务必明确各个检验项目的具体质量要求,如实且完整地记录下检验的具体情况。

2.4 问题整改与反馈机制

在水闸工程施工质量监督期间所发现的各项问题,需构建起一套系统化的整改以及反馈方面的机制,务必要保证质量问题能够得到及时且有效的处理,进而形成闭环式的管理状态。水行政主管部门连同其所属的质量监督机构,在检查过程中察觉到质量问题之际,应当向项目法人出具整改通知书,之后由项目法人来组织工程质量责任主体按照规定期限开展整改工作。要是工程施工当中使用了不合格的原材料、构配件以及中间产品,又或者存在严重违反施工工序的情况,再继续施工的话极有可能无法达到质量标准,甚至还会留下质量隐患,此时质量监督机构是有权责令其返工或者停工进行整改的。对于那些不具备或者不符合验收条件却依然强行组织并通过验收的行为,还有虚假或者变通开展验收的行为,质量检验表里有关主控检验项的记录出现造假现象,表述的数据和工程实体并不相符,验收不及时签认或者事后才去补签认质量结论等这类违规行为,必须要严格落实责任追究举措。尤其是对那些无视监督部门在事前事中给出的相关指导意见,没有及时落实整改就径直通过验收进而进入到下一道工序的情形,将会责令责任单位在限定时间内完成整改,并且重新组织验收工作。工程质量问题整改完毕之后,责任单位需要撰写书面的整改报告并将其报送至质量监督机构,质量监督机构会对整改情况进行细致核实并予以确认,以此确保质量问题能够彻底得到解决,不会留下任何隐患。与此要把典型的质量问题以及整改情况归入工程质量监督档案当中,从而为后续出现类似问题的预防工作给予一定的参考与借鉴。

3 验收标准化流程与方法

3.1 验收依据与标准制定

水闸工程施工质量验收需严格依照国家相关法律法规、规章制度、行业技术规范、强制性标准以及经批准的设计文件等规范性依据来开展,进而构建起多层次且全方位的验收标准体系。水利部在近些年接连颁布并施行了《水利水电建设工程验收规程》SL/T223—2025、《水利

水电工程单元工程施工质量验收标准》SL/T631.1~4—2025 等一系列标准规范,这些为水闸工程施工质量验收给予了基本的技术依据。验收标准清楚地把施工质量验收划分成施工单位自检以及监理单位验收这两个各自独立负责的环节。当单元工序工程施工完成并且具备验收条件之后,施工单位要依据验收标准准时开展自验工作,制作单元工序工程施工质量检验表,并且向监理单位提出验收申请。监理单位在收到报验申请之后,依照验收标准展开复检,制作单元工序工程施工质量验收表,同时签署验收意见。对于重要隐蔽单元工程以及关键部位单元工程,还应当由建设单位来主持验收事宜,由建设、勘察、设计、监理、施工等单位的代表共同组成联合小组来一同进行验收并签署验收意见,制作重要隐蔽关键部位单元工程施工质量验收签证表,各个单位的验收代表需要当场按照不同栏目签署验收意见,以此确保验收程序规范、责任清晰明确。

3.2 分部分项工程验收内容

水闸工程分部分项工程验收涉及单元工程、分部工程以及单位工程等诸多层面,每一层面的验收都有着与之相对应的具体内容与特定要求。单元工程验收属于最基本的验收单元,其着重于对工序施工质量以及检验指标的符合性展开检查,尤其要关注钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑等这些关键工序的质量状况。分部工程验收是在其所包含的所有单元工程均已经验收合格的前提之下开展的,其主要关注点在于分部工程的整体质量状况以及功能实现的情况,就好比闸室分部工程,就应当涵盖底板、闸墩、工作桥等各个组成部分的质量评估事宜。单位工程验收则是在水闸所有的分部工程都已验收合格之后才去实施的,这是针对水闸工程整体质量所做出的全方位评价,其中涉及到工程外观质量、使用功能以及技术资料完整性等诸多方面。对于重要隐蔽单元工程与关键部位单元工程联合验收以及分部工程、工程外观质量、单位工程验收而言,在此之前,项目法人需要至少提前一天将相关情况告知质量监督部门。

3.3 验收资料整理与归档要求

水闸工程施工质量验收资料的整理以及归档工作,得依照规范化的标准以及标准化的要求来开展,务必要保证验收资料具备真实性、完整性、准确性,并且能够实现可追溯这一特性。施工单位和监理单位各自需要去制备并妥善保存单元工序工程施工质量检验表以及单元工序工程施工质量验收表,在填表的过程当中,要清晰明确地指出各个检验项目具体的质量要求,同时要完整且真实地将检验的具体情况记录下来。验收资料所涵盖的内容并非仅限于工程项目建设审批方面的相关文件、项目法人和勘察设计施工监理等参建单位所签订的合同协议副本、参建单位

项目负责人的工程质量终身责任授权书承诺书及其相关的证明材料、参建单位的资质证书营业执照等体现其基本情况以及工程质量管理组织情况等方面的资料^[4]。水行政主管部门以及其所属的质量监督机构有必要进一步健全档案管理的相关制度,对于工程项目的质量监督档案要及时地予以收集、整理并归档,归档的资料应当包含质量监督计划、监督检查记录、质量问题整改通知书、质量检测报告、质量事故处理资料以及工程质量监督报告等一系列完整的资料。

3.4 验收结果评价与后续处理

水闸工程施工质量验收结果的评价应当立足于客观公正以及科学规范这样的基础之上。要依据历次开展的监督检查情况、问题整改的实际落实状况、质量资料的审查备案情形以及质量检测的具体状况,在工程建设阶段的验收之时以及竣工验收之前,分别给出工程质量评价的意见以及工程质量监督的报告。验收结果的评价涵盖了单元工程质量等级的评定、分部工程质量等级的评定、单位工程质量等级的评定以及工程整体质量的综合评价,进而形成一个系统且完整的质量评价体系。对于那些验收合格的工程而言,水行政主管部门连同其质量监督机构需要出具工程质量监督的报告,这份报告会成为工程竣工验收环节当中极为重要的依据。而对于验收不合格的工程来讲,则应当责令相关责任单位去进行整改,并且重新组织验收工作,一直持续到工程质量能够达到合格的标准为止。工程在顺利通过验收之后便会进入到质量保修期,在此期间,项目法人得和施工单位签署质量保修的协议,清晰明确地界定保修的范围、保修的期限以及保修的责任。

4 结束语

水闸工程施工质量监督以及验收标准化情况,这可是确保水利工程建设质量的关键保障所在。就高海拔地区那种特殊环境条件来讲,去构建能够契合其特殊地理气候条件的质量监督体系和验收标准,意义就显得格外突出了。本文仔细分析了高海拔地区水闸工程施工质量的特点,围绕着质量监督标准化体系构建以及验收标准化流程制定这两方面来展开详尽的研究,进而提出了一套比较完整的水闸工程施工质量监督与验收标准化框架。随着水利工程建设技术持续向前发展,管理水平也在不断提升,在这种情形下,得不断地转变观念、创新方法、优化流程,以此推动水闸工程施工质量监督与验收工作朝着更加科学、规范且高效的方向去发展。

〔参考文献〕

- [1]李渊.水利工程中水闸施工技术的应用与管理措施研究[J].价值工程,2024,43(27):30-32.
- [2]燕光杰.水利工程中水闸施工技术要点及其注意事项

[Z]//重庆市大数据和人工智能产业协会,西南大学,重庆工商大学,重庆建筑编辑部.人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集.河北省水利工程局集团有限公司,2025:776-778.

[3]吴丽娜.水闸工程建设施工监理的现场控制[C]广西网络安全和信息化联合会.2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集.浙江庆达工

程管理技术有限公司,2025:246-248.

[4]刘永宝.绿色理念引领下农田水利水闸施工管理控制新举措[J].农业开发与装备,2025(8):185-187.

作者简介:薛晶晶(1983,4—),毕业院校:塔里木大学,所学专业:农业水利工程,当前就职单位名称:新疆小海子水利建筑安装工程有限公司,就职单位职务:技术员,职称级别:工程师。

水库水流运动规律的研究现状分析

刘江浩 吕新利 崔琳琳 马龙 高健

北方民族大学土木工程学院, 宁夏 银川 750021

[摘要]水库属于水资源调控以及防洪管理范畴内的关键设施,其水流运动规律对于安全运行、生态环境还有泥沙输移等方面均会产生直接影响。本论文在对国内外的研究现状加以梳理之后,着重对水库水流运动的基本理论、研究方法以及各类影响因素展开分析,并且结合高精度数值模拟以及大数据技术的发展趋势,对未来的相关研究予以展望,以此为水库运行的优化以及生态调控给予理论方面的参考以及技术层面的支持。

[关键词]水库水流运动;水动力学;运动规律

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18061

中图分类号: TV145

文献标识码: A

Analysis of the Current Research Status of Reservoir Water Flow Movement Law

LIU Jianghao, LYU Xinli, CUI Linlin, MA Long, GAO Jian

School of Civil Engineering, North Minnzu University, Yinchuan, Ningxia, 750021, China

Abstract: Reservoirs are key facilities within the scope of water resource regulation and flood control management, and their water flow patterns have a direct impact on safe operation, ecological environment, and sediment transport. After reviewing the current research status at home and abroad, this paper focuses on analyzing the basic theory, research methods, and various influencing factors of reservoir water flow movement. Combined with high-precision numerical simulation and the development trend of big data technology, it looks forward to future related research, providing theoretical references and technical support for optimizing reservoir operation and ecological regulation.

Keywords: reservoir water flow movement; hydrodynamics; movement law

引言

水库于水资源管理、防洪减灾以及生态保护等方面,均有着无可取代的重要作用。其水流运动规律的研究,一方面属于水力学理论当中的关键内容之一,另一方面也是开展水库安全管理工作以及实现科学调度所不可或缺的基础所在。水库的水流呈现出非均匀性、非正常性以及分层等明显特征,并且其具体的演变情况是受到库体自身的形态状况、流入水库的条件、所采取的调度策略以及环境方面的诸多因素等综合共同作用而产生的影响。随着水库的规模不断变得更为庞大,同时管理技术也在朝着智能化的方向持续发展进步,在此情形之下,以往的传统经验分析方式已然很难再充分满足针对复杂水动力现象展开精准预测以及有效控制的相关需求了。就国内外的众多学者而言,他们在水库的水动力特性方面、分层结构相关领域以及生态水力学这个范畴内,都收获了颇为丰富的研究成果。本文的主要目的就在于全面且细致地对水库水流运动规律的研究当前的实际状况予以系统的梳理,从而能够为水库的调控工作以及生态管理事宜给予科学层面的依据参考。

1 水库水流运动的基本理论

1.1 水流运动的流体力学基础

水运动学是水力学的一个组成部分,专注于从位移、速度、加速度等运动学物理量研究水流运动,不涉及作用

力分析。水流运动的基本方程是连续方程,即质量守恒原理在流体力学中的表达式。它体现了流体在运动进程里质量维持恒定这一基本属性。借助连续方程,研究者可剖析处在不同水体状况之下的流量分布情况、速度场的具体构造以及水流的演变经过,进而给理解并预测水库水流运动规律给予理论层面的依据。

1.2 水库水动力特性与运动规律

水库水流的动力特性会受到多种多样的因素的影响,其运动所呈现出的是复杂的三维流场结构以及非线性的演变规律。在水库内部,一般存在着较为明显的流速梯度,其中表层的水流速度是比较高的,然而底层的水流因为受到了摩擦以及阻力的作用,其水流速度就会显著地减弱下来,并且水流还会呈现出一定程度的旋涡、回流以及分层等特征。正是这些水动力特性确定了水库的输沙能力、水质扩散的规律以及温度分布的模式。水流运动的规律就表现为随着时间和空间的变化所形成的流量分布规律、分层的演化情况以及涡旋结构的形成与消散过程。在不同规模的水库以及不同的操作条件之下,水流运动的规律会表现出明显的差异,比如说调节水位的蓄放策略会让库区水体的垂直混合程度以及流向发生改变,而入流量出现季节性的波动又会使水流呈现出周期性的变化趋势。近些年来,研究者们通过将现场观测与数值模拟相结合的方式开展研究,从而揭示出水库水流在不同操作模式下动量传递、

能量耗散以及分层混合的规律,这为水库的运行管理以及生态水力学分析给予了重要的参考依据。

1.3 水库水流结构类型与分类

水库水流结构的复杂性主要源自库区几何形态、入流条件以及水动力环境之间的相互作用。依据流动特征来看,水库水流可划分成层流、湍流还有分层流等多种类型,其中分层流结构是比较典型的,其表层水体与底层水体在速度和温度方面有着明显的差异,进而形成了热或者密度梯度层。回流区以及旋涡区属于水库所特有的流动结构,常常会出现库区入流口周边以及坝前区域,对于泥沙沉积、水质混合以及生态环境而言,有着重要的影响。除此之外,水库水流还能按照流向特征来分为主流区、缓流区以及死水区,不同区域的水动力特性存在着显著的差异,这就决定了水库水流运动的空间分布状况以及动力响应情况。通过针对水流结构类型展开分类研究,学者们可以更为精确地去描述水库水动力行为,同时也能够为数值模拟以及工程管理提供分区分析的相关基础。近些年来,将现场监测、数值模拟以及实验研究等方法综合起来运用,对于水库水流结构特征的认识也变得日益深入了,在分层流演化、涡旋形成以及回流区动力特性等方面更是取得了颇为重要的进展。

2 水库水流运动研究方法

2.1 现场观测与测量技术

现场观测乃是研究水库水流运动规律的一把基础利器,借助于对水位、流速、水温、水质等一系列参数展开连续不断的监测活动,便能够获取到水流所呈现出的真实动态方面的相关信息。传统意义上的现场观测涵盖了多种方式,像运用流速计来开展测量工作、使用 ADCP 声学多普勒流速剖面仪以及依托水位观测站等,这些不同的方法都能够较为准确地将水库在不同深度以及各个位置所具有的流动特性给记录下来。凭借着长时间的观测操作,研究者们得以揭示出水库水流所存在的季节性变化规律、分层流的相关现象以及流速的空间分布特点,进而为数值模型的验证事宜以及实验室模拟活动给予相应的数据方面的有力支撑。近些年来随着遥感技术以及水下传感器网络的不断发展进步,对于水库大尺度流场还有温度分布的监测工作也变得更为高效且更加精确了。综合起来对现场观测所得到的数据加以分析,就能够更为透彻地去理解水流的动力行为以及其给泥沙输移、水质扩散还有生态系统所带来的种种影响,从而为水库的科学管理以及调度工作提供一份可靠的依据。

2.2 数值模拟方法

数值模拟方法算得上是研究水库水流运动规律的一把重要利器。其借助数学模型以及计算机技术来针对水库内部那种复杂的流动状况展开预测与分析。因模拟精度以及计算资源方面存在差异,水库水流模拟一般会选用一维、

二维或者三维模型当中的某一种。一维模型可实现对水位变化以及流量分布的快速预测,它在大规模调度分析当中是比较适用的,然而却没办法将局部流场结构给反映出来。二维模型依靠对水平面速度场展开相关计算,能够描绘出平面流动所具有的那些特征,对于回流区、死水区这类复杂区域的分析而言是适用的。而三维模型则可以全方位地去模拟水库的垂直分层流、涡旋结构以及热盐分布情况,这在精细水动力学研究当中有着极为重要的价值。数值模拟不但能够预测水流运动规律,而且还能够用来评估不同调度方案给库区水动力特性、水质分布以及泥沙沉积所带来的影响,进而为水库运行的优化给予科学层面的依据。随着计算能力一步步得以提升,并且高精度模型也开始得到应用,数值模拟在水库水动力学研究里所发挥的作用变得日益凸显,已然成为了理论分析同工程实践之间极为重要的一座桥梁。

3 水库水流运动的影响因素分析

3.1 水库形态对水流运动的影响

水库的几何形态属于影响水流运动规律的关键要素之一。就库区来讲,其长度、宽度、深度等维度,再加上水库岸坡的具体形态,这些全都直接左右着水流在空间当中的分布状况以及速度方面的特性表现。一般而言,狭长类型的水库往往会呈现出较为明显的主流区以及缓流区,其中主流区的流速处于相对较高的状态,然而缓流区却比较容易滋生出旋涡,甚至会出现死水区的情况,如此一来便会对泥沙的沉积情况以及水质的分布格局产生影响。水库库容的大小以及分区的布置方式同样能够促使水流的垂直混合状态以及分层结构发生改变。像大型水库那样,因为其深度通常都比较大,所以表层水和底层水之间往往会存在着颇为明显的速度方面的差异以及温度的梯度情况,进而就会形成一种相对稳定的分层流结构。水库底部要是存在凹凸不平的状况或者有浅滩区域的话,那么就极有可能引发局部出现回流现象以及涡旋的形成,这对于泥沙的沉积状况以及流场的演变进程都会产生颇为显著的影响作用。从整体上来看,水库的形态一方面会影响水流的速度以及流动的方向,另一方面还会给水库的水动力特性、水质的分布情况以及生态环境等方面带来较为深远的影响效果。所以说,在开展水库的设计工作以及后续的运行管理工作期间,务必要全面且细致地去考量形态因素对于水流运动所起到的调控作用。

3.2 水文条件(流量、季节性)影响

水文条件在很大程度上决定了水库水流运动规律,其中入流量的多少、季节性的变化以及径流的波动情况,均会对水流速度、流向还有水体混合状况带来不容忽视的影响。在汛期时候,随着入流量不断增多,水库主流的流速也会相应加快,混合强度变得更强,甚至底层水还可能出现较为强烈的循环流动态势;而到了枯水期,流量逐渐

减少,水体流动速度也变得越来越慢,分层的现象变得更加突出,底层水的交换能力也随之下降。季节性温度的变化以及降雨模式的不同,还会导致水体出现密度方面的差异,进而形成热或者盐分梯度,最终改变水库的垂直流动以及分层特性。水文条件一方面会影响水动力学的相关特征,另一方面也与泥沙输移、水质演变以及水生态环境的稳定性有着直接的关联。通过对不同水文条件下水流响应规律展开分析,能够为水库蓄放调度以及生态管理给出科学合理的依据。

3.3 水库操作方式与调度策略影响

水库的操作方式以及调度策略,称得上是影响水流运动规律的关键人为要素。其中,蓄放水位的把控情况、闸门开启的具体方式以及调度所处的时间阶段,都有可能使水库内部的流场分布状况以及能量传递情形发生改变。连续放水这一策略和间歇放水这种策略,会致使水体的速度场以及旋涡结构呈现出较为明显的不同之处^[1]。并且,不一样的调度方案,还对分层混合的过程以及底层水的交换效率有所影响。在水库实际运行的这个过程当中,倘若能够做到合理的调度,那么一方面可以对水动力条件予以优化,另一方面也能够有效地对泥沙沉积情况以及水质分布状况加以控制,进而达成防洪、发电以及生态保护等诸多目标。相关研究已经表明,调度策略和水流运动二者之间存在着颇为复杂的非线性耦合关联,这就需要将数值模拟所得到的数据和现场观测所获取的数据相结合,展开科学层面的分析,以此来促使水库运行实现综合意义上的优化。

4 研究发展趋势与展望

4.1 高精度数值模拟与大数据技术融合

随着计算机技术以及水动力学模型不断发展,高精度数值模拟在水库水流运动研究当中所发挥的作用变得愈发显著。传统的数值模型受到计算能力以及网格精度的限制,很难完整地捕捉到水库复杂流场的三维结构以及非线性特征。近些年来,研究者通过引入高性能计算、大数据分析还有人工智能算法,便可以在更大的空间尺度以及更长的时间尺度上精准地模拟出水库内水流运动规律。大数据技术不但能够整合多种来源的监测数据,而且可针对历史流量、水位以及气象条件展开统计分析,从而给模型校准以及验证给予可靠的依据^[2]。数值模拟与大数据相互融合之后,水库水流运动的预测精度有了大幅度提升,并且还能够对不同调度策略以及极端水文条件下的流场变化实现高效分析,进而为水库运行优化、防洪调度以及生态

管理提供科学的决策支持。

4.2 水库生态水力学研究

近些年来,水库生态水力学已然变成水库水流研究的一个极为重要的方向,其关键之处就在于去探寻水流运动同生态系统之间的那种耦合关联。水流呈现出的分层情况、回流状况以及涡旋结构,一方面会对泥沙的输移以及水质的扩散产生影响,另一方面也给水生生物的栖息地、水温的分布还有溶解氧的状况带来了颇为重要的影响。生态水力学方面的研究着重于水流调控以及生态保护这两者协同起来进行优化,借助对不同水库操作方式给生态环境所造成的影响加以分析,就能够达成对水库功能的综合性管理了^[3]。尤其是在大型水库以及复杂的水系当中,水动力学特性跟生态系统状态彼此之间存在着相当复杂的非线性反馈机制,这就得依靠数值模拟、现场观测以及实验模拟等多种多样的手段来展开综合性的研究工作。朝着这个方向不断发展,对于构建水库生态管理模式是有帮助的,能够促使水资源利用、洪水防控以及生态保护实现平衡且协调的发展态势。

5 结语

水库水流运动规律的研究属于水库运行管理以及水动力学理论的关键部分,已经收获了颇为丰富的成果,然而依旧面临着不少的挑战。本文全面且细致地对水库水流运动的基本理论、研究方法还有影响因素加以整理归纳,并且还对其后续发展进行了展望,所涉及的方向包括高精度数值模拟、大数据技术的融合应用、生态水力学方面的研究以及智能调度等。在未来,伴随着监测技术以及计算能力的不断提升,水库水流运动规律的研究将会朝着更为精细化、智能化以及综合化的趋势去发展,这对于达成水库运行优化、生态保护以及资源可持续利用等多重目标是很有帮助的,同时也能够为水库工程管理给予科学的依据以及技术方面的有力支撑。

【参考文献】

- [1]王金洋,假冬冬,杨俊,等.受顶托作用的河道水流运动特征研究进展[J].水运工程,2025(2):101-109.
- [2]孙慧颖.运河大角度连续分汇流河道水流运动特性及其通航影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2024.
- [3]张帅领,张春艳,江承阳,等.矩形狭缝裂隙水流运动特征数值模拟研究[J].地下水,2023,45(5):11-14.

作者简介:刘江浩(2005.5—),男,毕业院校:北方民族大学,所学专业:水利水电工程专业。

乡镇级农田水利工程简易测量管理模式的实践与优化建议

张思龙¹ 谭春游²

1. 广西贵港市港南区湛江镇农业服务, 广西 贵港 537100

2. 贵港市润港工程勘察设计有限责任公司, 广西 贵港 537100

[摘要] 乡镇级农田水利工程在保障灌溉以及提高农业生产效率等方面所起到明显的作用, 然而在测量管理环节当中却存在着一些问题。多数乡镇依旧依靠传统的人工测量方式, 这种方式使得数据的精度以及可靠性都受到限制, 并且管理流程也不够规范, 测量记录以及审核工作也做得不够完善。测量人员的专业能力呈现出参差不齐的状况, 而且培训力度不足, 信息化以及智能化手段的应用也比较少, 这就使得工作效率变得低下, 数据的可追溯性也很差。从整体来看, 现有的简易测量管理模式存在着一定的局限性, 要想提升管理水平以及工程质量, 就需要在技术、流程、人员以及信息化等多个方面做出改进。

[关键词] 乡镇级农田水利; 简易测量管理模式; 实践与建议

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18055

中图分类号: TV5

文献标识码: A

Practice and Optimization Suggestions for Simple Measurement and Management Mode of Township Level Agricultural Water Conservancy Projects

ZHANG Silong¹, TAN Chunyou²

1. Guigang Gangnan Zhanjiang Agricultural Services, Gangnan, Guangxi, 537100, China

2. Guigang Rungang Engineering Survey and Design Co., Ltd., Guigang, Guangxi, 537100, China

Abstract: Township level agricultural water conservancy projects play a significant role in ensuring irrigation and improving agricultural production efficiency. However, there are some problems in the measurement and management process. Most towns still rely on traditional manual measurement methods, which limit the accuracy and reliability of data, and the management process is not standardized enough. The measurement records and review work are also not complete enough. The professional abilities of measurement personnel vary greatly, and there is insufficient training. The application of information and intelligent methods is also relatively rare, which makes work efficiency low and data traceability poor. Overall, the existing simple measurement management model has certain limitations. In order to improve management level and engineering quality, improvements need to be made in multiple aspects such as technology, processes, personnel, and information technology.

Keywords: township level agricultural water conservancy; simple measurement management mode; practice and suggestions

引言

随着我国农业现代化进程持续推进, 农村基础设施建设也在不断开展, 农田水利工程在保障粮食安全、改善灌溉条件以及提高农业生产效率等方面有着十分重要的作用。乡镇级的农田水利工程, 其建设规模相对较小, 分布范围却比较广泛, 而且资金以及技术力量都较为有限, 在这样的情况下, 其测量管理工作普遍存在着操作较为简易、标准不够统一以及技术手段较为落后等一系列问题, 这些问题在一定程度上对工程的施工质量以及后期管理效率产生了影响。传统的测量方法需要依靠人工来进行操作, 数据记录以及审核流程也不够规范, 如此一来, 测量精度以及可靠性就很难得到有效的保证。与此测量人员的专业能力存在很大的差异, 培训以及技术提升机制并不完善, 信息化以及智能化手段的应用也比较欠缺, 这就使得测量管理的效率较低, 出现误差的风险也较高。近些年来, 随着 GPS 测量、无人机航测、电子水准仪以及信息化管理平台等相关技术不断发展, 简易测量模式开始逐步朝着现

代化、智能化的方向去转变, 这为乡镇级农田水利工程测量管理提供了全新的技术手段以及方法方面的支持。鉴于此, 本研究着重对乡镇级农田水利工程简易测量管理模式的实际应用状况展开系统分析, 全面且细致地剖析在技术、流程、人员以及设备等方面所存在的各类问题, 并且给出具有针对性的优化建议, 努力探索出一套能够兼顾操作简便性、数据准确性以及管理效率的测量管理模式, 以此来为提升乡镇农田水利工程建设的质量以及管理水平给予科学依据以及实践方面的参考。

1 乡镇级农田水利工程简易测量管理模式的特点

乡镇级农田水利工程简易测量管理模式具有制度简化、操作灵活和强调实用性的特点。该模式通常采用分级管理机制, 明确管护主体责任, 例如水利部门负责行业指导, 乡镇政府承担日常检查和考核, 村级组织具体实施管护, 部分地区还形成了“建管结合”的管理模式。在测量环节, 运用标准化计量工具保障数据准确性, 但针对乡镇操作会简化部分复杂流程, 更注重灌溉效率和水资源利用

率等核心指标的快速检测。资金运作方面,通过整合农业综合开发和土地整治等项目资金,并设立专项管护经费,同时强调“谁受益、谁管理”的原则,鼓励农民参与。人员配置灵活,由水利部门技术人员、乡镇专管员及村级管护人员组成,培训内容侧重设施维护和灌溉管理等实用技能,而非复杂工程技术,从而实现管理高效、操作简便和社区参与度高的特点。

2 乡镇级农田水利工程简易测量管理模式的现状

2.1 技术方法问题

在乡镇级农田水利工程开展测量管理相关实践期间,于技术方法层面存在着一定的局限性以及不足之处。多数乡镇工程规模偏小,所拥有的经费也较为有限,在此情况下,测量过程当中依旧广泛运用传统的人工测量手段,像是水准测量、钢尺测量还有简单的平差方法等等,而这些方法的操作流程较为繁琐,并且受到人为因素的影响程度颇高,如此一来便很容易致使测量数据的精度呈现出不稳定的状态。部分乡镇在测量工具以及仪器的配备情况上存在着短缺或者出现老化的问题,像现代化的测量设备比如 GPS 定位仪、电子水准仪等应用的次数并不多,这也就没办法满足对于高精度以及快速测量方面的需求。除此之外,测量方法在施工进程当中的标准化程度并不算高,不同的施工队伍针对测量操作流程以及数据记录方法的理解各不相同,进而就容易出现数据不够完整或者记录出现错误等情况。

2.2 管理流程问题

在乡镇级农田水利工程开展测量管理工作期间,其管理流程存在着一些问题,这些问题主要体现在流程不够规范且不够系统化。就一方面而言,测量任务在安排以及执行的过程中缺少统一的标准,并且操作指引也不够明确,如此一来,不同的施工队伍在测量方法、记录方式以及数据上报等诸多环节都存在着差异,进而对工作效率以及数据一致性产生了影响^[1]。从另一方面来讲,测量工作的审核以及监督机制并不完善,部分工程甚至缺乏针对测量数据的定期检查与复核,这就很容易出现错误数据没有被及时发现或者纠正的状况。与此测量记录以及档案管理同样存在欠缺之处,部分工程没办法做到资料的完整归档以及有效保存,这无疑给后续的施工以及管理工作带来了不少的困难。

2.3 人员培训及能力问题

在乡镇级农田水利工程建设的过程中,人员培训以及能力方面存在着较为明显的欠缺之处,很多乡镇工程测量人员大多依靠自身经验来进行操作,其专业理论知识以及系统测量技能都比较欠缺,对于现代测量技术以及新型仪器设备的掌握程度也极为有限,而且因为培训体系不够完善,人员更新以及技能提升缺乏连续性和系统性,使得部分测量操作出现了不规范或者存在错误的情况,施工现场人员对于测量数据的重要性的认识不够充分,在操作过程中很容易出现随意性或者疏忽,进而对测量结

果的准确性以及可靠性产生了影响。

2.4 设备及信息化应用不足

在乡镇级农田水利工程建设期间,其测量管理环节存在着设备配备以及信息化应用方面的诸多不足之处。多数乡镇工程依然依靠水准仪、钢尺这类传统测量工具,还有简单的手工记录设备,现代化测量仪器像 GPS 接收机、电子水准仪以及无人机测绘等应用甚少,使得测量效率不高,数据精度也受到限制。并且,信息化管理水平不高,测量数据的采集、传输、存储和分析大多依靠人工操作,缺少统一的数字化平台和数据管理系统,很难达成数据的实时共享与动态监控。

3 乡镇级农田水利工程简易测量管理模式优化建议

3.1 技术方法优化

就乡镇级农田水利工程的技术方法优化而言,需要从测量精度、效率、标准化以及适应性等诸多方面着手予以系统提升。在测量工具选取层面,应当逐步去推广现代化的仪器设备,像是高精度的 GPS 接收机、电子水准仪、全站仪还有轻量级无人机航测系统,以此来取代以往那种依靠人工操作的传统水准测量以及钢尺测量方式,如此一来,既能大幅削减人为出现的误差情况,又可以促使测量数据的稳定性与可靠性得以提高。在测量方法方面,得建立起契合乡镇工程实际情况的标准化操作流程,这里面涵盖了测量点的合理布设方式、数据采集的先后顺序、平差计算的具体做法以及数据记录的方法等等,务必要保证不同施工班组在操作过程里的一致性,进而让测量结果具备更强的可比性与可追溯性。与此要依据工程规模以及地形条件的不同,灵活运用分层测量、局部加密测量或者快速扫描测量等不同的策略,以此来确保数据具备全面性与代表性,并且在施工进程当中,要及时对测量方案做出调整,以便能够妥善应对复杂地形以及季节性施工条件所带来的种种情况^[2]。在数据处理这个环节,应当引入基于软件的平差与分析工具,达成测量数据的快速处理、可视化呈现以及施工反馈的效果,使得管理人员能够实时知晓工程的推进状况与施工质量,从而为施工决策给予科学方面的依据。除此之外,还得留心测量方法的综合适应性问题,也就是说要依照土质特性、水文条件以及施工环境的具体情况,去制定具有针对性的测量方案,要兼顾到效率与精度这两方面的要求。

3.2 管理流程优化

在乡镇级农田水利工程简易测量管理模式不断优化过程当中,对管理流程加以改进无疑是一个极为关键的环节,其对于提升工程质量以及工作效率均有着十分重要的作用。要着手建立起一套系统化且标准化的测量管理流程,从测量任务的规划开始,一直到实施阶段,再到数据审核以及归档环节,都要形成一个完整的闭环管理体系。

在测量任务的分配方面,应当依据工程规模、施工区域的具体特点以及施工进度来做出科学合理的安排,要清晰明确各个班组各自所承担的职责以及相应的时间节点,以此确保测量工作能够与施工进度紧密地衔接起来,防止出现重复作业或者遗漏测量点等情况。数据采集以及记录环节务必要做到规范化,具体而言,需要统一测量记录表格,明确数据的单位与格式,并且规范数据平差以及校核的方法,从而从源头上保障数据的准确性以及一致性。与此还应当进一步完善审核与复核机制,安排专业的人员定期对测量数据展开检查,及时发现其中存在的异常或者偏差情况,并且迅速将这些情况反馈至施工现场,进而构建起一个动态的监督管理体系。除此之外,档案管理流程同样需要实现规范化,要把测量数据以及相关的文件都纳入到系统化的存档范畴之内,并且实施数字化的管理方式,这样做能够方便后续针对施工质量进行追溯以及开展工程验收等工作。为了使流程具备更高的可操作性以及透明度,还可以考虑引入信息化管理的相关手段,比如借助移动端实现数据上传功能,利用云平台来统一管理各项事务,通过可视化的方式对整个进程进行监控,从而达成对测量任务执行以及数据审核的实时有效监控。

3.3 人员培训与能力提升

在乡镇级农田水利工程简易测量管理模式不断优化过程当中,人员培训以及能力提升这其实在很大程度上决定了测量工作能否具备科学性、规范性还有高效性,所以说是极为关键的一个环节。一开始,应当去着手建立起一套系统化的培训体系,针对那些从事测量工作的人员,要开展较为全面的培训,培训内容涉及基础理论知识、仪器操作技能以及现代测量技术等诸多方面,让这些人员一方面能够掌握像水准测量、平差计算这类传统测量方法,另一方面也能对 GPS 定位、全站仪还有无人机航测等现代化测量工具的使用方法比较熟悉。此次培训所涵盖的内容还应当包括工程测量的规范流程、数据记录与审核的标准,以及在施工现场碰到常见问题时该如何去判断与处理的能力,以此来提升人员在实际施工环境当中的应变能力以及独立工作的能力^[3]。需要依据实际工程的具体需求,展开分层次且有阶段性特点的培训,针对新进人员、经验有所欠缺的施工人员以及骨干技术人员,分别制定出具有差异性的培训方案,借助集中授课、现场给予指导、开展案例分析以及进行实地演练等多种方式相结合的办法,以此提高培训所具有的针对性以及实际效果。除此之外,还要建立起持续不断的技能考核以及激励机制,定期对人员的测量操作能力、数据处理水平还有工作效率加以评估,推动人员不断地改进自身操作的方法并且提升技术水平。

3.4 信息化与智能化建设

在乡镇级农田水利工程简易测量管理模式的优化进

程里,信息化以及智能化建设属于提升管理效率、数据准确性以及决策科学性的重要环节。要积极推动测量数据采集走向数字化,借助 GPS 接收机、电子水准仪、全站仪还有无人机等现代化测量设备,达成现场数据的自动记录以及实时传输,以此削减传统手工记录所引发的误差以及延迟情况。接着,需构建统一的信息化管理平台,把测量数据、施工进度、地形资料以及工程档案集中起来予以存储与管理,支持多终端访问并实现实时更新,让管理人员可以随时知晓施工现场的最新状况,针对异常数据或者偏差展开快速分析与反馈。除此之外,还可引入智能化分析与辅助决策工具,凭借大数据分析可视化技术,对测量数据实施自动平差、误差校正以及质量评估,实现数据处理的高效化与精细化^[4]。信息化建设还需包含档案管理与历史数据追溯,借助云平台或是 GIS 系统,将历次测量记录与施工记录相互关联起来,方便长期监控、施工验收以及后续维护管理。与此智能化建设还可进一步延伸至施工辅助方面,像依靠传感器开展施工状态监控、动态测量点管理以及施工过程模拟,为现场决策给予科学依据。

4 结语

经过对乡镇级农田水利工程简易测量管理模式展开研究后发现,现有的管理模式在技术方法方面、流程规范方面、人员能力方面以及信息化应用方面都存在着一一定的欠缺之处,而这些欠缺在某种程度上对工程测量精度以及施工管理效率形成了制约作用。对于这些问题,本文给出了系统的优化方面的建议,像是引入现代测量技术、构建标准化管理流程、强化人员培训并提升其能力,还有推进信息化与智能化建设等相关举措。这些优化方案能够在一定程度上提升测量数据的准确性、施工管理的规范性以及整体的工作效率,进而为乡镇级农田水利工程达成高质量建设给予技术层面以及管理层面的有力支撑。此项研究也为乡镇工程测量管理模式的改进以及实践探索给予了理论层面的依据以及参考方面的经验,对于推动乡镇农田水利工程管理朝着科学化、标准化以及智能化的方向去发展,达成工程建设的可持续性以及长效管理是有帮助的。

[参考文献]

- [1]方鑫,刘志毅,施莎帅.单镜头无人机倾斜摄影测量技术在丘陵地区农田面积调查中的应用[J].测绘与空间地理信息,2025,48(8):194-195.
 - [2]庞宇航.无人机低空摄影测量技术在高标准农田建设中的应用[J].农村科学实验,2024(18):85-87.
 - [3]朱师欢,林阳.无人机摄影测量技术在农田建设项目中的应用实践[J].中国农业综合开发,2025(1):38-42.
- 作者简介:张思龙(1988.10—),毕业院校:广西大学(函授)土木工程专业,单位:广西贵港市港南区湛江镇农业服务,职务:中心主任,职称级别:中级职称。

水泵安装参数对水利输水系统运行效能的影响及协同调试策略

郑 嘉

浙江江能建设有限公司, 浙江 杭州 310000

[摘要]水泵安装参数在水利输水系统里极为重要,其恰当设置和系统整体运行效能提升以及能源消耗优化紧密相关。文中经分析安装高程、进出口管路配置等关键参数,探究这些参数对系统水力特性以及效率的影响机制,还提出协同调试策略来达成参数间动态匹配。

[关键词]水泵安装参数;水利输水系统;运行效能

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18059

中图分类号: X799.3

文献标识码: A

The Influence of Installation Parameters of Water Pumps on the Operational Efficiency of Water Conveyance System and Collaborative Debugging Strategies

ZHENG Jia

Zhejiang Jiangneng Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract: The installation parameters of water pumps are extremely important in hydraulic water transmission systems, and their appropriate settings are closely related to the overall operational efficiency improvement and energy consumption optimization of the system. The article analyzes key parameters such as installation elevation and inlet/outlet pipeline configuration, explores the impact mechanism of these parameters on the hydraulic characteristics and efficiency of the system, and proposes a collaborative debugging strategy to achieve dynamic matching between parameters.

Keywords: water pump installation parameters; water conveyance system; operational efficiency

引言

水利输水系统作为水资源调配的核心基础设施,其运行效能直接影响到农业灌溉、城市供水和工业用水等多个领域的可持续发展;水泵作为系统中的关键设备,其安装参数的合理设定不仅决定了单机性能,更对整个系统的水力平衡和能源效率产生深远影响。在实际工程中,由于安装参数选择不当导致的系统振动、效率低下和设备磨损等问题屡见不鲜,这凸显了深入探究参数优化与协同调试的必要性。

1 水泵安装参数对系统运行效能的影响

水泵安装涉及诸多参数,像安装高程、进出口管路配置以及基础设置等,这些因素综合起来,对系统运行期间的水力性能以及能源利用效率起着决定作用。要是安装高程设置得过高或者过低,那就会直接改变水泵的吸上真空度,如此一来,汽蚀现象便可能被引发,进而致使效率大幅降低。进出口管路的弯曲半径和长度配置要是不合理,那么局部阻力损失就会增加,系统扬程和流量也就难以达到设计所规定的数值了。长时间处于非理想参数状态下运行的系统,不但会让设备加速老化,而且还有可能因为振动传递而引发管道破裂这类极为严重的后果。所以,务必要借助精细化的参数调整手段,来对整体运行状态加以优化。再者说,安装参数和系统效能之间的关系并不是呈线性的,它是受到管网特性以及运行负荷等多种因素影响的。这就要求在实际的应用过程当中,要从动态的角度去对参

数展开评估。唯有把安装参数当作是一个整体系统来看待,而不是将其视作孤立的因素,才能够从根源上提升水利输水系统的可靠性以及经济性,同时也为后续的协同调试工作打下坚实的基础。

2 关键水泵安装参数分析

2.1 安装高程

安装高程指的是水泵基准面和吸入液面二者间的垂直距离,其设定时要综合考量诸多因素,像汽蚀余量、大气压力以及工作介质特性等都得纳入考量范围。安装高程要是设定得过高,那么有效汽蚀余量就会降低,汽蚀风险也会相应增加;要是设定得过低,则可能使得水泵淹没深度不够,如此一来便会影响其启动性能。所以,一定要依据现场的具体情况来进行精准的计算。在实际的工程当中,确定安装高程大多时候是依靠设计规范还有经验公式,然而倘若忽略掉当地温度的变化以及介质密度的波动情况,那就极有可能会引入较大的误差,这就需要借助模拟分析的方式来加以修正了。一个合理的安装高程,一方面能够确保水泵能够在高效区顺利运行,另一方面还能够减少振动以及噪声,进而延长设备的使用寿命,并且还能对整个系统的稳定性给予有力的支撑。除此之外,安装高程的调整还得和进出口管路的配置相互协调起来,防止因为参数出现冲突而导致系统性能有所下降,而这恰恰是协同调试过程当中需要着重关注的内容所在。

2.2 进出口管路配置

进出口管路配置涵盖管径选择、弯头数量以及阀门位置等诸多细节,这些方面都会对系统阻力以及流量分布产生影响。较大的管径可降低流速,减少摩擦损失,不过要是过度增大,那么投资成本就会提高,还会占用更多空间^[1]。合理的弯头和阀门布局能优化流态,避免涡流出现。实际应用中,进出口管路的长短、走向和水泵特性曲线匹配,不然工作点会发生偏移,运行效率也会降低,比如过长的吸入管道会增加阻力损失,引发汽蚀问题。所以管路配置设计要依据水力计算和模拟验证,通过调整局部元件来平衡系统压力与流量需求,这样的精细化操作能提升单一设备性能,还能多泵并联、阀门联动等复杂场景下协同运行创造条件。

3 安装参数与系统协同关系

3.1 水泵与管网的匹配性

水泵与管网的匹配性要求水泵特性曲线与系统阻力曲线在理想工作点附近相交,否则会导致运行效率低下或设备过载;安装参数如进出口配置和高程设置直接影响这两条曲线的形态,因此必须通过参数优化实现动态平衡。一个匹配良好的系统不仅能够降低能源消耗,还能减少振动和噪声从而提高设备可靠性,而忽视这种协同关系则可能引发局部高压或流量不足等故障^[2]。在实际调试中需要通过模拟软件分析不同参数组合下的系统行为,并针对实际运行负荷进行适应性调整;这正是协同调试策略的核心内容,它强调参数间的相互作用而非单一因素的独立优化。

3.2 多泵并联运行的参数协调

在大型水利输水系统当中,多泵并联运行的情况是较为常见的。其参数协调会涉及到多个方面,像是安装高程的一致性以及管路的对称性等等。要是各泵的安装参数出现差异,那么就会致使流量分配变得不均匀,并且还会引发部分泵出现过载情况,而其他泵则处于闲置状态的问题,如此一来便会使系统整体的效能降低。通过对安装高程加以统一以及对管路布局予以优化,可以确保各泵能够在相似的工况下运行,并且减少彼此之间的相互干扰。与此阀门调节以及控制系统也与之相互配合,以此来达成动态平衡的状态。这样的参数协调一方面提升了系统的容量以及灵活性,另一方面还增强了系统应对负荷变化时的适应能力。所以说,在实际的工程当中,务必要把多泵当作是一个整体系统来开展参数设定工作,而不是孤立地去处理单台设备。

3.3 阀门与水泵的联动控制

阀门和水泵的联动控制依靠调节开度的方式去改变系统的阻力,进而对水泵的工作点加以优化,达成节能运行的目的。安装参数,像阀门所处的位置以及类型的选择,会对控制精度以及响应速度产生影响。比如说,处在靠近水泵出口位置的阀门,能够较快地对压力做出调节,不过

可能会使水锤的风险有所增加。在实际的系统当中,阀门控制得要和水泵的特性相互匹配起来,防止因频繁启停而致使设备出现磨损以及造成能源方面的浪费^[3]。而对安装参数做出合理的设定,就为这种联动奠定了基础,举例来讲,借助预先调节阀门开度的方式来与预期负荷的变化相匹配,这不但提升了系统的自动化程度,而且强化了其在复杂工况之下的稳定性。所以说,阀门和水泵的集成调试在协同策略里属于极为重要的一个环节。

3.4 基础与振动控制

基础设计以及振动控制这两方面的情况,和水泵运行时的平稳程度还有其使用寿命是紧密相关的。其中,像基础刚度还有地脚螺栓预紧力这样的安装参数,它们会对振动的传递情况以及噪声的水平产生影响。要是有了个坚固牢靠的基础,那么它就能吸收掉一部分振动,并且还能阻止振动传到管道系统那边去。相反,要是安装出现了松动的情况,那可就有可能会让振动被进一步放大,进而致使连接件出现疲劳失效的问题。在实际的应用过程当中,基础参数得依据水泵的转速以及负荷特性来展开设计工作,与此同时还要和进出口管路的柔性连接相互结合起来,以此来把共振的风险给降下去。这样一种从多个不同维度去协同配合的做法,一方面提升了设备所具备的可靠性,另一方面也使得维护的需求有所减少,并且还让系统的使用寿命得以延长。所以说,基础与振动控制作为安装参数当中极为重要的一部分,务必要在调试的过程里面对其进行严格的监测以及相应的调整操作。

4 协同调试策略

4.1 参数预调与模拟分析

在系统正式投入运行之前,借助计算机模型对不同安装参数组合的效能展开评估,如此一来便能够识别出潜在存在的各类问题,并且以此为基础对设计方案做出相应的优化调整。这种方法能够在很大程度上缩减现场的调试所花费的时间,同时也可降低改造方面的成本。就好比说,通过模拟安装高程发生变化时对汽蚀余量所产生的影响,进而避免在实际运行过程当中出现故障情况。依据中国水力发电工程学会所颁布的《泵站调试技术指南》来看,运用数值模拟的方法是能够提前预测到 90%以上有关安装参数方面问题的。而这种凭借计算机辅助工程所开展的预调方式,当下已然成为行业内通行的标准实践做法。模拟分析必须要以实际工程的数据以及水力模型作为基础,唯有如此才能够保证最终所得结果具备足够的可信度以及适用性。与此在预调参数的时候还需要充分考虑到未来负荷可能会出现的变化情况以及系统后续扩展的需求,进而有效增强其长期的适应能力。具体来讲,这就需要去构建一个完整的数字孪生模型,这个模型当中要涵盖管路的特性、水泵的性能以及控制系统等方面的内容。通过对多工况进行仿真操作,以此来验证安装高程和管路配置之间是

否能够很好地相匹配。这样的策略一方面能够提升调试工作的效率,另一方面还能后续开展的动态监测提供可参照的基准。所以在实际的应用过程当中,应当将其当作协同调试环节里的首要步骤来加以实施。在参数预调的过程中,有一个方面是需要着重予以关注的,那就是要妥善处理模拟精度和计算资源之间的平衡关系。如果模型过于简单化了,那么就极有可能会忽略掉一些关键性的细节内容;而要是模型太过复杂的话,那么又会耗费大量的时间。所以这就要求工程师得根据工程自身的重要程度等级来选择恰当的模拟深度。

4.2 分阶段启动与负荷测试

分阶段启动以及负荷测试是通过逐渐加大系统负荷的方式来确认安装参数是否合理,同时还能找出在不同工作状况下出现的性能差异。比如一开始让系统空载运行,去检测振动以及噪声水平,接着再慢慢增加流量,留意扬程和效率的变化情况。此方法的好处在于能及时察觉到参数不匹配的问题并且做出相应调整,防止一次性满负荷运行而可能致使设备受损的情况发生。而且测试所得到的数据可为后续的优化工作提供实际证据,助力修正模拟分析环节里的误差^[3]。分阶段测试和实时监测相互结合,以便捕捉瞬时发生的各种现象并迅速做出反应,这也是在协同调试过程中达成参数动态优化的关键途径。在具体的操作流程里,每一个测试阶段都需持续足够长的时间来观察系统的稳定程度,一般建议每个负荷等级至少要保持运行两小时以上,并且要记录振动、温度、压力等关键参数的变化走向。如此一来,既能验证安装参数设置是否合理,又能逐步使系统各部件之间的配合关系得以磨合,为最终的满负荷运行打下稳固的基础。

4.3 动态监测与实时调整

动态监测以及实时调整,借助传感器和控制系统来采集运行数据,依据实际工况对安装参数加以微调,以此维持最优效能,比如依靠监测振动和压力信号来调整阀门开度或者泵速,达成系统需求与设备能力的平衡。此方法可应对负荷波动及外部环境变化,提升系统适应性与可靠性,而安装参数的实时调整要依据预设算法和经验规则,保证决策准确性与及时性,以及在中国南水北调工程所应用的智能监测系统,成功达成了对数百台水泵安装参数的实时追踪与自适应调整,大幅提升系统整体运行效率。动态监测拓展了调试的时空范围,把协同关系从静态设计延伸至动态运行,所以它成为现代水利输水系统里不可或缺的调试环节。具体实施过程中,需在水泵关键部位安装振动传感器、压力变送器以及位移监测装置,这些传感器须以不低于 100Hz 的采样频率收集数据并经由工业以太网传至中央控制系统,系统通过实时分析这些数据,可及时察觉安装参数与实际运行条件间的偏差,并自动生成调整建议

或者直接执行参数优化,这种闭环控制方式极大地提升了调试工作的精确度与响应速度。

4.4 系统集成与优化反馈

系统集成以及优化反馈会把各个调试环节所涉及的数据与经验都整合到同一个平台上,并且借助反馈机制来持续对安装参数以及运行策略加以改进,就好比依据长期运行数据去调整安装高程或者管路配置,以此来应对设备出现的老化情况以及负荷方面所发生的变化。这样的策略着重指出调试并非是一个仅此一次的过程,而是一个呈循环递进状态的系统工程,其需要多学科团队展开合作并且获得先进工具的支持,从而达成整体效能的最优化。国内某省级水利科研院所所开发的泵站调试管理平台便将参数预调、测试数据以及实时监测信息进行了整合,由此形成了完整的调试数据库以及知识库系统。优化反馈不但提升了当前系统的性能,而且还为类似的工程给予了极为宝贵的经验,所以在实际的应用当中应当建立起标准化的流程以及数据库,以此来推动行业技术不断取得进步。特别要建立的是调试数据和安装参数之间相互关联的分析模型,凭借机器学习的方法去挖掘历史调试数据里潜在的规律,进而形成针对不同泵型、不同系统配置的安装参数优化方案库。

5 结束语

水泵安装参数对于水利输水系统的运行效能有着颇为复杂且影响深远的作用,要想达成参数间的动态平衡并加以优化,得依靠协同调试策略来实现。本文全面深入地剖析了安装高程以及进出口管路等关键参数所具有的作用机制,还对它们和系统协同关系之间存在的多维互动展开了探讨。研究得出,协同调试可提升系统的效率与可靠性,降低维护成本以及能源消耗,能给可持续发展给予技术支持。后续的研究应当进一步将智能监测以及自适应控制技术加以集成,以此来应对更为复杂的运行场景,实际应用时要重视多参数协同以及全生命周期管理,推动水利输水系统朝着高效化与智能化的方向去发展。

[参考文献]

- [1]田培旭.某工程泵站水泵安装及调试技术探讨[J].当代农机,2024(10):65-66.
- [2]李雷.水泵水轮机安装过程中的关键技术研究[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(1):106-108.
- [3]李思源.水泵水轮机安装过程中的关键技术问题探究[J].水电站机电技术,2025,48(7):54-117.
- [4]钱程.论水泵机组安装施工技术与质量控制[J].中国设备工程,2025(14):227-229.

作者简介:郑嘉(1993.9—),女,汉族,浙江丽水人,华东理工大学,工程专业;浙江江能建设有限公司,机电工程事业部副总经理、工程师。

丁坝对弯道水流流态影响的研究现状

韦欣欣 曾媛媛 刘政昕 四郎巴登

北方民族大学土木工程学院, 宁夏 银川 750021

[摘要]丁坝属于河道弯道防护方面的关键工程举措,其对于水流流态会产生颇为显著的影响。本论文对丁坝对弯道水流的研究成果进行了分析,研究表明,丁坝对弯道主流线的位置走向、流速的具体分布状况、水面线呈现出的形态以及回流区与漩涡结构等方面都做出改变,进而对河道的冲刷以及淤积情况起到调节作用。已有的研究大多运用物理模型试验、数值模拟还有现场观测等手段,剖析了丁坝的长度、高度、布置方式等诸多参数针对流场所起的作用规律。而且研究发现,若丁坝布设不够合理,就有可能引发局部流速出现集中现象或者回流区发生扩大的情况,这就给河道带来新的冲刷风险。目前的研究正朝着将多种方法相互结合起来以及开展设计优化的方向不断发展前行,以此为丁坝工程的设计工作以及弯道的整治事宜给予一定的参考依据。

[关键词]丁坝; 弯道水流; 流态影响

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18060

中图分类号: TV131

文献标识码: A

Research Status of the Influence of Spur on the Flow of Curved Water Flow

WEI Xinxin, ZENG Yuanyuan, LIU Zhengxin, SILANG Badeng

School of Civil Engineering, North Minnzu University, Yinchuan, Ningxia, 750021, China

Abstract: Spur is a key engineering measure in the protection of river bends, and it has a significant impact on the flow state of water. This paper analyzes the research results of the use of spur dikes on curved water flow. The study shows that spur dikes make changes to the position and direction of the main flow line in curved channels, the specific distribution of flow velocity, the shape of the water surface profile, and the backflow zone and vortex structure, thereby regulating the erosion and sedimentation of the river channel. Most existing studies have used physical model experiments, numerical simulations, and on-site observations to analyze the effects of various parameters such as the length, height, and layout of the spur dike on the flow field. Moreover, research has found that if the layout of the spur dike is not reasonable enough, it may lead to the concentration of local flow velocity or the expansion of the backflow area, which brings new scouring risks to the river channel. At present, research is constantly developing towards combining multiple methods and conducting design optimization, providing a certain reference basis for the design work of spur projects and the rectification of bends.

Keywords: spur; bend water flow; flow influence

引言

在河道治理以及岸防工程领域当中,弯道区域因为水流受到离心力的作用,往往会呈现出主流发生偏移、凹岸出现冲刷情况以及凸岸产生淤积等一系列较为复杂的水动力方面的特征,这些特征会直接对河道的稳定性、航运的安全状况以及沿岸的生态环境产生影响。丁坝属于十分重要的河道防护构造,在河道治理过程中,通过将其沿着岸边或者是在弯道的内侧进行布置的方式,可以对弯道水流的方向、流速的分布情况以及能量的传递起到调控的作用,进而达成让河床保持稳定以及对冲刷情况进行控制这样的目的。近些年来,伴随着水力学相关的研究以及河道整治工程不断发展,学者们逐步察觉到丁坝不仅仅在控制局部的流速以及水流的方向方面发挥着作用,而且还会对回流区、漩涡结构、水面线的形态以及流场的紊动特征等产生颇为显著的影响,而这些诸多的因素综合起来便共同决定了弯道所处的水力环境以及泥沙运移的规律。国内外

与之相关的研究借助物理模型试验、数值模拟以及现场观测等多种多样的方法,针对丁坝给弯道水流流态带来的影响展开了较为广泛的探索活动,这其中就涵盖了丁坝的长度、高度、布置角度以及群坝效应等相关参数对于流速场、主流线的位置以及漩涡分布所具有的调控作用。不过,当前的研究依旧存在着一定的局限性,像是在不同流量条件之下流态的响应规律还没有完全清晰明确、对于丁坝与群坝耦合效应的长期演变机理研究还不够充分,再者智能化优化设计方法的应用也并不普遍。所以,全面且细致地梳理丁坝对弯道水流流态影响的研究实际状况,深入剖析其作用的具体机理、参数的敏感程度以及方法技术的发展走向,这对于指导河道整治工作、优化丁坝的设计方案以及确保河道的稳定状态而言,有着极为重要的理论层面的价值以及工程实践方面的意义。

1 丁坝的作用

丁坝是广泛使用的河道整治和维护建筑物,其主要功

能为保护河岸不受来流直接冲蚀而产生掏刷破坏,同时它也在改善航道、维护河相以及保护水生态多样化方面发挥着作用。它能够阻碍和削弱斜向波和沿岸流对海岸的侵蚀作用,促进坝田淤积,形成新的海滩,达到保护海岸的目的。按丁坝的作用和性质又分为控导型和治导型两种。控导型丁坝坝身较长,一般坝顶不过水,其作用是使主流远离堤岸,既防止坡岸冲刷又改变河道流势。治导型丁坝工程的主要作用是迎托水流,消减水势,不使急流靠近河岸,从而护岸护滩、防止或减轻水流对岸滩的冲刷。

2 丁坝对弯道水流流态的影响研究现状

2.1 丁坝对主流线位置的影响

丁坝对弯道主流线位置产生的影响属于河道整治以及防护工程研究范畴内的关键课题,它主要是借助改变弯道内部水流的分布特点以及流向构造的方式去对主流线在空间当中的位置加以调节。弯道水流在受到离心力的作用之下,原本的主流线多数情况会偏向于凹岸这一侧,然而丁坝的设置会改变弯道局部水流的状态,致使来流在坝体周边出现较为明显的偏折以及分流的情况。相关研究显示,丁坝迎水侧的水流会被迫改变自身方向,有一部分水流受到阻碍之后会形成绕流,进而使得弯道主流线出现偏移的现象。当丁坝朝着上游进行布设的时候,能够有效地引导主流远离河岸,削弱弯道凹岸的冲刷作用;而当丁坝朝着下游进行布设的时候,则有可能将主流推向外侧,加剧局部的冲刷程度。不同形态的丁坝(像T型、L型、透水式等等)针对主流线所起到的调节效果也会存在差异,其中T型丁坝因为具备分流以及导流这两种作用,通常能够在控制主流偏移以及减缓流速等方面获取较好的综合成效^[1]。与此丁坝的长度、高度、与岸线的间距以及群坝的布置方式都会对主流线的稳定位置产生重要的影响。物理模型以及数值模拟的研究发现,当丁坝长度增加或者间距减小的时候,主流线更易于远离凹岸,河槽中心流速带的位置趋向于稳定;但是布置过于密集的话,会导致水流出现紊乱的情况、回流区不断扩大,最终引发新的冲刷中心的产生。

2.2 丁坝对流速分布的影响

丁坝对弯道水流流速分布产生的影响,主要表现在其对弯道内部水流速度场重新分配以及能量传递过程加以改变。在弯道当中,原本就存在着较为明显的横向流速梯度,靠近凹岸的地方流速相对较大,而凸岸处流速则较小,丁坝的设置使得这种原有的流速分布平衡状态被打破。相关研究说明,丁坝在迎水面位置会形成局部的高流速区域,水流受到阻碍之后会绕着坝体流动,进而使得丁坝下游以及背水侧出现低速回流区域,最终致使整个弯道的流速分布呈现出“高-低-高”这样复杂的变动格局。物理模型以及数值模拟方面的研究情况表明,当丁坝的长度以及高度比较大的时候,来流受到的阻碍会更加明显,坝头处的流

速会急剧增加,并且在坝头下游会出现强烈的剪切流以及涡旋区域,局部的紊动能也会有显著的增强;而在丁坝尾部以及背流区域,流速会大幅度降低,形成滞流或者回流带。在群坝布设的情况下,坝间的水流会相互产生干扰,在间隙处可能会形成加速流通道,从而在局部形成高流速带,对下游河床会产生较强的冲刷作用。丁坝的形态、间距以及布设角度对于流速分布的影响十分敏感,迎水角度过大或者间距过小都有可能导导致主流集中、冲刷强度增强;与之相反,适度的布设能够有效地削弱弯道内部流速不均的情况,让流速分布趋向于平缓,这对于河势稳定以及岸坡防护都是有利的。

2.3 丁坝对水面线与流态结构的影响

丁坝对于弯道水面线以及流态结构所产生的影响,重点在于其对局部水流能量分布情况、流向所发生的改变以及水位梯度的调节方面。在弯道内部,水流受到离心力的作用,其水面线原本呈现出外侧较高而内侧较低的倾斜特点。在设置了丁坝之后,因为丁坝具备对水流起到阻挡、分流以及导向的作用,所以弯道内部的水面线形态产生了颇为显著的变化。相关研究显示,在丁坝迎水的那一侧,由于流速有所增大,动能也出现了上升的情况,这就使得水面在局部位置抬高起来;然而在丁坝背水的那一侧,流速降低了,压力却上升了,进而形成了相对较为低洼或者说是回水的区域,如此一来,水面线便呈现出“凸一凹”相互交替的波动形态。随着丁坝群的布置设置,弯道内部的水面线不再是单调且平滑的状态,而是呈现出周期性的起伏特点,这实际上反映出了水流能量分布存在着空间上的不均匀状况。丁坝还将会对弯道流态结构带来深远的影响,在其迎水面会形成强烈的绕流以及分离流区域,而在下游部位则会出现比较明显的回流、涡旋以及二次流的结构,流态从原本单一的主流模式转变为了复杂的多流区体系^[2]。无论是物理模型还是数值模拟所得出的结果都说明,丁坝的长度、间距以及形态方面的不同情况,会直接对分离流区域以及回流区域的范围和强度产生影响,尤其是在弯道凹岸所在的区域,要是丁坝过长或者间距过于密集,那么就有可能导致紊流区域相互叠加,进而引发局部水面出现不稳定的情况以及产生强烈的冲刷现象。与之相反的是,经过合理布置设置的丁坝群,能够平衡水面线的坡降程度,对流态结构加以优化,让流速分布变得更加均匀,推动河道纵向能量的衰减,最终实现减缓弯道冲刷以及稳定河势的综合水动力效果。

2.4 丁坝对回流区与漩涡分布的影响

丁坝在弯道水流当中进行设置时,会对回流区以及漩涡的分布特性产生颇为显著的影响,这种影响重点体现在弯道内侧回流区形成的大概范围、所具备的强度还有漩涡呈现出的结构形态方面。相关研究说明,丁坝借助阻断以及偏转主流这样的方式,促使部分水流在坝子后面形成比

较明显的回流区,并且这个回流区的范围同丁坝的长度、间距以及布置角度之间存在着紧密的关联。随着丁坝群数量不断增多,弯道内侧的回流区往往变得更加复杂起来,会呈现出多级漩涡结构,水流在坝子后面也显示出十分明显的三维流动特点。在这个过程当中,丁坝下游的漩涡强度会随着水流速度以及来流攻角发生改变而有所变化,在流速较高的情况下,漩涡区会朝着外侧进行扩展,进而增强局部的紊动能以及泥沙再悬浮的作用。有一部分学者通过把物理模型和数值模拟相互结合起来的方式察觉到,要是能够合理地去布置丁坝,那么就可以有效地对弯道内侧那种强回流以及大尺度漩涡的形成起到削弱的作用,如此一来便能够使弯道内的水流分布变得更为均匀一些,同时也有助于稳定河床的形态。

2.5 丁坝对弯道水流能量与紊动特征的影响

丁坝对弯道水流能量以及紊动特征所产生的影响,主要表现在对局部能量分布加以改变、使紊动强度得以增加,还有重塑能量耗散结构等方面。弯道水流原本就有离心力的作用以及横向环流的特性,其流速分布以及能量状态呈现出不均匀的特点,而丁坝的设置更是进一步打破了原有的流场平衡。通过研究可以发现,在丁坝上游区域,水流受到阻碍进而形成了局部的高能区,水流在坝头附近会产生强烈的剪切以及紊动现象,这就使得局部的湍动能有了较为显著的增长,流体能量在空间方面呈现出十分明显的梯度分布情况。在坝后区域,因为形成了回流与漩涡结构,所以能量传递的效率出现了下降的情况,呈现出低能耗区的特点,不过紊动扩散的作用却有所增强,这使得局部流场变得更加复杂了^[3]。除此之外,丁坝群对于弯道水流能量的影响还存在着累积效应,随着丁坝布置数量以及密度的不断增加,流场的能量耗散程度不断加剧,主流能量逐步向着中下层进行扩散,如此一来便能够改善弯道外侧冲刷、内侧淤积这种不均衡的状况。数值模拟以及实测的结果都说明,对丁坝尺寸、间距以及入射角度等关键参数进行合理优化,是控制弯道紊动结构、调节能量分布的核心手段。科学的布置方式可在保证河道行洪安全的前提下,提高能量耗散效率,稳定河床形态,并改善河道演变趋势。由此可见,丁坝布置的参数化设计对于弯道水流动力结构调控具有重要的工程意义和实践价值。

3 研究方法与技术发展趋势

当下针对丁坝给弯道水流流态所造成的影响展开的研究方法,呈现出多样以及技术集成方面的特性,主要涵盖物理模型试验、数值模拟还有现场观测这三大类别,并且正逐步朝着高精度、多尺度以及耦合分析这样的方向去发展。物理模型试验依靠着缩尺水槽以及可调丁坝装置,

可直观地把弯道流场、回流区、漩涡以及水面线的变化展现出来,再结合像 PIV (粒子图像测速)、激光多普勒流速仪还有高速摄影这类先进的测量技术,便能够获取到高分辨率的速度场、涡结构以及水面波动方面的数据,进而为弄清楚丁坝对于局部流动的机理给予直观的依据。就数值模拟方法来讲,随着计算流体力学技术不断取得进展,RANS (雷诺平均 Navier - Stokes) 模型、大涡模拟还有体积法捕捉自由面方法得到了广泛的应用,其主要用于预测复杂的三维流态、流速分布以及泥沙输移的相关特征,并且还能够针对不同的丁坝形态、布置参数以及流量条件展开敏感性分析以及优化设计。近些年来,多方法耦合研究渐渐变成了一种趋势,比如把物理模型实验所得到的数据应用于数值模型的校正与验证,或者把数值模拟的结果同现场流量监测、声学多普勒流速剖面仪观测数据相互结合起来,以此达成对弯道水流长期演变以及泥沙输移的高精度再现效果^[4]。除此之外,智能化以及数据驱动的方法也开始逐渐被引入进来,像是借助机器学习算法来开展参数反演、流场预测以及最优丁坝布置方案的辅助设计工作。

4 结语

丁坝对于弯道水流流态有着十分重要的调控作用,其能够通过改变主流线所处的位置、流速的分布情况、水面线呈现出的形态以及回流区与漩涡结构的状态,进而对弯道的冲刷以及淤积过程产生有效的影响,最终达到提升河道稳定性以及岸防安全的目的。就现有的相关研究情况来看,在物理模型试验、数值模拟以及现场观测等诸多方面都已收获了颇为丰富的成果,然而在丁坝参数的优化、群坝耦合效应的分析以及长期演变规律的研究等方面依旧存在着一定的局限性。在未来的研究当中,应当进一步将多种方法加以耦合运用,并且融入智能化分析手段,同时紧密结合工程实践实际情况,去深入探索丁坝布设方式与弯道流态调控之间最为理想的策略,以此来为河道整治工作以及丁坝工程的设计事宜给予更为科学合理的依据。

【参考文献】

- [1]刘红标.河道整治工程中丁坝对弯道水流特性影响研究[J].内蒙古水利,2024(11):37-39.
- [2]郭相军,胡方方,郭海洋.丁坝对弯道水流特性影响分析[J].河南水利与南水北调,2024,53(1):85-87.
- [3]张浩南,景何仿.多级丁坝影响下弯道水流运动三维数值模拟研究[J].宁夏工程技术,2023,22(1):73-79.
- [4]李苏.透水丁坝对弯道水流特性影响的三维数值模拟研究[D].陕西:西安理工大学,2021.

作者简介: 韦欣欣 (2005.4—), 女, 毕业院校: 北方民族大学, 所学专业: 水利水电工程专业。

基于数字孪生的水资源优化调度管理方法及系统研究

吾尔古丽·吐送尼亚孜

塔里木河流域和田河水利管理中心, 新疆 和田 848000

[摘要]随着水资源短缺这一问题变得日益严峻起来,传统水资源管理所采用的方式已经很难去契合那复杂且多变的环境方面的需求了。数字孪生技术属于一种新兴的数字化相关手段,它给水资源优化配置调度管理带来了全新的解决办法。文章着眼于干旱地区水资源调度管理所具有的特殊性,同时结合数字孪生技术自身的内涵特点以及其关键技术层面的内容,对传统水资源调度管理存在的局限性展开了较为细致的剖析,并且在此基础之上提出了一种基于数字孪生的水资源优化配置调度管理的具体方法。

[关键词]数字孪生; 水资源调度; 多源数据融合

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18062

中图分类号: TV697

文献标识码: A

Research on the Optimization and Scheduling Management Method and System of Water Resources Based on Digital Twins

WUERGULI Tusongniyazi

Tarim River Basin Hotan River Water Conservancy Management Center, Hotan, Xinjiang, 848000, China

Abstract: With the increasingly severe problem of water scarcity, traditional water resource management methods are no longer able to meet the complex and ever-changing environmental needs. Digital twin technology is an emerging digital technology that provides a new solution for optimizing the allocation, scheduling, and management of water resources. The article focuses on the particularity of water resource scheduling and management in arid areas, and combines the inherent characteristics and key technical aspects of digital twin technology to conduct a detailed analysis of the limitations of traditional water resource scheduling and management. Based on this, a specific method for optimizing water resource allocation and scheduling management based on digital twin is proposed.

Keywords: digital twin; water resource scheduling; multi source data fusion

引言

在现代社会发展、人口增长以及气候变化等多方面因素的影响下,水资源污染或短缺问题开始日益突出。随着水利基础设施建设的快速发展,水资源精细化管理的现实需求持续增强,当前水资源利用效率不足与调配机制不健全等问题突出。因此,传统水资源调度方法已无法满足当前的水资源调度需求,基于智能技术的水资源调度也开始备受关注。数字孪生技术通过构建物理世界与数字空间实时交互的映射关系,为实现水资源系统的精准感知与智能决策提供了技术上的可能,近年来在水利行业的应用范围不断扩大且深度持续增加。

1 数字孪生技术概述

1.1 数字孪生内涵与特征

数字孪生说到底就是借助数字化的方式去构建物理实体的虚拟映射,进而达成物理实体和虚拟映射之间能够实时进行数据交互并且互相驱动优化的一种技术框架,它的核心特点在全要素数字化、实时交互性以及动态预测性等诸多方面都有所体现。具体来讲,在水资源管理这个领域当中,数字孪生系统会依靠布置在流域或者水利工程处的多种多样的感知设备,不断地去采集像水情、工情还有雨情这类的关键数据,而后依据这些数据来构

建起一个有着极高保真度的水资源系统的虚拟模型,如此一来便能对物理实体的运行状况予以实时的监控,同时还能较为准确地预测其未来的发展走向。在干旱地区的某个流域,通过构建数据底板以及模型库这两项举措,成功地将相关业务进行了深度的应用,使得水量调度的精准度得以提高,水资源利用的整体效能也有了明显的提升。

1.2 数字孪生在水资源领域的应用现状

水资源领域的数字孪生技术应用已经逐渐从起初的概念探索阶段迈向实践推广阶段,由此形成了一系列多元化的应用场景,像是流域管理、工程调度以及灌区节水等。就跨区域调水工程来讲,某一大型调水工程在部署了数字孪生系统之后,把设备监测点的数量拓展到了数千个之多,并且还引入了智能设备来开展自动巡检工作,从而达成了从以往被动地等待故障的出现转变为如今主动去防范风险这样一种根本性的改变^[1]。再看灌区节水领域,我国干旱地区的某个地方通过搭建数字孪生灌区试点以及防洪预报预警预案系统,基本上实现了对供水主管网和扬水主泵站的自动化远程控制,这在很大程度上提高了该地区水资源调控的能力以及利用的效率。

2 水资源调度管理的问题与需求分析

2.1 传统水资源调度管理的局限性

传统水资源调度管理方式于干旱地区遭遇了数据获取滞后以及决策过程单一这两重困境,很难契合复杂多变的水资源系统运行需求,其局限性突出表现在监测能力不够以及调度模式较为粗放等诸多方面。其一,传统管理模式大多依靠人工巡检和定点监测,数据更新的频次不高,并且覆盖的范围也有限,没办法达成对水资源系统运行状态的完整感知以及实时把控。其二,现有的调度决策过程过分依赖历史经验以及固定规则,缺少对多源信息以及未来情景展开综合分析的能力,这就使得水资源调配难以依据实际需求的变化来实现动态优化。

2.2 数字孪生驱动的调度管理需求

干旱地区水资源短缺情况日益严重,供水保障要求也在提高,水资源调度管理迫切需要借助数字孪生技术,完成从依靠经验到依靠模型的转变,这给系统构建提出了一些明确需求,比如要能全面感知,做出智能决策等^[2]。在数据方面,得突破多源异构水资源数据整合的难题,建立一个可融合遥感监测、地面站点以及物联网设备的全方位感知体系,达成从水源到用水户全链条的数据采集与传输。在模型方面,得开发能准确刻画水资源系统动态特性的仿真模型和优化算法,具备对水资源调配过程进行精准模拟以及多方案比选的能力。

2.3 系统建设目标与功能要求

建设基于数字孪生的水资源优化配置调度管理系统,应把实现水资源可持续利用以及保障供水安全当作根本目标,要满足业务应用实用性和技术架构先进性这两方面功能要求。具体来讲,该系统得有对水资源系统运行状态进行实时监控和动态评估的能力,能借助布置在流域及工程处的多种感知设备,接连不断地采集并更新像气象水文、工程运行这类关键数据。系统还得具备对水资源调度方案展开模拟仿真以及优化比选的功能,可依据来水预报与用水需求的变动情况,动态地生成并评估不同调度策略实际施行的效果。

3 基于数字孪生的水资源优化调度管理方法

3.1 多源异构数据采集与融合方法

多源异构数据的高质量采集以及有效融合,乃是数字孪生系统得以良好运行的重要根基所在,这就要求综合运用天空地一体化监测方面的技术以及数据治理的相关方法,去构建起一个可覆盖全要素并且贯穿全过程的水资源数据采集传输体系。在数据采集这个层面而言,得依据水资源管理业务实际的具体需求状况,合理地去布设像水文站点、水质传感器还有视频监控这类感知设备,并且要积极地引入诸如无人机航拍以及遥感监测等全新的技术手段^[3]。至于数据融合方面,那就需要建立起统一的水资源数据标准以及相应的规范,进而构建起能够对气象水文、

工程运行以及用水需求等多源信息加以整合的数据底板。尤其需要注意的是,干旱地区在开展水资源数据采集工作的时候,务必要更为着重地体现出冰雪融水补给以及农业灌溉用水所具有的特点,从而形成能够精准反映出当地水资源形成以及消耗规律的数据集合,以此来为后续的模式构建以及决策分析给予充足且可信的数据支撑。

3.2 水资源系统动态建模与仿真方法

水资源系统的动态建模以及实时仿真属于数字孪生技术里极为关键的环节,要想达成这一目标,得把机理模型和数据驱动模型很好地融合起来,进而构建起一套能够精准描绘水资源系统行为特点以及演化规律的数学模型体系^[4]。具体来讲,要依据干旱地区特有的水文特性还有用水规律去开发那种可模拟地表地下水相互转化过程以及作物耗水机制的专业模型,并且还得构建能体现水利工程运行特性以及水资源调配规则的调度模型,以此具备在不同来水情形以及用水需求状况下生成方案并评估其效果的能力。若想提高模型的实际应用性以及计算效率,能够引入像机器学习这类的人工智能技术,借助对历史数据展开学习挖掘,建立起虽简化却有效的代理模型,让这些模型有机组合起来协同运行,它们共同组成了数字孪生系统开展情景模拟以及方案优化的模型根基,给水资源调度决策给予了强有力的科学分析工具,能让管理者在虚拟环境当中对各类调度方案予以充分的测试以及比较。

3.3 多目标优化调度决策方法

在干旱地区,其水资源系统较为复杂,这就需要构建起一种多目标优化调度决策的方法,这种方法要能对经济社会的发展以及生态环境的保护加以统筹考虑。借助引入智能优化算法还有多准则决策分析方面的技术,进而达成让水资源配置实现综合效益的最大化这一目的。具体来讲,得先去构建一个包含有经济、社会以及生态等诸多维度的调度目标体系,把各个目标之间存在的竞争关系以及它们的优先顺序都明确清楚。就好比某个流域所实施的生产、生活、生态用水的统筹管理目标一样,依靠精准的调控手段,切实保障了该流域里面农业灌溉、居民饮水以及湿地补水等多种用水的需求都能够得到满足^[5]。接着,还得去研发那种能够对高维非线性优化问题予以处理的智能算法,以此来生成在多个存在竞争的目标之间达成平衡的帕累托最优解集。还要建立起考虑到不同主体的偏好情况以及风险态度的决策规则,从数量众多的非支配解当中筛选出能够契合当前决策情景的最优调度方案。

3.4 风险预警与应急响应策略

干旱地区的水资源系统面临着极端气候以及突发污染等诸多风险,这就得去建立起依托数字孪生技术的风险预警以及应急响应办法,进而形成从风险识别一直到应急处置的完整业务闭环。在风险识别这个层面,要充分借助数字孪生系统所具备的实时监测还有动态预测的能力,去

构建起涵盖水文水质以及工程安全等多个类别风险源的识别指标体系。就预警发布来讲,得依照风险的发展状况与可能产生的后果,去制定出科学且合理的预警阈值以及发布流程,并且借助多种通信渠道来保证预警信息可以及时并且准确地传达到相关责任主体那里。在应急响应这块,要依靠数字孪生系统的预案管理功能,形成针对不同风险情景的处置方案库以及资源调度策略。

4 水资源优化调度管理系统设计

4.1 系统总体架构

基于数字孪生理念打造的水资源优化配置调度管理系统,其架构设计宜采用分层模式,具体要构建起由感知层、传输层、数据层、模型层以及应用层这五层所组成的整体框架,借此形成可从数据采集环节一直延伸至业务应用层面的完整技术支撑链条。就感知层来讲,得去布设能够将水源、输水、配水乃至用水整个过程都涵盖在内的监测设施,以此来实时对水资源系统的运行状态数据加以采集。而在传输层这边,需依据监测点的具体分布状况以及所处的环境条件,去挑选与之相适宜的通信方式和网络协议,从而保证监测数据可以及时且可靠地传送到数据中心。

4.2 感知层与数据传输设计

感知层和数据传输系统的设计关键在于搭建起能够实现全面覆盖并且具备可靠传输功能的水资源监测网络,得依据管理对象空间分布以及业务需求所呈现出的特点,对监测站点的布局予以合理规划,并且慎重选择通信方式。在监测要素这个层面,务必要将降水量、河道水位、水库蓄量、地下水埋深、水质参数还有作物需水等一系列关键指标都涵盖进去,从而形成针对水资源循环过程较为完整的描绘。就监测技术而言,要充分综合运用自动水位站、远程水质传感器以及卫星遥感等多种不同的监测手段,进而构建起一个天、空、地相互融合的一体化立体监测体系。

4.3 模型层与仿真引擎设计

模型层以及仿真引擎的设计主要目标是构建起精准且高效的水资源系统模拟环境。要达成这一目标,得把水文水动力模型同优化调度算法整合起来,进而形成针对水资源系统行为特征的数字映射能力,同时也具备对未来情景展开预测预演的能力。从模型的组成情况来看,应当去构建一个完整的模型体系,这个体系里要包含水文模型、水动力学模型、水质模型、水资源调度模型还有工程安全模型等,要能够涵盖水资源管理所涉及的主要业务领域。在计算引擎这块儿,那就得采用高性能计算以及并行处理方面的技术,以此来提高复杂模型的计算效率,并且加快其响应速度。

4.4 应用层与功能模块设计

应用层以及功能模块的设计务必要紧紧围绕水资源调度管理方面的业务实际需求还有用户的使用习惯展开,去开发出具备良好用户体验并且有着实用价值的软件系统,从而能够给予水资源管理整个过程全方位的决策支持功能。就系统的功能而言,起码得涵盖水资源监测、水量调度、应急响应以及综合管理这四大核心模块,进而对水资源管理的主要业务实现较为完善的支撑作用。在人机交互这个层面,那就得运用可视化技术以及交互式设计手段,把那些复杂的专业数据还有模型结果以一种直观且容易理解的形式呈现给用户。

5 结束语

数字孪生技术给干旱地区的水资源优化配置调度管理带来了全新的解决办法。其通过建立起物理系统和数字虚体之间的实时互动以及双向映射关联,促使水资源管理从依靠经验来驱动转变为由模型来驱动,达成了根本性的改变。本文所阐述的基于数字孪生的水资源优化配置调度管理方式,把多源数据采集融合、系统动态建模仿真、多目标优化决策还有风险预警响应等诸多关键的技术环节予以系统地整合起来,进而形成了一套涵盖感知、传输、数据、模型以及应用这五层架构的系统设计方案。在未来,伴随着物联网以及人工智能等相关技术不断向前发展,数字孪生系统在水资源管理当中的应用无论是深度还是广度都将会得到进一步的拓展。尤其是在冰雪融水预测以及生态需水保障这类干旱地区所特有的问题方面,数字孪生技术将会发挥出更为重要的支撑作用。

[参考文献]

- [1]寇梦璐.水资源智能调度模型的构建与应用策略[J].河南水利与南水北调,2025,54(8):35-36.
 - [2]张猛.面向水资源可持续发展的水文自动化监测与预测方法研究[N].河北经济日报,2025-09-04(12).
 - [3]陈华鑫,陈悦云,何建兵,等.新安江流域水资源统一调度实践与思考[N].水利发展研究,2025-10-23(6).
 - [4]翁硕,林明财,林建锋,等.基于多目标优化的梯级水库水资源调度协同策略研究[N].水利水电科技进展,2025-10-23(6).
 - [5]孙浩,赵迪,赵浩鹏.智慧水利信息化系统在水利工程中的应用研究[J].水上安全,2025(16):19-21.
- 作者简介: 吾尔古丽·吐送尼亚孜(1972.4—), 毕业院校: 新疆农业大学水利水电建筑工程, 所学专业: 水利管理, 当前就职单位名称: 塔里木河流域和田河水利管理中心, 职称级别: 高级工程师。

330MW 亚临界机组汽轮机热力系统能效分析与优化研究

靳海峰 周 磊

江苏淮阴发电有限责任公司, 江苏 淮安 223200

[摘要]随着能源需求不断增加以及环保要求变得愈发严格起来, 火力发电机组能效的提升已然成为行业所聚焦的重点所在。330MW 亚临界机组属于我国火电范畴里的关键构成部分, 其汽轮机热力系统的运行效率会对整体电厂的经济性以及环保性能产生直接影响。当下, 不少机组在长时间的运行过程当中出现了能效有所下降的情况, 迫切需要借助科学的方法来展开分析并加以优化处理。文章依据现有的相关研究成果, 同时结合系统理论, 针对 330MW 亚临界机组热力系统开展能效评估工作, 并且给出具有针对性的优化策略, 目的是为了给实际运行给予相应的指导。

[关键词]330MW 亚临界机组; 汽轮机; 热力系统; 能效分析

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18051

中图分类号: TK223

文献标识码: A

Energy Efficiency Analysis and Optimization Study of 330MW Subcritical Unit Steam Turbine Thermal System

JIN Haifeng, ZHOU Lei

Jiangsu Huaiyin Power Generation Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu, 223200, China

Abstract: With the increasing demand for energy and stricter environmental requirements, improving the energy efficiency of thermal power generation units has become a key focus of the industry. The 330MW subcritical unit is a key component of Chinese thermal power sector, and the operational efficiency of its steam turbine thermal system directly affects the overall economic and environmental performance of the power plant. At present, many units have experienced a decrease in energy efficiency during long-term operation, and there is an urgent need to use scientific methods to analyze and optimize them. Based on existing research results and combined with system theory, this article conducts energy efficiency evaluation on the thermal system of a 330MW subcritical unit and provides targeted optimization strategies to provide corresponding guidance for actual operation.

Keywords: 330MW subcritical unit; steam turbine; thermal system; energy efficiency analysis

当前, 随着国家能源政策调整, 火电机组“节能减排”工作日趋紧迫和重要。目前, 330MW 级别机组在我国北方供热机组占有很大比例, 尤其是近几年的新增供热机组几乎全是 330MW 级别的, 不仅有亚临界甚至还开发研制出超临界的供热机组; 许多文献资料显示这个级别的机组在实际运行中会存在很多问题, 如供电效率偏低煤耗偏高、投运顺序阀时出现轴系振动大瓦温高等问题, 为助力“双碳”目标的实现, 能源电力企业向着绿色低碳方向转型, 对煤电机组进行节能提效改造已成为国家在能源电力领域的重要举措。

1 330MW 亚临界机组热力系统概述

330MW 亚临界机组热力系统关键构成部分有锅炉、汽轮机、凝汽器、给水加热器以及辅机等设备, 其运作原理是以朗肯循环为基础, 借助燃料燃烧所生成的高温高压蒸汽来推动汽轮机实现发电功能。在这套系统当中, 像压力、温度这类蒸汽参数的设定情况, 对于整个系统的效率有着颇为重要的影响作用, 而所谓的亚临界状态, 便是指运行时的压力低于临界点的那种工况情形, 往往还会伴随着一定程度的能量损失出现^[1]。热力系统的运行稳定程度

以及效率水平, 都取决于各个设备之间的相互协调与配合情况, 就好比汽轮机所排出的蒸汽进入到凝汽器里面去进行冷凝操作, 进而形成一个真空环境, 以此来促使做功能力得以提升。与此在给水加热这个过程当中, 是通过回收余热的方式来削减能量的浪费情况, 不过在实际的运行进程里, 常常会因为设备出现老化状况以及参数发生偏离等情况, 致使效率有所降低。该系统在火电厂里面有着广泛的应用范围, 然而其能效方面所具备的潜力还没有得到充分的挖掘, 这就需要通过细致深入的分析来探寻出能够改进的空间所在。

2 热力系统能效分析

2.1 能效评价指标

热力系统的能效评价一般会采用多种指标来展开, 像热效率、煤耗率、汽耗率以及排烟温度等等, 这些指标可较为完整地反映出系统能量利用的实际状况。热效率指的是系统输出功和输入热量之间的比值, 它直观地呈现出能量转换的效果, 其计算过程需要把蒸汽初参数以及终参数所产生的影响都考虑进去。煤耗率所指的是单位发电量所耗费的标准煤量, 这是一项用来衡量经济性的重要指标,

煤耗率越低就意味着能效越高。汽耗率体现出的是汽轮机单位出力所需要的蒸汽量,它的数值会受到设备状态以及运行方式的约束。排烟温度作为锅炉效率的一种间接指标,过高的温度说明余热回收做得不够到位,进而造成了能量的浪费。除此之外,凝汽器真空度以及给水温度同样重要的评价参数,前者会对汽轮机背压和出力产生影响,而后者则和回热系统效果有所关联。在实际的应用过程当中,这些指标得结合机组运行的数据来进行综合性的分析,从而找出能效存在薄弱的环节。

2.2 主要能效问题分析

330MW 亚临界机组热力系统于运行之时,面临着诸多效能方面的难题,这些难题主要涵盖设备出现老化的状况、各项参数发生偏离以及系统匹配不够理想等诸多方面。设备老化这一情况,使得汽轮机通流部位出现磨损现象,同时锅炉受热面也沾染了积灰,如此一来便致使内部阻力有所增加,传热效率也相应地下降了,最终引发了汽耗率以及煤耗率的上扬。参数偏离则具体体现为蒸汽的压力以及温度都低于所设计的数值,这种情况往往是由于运行调整操作不妥当或者监测仪器存在误差所致,进而对热力循环的整体性能产生了直接的影响。系统匹配欠佳涉及到各个设备之间协调出现问题,就好比当凝汽器真空度不足之际,汽轮机出力就会减少,与此同时给水加热器也没能充分地利用抽汽余热,这就造成了能量的浪费。除此之外,辅助设备像泵和风机的能耗过高的情况同样是比较常见的问题,其运行效率较低会进一步放大系统的损失。在长时间的运行过程当中,这些问题经过不断积累之后所产生的效应,使得能效呈现出逐年递减的态势,甚至还会诱发设备出现故障。通过针对实际运行数据展开分析,能够察觉到排烟温度出现升高以及凝汽器端差增大的情形,这些都是能效损失较为典型的征兆。

3 热力系统优化措施

3.1 运行参数优化

运行参数的优化属于提升热力系统能效的一种直接的方式,借助对蒸汽压力、温度以及流量等相关参数加以调整的操作,可促使系统趋向于设计工况的状态。比如说,适度地提高主蒸汽温度以及再热蒸汽温度,能够在一定程度上强化汽轮机内部的能量转换效率,不过在此过程中要确保锅炉受热面具备相应的承受能力。降低凝汽器背压是通过改善真空度的方式来达成的,而这又需要对循环水系统的运行方式以及抽气设备的运行方式进行优化。给水温度的把控同样极为关键,提高给水温度能够有效减少锅炉的燃料消耗,然而又要做到与回热系统抽汽量保持平衡的状态。在实际的操作环节当中,参数优化必须要依据实时监测所获取的数据,并且运用自动控制系统来开展细致的调整工作。与此针对运行人员展开的培训是绝对不能缺少的,以此来保障参

数设定能够契合安全方面以及经济方面的相关要求。

3.2 设备改造与升级

设备改造与升级乃是解决热力系统能效难题的关键办法,其中涵盖了汽轮机通流部分改造、锅炉受热面更换以及高效辅机的应用等方面。汽轮机通流部分改造借助采用新型叶片以及密封技术的方式,以此来削减内部出现的泄漏情况以及摩擦所导致的损失,进而促使内效率得以提升。锅炉受热面更换主要是为了消除积灰以及腐蚀所带来的影响,让传热效果得以强化,同时使排烟温度有所降低。高效辅机像变频泵还有节能风机的应用,能够在很大程度上降低厂用电率,推动整体系统的能效得到提升。对控制系统进行升级,引入智能算法,达成设备运行的最优调度,防止出现能量的浪费情况。设备改造在实际操作过程中需要全面考量投资成本以及效益这两方面的情况,一般会优先去挑选那些投资回收期比较短的项目。

3.3 系统集成优化

系统集成优化着重于热力系统各个组成部分的协调以及整合事宜,借助对系统布局加以改进以及对流程设计予以完善,达成能量的梯级利用目标,并且使损失尽可能地实现最小化。就好比对回热系统抽汽点位以及相关参数予以优化操作,如此一来便能够提升给水加热方面的效率,同时还能削减冷源方面的损失情况。引入低压省煤器或者空气预热器,把排烟余热回收起来,进而用于给水加热或者助燃空气的加热,以此方式来促使锅炉效率得以提升。系统集成还涵盖辅机系统的优化内容,比如说循环水泵和冷却塔要匹配着运行,这样才能确保凝汽器能够在最佳的真空状态下展开工作。除此之外,还需考量热电联产或者余热发电模式,把系统当中原本被废弃掉的热能转化成为有用的功,如此便能够进一步提升整体的能效水平。集成优化务必要从全局的视角去着手开展相关工作,凭借模拟软件来完成系统建模以及仿真操作,借此对不同方案所取得的效果进行评估分析。在实际的应用过程当中,一步步地去落实集成措施,这样既能减少对运行所造成的干扰影响,同时也能够积累起相应的经验,以便于后续的改进工作能够顺利开展。凭借着系统集成优化手段,热力系统能够达成能量流和价值流的协同统一状态,大幅度地降低运行成本以及对环境所产生的影响。这种方法需要多学科知识作为支撑保障,无疑属于未来能效提升方面极为重要的发展方向之一。

3.4 余热利用与节能技术应用

余热利用以及节能技术的应用属于热力系统优化当中的创新范畴,借助对系统里废弃热能加以回收并利用的方式,达成能量资源的最大限度利用效果。比如运用低温余热发电技术,把凝汽器排汽或者锅炉排烟里的热能转变成电能,以此来补充厂内用电方面的需求。热泵技术的应

用可以从低品位热源当中提取热量,用于给水加热或者是空间采暖,进而减少化石燃料的消耗量。节能技术还包含高效绝缘材料的使用,以此来减少管道以及设备的散热损失情况,另外还有智能照明以及空调系统的优化操作,目的是降低辅助能耗^[2]。在实际的项目当中,余热利用需要依据热源特性以及用户需求去定制相应的方案,从而保证技术的可行性以及经济性。与此节能技术的应用要结合机组运行的特点,防止给主系统带来负面的影响。依靠余热利用以及节能技术,不但可以提升系统的能效,而且能够减少温室气体的排放量,对可持续发展目标起到支持作用。所以,这项措施在热力系统优化当中有着十分广阔的前景,需要进一步加大研发以及推广的力度。

4 优化效果评估

4.1 能效提升效果

在实施了一系列优化举措之后,330MW 亚临界机组热力系统的能效得以明显提升,具体呈现出热效率有所提高以及煤耗率出现降低这两种情况。借助对运行参数加以优化的方式,当主蒸汽温度每提升 10℃的时候,热效率大概能够提升 0.5%,与此煤耗率也会下降,大约是每千瓦时下降 1~2g。就设备改造来讲,像汽轮机通流部分进行升级这样的操作,能够让内效率提升 2%~3%,相应地还能减少汽耗率以及运行成本。系统集成优化以及余热利用技术在应用过程中,进一步把系统当中原本废弃掉的热能给回收了起来,整体而言,能效提升的幅度能够达到 5%以上。从实际运行所得到的数据来看,在经过优化之后,机组的年发电量增加了,而且单位能耗也出现了下降的情况,这无疑证明了所采取的那些措施确实是有成效的。能效的提升一方面依靠技术方面的改进,另一方面还需要不断地去监测并做出相应的调整,从而能够应对运行条件发生的变化。从长远的角度来讲,优化的效果是能够维持系统处于稳定运行的状态,并且还能够延缓设备老化的进程。所以说,能效提升应该是优化工作最为关键的核心目标,对其展开的量化评估能够为后续的推广工作提供一定的依据。

4.2 经济性分析

经济性分析属于评估热力系统优化措施是否具备可行性的极为重要的一环,这其中涉及到投资成本方面的考量、运行费用的核算以及收益的具体计算。就设备改造与升级这一方面来讲,往往需要投入相当高的初始资金,在某些情况下,像汽轮机通流部分改造这样的工程,其所需费用甚至能够达到数百万元之多,不过凭借着能效得以提升所带来的煤耗节约成效,这类投资的回收周期通常会在 3~5 年这样一个区间范围之内^[3]。而运行参数优化所花费的成本相对而言是比较低的,它主要牵涉到控制系统方面的升级事宜以及相关人员的培训工作,其产生的收益一方

面体现于燃料费用有所减少,另一方面则表现在维护成本出现了下降的情况。至于系统集成优化以及余热利用相关的项目,或许需要投入数额较大的资金,然而在长期的运行过程当中,节能所带来的收益加上环保补贴,是能够在很大程度上对成本予以覆盖的。经济性分析在开展的过程中,还应当充分考虑到电价方面以及政策层面诸多因素的影响,比如说碳交易市场不断发展的态势,就有可能会使得优化项目的经济价值得以进一步提升。

4.3 环境效益

热力系统优化所呈现出的环境效益,重点在于污染物减排以及资源节约这两个层面。借助能效的提升来削减煤炭的消耗量,如此一来,二氧化硫、氮氧化物以及粉尘的排放量就会相应降低。比如说,当煤耗率每一千瓦时降低 1g 的时候,对应的二氧化碳排放量也会每一千瓦时减少大约 2.5g,这对于缓解气候变化而言,无疑是有着积极作用的。余热利用技术还能进一步压缩废弃物的排放,把热能回收起来加以利用,进而减轻对环境所造成的负担。环境效益得结合当地的环保法规来予以评估,优化措施或许能够助力机组去满足更为严格的排放标准。与此像水资源消耗这样的资源节约情况,通过系统集成优化达成循环利用的目的,这可是对可持续发展给予有力支撑的。在实际取得的效果当中,环境效益不但能够让局部的空气质量得到改善,而且还能让企业的社会形象得以提升。

4.4 实施建议

为了保证热力系统优化举措能够顺利推进,特给出如下几点建议:其一,要制定出详尽的实施方案,按照不同阶段来逐步推动优化项目的开展,在诸多措施当中优先挑选那些技术较为成熟且具备较高经济性的选项^[4]。其二,得强化对运行人员的培训工作,提升他们对于优化参数以及相关设备的操作技能,防止出现因为操作方面的失误而使得实际效果大打折扣的情况。其三,要构建起长期的监测机制,定期针对能效指标以及环境效益展开评估,依据评估情况及时对优化策略做出相应的调整。其四,要重视设备的维护保养以及更新换代事宜,防范设备老化问题再度出现,从而维持优化效果能够具有持续性。在实施的整个过程当中,还要进一步加强与供应商以及科研机构之间的合作交流,借此引入先进的技术成果以及管理方面的经验做法。要充分考量政策层面的支持情况以及资金方面的安排部署,可充分利用国家所设立的节能补贴或者绿色信贷等手段来促使实施成本得以降低。

5 结束语

本研究针对 330MW 亚临界机组汽轮机热力系统的能效展开分析,并对优化事宜加以探讨,从中揭示出该系统在运行期间所存在的关键问题以及相应的改进路径。优

化措施得以实施之后,既使得能效得到了提升,也促使经济性有所改善,而且还收获了颇为显著的环境效益。在未来的发展进程中,伴随技术不断取得进展以及相关政策给予有力支持,热力系统的优化将会把更多的关注点放在智能化方面以及集成化层面,进而为火电行业的绿色发展赋予全新的动力。

[参考文献]

[1]史鹏飞,康朝斌,张志强,等.某 330MW 亚临界直接空冷燃煤机组汽轮机综合节能改造效果分析[J].电力科技与环保,2023,39(1):8-15.

[2]喻敏,刘兴波,史宣平.300MW 亚临界汽轮机机组升级改造技术研究方案[J].东方汽轮机,2024(1):15-19.

[3]吴俊杰,王智刚,王广涛,等.630MW 机组凝汽器清洗系统的改进与评估[J].节能,2025,44(4):138-141.

[4]周永芳,蒋爱华,易汝杨.基于单耗分析的 600MW 火电机组回热系统仿真分析[J].资源信息与工程,2025,40(5):94-98.

作者简介:靳海峰(1989.10—),单位名称:江苏淮阴发电有限责任公司,毕业学校和专业:金陵科技学院,电气工程及其自动化专业。

330MW 中调供热机组再热器安全阀动作分析

周 磊

江苏淮阴发电有限公司, 江苏 淮安 223001

[摘要]随着“双碳”目标推进及能源结构调整,火电机组逐步向“灵活性调峰+热电联产”转型,供热改造后机组的运行工况更趋复杂,中调门等关键调节部件的工作负荷显著增加,相关故障风险也随之上升。文章针对某公司 330MW 中调供热机组因中调门阀座脱落引发的再热器安全阀动作事件,从事件经过、原因溯源、检查处理、防范措施等方面进行系统分析,为同类型供热机组的设备维护、运行优化提供全面参考,有效防范类似事故发生,保障机组安全经济运行与供热可靠性。

[关键词]再热器安全阀;中调门;阀座脱落

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18052

中图分类号: TK223

文献标识码: A

Action Analysis of Reheater Safety Valve of 330MW Middle Note Heating Unit

ZHOU Lei

Jiangsu Huaiyin Power Generation Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu, 223001, China

Abstract: With the promotion of the "dual carbon" goal and the adjustment of the energy structure, the thermal power units are gradually transforming to "flexible peak shaving + cogeneration". After the heat supply transformation, the operating conditions of the units become more complex, and the working load of key regulating components such as the middle regulating valve increases significantly, and the related failure risk also increases. This paper systematically analyzes the reheater safety valve action event caused by the falling off of the valve seat of the intermediate control valve of a 330MW middle note heat supply unit in a company from the aspects of the event process, cause traceability, inspection and treatment, and preventive measures, so as to provide a comprehensive reference for the equipment maintenance and operation optimization of the same type of heat supply units, effectively prevent similar accidents, and ensure the safe and economic operation of the unit and the reliability of heat supply.

Keywords: reheater safety valve; intermediate control valve; valve seat detachment

引言

在当前能源转型背景下,热电联产机组凭借“能源梯级利用、节能减排”的优势,成为保障民生供热与工业用汽的核心力量。为响应国家能源局关于火电机组灵活性改造的要求,提升机组调峰能力与供热适应性,众多电厂对原有机组进行了供热系统优化改造。中调门作为供热机组抽汽压力调节的关键部件,其工作状态直接影响抽汽参数稳定性与再热蒸汽系统压力控制。

再热器作为火电机组热力循环的重要组成部分,其核心功能是将汽轮机高压缸排出的中压低温蒸汽重新加热至高温,不仅能提高机组循环热效率(通常可提升效率3%~5%),还能降低汽轮机末级叶片的湿度,减少叶片侵蚀损耗。再热器安全阀是再热蒸汽系统的最后一道安全屏障,当系统压力超过额定整定值(通常为设计压力的1.05~1.1倍)时,需在0.5s内快速开启泄压,防止再热器因超压发生爆破等恶性事故。据行业统计数据显示,再热蒸汽系统故障中,因调节部件失效导致的安全阀误动作占比达35%以上,此类事件不仅会造成机组非计划降负荷,还可能导致供热中断,给电厂与热用户带来重大经济损失。因此,深入分析中调门故障引发的安全阀动作事件,对提升供热机组运行安全性与可靠性具有重要的工程实

践意义。

1 机组改造背景与技术参数

江苏淮阴电厂 #4 汽轮机组为哈尔滨汽轮机厂生产的亚临界、一次中间再热、单轴、双缸、双排汽、抽汽冷凝式机组,机组型号为 73E-3,额定功率 330MW,额定主蒸汽压力 16.7MPa,额定主蒸汽温度 538℃,再热蒸汽额定温度 538℃。机组原设计抽汽型式为中压缸回转隔板工业抽汽,通过调整中压第 5 级回转隔板开度,维持工业抽汽压力在 1.5MPa,单台机组最大工业抽汽能力为 300t/h。

近年来,随着电厂周边的快速发展,新增多家要求供汽压力为 2.0MPa 的工业用户,原抽汽系统已无法满足供热需求。为解决这一矛盾,公司于 2021 年对 #4 机组供热系统进行改造:在热再管道上开孔引出分支管道,依次加装安全阀、逆止阀、抽汽快调节阀、电动截止阀等设备,形成独立的高压抽汽支路。

同时对中压调节门进行结构优化,更换调节阀芯与阀座,增加执行机构灵敏度,使其具备在部分负荷下通过关小中调门提升抽汽压力的功能,确保抽汽参数满足 2.0MPa 用户需求。改造后机组抽汽能力提升至 350t/h,供热负荷适应性显著增强,但中调门因需频繁参与抽汽

压力调节，其工作强度与故障风险也相应增加。

2 事件经过

2.1 运行背景与初始状态

2024年6月4日，江苏淮阴电厂#4机组参与电网深度调峰任务，按调度指令执行30%深度调峰（负荷99MW）至9:35结束。随后机组开始升负荷，10:12负荷升至165MW并投入AGC（自动发电控制）模式，AGC设定负荷响应速率为1.5MW/min，压力偏差允许范围±0.1MPa，机组负荷稳定在165MW左右运行。此时机组主要运行参数如下：高压缸排气压力2.52MPa，再热蒸汽温度535℃，工业抽汽压力2.0MPa，抽汽流量280t/h；阀位指令73.2%，#3高调门开度21.5%，#4高调门关闭（因机组负荷较低，单侧高调门满足通流需求），#1中调门开度22.7%，#2中调门开度22.3%，各调门反馈与指令偏差均在±0.5%范围内，符合运行要求。

2.2 事件发展过程

10:41:16时，机组负荷小幅升至167MW，高压缸排气压力微升至2.54MPa，阀位指令调整至73.45%，#3高调门开度增至21.6%，#1、#2中调门开度保持不变。10:41:22时，燃烧盘值盘人员发现机组负荷突然降至162MW，高压缸排气压力快速上升至2.57MPa，阀位指令自动上升至74%，#3高调门开度同步增至22.4%，但#1、#2中调门开度仍维持在22.8%和22.28%。值盘人员立即检查燃烧系统，发现给煤量、风量、炉膛负压等参数均无异常，高调门、中调门反馈信号正常，遂采取燃烧调整措施（适当增加给煤量5t/h，调整二次风配比），但负荷与高压缸排气压力未出现明显恢复。（如图1所示）



图1 调门动作曲线

10:42:10时，汽水盘值盘人员在监控汽轮机“主控”画面时，发现“抽汽控制”弹窗中“高排压力高”报警信号灯亮（报警阈值3.0MPa），此时高压缸排气压力已升至3.2MPa。值盘人员判断中调门开度不足导致高排压力升高，遂手动将两侧中调门从22%缓慢开大至24%，但报警信号未消失，且高压缸排气压力持续上升。约30s后（10:42:48），再热器安全阀因超压动作，现场听到明显的

泄压声，此时DCS系统记录关键参数如下：机组实际负荷156.25MW，高压缸排汽压力3.93MPa（达到安全阀整定值），阀位输出89.9%，#3高调门油动机位置99.0%（接近全开），#4高调门油动机位置20.816%，#1中调门油动机位置24.907%，#2中调门油动机位置24.167%（如图2所示）。

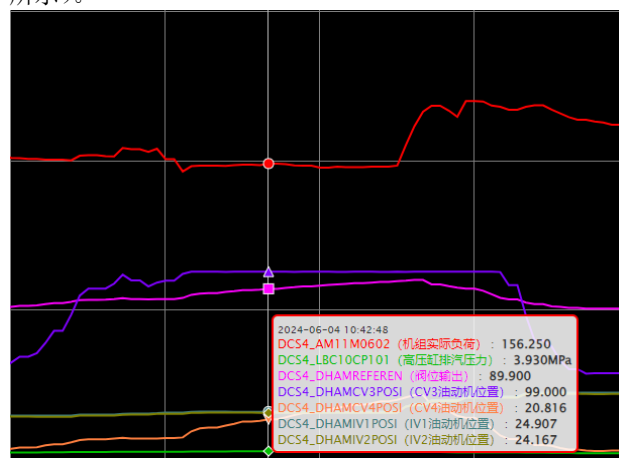


图2 调门动作曲线

值盘人员确认安全阀动作后，立即持续开大中调门以降低再热蒸汽压力，10:43:26时两侧中调门开度从24%增至30%，高压缸排气压力开始快速下降，10:44:10时降至2.5MPa（正常范围），再热器安全阀成功回座，机组负荷逐步恢复至165MW，各项参数趋于稳定。

2.3 事件影响

此次事件导致机组降负荷10.75MW，持续时间约3min，未造成供热中断。事件未造成人员伤亡与设备重大损坏，但暴露出机组改造后中调门运行维护存在的薄弱环节，若未及时处理，可能导致再热器超压爆破等严重事故。

3 原因分析

3.1 原因查找

负荷稳定后，技术人员进行分析排查时发现回到原工况时调节级、一抽、二抽压力均较安全阀动作前增大不少，同负荷下中调门开度较安全阀动作前增大约10%左右方能使上述压力回到安全阀动作前数值。经现场试验发现：#1中调门在开启时各项参数均能正常反映，在关闭时发现在20%开度时即无法再向下关闭；后将#1中调门开足后再次关闭时发现在32%开度时又无法再向下关闭。结合异常发生时情况，初步判断为：#4机#1中调门阀座脱落导致该侧通流面积减少，造成负荷下降；因实际负荷与给定负荷存在偏差，DCS阀位指令增加后高调门开大，使得再热器压力上升。值盘人员发现“高排压力高”报警后，未能引起足够重视，只是选择将中调门开度由22%开大至24%，且在开中调门过程中“高排压力高”报警一直存在，未能持续开大中调门直至“高排压力高”报警消失，最终造成安全阀动作。

3.2 保证机组安全运行的措施

因对机组安全性和高负荷工况没有较大影响,为保证机组安全运行,制定下列措施。

(1) 将#1 中调门打“维修开关”设定在 32%开度,正常情况下不做调整。

(2) 运行中加强对再热蒸汽压力及中调供热流量的监视,防止运行中#1 中调门阀座突然回座。3、机组接带高负荷时根据需要可将#1 中调门开大。在负荷下降关小#1 中调门时应注意#1 中调门的指令与实际阀位。如发现指令下降但阀位反馈不动时,这时#1 中调门阀座可能又发生位移,应将阀位指令设定与反馈值一致,防止油动机过载。

3.3 检查处理

机组停运后对#1 中调门进行解体检查,发现与分析一致,确实为阀座脱落。如图 3 所示。



图 3 阀座内部图

从现场情况看阀座脱落原因为:安装时过盈量不足,同时焊接时未焊透,因供热时中调门频繁参与调节,在蒸汽的长期冲刷和振动载荷下造成阀座脱落。后#1 中调门阀体现场找正加工,阀座返厂堆焊加工过盈配合 13 丝,返厂后回装。机组启动后运行正常。

4 防范措施

(1) 阀座与阀壳的配合公差严格控制在规定范围内,

过盈量按设计要求执行,避免因配合过松导致振动脱落。

(2) 采用整体锻造阀座替代焊接结构,消除焊接缺陷风险。

(3) 加强中调门运行参数监控,优化负荷调节方式,减少中调门的启闭次数,降低阀芯与阀座的冲击载荷。

5 结论

本文通过对 330MW 中调供热机组再热器安全阀动作事件的深入分析,明确了中调门阀座脱落是导致事故的直接原因,安装工艺缺陷、运行工况变化、操作监控不到位是重要诱因。通过采取阀座结构优化、制造安装质量管控、运行维护升级等一系列防范措施,有效解决了中调门运行隐患,机组恢复正常运行。

此次事件为同类型供热机组提供了重要借鉴:在机组灵活性改造过程中,不仅要关注设备功能满足需求,更要重视结构设计、制造工艺与运行维护的匹配性;针对频繁调节的关键部件,需采用更可靠的结构形式与材质,强化全生命周期管理;同时要完善运行监控体系与应急处置流程,提升故障预警与处置能力。未来,随着供热机组运行工况的日益复杂,需持续开展设备故障机理研究与技术创新,不断提升机组安全稳定运行水平,为热电联产行业的高质量发展提供保障。

【参考文献】

- [1]吴季兰.300W 火力发电机组丛书—汽轮机设备及系统.北京:中国电力出版社,1998.
 - [2]林万超.火力发电厂热力系统节能分析.北京:水利电力出版社,1987.
 - [3]赵宇,李军.再热蒸汽系统压力波动与安全阀动作关联性分析[J].热力发电,2021,50(3):123-128.
- 作者简介:周磊(1980—),男,江苏淮安人,高级工程师,淮阴发电有限公司发电部专工,从事火电厂汽机运行管理工作。

水利水电工程跨汛期施工的进度动态管控与风险应对机制研究

章燕子

阿拉尔市塔里木公路养护有限责任公司, 新疆 阿拉尔 843300

[摘要]水利水电工程属于国家基础设施建设里极为关键的部分,在推动经济向前发展以及确保民众生活方面,其发挥出的作用是无可取代的。特别是在水资源分布极不均匀的西部地区,工程建设时常得跨越汛期来开展施工,如此一来可应对季节性水流出现的变化以及气候方面的诸多挑战。跨汛期施工的时候,不但会碰到复杂多变的水文气象条件方面的波动情况,而且还会面临施工进度把控以及资源调配等诸多方面的重重压力。要是这些问题处理得不够妥当,那很容易就会致使工期出现延误状况、成本超出预算额度,甚至还会引发安全事故。所以说,针对进度动态管控以及风险应对机制展开相关研究,有着十分紧迫的实际意义。

[关键词]水利水电工程;跨汛期施工;进度动态管控;信息化水平

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18071

中图分类号: TV5

文献标识码: A

Research on Progress Dynamic Control and Risk Response Mechanism of Cross Flood Season Construction in Water Conservancy and Hydropower Engineering

ZHANG Yanzi

Alaer Tarim Highway Maintenance Co., Ltd., Alaer, Xinjiang, 843300, China

Abstract: Water conservancy and hydropower engineering is a crucial part of national infrastructure construction, playing an irreplaceable role in promoting economic development and ensuring people's livelihoods. Especially in the western region where water resources are extremely unevenly distributed, engineering construction often needs to cross the flood season to cope with seasonal changes in water flow and various climate challenges. During cross flood season construction, not only will there be complex and changing fluctuations in hydrological and meteorological conditions, but there will also be heavy pressures in controlling construction progress and resource allocation. If these issues are not handled properly, it can easily lead to delays in the project schedule, cost overruns, and even safety accidents. Therefore, conducting relevant research on dynamic progress control and risk response mechanisms has urgent practical significance.

Keywords: water conservancy and hydropower engineering; construction during cross flood season; dynamic progress control; informationization level

引言

水利工程作为国家基础设施建设的核心领域,覆盖范围广,涉及水库、大型灌溉系统、河道整治以及水力发电项目等方面。这类工程承载着经济发展和民生保障的重要任务,但是由于自然条件的复杂性,面临着诸多风险与挑战。尤其是在汛期这一阶段,水利工程的施工安全显得尤为严峻,强降雨、持续高水位以及由此引发的洪水、山体滑坡和泥石流等自然灾害,不仅严重影响施工进度,还威胁施工人员的生命安全。

1 跨汛期施工的特点与挑战

1.1 水文气象条件的不确定性

跨汛期施工所面临的最关键挑战,主要源自水文气象条件呈现出极为显著的多变特性以及难以捉摸的预测难度。在西部地区当中,特别是在那些把冰川融水与暴雨当作主要水源的区域,汛期水流量会骤然出现增减情况,而且往往超出人们预先设定的范围,这无疑给施工进度造成了相当大的干扰。举个例子来讲,依据中国气象局在 2024

年所发布的预测报告来看,该地区的年降水量波动幅度存在一种可能性,那就是可能会超出历史平均值的 20% 以上。如此这般强烈的不确定性,一方面会对施工设备的布置安排以及作业期间的安全状况产生影响,另一方面还有可能引发诸如基坑被淹没或者施工材料遭受损失这类直接的风险情况。与此温度方面所发生的各种变化,再加上像短时强降雨或者融雪洪水这样的极端天气事件,更是使得施工环境的复杂程度进一步得以加剧,这就迫使工程团队务必要去采用具备高精度的监测工具,并且要制定出那种适应能力很强的设计预案。

1.2 施工进度与资源调配的复杂性

跨汛期项目当中,施工进度以及资源调配所呈现出的复杂性显得格外明显。汛期这个时间段本身就很短,并且还存在着诸多不可控因素。在此情况下,工程要想避免出现资源浪费以及施工瓶颈等问题,就必须极为高效地去协调人力、机械还有材料等方面的流动情况。就西部地区而言,其基础设施相对来说是比较薄弱的,运输线路也很容

易受到洪水的影响,进而常常会导致资源供应出现中断或者延迟的现象。比如说像挖掘机、混凝土泵车这类大型机械设备,就需要在有限的时间内及时调动到相应的位置,然而天气突然发生变化,可能会迫使施工方临时对原本的部署计划做出调整,如此一来便会增加额外的成本支出。^[1]

依照中国水利水电科学研究院于 2025 年所拟定的研究草案而言,由于资源调配效率不高,致使项目成本超支率平均达到了 18%这样的程度。这一数据清晰地凸显出对调度算法予以优化的重要必要性。多个工种协同展开作业并且存在交叉施工的情形,更是使得进度管理方面的难度进一步增加。毕竟每一个环节要是出现延迟,都会引发连锁反应,进而对整体工期产生影响。所以施工团队有必要运用动态资源分配模型,同时结合实时的进度反馈信息,持续不断地对计划做出修正,以此来确保资源能够实现最大程度的利用。而要达成这一点,一方面需要有先进的管理工具作为支撑,另一方面也要求团队成员自身具备极高的灵活性以及应对突发状况的能力。

2 进度动态管控机制构建

2.1 进度监测与数据采集体系

进度监测与数据采集体系乃是达成动态管控的根基所在,其要依靠多渠道传感器网络以及自动化设备来实时搜集施工现场的关键参数,像水位、流速、土壤湿度还有设备状态等等这些。在西部地区的工程项目当中,鉴于环境状况恶劣且存在通信方面的限制,体系在设计的时候务必要把可靠性与实时性都兼顾到,运用物联网技术并借助卫星遥感来辅助地面监测站开展工作,从而保证数据能够实现全面覆盖并且能以高速完成传输。依据水利部在 2023 年所制定的技术指南来看,建议采用那种至少每隔十分钟就要更新一次的高频率数据流来为决策给予支持,这样的持续监测一方面能够将细微的变化捕捉下来,另一方面还能够为预测模型提供颇为丰富的输入内容,其数据来源包含了中国自然资源部网站上所公开的地理信息数据。

2.2 施工进度预测与模拟方法

施工进度预测与模拟方法会运用历史数据以及机器学习算法来预测未来趋势和潜在瓶颈,其中包含时间序列分析、蒙特卡洛模拟以及人工智能模型等,这些方法可应对水文气象与施工变量间的非线性关系。在实际应用里,工程团队会把实时监测数据输入至预测系统当中,而后系统会输出多种情景之下的进度预估,以此帮助识别出最优路径,如依据中国工程院 2024 年学术论文所引述的内容,有一种结合长短期记忆网络 LSTM 的模型在试点项目中使得预测误差降低到了 5%以下,这明显提高了计划的可靠性。模拟方法还能够开展虚拟演练,去测试不同资源调配方案给整体工期带来的影响,进而降低实地试错方面的

成本。^[2]西部地区项目的特殊之处在于一定要考虑极端事件出现的概率,所以模型会集成气候预测数据以及高分辨率地形图,以此增强其鲁棒性。总体而言,这些方法促使施工管理从被动反应转变为更为灵活且具备适应性的主动规划,进而支持更灵活多变的进度调整。

2.3 动态调整与响应策略

动态调整以及响应方面的策略,是依据预测得出的结果以及实时获取的反馈情况,对施工计划予以及时修正,以此来应对可能出现的突发变化。该策略最为关键之处在于设置弹性缓冲区域以及多级决策机制,这能够使得现场的管理人员在所授权的范围之内可以迅速做出调整,无需等到高层给予批准。比如说,当监测系统检测到洪水并发出预警之时,该策略有可能会自动启动设备的转移操作或者使作业暂停下来,以此将干扰降到最低程度。参照国家能源局在 2025 年所制定的规划文件来看,这样的一种策略在近些年开展的项目当中,已经让应急响应的时间减少了百分之二十,整体的效率也得到了提升。响应策略还涵盖了资源的重新分配以及工期压缩等相关技术,像是通过增加班次或者采用预制构件的方式来加快工程进度。在西部地区实际推行的过程中,该策略着重于和当地实际情况相结合,举例来讲,会利用干旱期间的间歇期来加紧开展施工工作,并且在汛期处于高峰期的时候把关注点放在防护措施方面。动态调整的整个过程是借助定期召开的会议以及数字化的相关工具来进行协调的,以此保证所有的利益相关者都能够保持步调一致,进而达成平滑过渡以及持续推动工程进度的目的。

2.4 信息化管理平台的应用

信息化管理平台的应用实现了将监测、预测还有调整等功能整合起来的目的,其可给出一个集中化的界面,以便对施工进度予以全方位的管控。此平台通常是以云计算以及大数据技术当作根基的,它能让相关人员实现远程访问以及协同开展工作,并且还能够在支撑实时数据的可视化展示以及警报的推送。在西部地区的工程项目里面,平台在设计之时会特别留意离线功能以及针对低带宽所做的优化,借此来克服通信方面存在的各类挑战。

就像能够引用中国水利网站的原文内容一样,在 2023 年所推出的“智慧水利”平台已经顺利接入了多个不一样的项目,让进度跟踪的精准度提升了 25%,决策的速度也提高了 30%。此平台的功能除了像上述所说的那些之外,还包含了文档管理、沟通日志以及风险仪表盘等诸多方面,可使团队较为完整地知晓项目当下的实际情况,并且能迅速地去分享相关信息。在应用期间,还加入了人工智能助手,它能够自动生成各类报告以及相关的建议,进而减轻人工操作方面的负担。借助这样的一种途径,信息化平台一方面提高了管控工作的效率,另一方面还推动了知识的共享以及持续不断地开展学习活动,最终为未

来的项目积累下宝贵的实践经验,形成一个完整的闭环管理系统,促使工程管理向着现代化以及科学化的方向不断向前发展。

3 风险识别与应对机制

3.1 汛期施工风险分类与评估

汛期施工风险分类与评估属于风险管理的初始步骤,其把潜在威胁划分成自然灾害、技术故障、人为因素以及管理漏洞等诸多类别,以此达成系统化的处理效果。在西部地区的项目当中,像洪水、滑坡还有泥石流这类自然灾害风险处于主导位置,原因是它们的发生频率以及所造成的影响力都相对较高,在评估的过程中运用了定量和定性相结合的方式,比如概率风险分析 PRA 以及故障树分析 FTA 等,通过这些方法来对每个风险发生的可能性及其后果加以量化。依据中国应急管理部于 2024 年所统计的数据来看,在汛期工程里面,与洪水相关的事故所占的比重超过了总影响的 40%,这无疑突出了重点需要进行防控的领域。评估时还会考量连锁效应,也就是一个风险事件到底是怎样去触发其他方面的问题的,进而制定出具有综合性的应对预案,其数据来源涵盖了学术期刊以及政府报告,如此一来便能够保证评估是建立在最新的科学成果之上的。^[4]评估得出的结果主要用于对资源分配进行优先排序,着重关注那些 high-impact 但概率较低的事件,而不是在各个环节平均地去发力,这样做无疑提高了风险管理的针对性以及效率。

3.2 风险监测与预警体系

风险监测预警体系借助实时数据流和预先设定的阈值,能够提前检测到潜在风险并发出警报,从而推动及时采取干预举措。在设计此体系时,涉及到了传感器网络、数据分析模块以及通信协议等层面,以此确保警报有准确性与及时性。于西部地区实际运用期间,该体系将气象、水文、地质监测等方面的数据予以集成,运用机器学习算法来识别异常模式。例如,当河流水位上升速度超出特定标准时,系统会自动启动预警,接着告知相关团队采取相应行动。

依据中国防汛抗旱总指挥部网站 2023 年所引用的原文内容来分析,新部署的预警系统在试点区域成功使得灾害损失降低了 15%,这无疑充分证实了它的实际效果。该体系还设有涵盖多级警报的机制,能够从低级别的提醒一直延伸至紧急的疏散指令,进而契合不同级别风险状况的实际需求。预警信息会借助多种不同的传播渠道,比如手机 APP、广播以及现场的显示屏等来进行广泛传播,以此保障所有相关人员均能接收到与之相关的各类信息。如此这般主动出击的做法,切实有效地提升了施工过程中所具备的安全性以及韧性程度。

3.3 分级响应与应急管控措施

分级响应以及应急管控措施依据风险级别的不同来

制定相应的行动方案,以此保证资源能够得以高效利用,同时实现对问题的快速遏制,这些措施涵盖预防、准备、响应以及恢复这四个阶段,每个阶段都明确了具体的责任以及流程,比如说针对低级风险,响应或许仅仅需要提升监测的频率;然而面对高级风险像即将来临的洪水时,则要启动全面的应急计划,其中包含人员疏散以及设备保护等内容,在西部地区的工程项目当中,措施着重强调与当地社区以及政府展开协作,毕竟外部的支持是极为关键的,依照国家发改委在 2025 年的政策草案来看,分级响应机制在近些年来的项目里平均把应急时间缩短了 20%,提高了整体的韧性,管控措施还包含了培训以及演练,定期去模拟各类场景,以此提升团队的应变能力,并且要确保所有成员都清楚自己的职责,措施实施之后会通过事后的分析来吸取经验教训,不断地对方案加以优化,进而形成一个持续改进的循环,以此降低未来风险发生的概率以及产生的影响。

3.4 风险防控的后评价与持续改进

风险防控的后评价以及持续改进机制会在项目结束后展开全面的回顾工作,对其中的成功经验以及失败教训加以总结,以此来促使未来相关实践得以提升。其评价的过程包含了数据的收集、针对利益相关者所开展的访谈活动以及对绩效指标进行细致分析等内容。通过这些举措来评估风险应对措施所具有的有效程度以及效率情况。就西部地区的项目而言,后评价显得尤为重要,原因在于那里的独特环境条件极有可能会滋生出未预见的挑战,就好比依据中国水利学会于 2024 年召开的会议摘要内容来看,后评价助力识别出了预警系统存在延迟方面的诸多问题,进而促使技术得以升级并且流程也获得了优化。

改进机制会依据评价得出的结果去更新风险数据库以及应对预案,以此保证知识能够顺利传承并让自身的适应性得以进一步增强。持续改进还涉及到技术创新以及管理方面的调整事宜,比如引入全新的工具或者对标准操作程序做出修订等。凭借定期实施的复审以及建立起来的反馈循环机制,工程团队可以逐步地将风险水平降下来,从而提升整个项目的成功率。这无疑彰显了作者所倡导的那种学习型且具备伦理负责特性的管理理念,着重强调的是长期效益而非短期收益。

4 结束语

本论文全面且细致地对水利水电工程跨汛期施工的进度动态管控以及风险应对机制展开了系统研究,综合考虑西部地区实际状况,成功构建起一套涵盖集成监测、预测、调整以及信息化平台的完整管理体系,经研究发现,水文气象方面存在的不确定性以及资源调配所具有的复杂性,构成了主要的挑战所在,不过借助动态方法以及风险分级响应举措,能够切实有效地实现对相关问题的缓解作用。该机制一经实施,对于工期把控以及安全水准的提

升所取得的成效是十分显著的。然而研究也发现了些许局限性状况,比如对技术的依赖程度相当高,这极有可能催生出新的风险。后续相关工作需要将重点聚焦在增强系统韧性以及强化人员培训等等方面。

[参考文献]

- [1]张浩杰.水利工程防洪安全风险分析及应对策略[J].水上安全,2025(7):139-141.
- [2]姚璟,杜明慧.雷达测流系统在水库出库站水文监测中的应用[Z].水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心).第十五届防汛抗旱信息化技术交流会论文集.黄河水利委员会河南水文水资源局,2025:430-436.
- [3]桑田.推进水利项目建设管理标准化的路径与措施[J].大众标准化,2025(12):71-73.

作者简介:章燕子(1989.3—),毕业院校:塔里木大学,所学专业:土木工程,当前就职单位名称:阿拉尔市塔里木公路养护有限责任公司,职称级别:工程师(水利水电)。

振温多维感知融合 AI 算法的水电站主变压器智能诊断与预警系统构建

边怡心

山东沂蒙抽水蓄能有限公司, 山东 临沂 276000

[摘要]水电站主变压器设备有状态监测与诊断预警需求,为此提出一种基于振动、温度等多维感知数据融合的人工智能诊断算法,该算法利用深度学习模型处理多源异构数据以提取特征并融合,从而实现主变压器核心部件的异常检测与故障诊断,在此基础上构建一套完整且包含数据采集、传输、存储、分析与可视化展示等功能模块的智能诊断与预警系统,其采用分布式架构,能支持边缘计算与云端协同,经在某大型水电站实际应用验证,此系统可有效识别主变压器潜在故障并提前预警,有力支撑设备预防性维护,研究表明,多维感知融合 AI 算法诊断准确率比传统方法高且泛化能力强,能给水电站主变压器智能化运维管理带来新技术途径。

[关键词]水电站;主变压器;多维感知;数据融合;人工智能;故障诊断

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18065

中图分类号: TM411

文献标识码: A

Construction of an Intelligent Diagnosis and Early Warning System for Hydroelectric Power Station Main Transformers Based on Multidimensional Sensing of Vibration and Temperature Fusion AI Algorithm

BIAN Yixin

Shandong Yimeng Pumped Storage Co., Ltd., Linyi, Shandong, 276000, China

Abstract: The main transformer equipment of hydropower stations requires state monitoring and diagnostic warning. Therefore, an artificial intelligence diagnostic algorithm based on multidimensional perception data fusion such as vibration and temperature is proposed. This algorithm utilizes deep learning models to process multi-source heterogeneous data to extract features and fuse them, thereby achieving anomaly detection and fault diagnosis of the core components of the main transformer. On this basis, build a complete intelligent diagnosis and warning system that includes functional modules such as data collection, transmission, storage, analysis, and visualization display. It adopts a distributed architecture, which can support edge computing and cloud collaboration, and has been verified by the actual application in a large hydropower station. This system can effectively identify potential faults in the main transformer and provide early warning, effectively supporting preventive maintenance of equipment. Research has shown that the multi-dimensional perception fusion AI algorithm has higher diagnostic accuracy and stronger generalization ability than traditional methods, which can bring new technological approaches to the intelligent operation and maintenance management of main transformers in hydropower stations.

Keywords: hydroelectric power station; main transformer; multidimensional perception; data fusion; artificial intelligence; fault diagnosis

引言

清洁能源生产的核心基础设施是水电站在全球能源转型中起着极为关键的作用。国际水电协会(IHA)2023年度报告显示,全球水电装机容量超1300GW,在可再生能源总装机容量里占比将近16%。水电站能量传输和电压转换的关键设备为主变压器,其安全运行直接影响电站安全性和发电效率。中国电力企业联合会统计过,2022年中国水电站主变压器故障引起的非计划停机事件在总停机事件里占比约12.7%,还造成了超20亿元人民币的经济损失。传统上变压器监测方法主要是定期人工巡检加上单一参数监测,这很难及时发现潜在故障且诊断精度也不高。

近年来,物联网、大数据和人工智能技术快速发展使

智能化诊断预警技术成为主变压器状态监测的新方法与技术路径,2020到2023年国家能源局接连发布好多项有关推进电力设备智能化监测的指导意见且明确要强化关键电力设备的实时监测和智能诊断,不过目前的研究在数据采集全面性、异构数据融合有效性、诊断算法准确性上还存在难题,并且水电站主变压器这种复杂电力设备尤其如此,因为单靠单一传感信息无法全面反映它的健康状况,而多维感知数据协同分析能给出更全面、更精准的设备状态评估。

一种基于振动、温度等多维感知数据融合的人工智能诊断算法被本研究提出并构建起完整的主变压器智能诊断与预警系统。该系统能采集变压器多个关键部位的振动、温度、噪声、负荷等多维参数,凭借深度学习技术实现特

征提取与数据融合以建立设备状态评估模型,进而达成潜在故障的早期检测与精准诊断。此研究不但填补了水电站主变压器多维数据融合诊断领域的技术空白,还给电力设备智能化运维管理提供新方案且在提高水电站安全运行水平、削减维护成本以及延长设备寿命方面意义显著。

1 振温多维感知融合 AI 算法设计

1.1 多维感知数据采集与预处理

本研究根据水电站主变压器的特性构建起一个包含振动、温度、声音、电气量和油色谱等多维感知参数的监测网络,其中主变压器箱体、冷却装置和引线位置安装的高精度加速度传感器用于采集振动数据且采样频率设成 10kHz 以便有效捕获绕组松动、铁芯变形等机械故障特征。温度数据靠红外热像仪和光纤温度传感器相结合的方式监测变压器各部位温度分布与热点变化且精度达 0.1℃、采样间隔为 5min,并且特种传感器还采集了油中溶解气体浓度、负载电流、电压波形等参数从而形成了全方位的感知体系^[1]。

原始采集的数据有噪声干扰、异常值以及不同尺度等状况,得进行系统性的预处理,振动信号靠小波包分解和自适应滤波相结合的法子消除环境振动干扰,温度数据做时间序列异常检测和平滑处理,油色谱数据用标准化和特征缩放方法让其尺度跟其他参数一致,处理完的所有数据依照统一的时间标签同步对齐,形成结构化的多维数据矩阵,数据预处理流程有效提升后续融合算法的性能,预处理后信噪比平均提高 12.6dB,异常检测准确率达 94.8%。

1.2 深度学习模型构建

多维感知数据有其特点,本研究针对这些特点设计出一种层次化的深度学习模型架构,该架构含特征提取网络、时序学习网络、融合决策网络这三个关键部分。由于振动数据、温度数据、油色谱数据类型不同,所以特征提取网络给它们各自设计了专用的网络结构,其中振动数据靠一维卷积神经网络(1D-CNN)提取局部时频特征,温度数据用改进的 ResNet 结构来捕捉空间热分布模式,油色谱数据借助多层感知机(MLP)完成特征映射,并且每个子网络最后一层输出都设计成相同维度(256 维)的特征向量以便于后续融合处理。

双向长短期记忆网络(Bi-LSTM)结构被时序学习网络所采用且其能够有效地捕捉设备状态演变中的长期依赖关系,模型配有 3 层 Bi-LSTM 单元且每层有 128 个隐藏节点,同时引入注意力机制以自适应地关注关键时间点的状态变化。融合决策网络利用自注意力模块对各个维度的特征进行加权融合并经由全连接层映射到故障类型空间,模型训练方面采用 Adam 优化器且初始学习率被设成 0.001 并引入学习率衰减策略,损失函数将交叉熵损失和焦点损失相结合从而有效解决故障样本不平衡的问题。

$$L = -\alpha(1 - p_i)^{\gamma} \log(p_i)$$

类平衡因子用 α 表示,调节因子 γ 被设成 2,目标类的预测概率用 p_i 来表述,模型拿 50 个历史故障案例还有 1000h 正常运行的数据做训练并用 5 折交叉验证评估性能,最后故障分类准确率达 95.3%,较单一模态方法提高了 14.7 个百分点。

1.3 多模态数据融合策略

本算法核心环节在于有效融合多维感知数据,为此本研究运用分层式融合策略达成不同层次下信息互补与协同增强的目标。在数据层面,将采集的不同物理量进行时间同步和空间对齐以构建多维特征张量,并且在特征层面设计出能自适应学习不同感知数据间相关性权重的跨模态注意力机制,从而凸显对当下状态判断最具价值的特征组合。到了决策层面,采用基于 Dempster-Shafer 证据理论的软融合方法综合考量各子模型的置信度和历史准确率得出最终诊断结果。

不同感知数据在不同故障类型下的判别能力差异被本融合策略重点关注,就像局部过热故障中温度数据和油色谱数据敏感性更高而机械松动故障里振动数据能提供更直接证据一样,这种“知识驱动”的自适应融合一旦实现,系统就能依据具体场景自动调整各维度数据权重,实验显示和简单早期融合或者晚期融合比起来,本研究的分层融合策略在故障早期识别率方面提升了 18.3%且误报率下降了 12.7%,尤其是在环境干扰复杂以及单一传感器数据质量不好的时候其鲁棒性更强。

1.4 算法性能评估与优化

多项指标综合分析被用于振温多维感知融合 AI 算法的性能评估,像准确率、精确率、召回率、F1 分数以及 ROC 曲线等都在其中^[2]。大型水电站实际场景测试结果显示,主变压器核心部件故障诊断时这个算法综合准确率达 94.8%,比传统单一数据源方法高了 15.3%。绕组热点、铁芯异常振动这些复杂故障模式下诊断精确率提升很明显,从原先的 78.2%提高到了 91.7%。算法实时性测试表明,在边缘计算设备上单次诊断平均时延是 187ms,符合水电站主变压器状态监测的实时性要求。

实际运行发现问题后,算法被优化了三个方面,其一采用自适应学习率策略以提高模型在数据分布有变环境中的稳定性,其二引入知识蒸馏技术把复杂模型变成轻量级版本从而降低计算资源需求并让边缘端推理速度提升 42%,其三设计基于置信度的分级诊断机制既保证高准确率又降低误报率使其从 4.3%降到 1.2%,经这三方面优化后的算法在水电行业复杂工业环境中有着不错的应用价值。

2 水电站主变压器智能诊断系统

2.1 系统架构设计

本研究依据振温多维感知融合 AI 算法构建起一套完备的水电站主变压器智能诊断系统,其采用“边缘-

云端”协同架构并涵盖数据采集层、边缘处理层、云端分析层以及应用服务层这四大主要功能层。数据采集层由带有多种传感器（例如振动、温度、声音、电气量、油色谱类传感器）的分布式传感网络组成，借助工业物联网协议（像 OPCUA、MQTT）达成数据实时传输。边缘处理层设置于接近主变压器的边缘计算单元，承担数据预处理、特征提取以及初步故障识别任务，利用轻量化深度学习模型达到毫秒级响应。云端分析层坐落于水电站中央控制室或者远程数据中心，部署完整的融合 AI 算法与大规模历史数据库以施行深度分析、模型训练和优化。

2.2 故障特征提取与分类

水电站主变压器故障模式繁多复杂，本系统运用多层次特征提取与分类策略，针对各类故障构建专门特征库与判别模型^[3]。时域特征方面，振动信号的均值、标准差、峭度和偏度等统计特征被提取出来以有效体现设备整体运行状况，而频域特征借助快速傅里叶变换（FFT）、包络分析提取振动能量分布和特征频率来识别轴承故障、铁芯松动这类机械问题，并且时频特征用小波包变换、经验模态分解（EMD）方法捕获非平稳信号里的瞬态异常，温度数据方面系统构建热分布特征图和温差梯度指标可精准定位热点位置和异常温升。

主变压器有九种典型故障，故障分类模型为其设计出二级分类结构，一级分类把故障大体分成电气故障、机械故障和热相关故障这三类，二级分类再进一步细分到具体故障类型。对于故障样本少的类别，系统引进对抗生成网络（GAN）技术合成训练数据并加上迁移学习方法以解决小样本学习难题。系统也没忘了带基于专家知识的规则库，使其与数据驱动模型互补，依据可信度加权融合机制整合这两种方法的判断结果。实际应用测试时，这个特征提取与分类方法对绕组变形、绝缘老化和冷却系统故障的早期识别率分别达 92.8%、95.3%和 94.1%。

2.3 诊断结果可视化

运维人员要理解系统的判断，直观地呈现诊断结果相当关键，所以本系统设计了多层次的可视化界面，像设备健康状态仪表盘、故障趋势图、多维数据关联分析图以及三维设备模型等都包含在内。设备整体状态由健康状态仪表盘用红黄绿三色来指示且健康指数（0~100）的实时变化也会被显示出来，故障趋势图把各项监测指标的历史变化轨迹展现出来并圈出异常点和预警阈值以便让运维人员能直观把握设备状态的演变过程，多维数据关联分析图靠热力图和散点矩阵展示不同感知参数之间的相关性从而有助于分析故障的根本原因，三维设备模型把诊断结果和设备的实际构件相对应并通过颜色和闪烁效果标示故障的位置以及严重程度以达成从虚拟到现实的精准映射，此外系统还提供故障案例库，该库能把当前诊断结果和历

史案例进行相似度匹配以给维护决策提供参考。各个可视化界面都能被多终端访问并且显示内容的深浅可根据用户权限动态调整，这样一来管理人员能得到概览信息而技术专家可查看详细的诊断依据和原始数据，进而有效地支撑起不同层次用户的决策需求。

3 预警系统构建与应用

3.1 预警指标体系建立

本研究依据水电站主变压器的运行特性与故障机理构建起一套涵盖振动、温度、电气参数、油中气体等多维度且分核心指标、关联指标、辅助指标三个层级的全面预警指标体系，其中铁芯和绕组振动特征频率、主油箱温度梯度、负载电流波动率等属于核心指标，冷却系统效率、油中溶解气体比值等归于关联指标，而环境湿度、外部负荷波动这类影响因素纳入辅助指标，并且中国电力行业近五年的统计数据表明主变压器故障大概有 82%能通过这些指标的异常变化预先识别，这一指标体系在确保科学性之时还周全考虑到不同规模水电站的适用性，从而给后续预警模型开发奠定稳固根基。

3.2 预警模型开发

本研究开发出一个基于多维感知融合且架构设计呈多层级的预警模型，其包含数据预处理层、特征提取层、融合决策层以及预警输出层这四层，在数据预处理层通过小波分解技术与统计滤波方法消除噪声干扰以提升信号质量，并且特征提取层运用将卷积神经网络（CNN）和长短时记忆网络（LSTM）相组合的深度学习架构，不但能从小振动和温度数据里分别提取时域、频域特征，还把传感器位置信息的空间特征纳入考量范围。

融合决策层运用注意力机制有效融合异构数据且让不同数据源在不同故障模式下拥有动态权重，这使模型对复杂工况的适应能力提升不少，2020 到 2023 年某大型水电集团运维数据表明变压器铁芯松动、绕组变形等早期故障被这个预警模型检测时准确率达 93.7%，比传统单一参数监测高 18.2%，多种故障征兆一同出现于复杂场景时模型的鲁棒性与可靠性更强^[4]。

3.3 预警策略制定

本研究依据预警指标体系与预警模型制定了三级预警策略，分别为注意级、警告级和紧急级，在参数稍微偏离正常范围时注意级预警就会触发并提醒运维人员关注相关参数变化，当多项指标持续超出限制或者单项指标严重超出限制时警告级预警就会触发且会建议进行有针对性的检查，若检测到可能会致使设备出现重大故障的异常模式时紧急级预警就会发出并且要求马上采取干预措施，预警信息涵盖异常类型、可能的故障原因、置信度评估还有处理建议，中国南方电网 2022 年发布的数据显示这种分级预警策略平均能提前 7~15 天发觉潜在故障从而让设备维护有充足的准备时间进而有效防止因突发故障造

成的停机损失。

4 结论

一套基于振温多维感知融合 AI 算法的水电站主变压器智能诊断与预警系统被本研究成功构建起来,通过建立多维指标体系、开发深度学习预警模型、制定分级预警策略以及部署“边缘-云端”协同架构,这套系统能够实现主变压器潜在故障的早期识别与预警,实际应用结果显示,在故障诊断准确率、预警提前量和系统鲁棒性方面它比传统方法都好,并且在复杂工况下,多维感知融合 AI 算法的泛化能力特别优越,中国水力发电工程学会 2023 年报告显示,水电站主变压器维护成本平均占设备总维护成本的 23.7%,而应用本系统有望让这个比例降至 17.2%,这样大型水电站每年能节省维护成本大概 240 万元,以后的研究会进一步优化算法在极端工况下的适应能力、探索自适应学习机制并拓展系统在同类变电设备上的应用价值,

从而给水电行业的智能化转型提供更全面的技术支撑。

【参考文献】

- [1]郭善成,王延廷,崔光源,等.太平湾水电站 3 号变压器时频域介电响应研究[J].变压器,2019,56(4):69-73.
 - [2]四川华能东西关水电股份有限公司.一种水电站主变压器与断路器协同过电压控制方法:CN119382051A[P/OL].2025-01-28[2025-10-10][Z].
 - [3]纪子杰,白维,李正洪,等.水电站油浸式变压器寿命评估模型研究[J/OL].中国科技期刊数据库工业 A,2024(7)[2024-07-01][Z].
 - [4]王浪.水电站主变压器在线监测系统大数据故障识别与诊断研究[J].电力系统装备,2024(9):128-130.
- 作者简介:边怡心(1998.4—),女,山东人,现就职于山东沂蒙抽水蓄能有限公司,长期从事水电电力工程检修及运行维护工作。

地下厂房第Ⅶ层提前开挖施工技术

彭固生 冀春辉

中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001

[摘要]文中通过地下厂房第Ⅶ层提前开挖施工技术研究,通过优化尾水隧洞的供风系统、供电系统及施工排水系统,从1#~4#尾水隧洞提前进入地下厂房第Ⅶ层,利用尾水隧洞钻爆台车采用“全断面法”进行地下厂房第Ⅶ层的提前开挖,希望文中为相关抽水蓄能电站地下厂房快速施工提供参考。

[关键词]地下厂房;第Ⅶ层;提前开挖

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18043

中图分类号: TU92

文献标识码: A

Construction Technology for Pre-excavation of the Layer VII of Underground Powerhouse

PENG Gusheng, JI Chunhui

Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450001, China

Abstract: This article studies the construction technology of early excavation of the layer VII of the underground powerhouse. By optimizing the air supply system, power supply system, and construction drainage system of the tailwater tunnel, the layer VII of the underground powerhouse is advanced from the 1 # to 4 # tailwater tunnels. The tailwater tunnel drilling and blasting trolley is used to excavate the layer VII of the underground powerhouse in advance using the "full section method". It is hoped that this article can provide reference for the rapid construction of underground powerhouses in related pumped storage power stations.

Keywords: underground powerhouse; layer VII; advance excavation

引言

抚宁抽水蓄能电站位于河北省秦皇岛市抚宁区境内,距离抚宁区约 32km。抚宁抽水蓄能电站额定发电水头 437m,总装机容量为 1200MW,电站共安装 4 台单机容量为 300MW 的立轴单级混流可逆式水泵水轮机。工程属大(1)型一等工程,主要永久建筑物按 1 级建筑物设计,次要永久建筑物按 3 级建筑物设计。

地下厂房第Ⅶ层位于厂右 0+025.8~厂左 0+080.65,厂上 0+014.65~厂下 0+020,长 106.45m,宽 34.65m,开挖高度 7m (EL.109~EL.102),与尾水隧洞相接。集水井位于厂右 0+006.350~厂右 0+025.800,厂上 0+004.150~厂下 0+010.350,长 19.45m,宽 14.5m,开挖高度 13m (EL.102~EL.89)。从 1#~4#尾水隧洞提前进入地下厂房第Ⅶ层,利用尾水隧洞钻爆台车采用“全断面法”进行地下厂房第Ⅶ层开挖,有效缩短地下厂房开挖支护施工工期。

1 本工程地下厂房施工特点

河北抚宁抽水蓄能电站地下厂房开挖支护工程量大,尤其第Ⅶ层及集水井开挖结构复杂、施工程序繁多,占据直线工期较长。为提高地下厂房施工效率,缩短施工工期,项目通过有限元仿真分析技术,分析确定地下厂房第Ⅶ层提前开挖的可行性,打破传统逐层开挖的施工工艺,利用尾水隧洞的供风、供电及施工排水系统,从 1#~4#尾水隧洞提前进入地下厂房第Ⅶ层,利用尾水隧洞钻爆台车采

用“全断面法”进行地下厂房第Ⅶ层开挖,有效缩短地下厂房开挖支护施工工期。

2 关键技术及创新点

2.1 关键技术

(1) 地下厂房第Ⅶ层提前开挖的有限元仿真分析技术。

采用有限元仿真模拟,动态模拟地下厂房第Ⅶ层开挖支护过程,验证以尾水隧洞断面为基准,采用暗挖的形式进行第Ⅶ层提前开挖的可行性。

(2) 厂房第Ⅶ层开挖预留中心岩柱技术。

根据监测数据,及现场地质条件,计算复核不同围岩类型条件下预留中心开挖区中心岩柱的规模及施工安全稳定性,优化开挖程序,提高施工安全性。

(3) 厂房第Ⅶ层开挖临时支护技术。

厂房第Ⅶ层提前开挖施工,根据现场模拟分析及围岩类型分布情况,优化确定支护参数,采用玻璃纤维+喷混凝土的施工工艺作为地下厂房第Ⅶ层临时支护措施。

2.2 技术创新点

(1) 采用有限元仿真软件 ABAQUS 与地下厂房施工图建立了 1:1 二维断面模型,仿真模拟地下厂房与主变室第Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ层和母线洞第Ⅰ、Ⅱ层开挖的同时,逐步推进尾水隧洞的开挖及地下厂房第Ⅶ层提前开挖的可行性。

(2) 根据有限元模拟结果,提取监测点的竖向位移-开挖时间步曲线,根据竖向位移量判断地下厂房第Ⅶ层的

提前开挖施工的可行性；同时，为提前开挖方案下的临时支护设计提供理论依据。

(3) 开挖过程，对围岩变形数据进行收集，分析围岩稳定状态及应力变化，并实时进行监控，根据监测数据及现场地质条件，复核不同围岩类型条件下预留中心开挖区中心岩柱的规模及施工安全稳定性，优化支护参数，提高施工安全性。

(4) 地下厂房第七层提前开挖时，针对局部块体不稳定问题，根据工作面地质巡查及编录成果，及时对潜在不稳定块体进行搜索、预测、分析，评价其稳定性，并提出针对性处理措施。

3 主要研究内容

3.1 地下厂房第七层提前开挖的有限元仿真分析技术

采用有限元仿真软件 ABAQUS 与地下厂房施工图纸建立了 1:1 二维断面模型，模拟地下厂房、主变室、母线洞的开挖程序，在主厂房与主变室第 III、IV、V 层和母线洞第 I、II 层开挖的同时，逐步推进尾水隧洞的开挖，当主厂房第 V 层完工时，第七层完成前半段的开挖，最后，主厂房第七层独自完成后半段的开挖。

(1) 仿真模型

基于有限元仿真软件 ABAQUS 与地下厂房施工图纸建立了 1:1 二维断面模型。

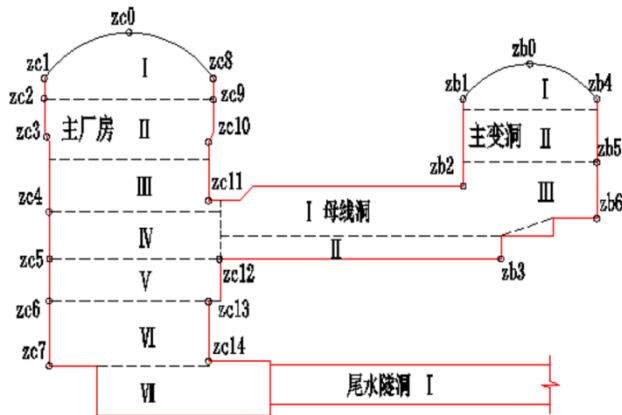


图1 地下厂房二维断面模型图

(2) 模拟结果及分析

位移是围岩力学行为变化最直观的综合反映，不管其作用机理如何复杂，其效应均可通过洞室周边位移反映出来。对洞室位移进行分析，是了解地下洞室力学动态的最直观的方法。对地下厂房第七层开挖有限元模拟结果见下图。

根据有限元模拟结果，提取主厂房第 VI 层的 1 个监测点和母线洞下方岩体的 2 个监测点，共 3 个监测点的竖向位移-开挖时间步曲线。

主厂房第七层提前开挖施工，使得地下厂房围岩出现了明显的变形重分布现象，具体表现为母线洞下方围岩产

生负位移，即原本隆起的围岩在尾水隧洞开挖后，向下凹陷，但位移依然在可控范围内（不超过 10mm），可以保证施工的安全。

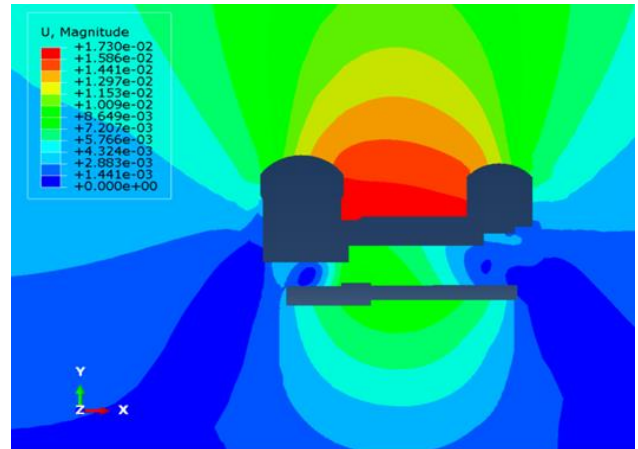


图2 主厂房第七层开挖后位移云图

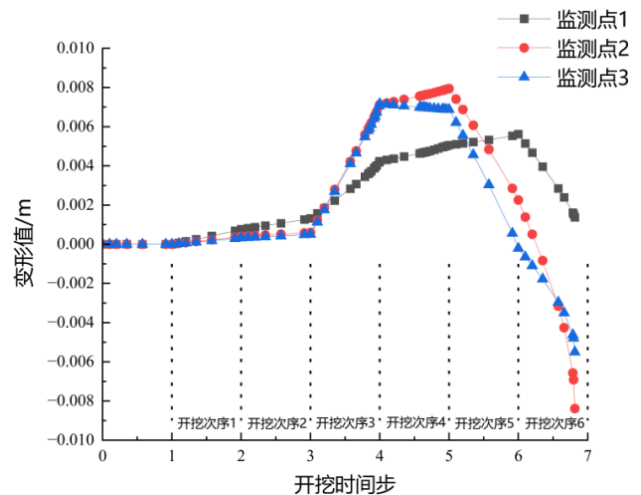


图3 开挖竖向位移曲线图

综上所述，地下厂房第七层的提前开挖施工并不会对地下厂房第 VI 层和母线洞下方的围岩造成较大的扰动，符合开挖条件；同时，有限元模拟结果也为提前开挖方案下的支护设计提供了理论依据。

3.2 厂房第七层开挖施工技术

利用尾水隧洞钻爆台车采用“全断面法”进行地下厂房第七层开挖，根据尾水隧洞台车最大宽度进行开挖，由马蹄形开挖调整为城门洞型开挖。

厂房第七层开挖，出渣时预留 1m 厚度石渣作为保护层，防止第 VI 层施工时破坏第七层底板。地下厂房第七层开挖断面为城门洞型，断面尺寸为 6.4×7.8（宽×高）。开挖采用手风钻+钻爆台车水平钻孔，周边永久轮廓线及底板采用光面爆破技术成型。III 类围岩循环进尺为 3.2m，IV 类围岩循环进尺为 2m，V 类围岩循环进尺为 1m。

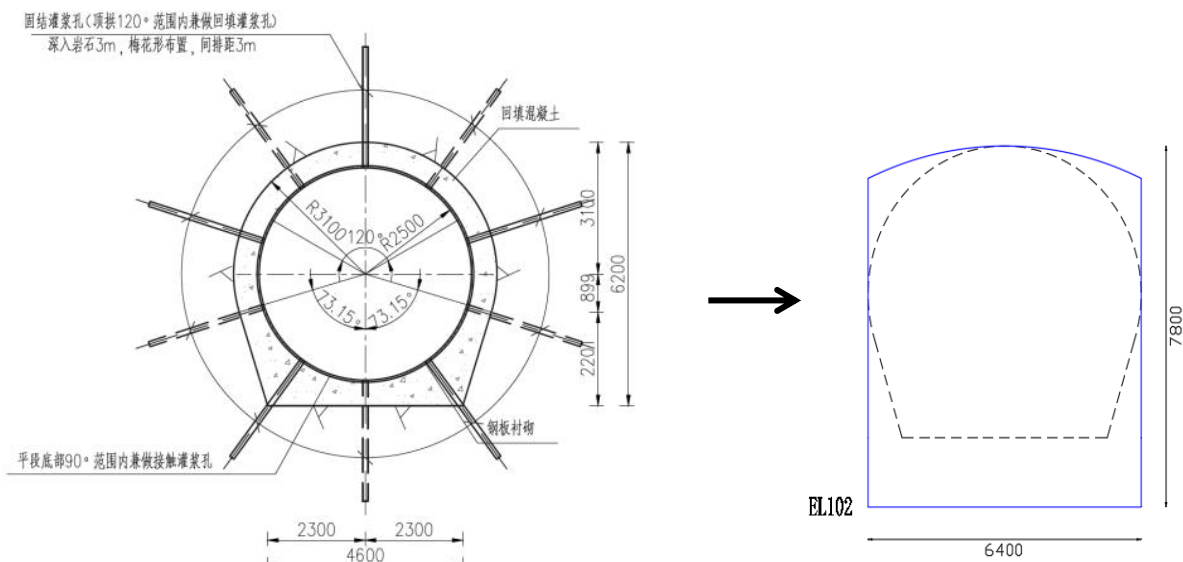


图4 开挖施工示意图

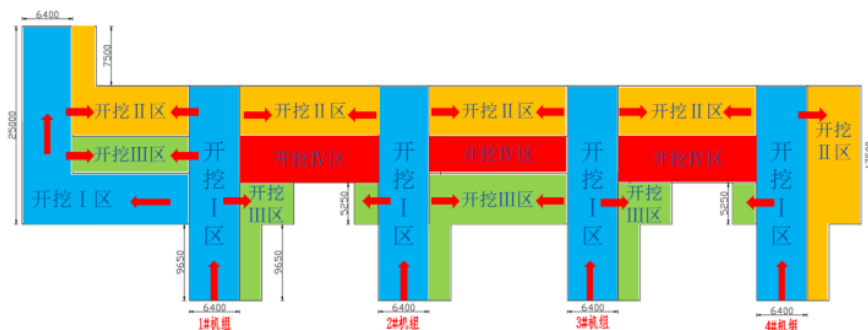


图5 厂房第Ⅶ层开挖程序

3.3 厂房第Ⅶ层开挖预留中心岩柱技术

为保证上下层施工安全,关键点在于中心岩柱的保留,施工过程中,加强围岩变形监测,根据不同围岩类型的变化及地质条件,计算确定中心岩柱的保留范围及临时支护参数,确保预留完整,避免破坏造成上层岩体不稳,在保证第Ⅶ层正常开挖时,确保第Ⅵ层预留岩体的稳定性。施工期间加强对围岩变形的监测,并及时进行地质素描及预报措施,并根据现场实际情况,及时调整开挖程序。开挖程序如图5:

从1#~4#尾水隧洞进入,采用平推的方式进行Ⅰ区~Ⅲ区开挖支护。施工顺序为开挖Ⅰ区→开挖Ⅱ区→开挖Ⅲ区→开挖Ⅳ区(地下厂房第Ⅵ层开挖支护完成后进行),开挖断面为城门洞型,断面尺寸为 6.4×7.8 (宽 $\times$ 高)。开挖采用手风钻+钻爆台车水平钻孔,周边永久轮廓线及底板采用光面爆破技术成型。

3.4 厂房第Ⅶ层开挖临时支护技术

利用1#~4#尾水隧洞提前进入厂房第Ⅶ层开挖,开挖过程中,需进行临时支护,来保证开挖过程中岩体稳定。定期检测围岩变形情况,分析围岩稳定情况,各方进行讨论研究,必要时加强支护,明确各类围岩采取的措施,

及支护后的围岩稳定情况,可为其他工程地下厂房第Ⅶ提前开挖时,提供参考依据。

厂房第Ⅶ层提前开挖施工,根据现场模拟分析及围岩类型分布情况,确定支护参数:地下厂房第Ⅶ层临时支护采用玻璃纤维锚杆, $\Phi 22@1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 、 $L=3\text{m}$ (梅花形布置)、入岩 2.9m ,钢筋网为 $\Phi 8@20\text{cm}\times 20\text{cm}$,C30喷混厚度为 15cm 。

玻璃纤维锚杆 $\Phi 22@1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 、 $L=3\text{m}$ 、入岩 2.9m
挂网 $\Phi 8@0.2\text{m}\times 0.2\text{m}$,喷C30混凝土厚 0.15m

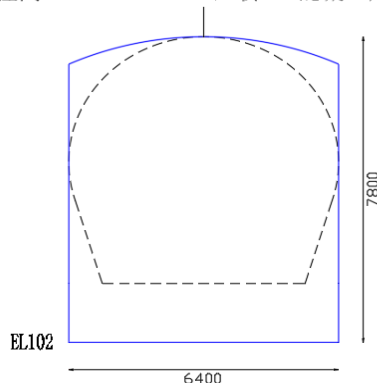


图6 临时支护示意图

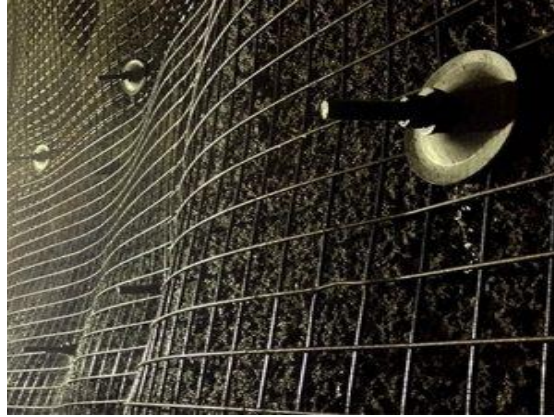


图7 玻璃纤维锚杆施工

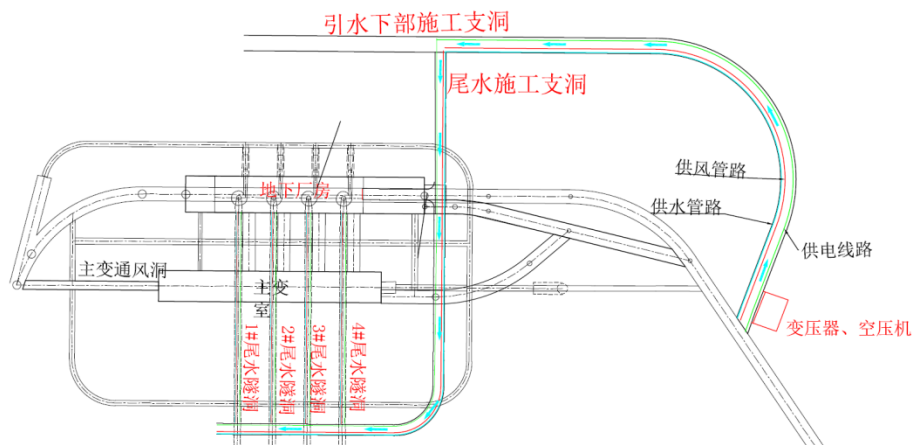


图8 厂房第Ⅶ层开挖施工平面布置

3.5 施工平面布置

厂房第Ⅶ层开挖首先需要合理布置道路及风水电布置。

出渣道路布置:主厂房→尾水隧洞→尾水隧洞施工支洞→引水下支洞→交通洞→Y3号公路→Y1号公路→L6号公路运至南沟渣场。

采用尾水隧洞的供风系统,使用引水下支洞已布置的4台 $24\text{m}^3/\text{min}$ 空压机,供风量为 $96\text{m}^3/\text{min}$ 。采用尾水隧洞的施工通风系统,使用在交通洞口已安装的1台 $2\times 110\text{kW}$ 隧洞专用轴流式通风机,向地下厂房第Ⅶ层压入新鲜空气。施工用电由场内主要的 10kV 线路接入,采用尾水隧洞施工支洞口设置的1台S11-1000/10/0.4变压器进行供电。

采用尾水隧洞的施工排水系统,尾水隧洞底板高程为EL.104,地下厂房第Ⅶ层底板高程为EL.102。在第Ⅶ层设置 $3\text{m}\times 2\text{m}\times 1.5\text{m}$ (长×宽×高)的集水坑,集水坑内安装2台WQ100-100-30-15污水泵,抽排至尾水隧洞的施工排水系统,如图8所示。

4 结语

通过尾水隧洞实现主厂房第Ⅶ层的提前开挖,为验证该方案的可行性,对地下厂房第七层提前开挖使用有限元

仿真软件ABAQUS进行了仿真模拟。第Ⅶ层的提前开挖不会对主厂房第Ⅵ层和母线洞下方的围岩造成较大的扰动,符合开挖条件;同时,有限元模拟结果也为提前开挖方案下的支护设计提供了理论依据。通过优化尾水隧洞的供风系统、供电系统及施工排水系统,从1#~4#尾水隧洞提前进入地下厂房第Ⅶ层,利用尾水隧洞钻爆台车采用“全断面法”进行地下厂房第Ⅶ层开挖,缩短地下厂房开挖支护工期。

【参考文献】

- [1]胡良坡.大跨度、高边墙地下厂房分层开挖支护施工技术分析[J].建筑设计及理论,2019(5):78.
- [2]王军政.大跨度深埋地下厂房洞室群开挖支护施工技术研究[J].建筑理论,2025(4):67.
- [3]陈庆宇.水电工程地下厂房洞室群开挖与支护施工技术应用[J].建筑科学,2025(11):69.
- [4]刘进.水电站地下厂房开挖和支护方案[J].文化科学,2018(12):91.

作者简介:彭固生(1981.12—),男,工程师,本科,主要从事水利水电工程施工技术管理工作。

电力工程技术在智能电网建设中的应用的研

张 滨 王云鹏 夏 智

沈阳电力勘测设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

[摘要]随着能源结构不断转型以及信息技术持续发展,智能电网已然成为新一代电力系统极为重要的一种形式,当下正于全球范围快速推进其建设与应用进程。电力工程技术在智能电网建设方面发挥着核心的支撑作用,借助优化能源配置、提升系统稳定性与运行效率、确保电力安全及服务质量等举措,促使传统电网朝着智能电网方向实现深度转型升级。深入剖析电力工程技术在智能电网当中的应用价值,对其在智能发电、智能输电、智能变电、智能用电以及电力系统保护与安全控制等诸多环节的具体应用展开探讨,同时展望未来的技术发展趋势。研究显示,电力工程技术不但提高了电网运行效率与可靠性,而且还推动了绿色低碳发展,给能源产业的可持续发展给予了坚实的保障。

[关键词]智能电网; 电力工程技术; 新能源

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18070

中图分类号: TM76

文献标识码: A

Research on the Application of Power Engineering Technology in the Construction of Smart Grid

ZHANG Bin, WANG Yunpeng, XIA Zhi

Shenyang Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: With the continuous transformation of energy structure and the continuous development of information technology, smart grid has become an extremely important form of the new generation of power system, and its construction and application process is rapidly advancing globally. Electric power engineering technology plays a core supporting role in the construction of smart grids. With measures such as optimizing energy allocation, improving system stability and operational efficiency, ensuring power safety and service quality, it promotes the deep transformation and upgrading of traditional power grids towards smart grids. Thoroughly analyze the application value of power engineering technology in smart grids, explore its specific applications in various aspects such as intelligent power generation, intelligent transmission, intelligent transformation, intelligent power consumption, and power system protection and safety control, and look forward to the future trend of technological development. Research shows that power engineering technology not only improves the efficiency and reliability of power grid operation, but also promotes green and low-carbon development, providing a solid guarantee for the sustainable development of the energy industry.

Keywords: smart grid; power engineering technology; new energy

引言

智能电网属于继传统电网之后出现的一种创新型电力系统,它的关键之处在于把信息、通信、控制等相关技术同电力系统加以深度融合,进而达成对电网运行情况的实时监控、精准调控以及自主优化的目的。在全球能源结构朝着低碳化方向进行转型,且可再生能源所占的比例也在持续提高这样的大背景之下,电网运行所呈现出的复杂性以及不确定性都有了明显的增长,这也就对电力系统的稳定性、可靠性以及效率提出了更高的要求。电力工程技术包含了从发电、输电、变电、用电一直到保护控制等整个生命周期当中的各个环节,它可以通过智能化的方式提升电网的综合性能,实现资源的优化配置以及安全运行。近些年来,大数据、人工智能、物联网等技术在智能电网当中得到了应用,使得电力工程技术的价值得以进一步显现出来,其在确保电力系统安全、优化能源利用、提升服务质量等诸多方面都发挥着无可替代的重要作用。所以,深入地研究电力工程

技术在智能电网当中的应用情况,一方面有助于理解智能电网建设的原理以及实现的具体路径,另一方面对于推动能源产业的转型以及建设高效、绿色、可靠的现代电力系统而言同样有着十分重要的意义。本文会依据现有的技术成果以及应用实践,对电力工程技术在智能电网建设当中的应用价值以及具体的实现方式展开系统分析,并且对未来的趋势加以展望,以此给智能电网建设提供一定的参考。

1 智能电网的概述

智能电网,别称“电网 2.0”,是个新型电力系统,基于旧有电网,融汇了高端信息、通信、调控技术,使得电网更聪明、更高效,智能电网能够即时监管电网运作,预判并调整电力需求,从而优化资源配置,增强电力系统的稳定性和经济性。智能电网的主要特点包括自我修复、相互交流、完善、相容性和整合。当电力系统发生故障时,智能电网能够自动识别问题、隔离故障点,并迅速恢复电力供应,有效减少停电的时间和影响范围。

2 电力工程技术在智能电网中的应用价值

电力工程技术于智能电网建设而言,有着诸多方面的应用价值,其关键在于借助技术手段达成能源的优化配置,提高系统的稳定性与可靠性,提升电力服务的质量,推动电力产业走向可持续发展。电力工程技术依靠新能源并网技术、储能调度以及智能化能量管理,可实现能源结构的优化,如此一来便能减少对化石能源的依赖,降低碳排放量,推动绿色低碳的发展进程。这样的优化举措,既提升了电力系统的经济性,又在环境保护以及能源可持续性方面产生了颇为深远的影响。在提升系统稳定性与可靠性这件事上,电力工程技术能够凭借高精度传感器、状态监测、故障诊断以及自动化控制等手段,达成对电网运行状态的实时感知以及动态调节,进而有效减少停电事件的发生,提高电网针对突发事件的应对能力以及自我恢复能力,以此保障电力供应的连续性与安全性。除此之外,电力工程技术还能够在很大程度上提高电力服务的质量以及运行效率。借助智能化的生产、输配以及用电管理,实现电网运行的优化调度与协同控制,这不仅能减少能源的浪费情况,还能提升对用户需求的响应速度以及服务水平,从而满足现代社会多样且高可靠性要求的用电需求。电力工程技术的应用推动了电力产业的结构升级以及可持续发展,其通过促进新能源的开发与利用、优化电力系统的运营模式以及提升产业链的智能化水平,为能源产业的长期发展给予了坚实的技

3 电力工程技术在智能电网中的具体应用

3.1 智能发电中的应用

在智能发电这个环节当中,电力工程技术主要是借助新能源的接入、发电过程的智能化监控以及优化控制等方面来促使能源利用效率得以提升,并且让系统的可靠性有所增强。传统的电网发电是依靠化石能源来进行的,其发电调度所具备的灵活性是存在一定限制的。然而智能电网不一样,它会采用像风力、光伏这类可再生能源,与此同时还会结合储能技术以及智能调度算法,以此达成发电资源的动态优化分配,进而保障供需能够保持平衡,也让电力系统可以维持稳定状态。并且,电力工程技术凭借数字化监控以及远程控制的相关手段,针对发电机组的运行状态展开实时的监测工作,如此一来便能够迅速识别出异常状态并及时做出相应的调整,进而保证发电设备能够在高效且安全的状态之下正常运转。这样的智能化发电方式,一方面提高了能源的利用率,另一方面也使得设备出现故障的风险以及运行成本都降低了,对于实现那种绿色、低碳且高效的能源生产模式是很有帮助的。除此之外,智能发电还和需求侧响应以及电力市场紧密结合起来,由此实现了发电调度的经济优化,能够让电力供应依据实时的负荷情况以及价格信号来展开动态的调整,进一步提升了整个电力系统的经济性以及可靠性。

3.2 智能输电中的应用

在智能输电这个环节当中,电力工程技术借助特高压输电、柔性直流输电以及智能线路监测与动态调度等一系列手段,来确保电力可从发电端高效且安全地传送到负荷中心。其中,特高压输电技术在长距离且大容量的输电情况之下,可明显降低线路损耗,进而提升电能传输的效率;柔性直流输电技术能够达成对电力流的快速调节以及精确控制,以此适应新能源所具有的波动性比较大的这一特点。电力工程技术把传感器网络、状态监测系统还有智能控制算法相互结合起来,从而实现输电线路展开实时的监控以及故障诊断,如此一来便能够迅速锁定潜在的问题并且采取自动化保护方面的措施,切实有效地降低线路出现故障以及发生停电的风险。与此通过针对输电网络进行优化拓扑调整以及负荷调度,电力工程技术能够在不同的电源与负荷之间达成动态的平衡,由此提高输电系统的灵活性以及可靠性。智能输电的应用不但保障了电能的高效传输,而且还为智能电网整体的安全、稳定运行给予了稳固有力的支撑。

3.3 智能变电中的应用

智能变电环节于电力系统而言,乃是达成自动化以及数字化的关键之处,在此环节当中,电力工程技术起到了颇为重要的作用。借助数字化变电站的建设进程,变电设备的运行实际状况、负荷方面的数据以及故障相关信息,都能够达成远程的监控操作,并且可实现数据的实时采集工作,如此一来,运维人员便能够在控制中心展开统一的调度活动以及管理工作。自动化控制系统与智能算法相互融合之后,可以根据电网的实际运行状况,对开关以及变压器的运行模式予以动态的调整,进而实现负荷分配的优化,促使电网运行的稳定性得以提升。与此电力工程技术在变电环节引入了设备健康状态的评估功能、预测性的维护功能以及故障自诊断功能,这使得在设备故障尚未发生之前,便能够提前发出预警并加以处理,由此降低了意外停电事件出现的频次。智能变电技术一方面提升了设备运行的效率以及可靠性,另一方面也为整个电网的可视化管理、数据相关的分析以及系统的优化给予了相应的技术支撑,已然成为智能电网高效运行当中的重要环节所在。

3.4 智能用电中的应用

智能用电这一环节,主要是借助电力工程技术来达成相关目标的。它能够实现用电方面的监测工作,还能对能效予以优化,并且对需求侧响应管理加以落实。从用户侧来讲,智能计量设备是能够实时去采集用电数据的。再凭借信息化平台针对这些数据展开分析操作,如此一来便能让用户用电行为变得可视化起来,同时也能促使用电效率得以优化。把智能负荷调控以及需求响应机制相互结合起来,电力工程技术就能够依据电网当下的运行状态以及实时电价情况,去引导用户对自身的用电模式做出调整,进而达成负荷平衡的目的,实现电力资源的优化分配。与

此智能用电技术还能够给工业领域、商业领域以及居民用户都提供个性化的能源管理方案,以此提升用电的透明度,提高能源利用的效率,减少能源方面的浪费情况。在电力系统的层面,智能用电技术能够通过和电网监控系统展开实时的交互操作,进而实现对电力需求的预测以及调控功能,使得电网的运行弹性以及可靠性都得到增强,最终形成一个供需协调、高效运行的智能电网体系。

3.5 电力系统保护与安全控制中的应用

在电力系统保护以及安全控制这个环节当中,电力工程技术借助智能化保护装置、故障隔离还有信息安全方面的措施,来保障电网可以稳定且安全地运行。智能保护技术能够实时对电流、电压以及系统状态信息加以采集,再结合快速判断算法,当电力系统出现异常或者发生故障的时候,它能够自动将故障区域隔离起来,并且启动备用电源,以此最大限度地缩减停电的范围以及时间^[1]。与此电力工程技术还会通过网络安全控制、加密通信以及入侵检测等一系列手段来保护电网信息系统,防范网络攻击以及数据篡改,进而确保电力调控系统的可靠性以及完整性。电力系统保护与安全控制技术的应用,一方面保障了电力供应的连续性,另一方面也给智能电网的稳定且高效的运行给予了极为重要的保障,使得整个系统即便处在复杂的运行环境之下,依旧能够维持良好的性能以及可靠性。

4 电力工程技术在智能电网中的发展趋势

4.1 新能源与储能技术的融合

随着新能源占比逐步提高,电力工程技术在智能电网方面的发展趋势,其中一个表现就是新能源和储能技术相互融合^[2]。借助电池储能系统、抽水蓄能以及分布式储能技术等手段,电力系统可对风能以及光伏发电这类波动性较强的能源加以平滑调节,以此保证电网供需保持平衡且运行稳定。与此储能技术同电力工程控制系统相结合以后,能够让电网在负荷高峰时期以及新能源发电出现波动的时候达成灵活调度的效果,减少对传统化石能源的依靠,提高电力系统的绿色程度,给智能电网建设不断注入动力。

4.2 大数据、人工智能与物联网的应用

未来智能电网的发展会更更多地依靠大数据分析、人工智能以及物联网技术的应用来推进。把电力工程技术跟海量数据采集与分析结合起来,是能够达成对电网运行状况、负荷需求还有设备健康状态做出精准预测这一目的的,进而可为调度以及控制工作给予科学方面的依据^[3]。人工智能算法在优化负荷分配、故障诊断以及维护策略等方面都有着不错的作用,能够促使电网自主决策能力得以提升。

物联网技术借助传感器以及智能终端,能够实现电力设备、用户以及控制中心之间的实时互联,从而给电网给予全方位且连续的数据支撑,使得智能电网能够达成更高层次的自动化与智能化。

4.3 数字孪生与未来电力系统创新

数字孪生技术乃是智能电网后续发展的重要核心指向,其凭借于在虚拟空间当中构建起电网的数字模型,进而达成对电力系统的仿真操作、预测预估以及优化控制目标。电力工程技术借助数字孪生这一手段,能够在不干扰实际运行进程的情形下,对不同的运行场景以及故障状况予以模拟呈现,以此来对调度策略加以优化,同时对维护方案做出完善,最终促使系统安全性得以提升,效率同样获得提高^[4]。并且,数字孪生同人工智能、物联网相互融合之后,将会有力地推动电力系统从原本的被动控制状态朝着主动智能管理模式转变,进而为未来的智能电网给出创新性的建设模式以及相应的技术保障。

5 结语

电力工程技术于智能电网建设而言,有着无可取代的作用。它在优化能源结构、提升系统稳定性以及可靠性方面发力,在提高服务质量与运行效率上发挥作用,还能保障电力系统安全并推动产业可持续发展,各个环节都彰显出技术的核心价值。随着新能源接入比例不断增大,大数据、人工智能、物联网还有数字孪生技术的应用,智能电网建设会呈现出更高的智能化程度、更强的灵活性以及更佳的绿色化水平。日后,电力工程技术的发展会持续推动智能电网创新升级,为构建安全、高效、低碳且可持续的现代电力系统给予坚实保障,成为推动能源产业转型以及现代化建设的关键力量。

[参考文献]

- [1]许健,文科,徐正民.电力工程技术在智能电网建设中的应用分析[J].投资北京,2025(3):56-57.
 - [2]李强,黄益军,林圭俊.智能电网建设中电力工程技术的应用[J].光源与照明,2024(11):174-176.
 - [3]陈科科.电力工程技术在智能电网建设中的应用研究[J].仪器仪表用户,2024,31(9):88-90.
 - [4]谢守岭,谢慧敏,谢玉彤.电力工程技术在智能电网建设中的运用研究[J].电力设备管理,2024(20):230-232.
- 作者简介:张滨(1984.5—),毕业院校:沈阳农业大学,所学专业:农业电气化与自动化,当前就职单位:沈阳电力勘测设计院有限责任公司,职务:配电设计室副主任,职称级别:中级。

供电公司电力负荷管理与虚拟电厂模式创新

琚洁华 夏世超 朱彬斌

国网上海市电力公司金山供电公司, 上海 201540

[摘要]随着国家“双碳”战略持续深入推进以及新型电力系统建设速度不断加快,电力负荷管理遇到了资源分散、响应效率不够高等诸多挑战。本项目依据国网上海金山供电公司针对 2025 年金山典型工商业园区灵活资源聚合与示范应用所编制的可研报告,搭建起一套以虚拟电厂作为核心的负荷资源聚合体系,借助多维度看板系统达成资源的可观、可测、可调、可用状态。本文着重阐述了聚合商考核以及动态管理方面的机制、从多个角度展开的协同运营模式,还有在紧急情形下客户经理直接与客户相连的创新响应机制,并且在十个示范园区实施了应用验证工作。

[关键词]电力负荷管理;虚拟电厂;聚合商考核;可调节负荷

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18057

中图分类号: TM7

文献标识码: A

Power Load Management of Power Supply Companies and Innovation of Virtual Power Plant Models

JU Jiehua, XIA Shichao, ZHU Binbin

Jinshan Power Supply Company of State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai, 201540, China

Abstract: With the continuous deepening of the national dual carbon strategy and the acceleration of the construction of new power systems, power load management has encountered many challenges such as resource dispersion and insufficient response efficiency. This project is based on the feasibility study report prepared by State Grid Shanghai Jinshan Power Supply Company for the flexible resource aggregation and demonstration application of typical industrial and commercial parks in Jinshan by 2025. A load resource aggregation system with virtual power plants as the core is built, and a multi-dimensional kanban system is used to achieve the observable, measurable, adjustable, and available status of resources. This article focuses on the mechanisms of aggregator assessment and dynamic management, collaborative operation models from multiple perspectives, and innovative response mechanisms that directly connect customer managers with users in emergency situations. Application verification work has been implemented in ten demonstration parks.

Keywords: power load management; virtual power plant; aggregator assessment; adjustable load

1 绪论

1.1 项目背景与意义

电力负荷是指发电厂或电力系统中,在某一时刻所承担的各类用电设备消费电功率的总和。单位: KW,在实际运行工作中我们经常用电流来表征负荷。电力负荷分类:按发、供、用关系分类,分为用电负荷、线路损失负荷、供电负荷、厂用负荷、发电负荷。①按电力系统中负荷发生的时间分类,分为高峰负荷、最低负荷、平均负荷。②按突然中断供电引起的损失程度分类,分为一级负荷、二级负荷、三级负荷。③用电负荷的这种分类方法,主要目的是为确定供电工程设计和建设标准,保证使建成投入运行的供电工程的供电可能性满足生产或安全、社会安定的需要。

国家制定的 2030 年前碳达峰行动方案以及上海市碳达峰实施方案等一系列政策文件,清晰地指明了构建清洁低碳且安全高效的能源体系这一总体目标,同时还提出提升电网的灵活调节能力,并且增加负荷侧资源的参与程度。金山区属于上海市重要的工业基地,在这里,分布式

光伏、储能以及可调节负荷资源都较为丰富,不过当前的实际情况却是资源呈现出分散的状态,还存在着数据孤岛这样的情况,并且调控手段也有所欠缺等问题,这就使得在迎峰度夏等关键的时间段里,其负荷削减的能力很难达到系统所提出的需求标准。所以,去构建园区级的灵活资源聚合平台并且让它得以示范应用,这既是对国家双碳战略以及地方节能降碳政策的一种积极响应,同时也对于提升电网的安全运行水平以及优化区域的能源结构有着十分重要的实际意义。

1.2 区域负荷管理现状与问题分析

金山区目前已具备一定规模的分布式光伏、用户侧储能和柔性负荷资源,但多数处于孤立运行状态,缺乏统一聚合与协同调控机制。根据 2024 年运行数据,上海市发起 40 次需求侧响应中金山参与 25 次,但红利传导金额仅占全市 6.2%,反映出区域资源调节能力与响应效率存在明显短板。具体问题包括聚合商响应容量不足、用户侧资源四可能力偏低、负荷侧调峰能力未能有效形成等问题,严重制约了电网供需平衡与安全稳定运行^[1]。此外,现有

管理模式未能实现跨主体协同,缺乏针对突发情况的快速响应通道,亟需通过技术与管理创新予以突破。

2 灵活资源聚合体系的构建与实现

2.1 整体架构与技术路线

本项目严格依照国家电网公司有关数字化架构以及安全防护方面的规定要求来开展相关工作。其依据业务架构、应用架构、数据架构还有技术架构这四层设计方面的原则,去构建一个能够涵盖资源接入环节、数据处理环节、业务应用环节以及可视化展示环节的完整全链条系统。该系统是在原有的负荷管理系统的基础之上,针对其功能加以完善并实现提升的。并且还充分利用了像有序用电模块、空调调控模块、大数据应用模块等这些已经存在的既有模块。与此系统还通过新增加的资源管理、实时监测、数据分析、运行计划、异常状态监测、可调资源运营以及分层分级分类邀约等一系列多达十九项的看板功能,进而形成了契合金山区域自身特点的灵活性资源聚合业务体系。在技术路线方面,该系统是支持 IPv4 与 IPv6 这两种协议栈的,而且还能与国产自主可控终端以及 Windows 政府采购版终端实现兼容,以此来保证技术的先进程度以及部署时的灵活程度。

2.2 多维度资源看板系统设计

资源聚合看板系统处于项目核心位置,能够实现从资源台账管理一直到调控效果评估的全程覆盖。资源管理看板针对分布式光伏、用户侧储能、充电桩以及柔性负荷展开操作,具体是进行分类录入并实施动态监控,同时会实时呈现出资源的数量、功率还有建设趋势等方面的情况。实时监测看板借助采集电气量、状态量以及环境量的数据,对电源、储能、充电以及其他柔性负荷开展 D-1 预测,并且跟踪其实时运行的状态^[2]。数据分析看板会从资源健康度、响应速度、响应精度、最大响应时间以及最大响应率等多个维度来开展多指标评估工作,以此为精准邀约以及资源优化给予数据方面的有力支撑。运行计划、异常状态、可调资源比选、分层分级分类邀约等一系列看板共同组成了业务运营的决策中枢,达成了资源可观、可测、可调、可用以及碳流、能量流、信息流三流合一的可视化展现效果。

2.3 数据集成与安全架构

在数据集成这块,系统借助智慧能源单元以及安全套件把用户侧的分布式光伏、储能、充换电资源等还有其他可调节资源的四量数据以电力无线专网或者无线虚拟专网的方式接入管理信息大区数据中台,由此形成了金山虚拟电厂区级数据管理模块。其数据架构运用统一模型来设计,以此保证数据从采集开始一直到清洗、整合再到应用的整个流程都规范且一致。安全架构严格按照国家信息系统等级保护的要求以及国网公司安全防护技术规范来进行,在业务安全、物理安全、边界安全、应用安全、数据

安全、主机安全、网络安全还有安全管理这八个层面去布防,着重对调控指令下发、数据跨区传输以及第三方互联互通这些环节的安全保障予以强化,从而让系统能够在内外网隔离的环境当中稳定并且可靠地运行。

3 核心创新机制:管理、协同与响应

3.1 聚合商考核与动态管理机制

为了提高负荷侧资源的整体响应效率,本项目构建了一套依据多维度指标的聚合商考核以及动态管理机制。考核所涉及的内容包含了响应速度、响应精度、响应一致性、最大响应时间还有最大响应率等一系列关键性能指标。通过对历史运行数据和响应指令加以比对分析,进而计算出单位时间调节量、指令延迟时间、实际响应值与目标值之间的误差等各项参数,最终会形成针对单次以及总体性能的评估报告。该系统每个月都会生成聚合商响应能力的评级情况,对于那些连续评级处于较低水平或者响应偏差超出设定阈值的聚合商,会实施预警、约谈并且最终予以剔除的处理举措。借助这一机制,一方面优化了资源池的构成状况,另一方面也促使聚合商不断提升自身的运营水准,以此来确保日前邀约、日内邀约以及快速调节等多种类型市场品种能够可靠地得以执行。

3.2 多角度协同运营模式

3.2.1 聚合商视角:市场化运营与收益

聚合商属于资源聚合以及市场交易方面的关键主体,其主要目的在于借助参与需求响应和辅助服务市场来达成经济收益的最大化^[3]。就金山示范项目来讲,聚合商能够凭借平台获取到用户侧可调节资源的实时数据以及可调能力预测,从而精准地参与到日前、日内还有快速调节等一系列交易品种当中,并且在响应完成之后依据核定的响应量与价格标准获取收益分配。与此平台所具备的资源健康度分析、响应成本评估以及风险预警等相关功能,能够助力聚合商对资源组合与调控策略加以优化,进而提高其在市场中的竞争力以及长期的盈利能力。

3.2.2 园区视角:碳排管理与区域能源平衡

从园区政府管理的角度来讲,本项目借助资源聚合看板达成了对区域能耗以及碳排的实时监测工作,同时也能够开展相关趋势分析,这为落实金山区减污降碳协同增效实施方案以及重点用能单位节能管理办法给予了技术方面的抓手。该平台和市政数据共享以及碳市场信息进行了对接,可支持园区管委会针对企业能耗强度、碳排总量还有可调节能力展开多维度的评估,并且依据行业特性以及资源拓展指数去制定出精准的节能降碳推广路径。通过推动分布式光伏尽可能多地安装、储能设备实现高效利用以及柔性负荷有序地进行调控等方式,使得园区的整体能源自给率以及就地平衡能力都得到了提升,进而有力地推动了区域朝着绿色低碳转型的方向发展,促进了高质量的发展进程。

3.2.3 客户经理视角：属地化管理与穿透式服务

客户经理属于供电公司直面用户的那个服务窗口，就本项目来讲，其肩负着负荷检查以及需求响应协同这双重职责。其借助资源聚合看板能够实时知晓所管辖用户那边可调节资源的具体状态、以往的历史响应记录还有潜在的调控潜力，并且在日常工作的进程当中会去开展能效诊断方面的工作，给出优化方面的相关建议，同时也会发出响应邀约。更为关键的是，在像保供电这类任务，又或者是涉及百万千瓦级负荷调控这样比较紧急的任务期间，倘若聚合商在响应上出现不到位的情况，或者存在通信延迟的状况，那么客户经理可以凭借自身在属地管理方面所具有的优势，径直和用户取得联系，进而通过打电话、发短信或者到现场进行通知等方式来下达调控指令，以此来保证关键负荷能够实现快速的削减，从而确保电网的安全无虞。这样的穿透式服务机制很好地弥补了单纯依靠市场化响应所存在的种种不足，进而形成了一套双轨并行的负荷保障体系。

3.3 紧急响应创新：客户经理直联用户机制

当突发电网出现供需失衡情况，且有保供电任务需求的时候，本项目创新地设计出了一种客户经理直联用户的紧急响应机制。此机制能让客户经理在平台察觉到聚合商响应出现延迟或者容量不够时，直接向所在辖区里那些具备可调能力的用户发出调控邀请，如此一来便跳过了聚合商这个环节，进而使得响应链条得以缩短，执行效率也得到了提升。在实际的操作过程当中，客户经理会依照看板所给出的用户联系信息、历史响应意愿以及实时可调节容量等信息，采用一键群发或者是人工指令下发的方式去启动快速调节，并且在后续还会通过响应核定以及偏差分析的方式来对直联效果展开评估并予以反馈。这样的机制一方面强化了负荷控制所具有的实时性与可靠性，另一方面也提升了供电公司在极端场景之下的应急处置能力。

4 示范应用与效益分析

4.1 示范工程实施与运营

本项目选取了上海湾区高新技术产业开发区、碳谷绿湾产业园以及上海朱泾工业园区等十个典型的工商业园区当作示范站点，这些站点涵盖了诸如精炼石油产品制造、钢压延加工、电子设备制造、合成材料制造、基础化学原料制造、水泥制造、卫生材料及医药用品制造、金属加工机械制造还有仓储业等诸多不同类别的行业用户。其实施的过程包含了需求调研、看板完善、业务培训以及站点运营这四个阶段，前后历经了八个月的时间才得以完成^[4]。借助于现场的数据采集工作、设备的接入操作、标准化的相关处理流程以及系统的集成事宜，成功达成了让示范用户的分布式光伏、储能、充电桩还有柔性负荷资源能够实现全面的接入以及有效的聚合管理这一目标。运维团队经过专项的培训以及实操方面的演练之后，已然掌握了系统操作的方法、故障排查的技巧以及数据管理的能力，进而

切实保障了平台可以实现长期且稳定的运行状态。

4.2 综合效益评估

在经济效益这块，项目打造出了不低于1万千瓦的调峰能力，所节省的电网投资更是超过了千万元之多。需求响应以及辅助服务所带来的收益，还给参与其中的用户以及聚合商开拓出了全新的利润增长途径。从管理效益来讲，平台把负荷侧资源进行了精准的聚合操作，并且还能实现高效的调控，这无疑提升了供电公司对于日前、日内还有快速调节市场所具备的适应能力，同时也使得运行成本以及调度偏差都有所降低。就社会效益而言，项目通过提高区域能源的利用效率以及可再生能源的消纳水平，成功减少了碳排放量以及环境污染情况，进而为上海市的绿色低碳发展树立了一个实践方面的范例。

5 结论与展望

5.1 项目总结

此项目凭借构建金山典型工商业园区灵活资源聚合业务看板这一举措，达成了负荷侧分布式资源的规模化聚合以及智能化调控的目的。在聚合商考核、多角度协同以及紧急响应机制等方面展开了创新性的探索尝试。经示范应用情况显示，该系统可切实提升区域电网的调节能力以及能源利用效率，减少尖峰负荷对于备用容量的依赖程度，进而为双碳目标之下的电力负荷管理给出了具备可行性的技术解决办法与管理模式。

5.2 推广价值与应用前景

本项目的技术架构以及运营机制有着不错的复制推广价值，能够在其他的工业园区、商业集聚区还有城市能源互联网项目当中广泛地应用起来。在未来，随着虚拟电厂标准体系变得愈加完善以及电力市场建设不断推进，那种基于聚合商考核并且从多个角度展开协同的负荷资源聚合模式将会进一步在全国范围内进行推广，从而给构建清洁低碳、安全高效的新型电力系统增添更多的实践方面的智慧。与此项目在数据安全领域、跨平台互联方面以及碳电协同领域所开展的探索，也为后续能源数字化以及智能化的发展打下了一个十分坚实的基础。

【参考文献】

- [1]朱珂.负荷管理终端的电能质量监测技术分析[J].电子技术,2023,52(11):414-415.
- [2]贾蓉蓉.电力负荷控制终端装置的检测技术分析[J].集成电路应用,2025,42(6):156-157.
- [3]张文强.电力负荷管理系统在电力营销中的应用研究[J].销售与市场,2024(21):116-118.
- [4]靳智嵩.电力负荷管理系统效益及负荷响应资源研究[D].北京:华北电力大学(北京),2017.

作者简介：据洁华（1979.6—），毕业院校：上海交通大学，所学专业：电气工程系，当前就职单位：国网上海市电力公司金山供电公司，职称级别：高级工程师。

电力工程及其输电线路设计与施工的技术分析

王石兴

国网福建省送变电工程有限公司, 福建 福州 350013

[摘要]电力工程属于国民经济的基础产业范畴,其具备的基础性、专业性以及技术先进性,和社会经济的持续向前发展以及能源结构的稳定运行有着紧密的关联。输电线路是电力系统的关键构成部分之一,它肩负着在发电环节和用电环节之间传输电能的重要使命,其设计以及施工的质量,会直接影响到整个系统的运行安全以及经济效益状况。伴随着我国电力系统规模变得越来越大,同时智能电网技术也在不断地得以推广,输电线路的设计与施工技术正逐步朝着信息化、智能化以及绿色化的方向去发展。文中就电力工程及其输电线路设计与施工展开了一整套的分析工作,从设计要点、施工技术的应用情况以及未来的发展趋势等多个方面展开了较为细致的探讨,希望能够为电力工程建设给予相应的理论方面的支持以及实践层面的指导。

[关键词]电力工程;输电线路;设计;施工技术

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18053

中图分类号: TM75

文献标识码: A

Technical Analysis of Power Engineering and Its Transmission Line Design and Construction

WANG Shixing

State Grid Fujian Provincial Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Fuzhou, Fujian, 350013, China

Abstract: Electric power engineering belongs to the basic industry category of the national economy. Its foundational, professional and progressiveness technology is closely related to the sustainable development of the social economy and the stable operation of the energy structure. Transmission lines are one of the key components of the power system, carrying the important mission of transmitting electrical energy between the generation and consumption stages. The quality of their design and construction directly affects the operational safety and economic benefits of the entire system. With the increasing scale of China's power system and the continuous promotion of smart grid technology, the design and construction technology of transmission lines are gradually developing towards informatization, intelligence, and greening. The article presents a comprehensive analysis of power engineering and its transmission line design and construction, with detailed discussions on design points, application of construction techniques, and future development trends. It is hoped that this will provide theoretical support and practical guidance for power engineering construction.

Keywords: power engineering; transmission line; design; construction technology

引言

电力工程在能源基础设施体系里属于极为关键的环节,其技术水平以及工程质量,一方面决定了能源输送的效率以及稳定性,另一方面也体现出一个国家现代化建设的整体水平。输电线路在电力系统当中是连接发电、变电以及配电的重要纽带,其设计以及施工质量对于电网的安全运行有着决定性的意义。传统输电线路设计大多是以安全性和经济性当作核心,然而在当下快速发展的智能化与绿色化这样的时代背景之下,设计理念已经逐步转变为把技术创新与环境协调放在同等重要的位置上,着重于输电通道的空间优化利用、设备智能控制以及施工安全高效同时推进。并且随着输电电压等级及容量持续提高扩大,线路跨越的环境变得越来越复杂,施工技术也就面临着不少挑战。

本文会全面深入地分析电力工程及其输电线路的设计原则以及施工技术,并且对未来的发展趋势展开前瞻性的探讨。

1 电力工程及其输电线路设计与施工的重要性

在现代社会中,电力设备是人们不可或缺的基础设施之一,而输电线路则是实现电能输送的重要通道。因此,对于电力工程的输电线路建设和管理工作具有非常重要的意义。一方面,输电线路的设计需要考虑多种因素,如地形地貌、气候条件、环境影响等因素,输电线路的建造也需要注意安全问题,以确保人员的生命财产安全。另一方面,输电线路的运维检修也是十分重要的,因为输电线路一旦出现故障,将会对整个电网造成极大的影响。因此,电力工程的输电线路建设和管理工作是非常关键的一环,它不仅关系到能源供应的稳定和可靠性,还涉及人民的生活质量和社会经济发展。

2 电力工程及其输电线路设计要点

2.1 输电线路勘察与规划设计原则

输电线路的勘察以及规划设计属于整个工程建设的初始阶段,其具备的科学性与合理性会在很大程度上决定后续施工能够顺利推进的程度以及线路在运行时所具有

的稳定性状况。在设计刚开始的时候,要充分把地形地貌、气候方面的条件、地质的具体结构还有环境保护等诸多方面的因素都综合起来考虑,以此来保障线路路径布局既安全又具备经济性。最初,勘察这个阶段应当运用多源数据采集的方式以及数字化地理信息系统也就是 GIS 技术,进而达成对线路走向展开三维可视化的分析效果,通过这样的方式能够较为全面地掌握地形的起伏情况、植被的分布状态以及地质的稳定性状况。接着,规划设计得依照“安全可靠、经济合理、环境友好”这样的原则来进行,同时还要兼顾到运行维护时候的便利程度以及施工时的可达情况。对于像山区、高原或者是城市密集这类特殊的环境而言,还得结合抗风、抗冰、抗震等方面的因素去开展专项的设计工作,从而确保线路在极端气候条件之下依然能够保持稳定的运行状态。

2.2 输电线路结构优化与路径选择

输电线路结构优化的关键在于提升线路整体的机械稳定性以及运行安全性,与此同时还要兼顾经济性与美观性这两个方面。其结构设计涵盖诸多方面,像杆塔的形式、导线的型号、绝缘子的配置以及防雷接地系统等等。就杆塔设计来讲,得依据电压等级、跨越的跨度还有地形的具体条件来挑选适宜的塔型,比如耐张塔、直线塔或者转角塔之类的,以此来保障线路在受到风荷、冰荷以及张力作用之时能够保持稳定的状态。路径的选择要遵循减少地形障碍以及跨越难度的原则,对转角点与分段长度予以合理的规划,从而确保线路的张力分布是均匀的,施工操作起来也比较简便。在导线与地线的选择方面,需要考量电气性能、机械强度以及经济成本的综合匹配情况,常用的材料有钢芯铝绞线以及复合芯导线这类。随着新型高强度且低损耗导线的不断推广,线路的传输效率以及耐候性都获得了颇为明显的提升。运用有限元分析方法针对线路受力状态展开仿真优化,已然成为现代输电线路结构设计当中极为重要的一项技术手段,能够有效地降低结构风险,进而延长线路的使用寿命。

2.3 电气设备选型与系统安全设计

电气设备科学合理的选型对于保证输电系统能够安全且稳定地运行而言,属于极为关键的一个环节。这里所提到的电气设备主要涵盖了像变压器、断路器、隔离开关、避雷器、互感器以及电容补偿装置等诸多类型。在开展设备选型工作的时候,务必要依据输电的电压等级、系统的容量状况、实际的运行方式以及所处的环境条件等方面的情况来展开合理且周全的配置考量。就高压以及超高压输电线路来讲,应当挑选那些绝缘性能表现优异并且耐热性也相对较高的设备材料,唯有如此才能够有效地防止出现绝缘击穿方面的故障以及设备过热这类故障情况。在针对系统的安全设计方面,需要将短路电流保护、过载保护、接地保护以及避雷保护等多种不同层次的防御机制都充

分纳入到考虑范围之内,并且借助自动化保护装置来达成对系统故障的快速精准识别以及有效隔离的目的,进而切实减少事故所波及的范围以及由此造成的停电损失情况。除此之外,随着数字化变电站以及智能监控系统不断地向前发展,设备的在线监测技术以及远程控制技术也日渐趋于成熟完备了,这便能够使得相关人员实时且准确地掌握设备的运行状态,并且还能够潜在风险尚未爆发之前便提前发出预警提示,从而为电网的运行给予更为可靠的安全保障支撑。

2.4 电力通信与监控系统的完善

在现代电力工程领域当中,通信以及监控系统已然成为了达成智能化管理这一目标的关键支撑所在。就输电线路的通信系统来讲,其不单肩负数据传、保护信号还有调度命令传递方面的功能,而且在故障检测、状态监测以及运维管理等方面同样发挥着极为重要的作用。当下,人们普遍会采用光纤复合架空地线也就是 OPGW,与此同时还会运用数字微波通信技术,借由这些来促使信息传输的稳定性得以提升,并且让其抗干扰的能力也获得增强。在监控系统这个层面上,通过借助 SCADA 也就是数据采集与监控系统,能够对输电线路展开实时的监测操作,进而可以针对电流、电压、温度以及振动等这些关键参数实施动态的采集以及分析工作,以此达成远程故障诊断以及智能调度的目的。当把大数据和人工智能算法相互结合起来之后,该系统便能够实现对运行状态的预测以及自适应调控的功能,如此一来便能够让运维效率以及安全水平都得到大幅度的提升。在未来的发展过程当中,随着物联网也就是 IoT 技术得到进一步的应用,输电线路将会实现全生命周期的信息化管理,这无疑为智能电网的构建筑牢了稳固的基础。

3 电力工程及其输电线路施工技术应用策略

3.1 基坑开挖与地基处理技术

基坑以及地基施工属于输电塔架安全稳固的关键环节,其质量会对线路结构的长期可靠性产生直接影响,在基坑开挖期间,要依据地质勘察得出的结果来挑选适宜的开挖方式以及支护结构。对于软弱土层或者含有水层的地基而言,应当采取将加固与排水相互结合的举措,像是注浆固化、砂石换填、CFG 桩或者水泥搅拌桩加固等方式,以此来提高地基的承载力以及稳定性。在山区地段开展施工的时候,需要格外留心边坡的稳定性还有防滑方面的措施,避免出现塌方以及滑坡的风险。在施工进程当中必须要严格把控基坑的尺寸以及标高,保证塔基的位置和设计保持一致。施工完成之后应当实施地基沉降观测以及压实度检测,从而确保塔架基础能够实现长期的安全使用。

3.2 杆塔基础与安装施工技术

杆塔基础施工的质量是决定线路结构稳定与否以及抗荷载能力大小的关键因素。常见的塔基形式有独立基础、

联合基础、岩锚基础以及桩基础等多种类型,具体选用哪种形式要依据地质条件以及塔型来确定。在施工进程当中,务必对混凝土配合比以及养护工艺加以严格把控,以此来保障基础强度以及抗裂性能能够达到要求^[1]。在塔架安装这个阶段,应当运用机械化且模块化的施工方式,借助吊装设备来完成塔段的拼装工作,从而实现提高施工效率以及增强施工安全性这两个目的。在安装操作的过程中,需要对塔身垂直度、连接螺栓扭矩还有节点焊接质量等方面严格加以控制,以确保整体结构具备稳定性和良好的抗风性能。在地形较为复杂的区域或者存在大跨越的情况时,可以采用张力组塔或者是滑移组塔的技术手段,通过这样的方式来削减高空作业所面临的风险,进而提升施工的安全水准。

3.3 架线施工与导线紧线技术

架线施工属于输电线路建设里极为关键的一个环节,其施工的质量会直接对输电的效率以及运行的可靠性产生影响,在开展架线施工的时候,要依据线路跨越的具体情况来挑选恰当的放线以及牵引工艺,常用的方法有张力放线还有滑轮放线这两种。在施工开始之前,得完成导线的绝缘检测以及强度试验,以此保证材料的性能能够符合设计方面的要求。处于紧线这个阶段时,务必要对导线的张力以及弧垂加以严格的把控,借助测距仪和张力的控制系统来达成精确的调整,避免出现导线过松或者过紧的情况,防止由此引发机械疲劳或者是击穿的风险。除此之外,在跨越公路、铁路以及河流等这些特殊的区域之际,应当运用防护网、跨越架等等安全方面的举措,从而确保施工的安全性以及交通的畅通无阻。近些年来,随着无人机以及智能牵引设备的应用,架线作业的自动化程度有了颇为显著的提高,施工的精度以及安全性也都得到了相应的增强。

3.4 设备安装、调试及高压试验技术

设备安装以及调试属于输电工程竣工之前的极为关键的环节,其技术水平和系统的安全投运紧密相关。在安装期间,要严格依照设计图纸和技术规范来操作,保证设备的位置、连接的方式还有绝缘配置都准确无误^[2]。调试阶段需要针对电气设备展开系统性的检测,像绝缘电阻试验、接地电阻测试、开关动作特性试验等等,以此来验证设备性能的可靠性。高压试验是输电线路投运之前必须要经过的程序,借助施加比额定电压更高的测试电压,对线路绝缘系统的耐压性能加以检验,确保系统在长时间运行当中拥有足够的安全裕度。随着数字化测试技术不断发展,在线监测与智能试验设备的运用使得试验数据的精度以及可追溯性有了很大提升,给电力系统的安全运行带来了有力的保障。

3.5 检修工程与安全施工技术

检修以及维护属于输电线路全寿命周期管理里极为重要的一个部分。定期开展的检修工作能够有效地对设备老化、腐蚀还有机械疲劳等诸多问题起到预防的作用,进而使得线路的使用寿命得以延长^[3]。检修工作一般涵盖了

塔体的防腐处理、导地线及附属设施的更换操作、绝缘子的清洗事宜以及对接地系统展开检测等相关内容。在施工的过程当中,务必要严格依照安全作业规程来执行各项操作,同时要做好停电计划方面的安排,还要落实好接地保护的相关措施,以此来防止出现误操作的情况以及避免触电事故的发生。就带电作业而言,应当选用绝缘杆、绝缘斗臂车这类专业的设备,从而切实保障作业人员的人身安全。当处于山区或者跨越区段进行检修的时候,可以凭借无人机巡检手段以及红外成像技术来达成远程检测的目的,如此一来既能降低高空作业所存在的风险,又可以让检修工作的效率得到提升。从安全管理的角度来讲,需要构建起较为完善的施工安全体系,进一步强化针对人员的培训工作以及应急响应机制的建设,从而确保施工在整个过程当中都能够保持安全且处于可控制的状态。

4 电力工程及其输电线路设计与施工的技术发展前景

随着能源结构逐步转型以及电网朝着智能化方向不断发展,电力工程还有输电线路技术迎来了全新的机遇。在未来,其将会呈现出三个较为突出的趋势:一是智能化和数字化相融合,借助物联网、大数据以及人工智能来达成全生命周期的监测以及自适应控制;二是绿色低碳要和环境实现协调发展,大力推广环保材料以及节能施工方式,以此来减少碳排放以及对生态的干扰;三是高电压以及长距离输电技术取得突破,特高压直流以及超导技术能够提升远距离输电的效率与安全性。

5 结束语

电力工程以及其输电线路设计和施工属于一项系统性非常强且技术含量颇高的综合性工程。科学的设计理念、先进的施工技术还有完善的安全管理对于保障工程质量以及运行安全而言极为关键。本文经过对设计要点、施工技术以及未来发展趋势展开系统分析能够发现,现代电力工程正持续向着智能化、绿色化以及高效化的方向演进发展。在未来应当在技术创新、设备升级以及管理优化等层面不断推进深入研究,持续提升我国电力工程建设的整体水准,以此为构建安全、清洁且智能的现代电力体系给予坚实有力的支撑。

[参考文献]

- [1]王晓阳,张琳果,李金阳,等.电力工程及其输电线路设计与施工的技术分析[J].中国设备工程,2025(14):205-207.
- [2]欧振峰.电力工程及其输电线路设计与施工技术问题当议[J].中国高新科技,2024(16):80-82.
- [3]李万棉.电力工程及其输电线路设计与施工的技术问题[J].广西电业,2023(3):65-69.

作者简介:王石兴(1982.11—),男,福建省福州市人,汉族,本科学历,中级电力工程师,就职于国网福建省送变电工程有限公司,从事输电运检工作。

数字化技术在电力营销服务创新中的应用

陈维镜¹ 陈维辉²

1. 国网宁德供电公司城区供电分部, 福建 宁德 352100

2. 宁德市供电服务公司霞浦分公司, 福建 宁德 352100

[摘要]随着数字化技术不断发展, 电力行业营销服务正逐步发生转变。智能电表、大数据、人工智能以及移动平台等技术在企业里得到运用, 达成业务流程部分自动化以及客户服务线上化的效果。借助数字化手段, 企业可更好地掌握用户用电数据, 给予个性化服务并优化管理, 提升了服务效率与客户体验。不过当下依旧存在技术体系不够完善、数据质量不稳定以及安全风险等问题, 需进一步加以改进与完善。文章围绕数字化技术在电力营销服务中的应用展开分析, 为企业提高服务水平提供参考。

[关键词]数字化技术; 电力营销; 服务创新; 技术应用

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18045

中图分类号: TM7

文献标识码: A

The Application of Digital Technology in Innovation of Electric Power Marketing Services

CHEN Weijing¹, CHEN Weihui²

1. Urban Power Supply Division of State Grid Ningde Power Supply Company, Ningde, Fujian, 352100, China

2. Xiapu Branch of Ningde Power Supply Service Company, Ningde, Fujian, 352100, China

Abstract: With the continuous development of digital technology, marketing services in the power industry are gradually undergoing transformation. Technologies such as smart meters, big data, artificial intelligence, and mobile platforms are being applied in enterprises to achieve partial automation of business processes and online customer service. With the help of digital means, enterprises can better grasp user electricity consumption data, provide personalized services and optimize management, and improve service efficiency and customer experience. However, there are still issues such as incomplete technical systems, unstable data quality, and security risks that need to be further improved and perfected. The article analyzes the application of digital technology in power marketing services, providing reference for enterprises to improve their service level.

Keywords: digital technology; electricity marketing; service innovation; technology application

引言

随着信息技术以及数字经济不断发展, 电力行业迎来了前所未有的变革契机。传统电力营销服务模式多是线下办理、人工操作且以静态数据为主, 存在服务效率不高、客户体验不佳、业务流程复杂以及运营管理不够精细等问题, 很难满足用户日益多样且个性化的诉求。电力行业的数字化水平以及服务创新能力对于提升供电可靠性、优化能源配置以及推动绿色低碳发展有着关键作用。近些年来, 人工智能、大数据、云计算、物联网等数字化技术在电力营销领域应用逐渐加深, 给业务模式创新、客户服务优化以及运营管理提升带来了新的可能性。比如, 依靠智能计量与数据分析, 企业可实时了解用户用电状况, 达成精细化管理; 借助 AI 客服与智慧用能平台, 用户可获得更为便捷、个性化的服务体验; 数字化平台建设还可提高业务协同效率、强化决策科学性并保障数据安全。在此背景下, 探究数字化技术在电力营销服务中的应用, 既能提升企业核心竞争力, 又能为行业转型升级以及可持续发展提供实践途径。所以, 本文要

分析当下电力营销服务所面临的挑战, 整理数字化技术的应用状况与存在的问题, 给出推动服务创新的优化办法, 为电力企业实现高效、智能且以客户为中心的营销服务给予理论依据与实践参照。

1 电力营销服务创新的必要性

传统电力营销服务存在产品和服务单一、标准化的问题, 难以满足不同消费者的多样化需求, 同时主要依赖线下渠道和人工服务, 导致服务效率低、成本高, 难以满足现代用户对便捷和即时性的需求。数字化技术的快速发展为电力企业提供了创新机遇, 使其能够更准确地了解消费者需求和行为, 实现精准营销与个性化服务。通过数据分析和预测模型, 企业可以灵活调整供应, 提高市场响应速度, 同时借助在线平台、移动应用和社交媒体等多样化渠道, 与用户进行便捷、实时的互动, 从而提升用户体验和满意度。电力营销服务创新不仅能够增强用户满意度和忠诚度, 带来口碑传播和推荐效应, 还能帮助企业应对市场变化, 提高竞争力, 扩大市场份额, 是提升电力企业市场竞争力的重要手段。

2 数字化技术应用中存在的问题分析

2.1 技术体系不完善与系统兼容性不足

在电力营销服务展开数字化转型之际,技术体系建设并非尽善尽美,其中系统架构呈现出复杂态势,信息平台也处于分散状态,这些问题颇为凸显。不少电力企业于早期建设阶段便形成了诸多相对独立的业务系统,像营销管理系统、计量系统以及客服系统等等。这些系统在技术标准、数据格式还有接口协议等方面都欠缺统一规范,如此一来,不同平台之间便很难达成有效的对接,数据共享也难以实现。并且还有一部分系统的建设时间相对较早,其技术框架也显得比较陈旧,这使得它们和新一代数字化工具在兼容性以及扩展性方面存在着明显的差距。

2.2 数据质量、隐私保护与安全风险

在电力营销服务迈向数字化的过程中,数据质量问题呈现出了良莠不齐的状况,隐私保护方面的意识也显得有所欠缺,并且安全风险还出现了不断增加的态势,这些问题渐渐变得格外突出了。因为数据的来源多种多样,采集的方式也不统一,在部分基础数据当中存在着缺失的情况,还有一部分数据存在冗余的现象,另外还有一部分数据更新不够及时,这些情况都对数字化分析结果的准确性产生了影响,同时也使得其应用价值受到了一定程度的损害。与此随着像客户行为数据、用电数据这类敏感信息大规模地汇聚在一起,要是数据在采集、传输以及存储的过程中缺少严格的规范,那么就特别容易出现隐私泄露的风险^[1]。而且电力营销系统所连接的业务链条比较长,接口数量也比较多,网络攻击的手段还在不停地进行升级,要是系统的安全防护做得不够牢固,那么就很有可能会遭到入侵、篡改甚至是恶意的破坏,进而造成数据资产受到损失、业务被迫中断等一系列严重的后果。

2.3 人员信息化能力不足与组织变革阻力

在电力营销服务迈向数字化转型之际,人员信息化能力有所欠缺以及组织变革所面临的阻力,已然成为限制数字化应用进一步推进的关键因素。有一部分员工长时间习惯了传统的业务模式,对于数字化工具以及智能系统的运用并不够娴熟,甚至还存在着排斥的心理状态,这就使得新技术在实际开展工作的过程当中,其应用的效率并不是很高。与此数字化建设通常会伴随着业务流程的重新再造以及岗位职责方面的调整,在此情形下,一些部门以及部分人员对于组织变革有着诸多的顾虑,他们担心工作方式会发生改变又或者自身角色会被弱化,进而便在思想层面形成了阻碍。

2.4 服务流程数字化水平不均衡

在电力营销服务迈向数字化的过程中,各个业务环节呈现出数字化水平极为不均衡的情况,这使得整体流程的连贯性以及协同性都受到了一定程度的影响。就部分企业

而言,其线上服务渠道的建设相对比较成熟,像线上缴费、报修报障等相关功能也较为完备,然而在业务受理环节、配电服务衔接环节以及现场作业管理环节等流程当中,依旧沿用着传统的方式,数字化手段的覆盖不够充分,进而致使信息传递不够及时,流程衔接也不够顺畅。与此在不同的地区、不同的部门之间,于技术投入的力度、系统建设的标准以及人员配备等方面均存在着差异,这就导致同一业务在不同区域所呈现出的数字化应用水平是参差不齐的。

2.5 投入成本高与收益评估体系不健全

在电力营销服务展开数字化建设之际,其中存在的问题颇为突出,那就是投入成本颇高,而收益评估体系却并不健全。数字化项目一般会涉及到诸多方面的支出,像软硬件的购置、平台的建设、系统的升级,还有数据存储以及安全防护等等,其所需的资金投入数量可观,而且所持续的时间也较长,这无疑给企业的资金安排以及预算管理带来了相当大的压力。与此数字化所带来的效益往往是在服务效率得以提升、运营模式实现优化以及客户体验获得改善等诸多方面有所体现的,而这些效益具有一定的间接性与滞后性,所以很难在短时间内借助经济指标来直观地呈现出来^[2]。除此之外,部分企业到目前为止还没有建立起系统化且量化的效益评估机制,对于数字化项目的成本与收益也没有统一的评价标准,如此一来便使得决策依据不够充分,投入产出之间的关系也不够清晰明确。

3 数字化技术驱动电力营销服务创新的优化策略

3.1 完善数字化基础设施与平台建设

在电力营销服务创新进程里,把数字化基础设施以及平台建设加以完善,这可算作推动整体转型的极为关键的基础所在。当下,伴随业务规模不断拓展扩大,服务模式也在持续不断地升级变化,企业有必要去构建起更为稳定牢靠、更为高效能且更具开放性的数字化基础环境,从而能够充分支撑各类数字应用得以顺利运行并进一步拓展延伸。就基础层面而言,得借助强化云平台、数据中心、通信网络等基础设施方面的建设举措,以此来提升系统的处理方面的能力、存储方面的实力以及网络所具备的承载能力,进而给各类业务系统给予可靠的、稳固的技术支撑保障。处于平台层面时,应当积极推动营销系统、计量系统、客服系统、调度系统等各个系统的整合与升级操作,进而构建起统一的数据共享平台以及协同工作的平台,凭借标准化的数据接口以及统一的业务规则,达成不同系统之间彼此能够互联互通以及信息可以顺畅流动的良好局面。与此以平台化架构当作核心要点,去搭建起一个集数据采集功能、数据分析功能、数据展示功能以及业务管理功能于一体的高度集成化的数字化服务平台,以此为客户提供服务、办理各项业务、开展运行管理等诸多环节给予

集中式的有力支撑,促使数字化能力从原本的局部有所突破逐渐迈向整体层面的全面提升状态。

3.2 推动数据治理体系与安全保障体系建设

推动数据治理体系以及安全保障体系的建设,这在电力营销服务数字化创新里属于极为重要的一环,同时也是保证数字化成果能够稳定运行的关键先决条件。在数字化转型持续向前推进的这种大背景之下,电力企业有必要针对那些分散开来的、来源众多的数据展开统一化的管理工作。要通过去建立起清晰明确的数据标准体系、数据分类体系,还有数据质量评价机制,以此来促使数据具备更高的规范性、更强的一致性以及更好的准确性,进而让各类业务数据能够在统一的框架范围之内达成顺畅的流转状态,并且实现有效的利用目的^[3]。与此得进一步强化对于数据全生命周期的管理举措,从数据采集环节开始,一直到数据的传输、存储阶段,再到后续的使用环节以及归档环节,都得建立起规范化的操作流程,并且要清楚明确地界定出各个部门在数据治理相关工作当中各自所承担的职责以及分工情况,从而实现数据管理工作的制度化、体系化目标。随着数据规模不断地扩大起来,而且业务线上化的程度也在逐步提高,那么相应的安全风险自然而然也就跟着出现了上升的趋势,所以说构建起完善的保障体系就显得格外重要了。这里所说的完善的安全保障体系,具体而言就是指要去加强网络安全方面的监测力度,强化对于系统访问的控制措施,还要健全数据加密以及权限管理的相关机制等等,通过这些举措来全面提升数据资产所具备的安全性及可靠性程度。

3.3 深化智能化应用场景(AI 客服、智慧用能服务等)

深化智能化应用场景对于推动电力营销服务创新而言是一条极为重要的途径。把人工智能、物联网以及大数据分析等一系列技术融入到具体的业务场景当中,如此便能够大幅度提升服务的能力以及运营的效率。就客户服务来讲, AI 客服系统能够达成全天候在线予以响应的状态。借助语音识别、自然语言处理等技术,它能够迅速且准确地理解客户的各类需求,进而为客户给出业务方面的咨询,受理故障报修事宜,开展信息查询等工作,切实有效地缓解了人工客服所面临的诸多压力,同时也让服务的响应速度以及准确性都得到了提升。在智慧用能服务这块领域,依靠智能计量设备以及实时数据采集技术,企业完全有能力为用户带来诸如用电行为分析、负荷预测以及能效诊断等具有个性化的服务,以此来助力不同类型的客户对自身的用电结构加以优化,最终促使能源利用效率得以提升。与此在营销管理、设备监测以及业务调度等诸多环节之中,智能算法同样能够起到辅助的作用,助力实现故障预测、需求侧管理以及资源优化配置等相关事宜,从而促使电力业务从原本的“被动服务”模式朝着“主动服务”的全新

模式转变过来。

3.4 建立以客户为中心的数字化服务模式

建立以客户为中心的数字化服务模式,这是电力营销服务创新秉持的核心理念,其目的在于借助数字技术来充分理解客户需求,对服务流程予以优化,进而提升用户的使用体验,以此强化客户的满意度以及忠诚度,在这种模式当中,企业需要充分运用大数据分析、智能化平台以及客户管理系统,针对用户行为、用电习惯还有反馈信息展开全面且细致的采集与分析,从而形成较为精准的客户画像以及个性化的服务方案。依据这些数据,企业能够达成定制化的用电咨询、个性化的营销推荐、用能效率优化方面的建议以及主动预警以及故障通知等一系列服务,以此满足不同客户群体多样化的各类需求,与此数字化服务平台应当实现业务全流程的线上化操作,包含开户、缴费、报修、服务评价等诸多环节,给予便捷且高效的一站式服务感受,降低客户操作方面的负担以及等待的时间长度,在运营管理层面,凭借客户数据分析还能够对资源配置以及服务流程加以优化,提升整体的运营效率。

3.5 加强人才培养与组织数字化转型

强化人才培养以及推进组织数字化转型,这二者乃是推动电力营销服务创新的关键保障所在。在数字化技术迅猛发展的这样一种大背景之下,企业有必要去构建起一套系统化的人才培养相关机制。要借助专业培训、岗位轮换、技能认证还有实践演练等一系列的方式方法,以此来促使员工在数据分析、智能系统操作、客户管理以及数字化营销策略等诸多方面的能力得以提升,让其可以较为娴熟地运用各类数字工具,并且能够适应全新的业务模式^[4]。与此组织结构以及管理流程同样需要和数字化转型保持相适应的状态。得通过优化部门职能、清晰明确职责分工、建立起跨部门协同机制等举措,进而打破信息孤岛的局面,达成资源和数据的高效整合与共享目的。管理层应当在战略规划、业务流程设计、绩效考核以及文化建设等多个方面积极主动地去推动数字化理念切实落地,从而形成一个自上而下贯通无阻、全员共同参与其中的转型良好氛围。

4 结语

随着数字化技术持续向前发展,电力营销服务正从传统的模式朝着智能化、信息化以及以客户为中心的方向进行转变。借助大数据、人工智能、智能计量以及云计算等技术的应用,企业可提高业务流程的效率,优化客户的服务体验,强化决策的支持能力,还能为精准营销以及智慧用能给予强有力的支撑。不过,技术体系存在不完善的情况,数据质量也参差不齐,人员的能力有所欠缺,并且还存在安全风险等方面的问题,这些问题依旧需要引起关注。在未来,电力企业应当不断去完善数字化的基础设施,对

数据治理以及安全保障体系加以优化,进一步深化智能化的应用场景,同时推动组织和人才的同步转型,以此达成营销服务的持续创新以及高质量的发展。数字化技术的深入运用,不但能够提高企业的竞争力,而且给行业的转型升级以及可持续发展带来了重要的动力。

[参考文献]

- [1]曹利慧,姚倩云.数字化技术在电力营销服务创新中的应用[J].电子技术,2023,52(9):412-413.
[2]李敏,张宾.数字化技术在电力营销中的创新应用[J].集

成电路应用,2024,41(7):200-201.

- [3]阮坤,肖莎,屈英佼.电力营销中的数字化技术创新应用[J].中国集体经济,2025(17):193-196.
[4]李嘉慧.试析新时期数字化技术在电力营销的应用[J].电气技术与经济,2024(1):214-216.

作者简介:陈维镜(1994.2—),男,毕业院校:华北电力大学(北京)电气与电子工程学院,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:城区供电分部,职务:大客户服务班班长。

城区典型配电电缆故障案例分析

丁楠¹ 吕爽²

1. 中共国网天津市电力公司委员会党校（国网天津市电力公司培训中心），天津 300181

2. 国网天津市电力公司城西供电分公司，天津 300181

[摘要]文中通过对城区典型配电电缆热缩中间接头、冷缩中间接头及终端头三类故障案例的分析，系统研究了配电电缆在运行过程中常见的故障特征及成因。研究采用故障性质诊断、脉冲测距与声磁同步法等手段对故障点进行定位，并通过现场解剖对接头内部结构进行分析。结果表明，电缆接头故障主要由安装工艺质量不良引起，包括密封不严导致进水受潮、铜屏蔽及外半导体层断口处理不当、应力控制措施不到位、主绝缘划伤及尺寸偏差等。这些问题导致电场畸变、局部放电和绝缘老化，从而引发电缆击穿。研究指出，加强施工工艺管理、完善应力控制措施和密封防护、强化人员培训与现场质量监督，是提升配电电缆运行可靠性的重要途径。文中的分析结果对配电电缆接头设计、施工和运维管理具有重要的工程参考价值。

[关键词]配电电缆；接头故障；绝缘击穿；施工工艺

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18058

中图分类号: TM247

文献标识码: A

Analysis of Typical Distribution Cable Fault Cases in Urban Areas

DING Nan¹, LYU Shuang²

1. CPC State Grid Tianjin Electric Power Company Committee Party School (State Grid Tianjin Electric Power Company Training Center), Tianjin, 300181, China

2. Chengxi Power Supply Branch of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin, 300181, China

Abstract: This article systematically studies the common fault characteristics and causes of distribution cables during operation by analyzing three types of fault cases: heat shrinkable intermediate joints, cold shrinkable intermediate joints, and terminal heads in typical urban distribution cables. The study uses methods such as fault nature diagnosis, pulse ranging, and acoustic magnetic synchronization to locate the fault point, and analyzes the internal structure of the joint through on-site dissection. The results indicate that cable joint failures are mainly caused by poor installation process quality, including inadequate sealing leading to water and moisture ingress, improper treatment of copper shielding and outer semiconducting layer fractures, inadequate stress control measures, scratches on the main insulation, and dimensional deviations. These issues result in electric field distortion, partial discharge, and insulation aging, leading to cable breakdown. Research has pointed out that strengthening construction process management, improving stress control measures and sealing protection, enhancing personnel training and on-site quality supervision are important ways to improve the reliability of distribution cable operation. The analysis results in the article have important engineering reference value for the design, construction, and operation management of distribution cable joints.

Keywords: distribution cables; joint malfunction; insulation breakdown; construction technology

1 绪论

随着城市电网建设的不断推进，配电线路逐渐由架空线路向电缆化方向发展。电缆化供电不仅能提高供电可靠性和美观度，还可有效减少外界环境及气候因素对供电系统的影响。然而，电缆线路运行时间越长，电缆附件（尤其是中间接头与终端头）故障比例逐年上升，成为制约配电网稳定运行的关键环节。据统计，电缆附件类故障约占配电电缆运行故障的 70% 以上。因此，对典型配电电缆故障进行系统分析，查明原因并提出防范措施，对于提升配电网运行安全性与可靠性具有重要意义。近年来，电缆材料、工艺及检测技术快速发展，但城市复杂的环境条件和不规范的施工操作仍使部分电缆在运行中出现绝缘击

穿、放电或进水等问题^[1]。本文选取城区典型故障案例，结合现场检测与结构解剖分析，从工艺、材料及电场分布等方面系统研究电缆接头故障的形成机理，并提出针对性改进建议。

2 电缆热缩中间接头故障案例

（1）故障概况

某年 6 月 9 日 9 时 16 分，35kV 变电站某 10kV 线路零序保护动作，重合不良。经抢修班现场查线，确定为北西 2200006 杆刀闸至 KB360 开闭站 3# 开关电缆故障，无外力迹象。现场拉开北西 2200006 杆刀闸和 KB360 开闭站 3# 开关，将故障段隔离，其余非故障部分经倒路恢复送电。通过查阅电缆资产，该段电缆型号为

YJV22-8.7/15-3×240mm², 长度为 1534m。

(2) 现场故障探测

①故障性质诊断。试验人员用 2500V 兆欧表对三相电缆分别进行绝缘电阻测试,其中 A 相为 ∞ ,B 相到 0,C 相为 ∞ ;万用表测 B 相电阻 1.81M Ω ,后用万用表进行导通性测试,将对端三相短接,用万用表测量测试端 AB、BC、AC 之间的电阻均为 0,导通良好,判断故障类型为高阻接地故障。

②故障测距。采用二次脉冲法,对 B 相故障相测试,由于故障点电阻较高,对故障点多次进行升压测试,最终波形如图 1 所示。从图中可以较明显看出波形分叉点,即为故障距离 1233m。

③故障定点。经过查阅电线路径资料,初步判断故障点为中间接头。使用声磁同步法对故障点进行定点,在 1230m 附近声磁时间差最小且耳机里监听到的放电声音强度最大,经开挖确定为故障中间接头。

(3) 故障原因分析

为了确定故障原因,将故障中间接头进行解剖分析。将故障接头切下,发现击穿位置在电缆底部,热缩外护套管已被击穿出孔洞,孔洞附近有水流出。剥开外护套管,发现外护套管内侧存在大量的水渍如图 2 所示。

将内护套管打开后,发现铜屏蔽网未用恒力弹簧固定在铜屏蔽上,采用铜绑线固定,容易导致接地不实,使得接触电阻过大。如图 3 所示。

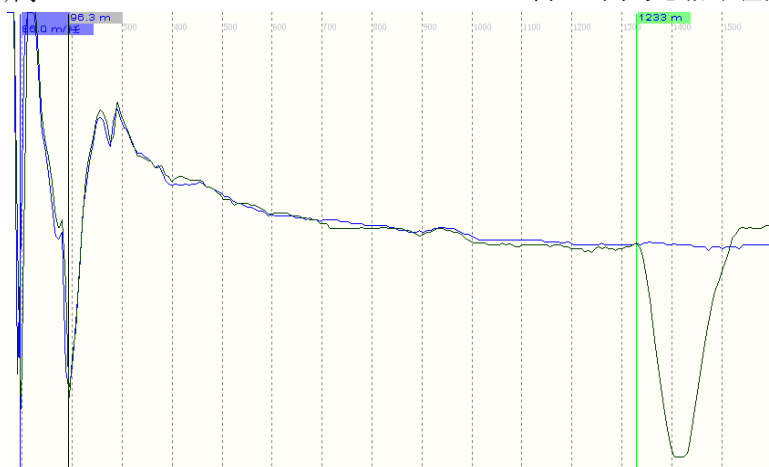


图 1 测试波形图



图 2 外护套管内部进水

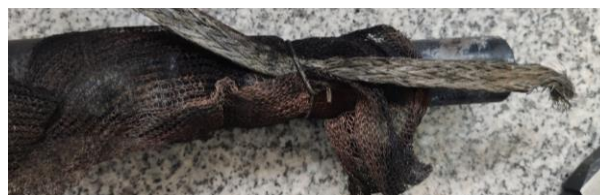


图 3 铜屏蔽网用绑线固定

同时,铜屏蔽断口处不齐,存在较多毛刺和尖端,长时间运行容易造成电场集中,形成局部放电点。如图 4 所示。



图 4 铜屏蔽断口不齐存在毛刺

剥除热缩半导体管和红色绝缘管后,在外半导体断口与绝缘处的台阶未用应力疏散胶填平,且未安装应力管。如图 5 所示。



图 5 外半导体断口无应力疏散胶和应力管

此外,外半导体层的断口处剥切参差不齐,断口处未做倒角处理,主绝缘未打磨且存在纵向划痕。如图6所示。

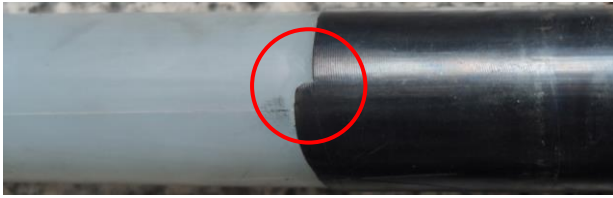


图6 外半导体断口不齐且绝缘存在划痕

在主绝缘断口处发现了放电痕迹,存在少量水渍,主绝缘断口未倒45°角或削成锥体,即制成反应力锥(铅笔头),造成断口处电场集中引起放电;未保留5mm内半导体层,因此连接管上绕包的半导体带无法搭接内半导体层。经与故障相对比,判断放电位置约在主绝缘断口处。如图7所示。



a)主绝缘断口放电痕迹



b)三相线芯对比图

图7 故障点情况

根据现场解剖情况,判断该次故障为电缆中间接头密封不良,导致水分侵入,在电场作用下,绝缘表面形成水树枝,进而发展成电树枝。主绝缘断口处电场集中产生局

部放电,电缆进水受潮长期运行后,在主绝缘断口处沿水渍爬弧放电^[2]。

3 电缆冷缩中间接头故障案例

(1) 故障概况

某年12月25日6时39分,某220kV变电站35kV某开关过流I段保护掉闸,某开关站2#开关掉闸。该故障线路为双缆线路,电缆全长3281m,投运时间为某年9月12日。

(2) 现场故障探测

①故障性质诊断

对三相进行绝缘电阻测试,用2500V兆欧表测试A相为0, B相 ∞ , C相 ∞ ;万用表测A相电阻为12M Ω ,后用万用表做导通性测试,结果为:AB断、AC断、BC通,判断为A相断线,结合A相故障电阻12M Ω ,综合确定故障类型为A相高阻断线故障。

②故障测距

由于判定故障类型为断线故障,因此采用低压脉冲法进行测距,对A相故障相测试(图3-1中黑色波形),初步判断故障点为终端附近,但终端前电缆有接地反射信号,为此采用比较法对故障点进行了验证^[3]。对B相良好相测试(图8中蓝色波形),通过对比可发现疑似接地反射信号并不为故障点,故障点确定为两个波形的明显分界处,从而确定故障点距离,断线故障为2698m。

③故障定点

经过查阅电缆路径图,使用声磁同步法,对故障点进行定点。由于测试环境恶劣,汽车来往噪音大给定点带来一定的困难,曾一度怀疑故障点是否发出了放电声。后来对端电缆裸露的地方(远离高压信号发生器),把探头放在电缆上,通过耳机听到了明显的放电声音,确认故障点肯定已放电,又回到2700多米处,移动探头仔细定点,找到了声磁时间差最小的点,同时用耳机监听放电的声音强度,证明故障点就在此处,经开挖位于直埋绿化带内为冷缩中间接头。



图8 测试波形图

(3) 故障原因分析

为了分析故障原因,将故障接头解体,如图9所示,打开接头玻璃钢外壳,防水胶整体固化较好,击穿点处防水胶发生爆裂。



图9 接头防水胶固化情况

剥除外层防水胶,露出内层密封管,如图10所示在两侧端部发现防水胶与密封管界面之间存在水分。



图10 防水胶与密封管界面间存在水分

检查接头本体两端密封情况,如图11所示,扒开端部阻水带后发现下方存在水分。虽然外层防水胶整体固化较好,但在防水胶与密封管界面、接头端部阻水带下方发现水分,说明在玻璃钢外壳最外侧两端以及每层防水措施的结合面存在缝隙,是水分入侵的薄弱点,在接头浸水运行环境下,水分从外壳两端沿界面缝隙向接头内部逐渐渗透,以至于在接头本体端部密封阻水带下方发现水分。



图11 接头端部阻水带下方存在水分

剥开密封管后可见故障接头本体,发生故障相击穿点如图12所示。



图12 故障两相击穿点

剖开接头本体,发现故障相压接管处导体线芯已熔断,如图13所示。



图13 压接管端部导体已熔断

检查时发现,如图14所示击穿点处半导体法拉第笼端部与硅橡胶结合界面处出现脱离迹象,在其他未击穿处也发现同样脱离迹象。接头内部法拉第笼与硅橡胶结合面出现分离现象,其中位于击穿点附近的可能由于故障瞬间高温造成,已无法确认。位于未击穿部位的也发现类似现象,由于距离击穿点较远,且硅橡胶不具备金属材料的导热性能,排除故障瞬间由于高温造成两种材料分离的可能,怀疑在制造时两种材料的结合工艺控制不到位。



a)击穿点处



b)未击穿处

图14 法拉第笼与硅橡胶界面出现分离

检查非故障相电缆本体及接头内侧,未发现明显放电痕迹,但发现其中一侧的半导体断口处理不齐,同时未做平滑处理,用手触摸有明显台阶,如图15所示,属于安装工艺不良。



图 15 半导电断口处理不当

上述半导电法拉第笼端部与硅橡胶结合界面处出现脱离以及半导电断口存在台阶,这两点属于接头内电场强度控制范畴,存在气隙缺陷将引发局部放电,但通过对问题部位进行检查后并未发现明显放电迹象,判断不是导致故障的主要原因。此外结合投运 3 个月即发生故障,基本可排除局放瞬间发展导致击穿的可能性。因此,基于解剖中发现的进水现象,判断接头的阻水密封工艺不佳,水分沿界面缝隙渗透到接头本体内,导致电缆本体与接头硅橡胶界面间的泄漏电流增大,加速该部位发热老化,逐渐发展导致绝缘击穿,属于进水导致的热老化击穿。

4 电缆终端头故障案例

(1) 故障概况

某年 7 月 4 日, 35kV 变电站某 10kV 线路零序保护动作, 重合不良。经巡视, 发现甲 1300001 杆电缆冷缩终端故障, 现场将两侧刀闸拉开后倒路送电。故障前, 为雷雨天气。经查询电缆资产, 该接头为某年架空入地工程时所制作, 运行仅 5 年便发生故障。

(2) 故障原因分析

现场故障点位于电缆中相, 由图 16 可以看出从电缆冷缩终端应力锥位置到三叉手套根部沿接地铜编织带对地形成了放电通道, 电缆中相绝缘及冷缩护套管均已烧化。

将故障电缆终端头摘下, 发现电缆三相安装时应力锥位置均被严重弯折, 应力锥与半导电断口搭接部分容易产生气隙, 导致局部放电。其中中相放电位置正处于弯折严重的应力锥上。如图 17 所示。

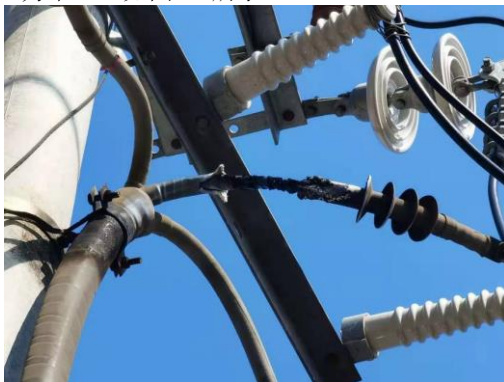


图 16 杆上电缆故障情况



图 17 电缆终端三相应力锥弯折严重

将非故障相冷缩终端应力锥切开, 发现应力锥安装尺寸存在明显偏差, 冷缩应力锥未与电缆外半导电断口形成有效搭接, 造成断口处电场集中, 未起到均匀电场的作用。如图 18 所示。造成应力锥安装错位的原因是施工人员未按照安装工艺要求进行安装, 外半导电层剥除长度过长。



图 18 电缆终端应力锥安装尺寸明显错误

继续解剖发现, 电缆外半导电断口切断时工艺不良, 造成断口不齐、毛刺较多, 并且环割断口时存在下刀过重的情况, 造成绝缘划痕较深, 受损严重。此外, 外半导电断口处未打磨与主绝缘平滑过渡。如图 19 所示。



图 19 电缆外半导电断口工艺不良

在非故障相的冷缩终端应力锥内侧与外半导电断口搭接位置发现了局部放电痕迹, 如图 20 所示。



图 20 电缆终端应力锥内侧放电痕迹

图 21 将故障相与非故障相同一位置进行对比发现,此次故障位置自外半导体断口处放电,并向下沿面放电至接近三叉手套处,最终对地放电导致零序保护动作。



a)故障相



b)非故障相

图 21 故障相与非故障相同一位置对比

5 结论与展望

通过对城区典型配电电缆热缩中间接头、冷缩中间接头及终端头三类故障案例的系统研究,可以得出以下结论:电缆接头与终端作为配电电缆系统中最关键且最薄弱的环节,其安装工艺质量直接决定了电缆线路的安全性和可靠性。分析结果表明,电缆接头故障的主要原因包括密封不严导致进水受潮、应力控制措施不当、半导体层与绝缘断口处理不规范、导体压接不良以及安装尺寸偏差等。这些因素易造成局部电场畸变、局部放电及绝缘老化,最终引发击穿故障。据统计,因施工工艺不良导致的接头故障占全部电缆运行故障的 70%以上,成为影响城市配电网安全运行的重要因素。

针对上述问题,应从施工质量、技术管理和运行监测

三方面着手改进。一是严格执行电缆附件制作及安装的标准化工艺流程,强化施工现场质量控制,确保接头的密封、防潮及应力控制措施到位;二是加强施工人员的技术培训和操作考核,提高其对交联聚乙烯电缆结构特性及电场控制原理的理解,减少人为工艺缺陷;三是建立完善的运行状态监测与评估体系,利用局部放电检测、红外测温、智能在线监测等手段,实现对电缆接头潜在故障的早期预警和预防性维护。

未来,随着智能电网和数字化配电系统的发展,电缆故障诊断将逐步向智能化、预测化方向演进。基于人工智能、大数据及物联网技术的电缆运行状态监测与风险评估方法,将为电缆系统的寿命管理和运维决策提供技术支撑。通过持续优化电缆附件设计、改进施工工艺及提升智能监测水平,可有效提升配电电缆系统的安全性与稳定性,为城市电网的高质量运行提供可靠保障。

【参考文献】

- [1]刘浩然,王志国.电缆附件安装工艺缺陷与绝缘故障关系研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(22):92-98.
- [2]陈建峰,张明.配电电缆常见故障及防范措施分析[J].电气技术,2021(8):34-38.
- [3]朱启林,李仁义,徐丙垠.电力电缆故障测试方法与案例分析[M].北京:机械工业出版社,2008.

作者简介:丁楠(1994.6—),女,学历:硕士,毕业院校:华北电力大学,所学专业:电气工程,目前职称:工程师;吕爽(1993.8—),性别:男,学历:硕士,毕业院校:华北电力大学,所学专业:电气工程,目前职称:工程师。

生物质能在电气系统中的集成与应用研究

陈 祎

华电科工生物质能分公司, 北京 100071

[摘要]在全球能源朝着低碳化以及可再生化不断转型的当下,生物质能凭借自身具备的可再生特性、较低的碳排放特点以及对环境较为友好的优势,受到了人们的广泛关注。文章把生物质能在电气系统当中的集成当作研究对象,全面且细致地分析了生物质能的燃料具体特性、接入电力系统的各种方式、分布式发电系统的相关设计情况。与此还对其在工业领域、农业范畴以及城市供电方面的应用潜力展开了分析,并且对它的运行效益以及环境影响进行了评估,只要进行科学且合理的系统设计,同时实施智能化的管理举措,那么就能够大幅度提升生物质能的利用效率,进而为构建起可持续发展的能源体系给予强有力的支撑。

[关键词]生物质能; 电气系统集成; 可再生能源

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18047

中图分类号: S216.2

文献标识码: A

Research on the Integration and Application of Biomass Energy in Electrical Systems

CHEN Yi

Huadian Engineering Biomass Energy Branch, Beijing, 100071, China

Abstract: In the current global energy transition towards low-carbon and renewable energy, biomass energy has attracted widespread attention due to its renewable characteristics, low carbon emissions, and environmentally friendly advantages. The article takes the integration of biomass energy in electrical systems as the research object, comprehensively and meticulously analyzing the specific fuel characteristics of biomass energy, various ways of connecting to the power system, and the relevant design of distributed generation systems. Furthermore, an analysis was conducted on its potential applications in the industrial, agricultural, and urban power supply fields, and its operational benefits and environmental impact were evaluated. As long as a scientific and reasonable system design is carried out, and intelligent management measures are implemented, the utilization efficiency of biomass energy can be significantly improved, providing strong support for building a sustainable energy system.

Keywords: biomass energy; electrical system integration; renewable energy

引言

全球能源需求一直处在不断增长的态势之中,与此气候变化这一问题也变得日益严峻起来。在此情形之下,可再生能源的发展已然成为了能源转型当中的核心关键所在。生物质能,在全世界范围内是排名第四的能源类型。它凭借着自身的可再生特性,以及所具有的低污染优势和碳减排优势,从而受到了人们的广泛关注。生物质能够充分利用农业废弃物、林业副产物以及能源作物等资源。随着低碳经济不断地向前推进,将生物质能集成到电力系统当中,这无疑成为了一种能够提升能源使用效率,并且对能源结构加以优化的重要途径。不过,生物质能自身在电网调节方面、输出存在间歇性的状况下以及分布式管理环节里,依旧面临着不少的挑战,这些挑战也相应地对系统的整体设计以及智能化控制提出了比较高的要求。所以说,针对生物质能电气系统展开关于技术集成以及应用模式的研究,对于达成高效、绿色且可持续的能源供应目标而言,有着极为重要的意义。

1 生物质能特性与优势

生物质能是世界第四大能源,仅次于煤炭、石油和天

然气,其资源储量和可再生性使其在全球能源结构中具有重要地位。根据生物学家估算,地球陆地每年生产 1000~1250 亿 t 生物质;海洋年生产 500 亿 t 生物质。生物质能源的年生产量远远超过全世界总能源需求量,相当于目前世界总能耗的 10 倍。我国可开发为能源的生物质资源到 2010 年可达 3 亿 t。随着农林业的发展,特别是碳薪林的推广,生物质资源还将越来越多。从燃料特性来看,生物质的硫含量、氮含量低,燃烧过程中产生的 SO_x、NO_x 较少;生物质作为燃料燃烧时,由于它在生长时需要的二氧化碳相当于他排放的二氧化碳的量,因而对大气的二氧化碳排放量近似于零,可有效地减轻温室效应;生物质能其储量颇为丰富,所蕴含的潜力也是巨大的,并且它还拥有低污染以及低碳排放这样的环境方面的优势,无疑属于可持续能源体系当中的一个重要构成部分。

2 生物质能电气系统集成技术

2.1 生物质能接入电力系统的方式

生物质能接入电力系统主要存在集中式接入以及分布式接入这两种模式,每种模式都有自身的特点,在能源结构优化方面所起的作用也各不相同。集中式接入模式一

般依靠大型生物质发电厂来运作,把农业废弃物、林业副产物还有能源作物集中起来进行收集处理,借助燃烧、气化或者厌氧发酵等技术把化学能转变为电能,之后再将其输送到公共电网当中。这种模式在规模化运行、能源转换效率以及集中管理等方面有着十分突出的优势,能够满足大规模负荷的需求,不过与此它还面临着原料运输成本偏高、电网负荷出现波动以及环境排放管理较为复杂等一系列问题。与之相比,分布式接入模式着重于把生物质发电设施布置在负荷中心或者是资源附近,直接给区域负荷供应能源,能够在一定程度上降低输电损耗,提升系统的灵活性,强化局部供电的可靠性。分布式接入模式对于系统的监测精度、负荷预测能力以及和主电网的协调运行都提出了更高的要求,必须要结合先进的调度策略以及保护技术来确保电能质量和供电稳定性。除此之外,为了充分挖掘生物质能的调节潜力,通常需要和风能、光伏等间歇性可再生能源以及储能装置协同配合运行,凭借智能化控制对能源输出加以优化,达成电网负荷平衡并且实现经济性的最大化,进而提升电力系统整体的稳定性和可靠性。

2.2 分布式生物质发电系统设计

分布式生物质发电系统在设计之时,务必要全面考量资源供给情况、能源转换所达成的效率高低、系统自身所具备的可靠性程度以及其对环境所产生的影响等诸多不同方面的因素。就选址这一环节来讲,应当把那些生物质资源相对较为丰富并且运输起来也颇为便捷的地区放在优先考虑的位置上,比如像农业废弃物比较集中的区域或者专门用于种植能源作物的地区等,如此一来便可以有效地降低燃料获取方面的成本,进而切实保障系统能够实现可持续的运行状态。在技术选择这个层面上,需要依据燃料所具有的特性以及其热值的具体状况来决定采用何种转化方式,像是燃烧、气化或者是沼气发电等方式都可纳入考量范围。与此还要通过对燃烧效率加以优化、对热能回收环节予以完善以及对电能转换过程做出改进等一系列举措,以此来促使能源能够得到最大程度的利用。在电气设计方面,分布式系统往往会采用模块化的架构模式,也就是把若干个容量相对较小的发电单元组合到一起,进而形成一个完整的系统整体。这样的设计方式一方面方便后续的扩展操作,另一方面也利于开展维护工作。而且,它还能够一定程度上依据负荷出现的变化情况灵活地对输出功率进行调节。在与电网并网的相关事宜上,系统设计必须要严格遵循电网接口所规定的技术标准,要确保电压等级能够实现精准匹配,并且保护措施也要做到相互协调一致。还需采取恰当有效的电能质量管理方面的举措,从而避免给电网带来诸如谐波干扰或者电压波动这类不良影响。除此之外,分布式系统在设计过程中,还应当把智能化控制手段以及实时监测方法综合结合起来运用,借助这种方式来达成对发电单元、负荷以及储能设备

进行动态调度的目的,进而使得系统的运行效率得以提升,经济性也能够获得增强,同时还能够确保环境排放的各项指标都能够符合相关规定的标准要求,最终实现绿色低碳的运行状态。

3 生物质能电气系统应用分析

3.1 直接发电应用(燃烧、气化、沼气等技术)

生物质能直接发电属于其在电力系统里最为基础并且广泛运用的一种模式,这其中涵盖了燃烧发电、气化发电还有沼气发电等诸多技术。燃烧发电是借助把固体生物质于锅炉当中进行燃烧的方式,进而把化学能转变成热能,随后再依靠蒸汽轮机来达成发电的目的,这算得上是当下最为成熟的那条技术路线了。它的优点体现在技术已然相当成熟、所使用的设备也较为可靠、对于燃料的适应能力颇强等方面,不过它同样存在着热效率并非没有上限以及部分排放方面的相关问题。气化发电则是凭借在高温且处于缺氧的环境下把生物质转化成为可燃气体,之后再经由燃气轮机或者内燃机来完成发电这一过程,它具备较高的热效率以及较强的可调性,并且还能够一定程度上减少固体废弃物的排放量。沼气发电主要是利用农业废弃物、畜禽粪便又或者是有机垃圾处在厌氧环境之下发酵时所产生的甲烷气体,通过燃气发电机组来实现能源的转化工作。这样的方式一方面能够提供清洁能源,另一方面也能对废弃物处理问题予以解决,进而达成资源循环利用的目标。直接发电模式在工业园区、农村以及城市生活垃圾处理系统里面都有着颇为显著的应用价值,其特点在于输出功率可以实现可控、能量转换的效率颇高,并且还能够同储能技术相结合,以此来对间歇性负荷以及可再生能源的波动加以调节,从而为区域电力供给给予稳定的保障。

3.2 工业、农业及城市电力供给应用

生物质能在工业、农业以及城市电力供给等方面有着广泛的应用潜力。在工业领域当中,生物质能借助燃烧、气化或者沼气发电等方式,能够为生产过程给予电力以及热能方面的支持,如此一来,既能减少对化石能源的依赖程度,又可以达成废弃物资源化的利用目标。在农业领域方面,像农作物秸秆、畜禽粪便还有农田剩余物等,可以直接当作燃料或者是原料来使用,经过气化处理或者厌氧发酵操作之后,会产生电力,进而为农机的运行、灌溉系统的运作以及农业加工环节提供所需的能源,与此还能减轻对环境造成的污染情况。就城市供电而言,城市生活垃圾以及餐厨废弃物能够凭借沼气发电或者垃圾焚烧发电的方式,实现能源的回收利用,以此来满足居民日常生活用电的需求以及公共设施正常运行的要求,并且还可以和分布式储能系统相互结合起来,达成局部负荷调节的目的。通过在不同的场景里应用生物质能,不但能够实现能源供应的多样化,而且可以对能源结构加以优化,降低碳排放量,进而促使经济效益与环境效益都得以提升,从而为构

建低碳城市以及发展循环经济给出一条可行的路径。

3.3 生物质能电力系统的运行效益与环保评价

生物质能电力系统在经济性、能源效率以及环境友好性这些方面都拥有着颇为突出的优势。经过合理设计之后的该系统,是能够使得能源成本得以降低的,与此同时还能让利用效率得以提高,并且借助多能互补的方式,进而达成运行经济方面的优化效果^[1]。生物质燃料自身所具备的特点是低硫、低氮,在其燃烧的过程当中,SO_x以及NO_x的排放量相较于传统燃料而言是明显要低的,而且CO₂的排放量基本上能够和生物质在生长期间所吸收的量保持平衡状态,这对于减缓温室效应是有帮助作用的。将智能调度以及储能技术加以应用,那么就可以对功率因数进行优化,减少能源方面的浪费情况,并且还能提升电网的质量。除此之外,生物质系统还能够把农业领域、林业领域以及城市当中的有机废弃物转变成为清洁能源,进而实现资源的循环利用。

4 生物质能电气系统发展趋势与挑战

4.1 高效生物质发电技术发展趋势

未来,生物质能发电技术的发展重点在于提高效率、智能化管理以及多能互补等方面。先进燃烧炉和气化装置的研发使得热能转化率得以不断提升,与此同时排放也降低了,实现了清洁化运行^[2]。气化联合循环和沼气发电技术不断发展,让系统在相同的燃料消耗下能够获取更高的电能输出。借助实时监测和优化控制,生物质发电设备的稳定性和经济性都得到了提升。生物质能与风能、光伏等可再生能源协同运行正逐渐成为一种趋势,这可以提高系统应对负荷波动的能力,为低碳电力供应提供技术方面的保障。

4.2 系统集成与智能化趋势

随着能源系统的复杂程度逐渐增加,生物质能电气系统正朝着智能化以及网络化的方向不断发展,在分布式能源以及微电网当中,生物质能够充当基荷能源,与风能、光伏以及储能设备一道去构建起智能能源网络,借助数据采集、负荷预测还有优化调度等手段,达成能源的高效分配以及系统稳定运行的目的,统一的接口标准、分布式的控制策略以及远程监控技术,能够让不同的能源单元协同开展运行,进而为大规模的推广以及智慧电网的建设给予有力的支撑。

4.3 技术、经济及政策挑战

虽然生物质能有着颇为广阔的前景,但它在电气系统

当中依旧面临着诸多挑战。从技术层面来讲,燃料种类繁多多样,而且热值也呈现出不均匀的状态,这便对设备的适应性提出了相应的要求,并且其收集以及运输的成本也相对较高。就经济方面而言,初期所需的投资金额颇为巨大,运营期间的成本同样居高不下,如此一来,其在市场当中的竞争力便显得较为有限了,这就需要相关政策给予有力的支持^[3]。在政策层面,与之相关的法规以及标准当下还存在不够完善之处,这对规模化推广工作产生了影响。与此环境管理、碳排放核算以及资源可持续性等方面也都亟待进一步完善。未来的发展要想取得进展,那就得依靠技术创新、智能化管理以及政策引导这几方面共同发力,以此来推动生物质能够实现高效且可持续的应用。

5 结语

生物质能属于重要的可再生能源范畴,它有着低碳、环保以及可再生这样的特性,在电力系统方面有着颇为显著的应用价值。借助科学且系统的相关设计和分布式发电的方式,生物质能可以达成高效、稳定并且在经济层面也是合理的电力供应状态,与此还能够推动废弃物实现资源化的利用,进而促使环境效益与经济效益双双得以提升。在未来的发展进程中,伴随着高效发电技术以及智能化控制不断取得进展,其集成的水平以及运行的效率还会进一步地得到提高。不过就目前情况来看,技术的适应性情况、经济方面的考量以及政策体系是否完善等因素仍旧是制约其推广工作的主要因素所在。从整体上来看,针对生物质能电气系统所开展的研究工作,给构建低碳且可持续的能源体系给出了可行的实践路径,并且也为其提供了相应的理论方面的支撑,对于优化能源的结构以及实现环境的可持续发展来讲,都有着不容忽视的重要意义。

【参考文献】

- [1]张东,姜钰湛,李浩然,等.生物质能与冷热电气联产耦合系统研究进展[J].农业工程学报,2024,40(4):14-28.
 - [2]郑瑜.生物质驱动的多能互补热电气联供系统多目标优化理论与应用[D].甘肃:兰州理工大学,2021.
 - [3]邝潇娜,王泽通,杜诗琦,等.太阳能和生物质互补发电技术及应用[J].科技与创新,2025(3):200-203.
- 作者简介:陈祎(1994.5—),女,学历:本科,毕业院校:北京工商大学,所学专业:自动化专业,学历:研究生,毕业院校:北京理工大学,所学专业:工程管理,就职单位:华电科工生物质能分公司,职务:电气工程师,年限:八年,目前职称:中级工程师。

电力系统自动化实现技术与发展趋势研究

杨 帅

北京朝阳电力实业开发有限公司, 北京 100025

[摘要]现代电力系统规模持续扩大,运行复杂性不断提高,自动化技术的应用对保障电网安全、稳定、高效运行极为重要。文章深入研究电力系统自动化的实现技术和发展趋势,着重分析自动化监控技术、调度自动化技术、配电网自动化技术以及人工智能和智能化辅助技术在电力系统中的应用情况及其作用,并且探讨智能化、分布式电源、能源互联网、数字孪生与仿真技术、可再生能源接入以及电网灵活调控等发展趋势。全面梳理这些技术与趋势,文章希望为电力系统的智能化发展提供理论依据和技术参考。

[关键词]电力系统自动化;实现技术;发展趋势

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18069

中图分类号: TM7

文献标识码: A

Research on Implementation Technology and Development Trends of Power System Automation

YANG Shuai

Beijing Chaoyang Electric Power Industry Development Co., Ltd., Beijing, 100025, China

Abstract: The scale of modern power systems continues to expand, and the complexity of operation continues to increase. The application of automation technology is extremely important for ensuring the safe, stable, and efficient operation of the power grid. This paper deeply studies the realization technology and development trend of power system automation, emphatically analyzes the application and role of automation monitoring technology, dispatching automation technology, distribution network automation technology, artificial intelligence and intelligent auxiliary technology in power system, and discusses the development trend of intelligence, distributed generation, energy Internet, digital twin and simulation technology, renewable energy access, and flexible regulation of power grid. By comprehensively reviewing these technologies and trends, the article aims to provide theoretical basis and technical references for the intelligent development of the power system.

Keywords: power system automation; implement technology; development trend

引言

电力系统作为现代社会基础设施的关键构成部分,其运行所呈现出的安全性、稳定性以及高效性,均会对国家能源供给以及社会经济发展产生直接影响。伴随电力需求持续增长以及能源结构日益多样化,传统的人工调控模式已然很难契合系统复杂性以及实时性的相关要求,电力系统自动化便顺势诞生,并且逐步发展成为主流模式。电力系统自动化涵盖的内容颇为丰富,它不但包含有监控与调度方面的功能,而且还涉及配电网管理、通信信息技术以及智能化辅助决策等诸多方面,进而为电网运行赋予了数据采集、分析、控制以及优化的综合能力。与此随着新能源、分布式电源以及能源互联网不断发展,电力系统自动化技术在提升系统灵活性、可再生能源接入能力以及智能调控水平等方面,都发挥出了极为关键的作用。所以说,针对电力系统自动化实现技术以及未来发展趋势展开系统研究,对于推动电网智能化以及实现高质量运行而言,有着不容忽视的理论价值以及实践价值。

1 电力系统自动化概述

电力系统自动化指的是在电力系统运转进程当中,借助先进的传感、测控、通信、计算以及信息处理方面的技

术,达成对电力系统设备予以监测、控制并且实现优化管理的目的,进而提升系统的安全性、稳定性以及经济性。它的关键点在于凭借信息采集与处理来达成对发电、输电、配电还有用电各个环节的综合管理,让各个环节可以协同开展工作并且能迅速应对系统出现的变化。电力系统自动化的开展历程经过了从模拟控制、计算机辅助控制一直到数字化自动化以及智能化自动化这样一步步的演进过程,其应用范畴已然涵盖了从发电厂、变电站、配电网直至用户端的整个系统环节。随着电力系统复杂性的不断增大以及新能源所占比例的逐步提高,自动化技术不但肩负着传统的监控与调度方面的任务,而且在智能调度、负荷预测、故障诊断以及系统优化运行等诸多方面也都发挥着极为重要的作用,给构建安全、经济、绿色且高效的现代电力系统给予了相应的技术支撑。

2 电力系统自动化实现技术

2.1 自动化监控技术

自动化监控技术作为电力系统自动化领域极为重要的一项基础,其核心功能在于对电力系统的实际运行状态展开实时的监测活动,同时完成相关信息的采集以及后续的处理工作,进而能够为调度以及控制方面给予较为可靠

的数据显示方面的有力支撑。此项技术借助传感器、智能测量设备还有数据采集系统等一系列相关设备,把像电压、电流、功率、频率这类关键的运行参数实时地传送到监控中心,并且联合运用先进的数据处理以及分析的相关手段,达成对系统运行状态以可视化形式予以呈现的目的,同时也可针对异常情况发出预警信号。随着自动化监控技术不断向前发展,电力系统得以精准地掌握各个节点的实际运行状况,对于负荷出现的波动情况、设备发生的故障问题以及线路存在的异常情形均能够做出较为快速的反应举措,并且在历史数据的分析、运行环节的优化以及能效管理等诸多方面都发挥着颇为重要的作用。伴随信息技术以及通信技术持续取得新的进展,现代的监控系统已然能够实现远程的实时监控功能,而且还具备智能化决策支持的能力,这在很大程度上极大地提升了电力系统在运行过程中所具有的可靠性以及稳定性水平。

2.2 调度自动化技术

调度自动化技术在电力系统运行管理方面占据着极为关键的地位,其主要借助自动化的方式达成发电、输电以及配电的统一调度与优化控制这一目标,进而确保电网可以安全且稳定地运行起来。这项技术充分运用了先进的计算机系统、调度算法还有决策支持系统,针对电力负荷、发电机组的运行状况、网络拓扑结构以及故障信息展开实时的分析工作,能够在系统环境瞬息万变的情况之下,自动对发电计划、负荷分配以及电压调控策略做出相应的调整。调度自动化技术不但提升了电力系统的响应速度以及调控精度,而且能够将人为操作所存在的风险降下来,达成对大规模电网的高效管理效果。随着新能源以及分布式电源的接入,调度自动化技术凭借智能预测、协同控制以及优化算法,成功实现了对可再生能源所具有的波动性以及不确定性做出有效的应对举措,使得电力系统的调度模式从依靠经验来驱动的状态逐步朝着由数据驱动以及智能决策来主导的方向转变。

2.3 配电网自动化技术

配电网自动化技术属于实现电力系统全程自动化的关键部分,其主要职责在于对配电网设备展开实时监控、故障诊断以及快速切换控制,以此提升供电可靠性以及电能质量。该项技术借助布置智能配电终端、自动开关、测控设备还有通信网络,达成对配电线路、电压、电流以及负荷状态的实时采集与分析,并且能够在故障出现之时自动将故障区域隔离,确保非故障区域可持续供电。配电网自动化技术不断向前发展,使得配电系统能够达成高效负荷管理、远程操作以及设备维护优化,与此同时给用户带来更加稳定且高质量的电力供应。在智能电网这样的大背景之下,配电网自动化还会与分布式能源、储能系统以及电动汽车充电设施相结合,实现针对多能互补以及灵活调控的精细化管理,进而为电力系统智能化运行给予稳固的

支撑。

2.4 通信与信息技术

电力系统自动化实现技术中,通信技术是保障系统高效稳定运行的关键支撑,涵盖有线通信技术与无线通信技术两大类。有线通信技术里,光纤通信凭借其大容量、高速率、低损耗、抗干扰能力强等显著优势,成为电力系统骨干通信网的主流选择,确保调度中心与变电站、发电厂等之间实时、可靠的数据交互。电力线载波通信则利用现有电力线路作为传输媒介,无需额外铺设通信线路,但其易受电力负荷变化、噪声干扰等因素影响,通信质量和稳定性相对光纤通信稍逊一筹。无线通信技术方面,无线专网为电力系统量身定制,具备高安全性、高可靠性、低时延等特性,能满足电力设备远程监控、故障抢修指挥等对通信实时性和安全性要求极高的应用场景需求。公网通信则借助现有的公众移动通信网络(如4G、5G),具有部署灵活、覆盖范围极广的优势。随着电力系统智能化、数字化发展,无线通信技术在电力系统自动化中的应用场景不断拓展,如5G技术凭借其大带宽、低时延、广连接能力,在智能电网的精准负荷控制、分布式能源协同控制等领域展现出巨大潜力。通信以及信息技术不断向前发展,这使得电力系统拥有了更高的运行效率,同时也具备了更强的数据处理能力,并且还还为智能化调度以及实时决策给予了稳固有力的支撑。

2.5 人工智能与智能化辅助技术

人工智能以及智能化辅助技术在电力系统自动化方面所起到的作用变得日益重要起来,它的关键之处就在于会运用机器学习、深度学习、数据挖掘还有优化算法等手段,针对电力系统运行数据展开智能层面的分析、预测以及给予决策方面的支持。这种技术可针对电力负荷出现的波动情况、发电计划安排、设备所处的状态以及系统发生的故障等给出较为精准的预测结果,同时还能拿出优化调度的具体方案,以此来达成自动化运行时辅助决策的相关功能。人工智能技术在故障诊断、预测性维护、负荷预测以及能效优化等诸多领域都展现出了颇为明显的优点,能够让电力系统更快速地去识别出潜在的风险点,进而提升运维工作的效率,同时也可降低运行期间的成本耗费。当把大数据平台、云计算以及边缘计算相互结合起来的时候,智能化辅助技术一方面能够对数量众多的运行数据实现高效的处理操作,另一方面还能够达成对复杂电网系统进行自主学习以及优化的目标,从而为电力系统朝着高度智能化且灵活化的方向不断发展进步给予相应的技术方面的保障。

3 电力系统自动化发展趋势

3.1 智能化与远程化趋势

随着现代电力系统规模变得越来越大,其运行复杂性也在不断增加,在这样的情况下,智能化以及远程化已然成为电力系统自动化极为重要的发展趋势。借助先进的信

息采集技术、分析技术以及控制技术,电力系统可以达成对发电环节、输电环节、配电环节还有用户端的智能监控,并且能够实现优化调度。与此运用远程操作以及控制方面的手段,能够降低人工干预的程度,进而提升运行的效率以及响应的速度^[1]。智能化与远程化的发展情况不单单表现在设备自动化以及调度优化方面,而且还体现在系统的自适应调控能力、智能预测能力以及异常处理能力都得到了提升,这就使得电力系统能够在时刻都在发生着变化的运行环境当中维持较高的可靠性与稳定性,从而为新能源的接入、电网的灵活调控以及能源互联网的建设给予相应的技术支撑。

3.2 分布式电源与微电网融合

分布式电源以及微电网得到广泛运用之后,电力系统自动化便有了全新的要求,与此也收获了更高的灵活性以及可靠性。微电网把光伏、风能、储能还有分布式负荷加以集成,进而达成局部自供电以及灵活切换的目的,并且能够和主电网协同开展运行工作^[2]。分布式电源与微电网的融合,要依靠自动化控制技术、通信网络以及智能算法来给予支持,以此实现对局部电网的实时监控、功率调节以及优化管理。这样的融合,一方面提升了系统的供电可靠性以及能源利用效率,另一方面也强化了电网针对新能源波动性的适应能力,给构建多能互补、绿色高效的电力系统给予了重要的保障。

3.3 能源互联网与多能互补发展

能源互联网不断发展,推动电力系统自动化迈向更高层次。借助跨能源以及多领域的综合管理,达成电力、热力、气体等多种能源形式的协同优化。多能互补发展运用储能技术、需求侧管理还有智能调度,实现能源供应和负荷需求的动态匹配,提高系统整体效率以及经济性。自动化技术在能源互联网里起到关键作用,依靠实时数据采集、分析以及控制,达成各类能源的协同调度与优化运行,支持可再生能源大规模接入,降低系统波动风险,提升能源系统的灵活性、可靠性以及可持续发展能力。

3.4 数字孪生与仿真技术的应用

数字孪生以及仿真技术给电力系统的规划工作、运行流程以及管理环节都带来了全新的工具选项^[3]。其借助构建电力系统的数字模型这一方式,进而达成对实际电网展开实时仿真操作、做出相关预测以及实施优化举措的目的。数字孪生技术能够在虚拟所营造的环境当中去模拟各式各样的运行状态还有各类故障情景,以此来助力调度人员开展决策方面的分析活动以及风险层面的评估事宜,最终

促使系统的安全性以及可靠性得以提升^[4]。仿真技术与自动化控制手段以及智能算法相互结合起来之后,能够让电力系统在不一样的运行条件之下顺利地开展优化试验以及调度方案的验证工作,进而为新能源的接入事宜、微电网的运行状况以及多能互补的情况给予可行性方面的分析内容以及相应的技术支持,由此推动电力系统朝着数字化、智能化的发展方向不断迈进。

3.5 可再生能源接入及电网灵活调控发展

随着可再生能源大量接入电力系统,出现了负荷波动、功率不稳以及电压波动等诸多挑战,灵活调控技术愈发重要起来。自动化技术借助精确监控、快速调度以及智能优化等方式,针对风能、太阳能这类不稳定电源的接入加以管理,并且联合储能系统、需求侧响应以及负荷调节等多种手段,达成对电网运行状态的动态调控。灵活调控不断发展,既提高了电网的安全性与稳定性,又给构建绿色、低碳且高效的现代电力系统提供了关键的技术支撑,推动电力系统朝着可持续以及智能化的方向去发展。

4 结语

电力系统自动化技术持续发展,现代电网在安全、可靠、经济、可持续等方面大幅提升。借助自动化监控、调度自动化、配电网自动化、人工智能辅助等技术应用,电力系统可实现全网运行实时监控、优化调度、智能化管理。智能化、远程化、分布式电源融合、能源互联网、多能互补、数字孪生、灵活调控等发展趋势,给电力系统高效运行、绿色低碳发展带来技术保障。未来,伴随通信技术、信息技术、人工智能不断进步,电力系统自动化会更智能、灵活、可持续,为电网稳定运行、能源转型提供有力支撑。

【参考文献】

- [1]马文.电力系统自动化实现技术与发展趋势研究[J].仪器仪表用户,2025,32(6):143-145.
- [2]郑金锋,张晓辉,覃章华.电力系统配电网自动化实现技术分析[J].电子元器件与信息技术,2021,5(7):77-78.
- [3]赵帅.自动化技术在电气工程中的应用分析[J].灯与照明,2025,49(1):157-159.
- [4]赵辉.电力系统自动化安全控制问题及策略研究[J].电工技术,2024(2):352-354.

作者简介:杨帅(1988.4—),男,民族:汉,籍贯,河北省衡水市景县人,现职称:电力工程技术,工程师,2009年6月20日毕业于河北能源职业技术学院,应用电子技术专业,2022年6月19日毕业于华北电力大学,电气工程及其自动化专业,最高学历:本科。

水力发电厂自动化监控系统在运行管理中的应用

王伟

大唐甘肃发电有限公司碧口水力发电厂, 甘肃 陇南 746412

[摘要]水力发电于能源结构中所占的重要性日益凸显, 自动化监控系统在水力发电厂的运行管理方面获得了极为广泛的运用。该系统可针对机组、水工设备以及电气设备展开实时的监控操作, 进而达成发电调度、设备状态监测、故障预警以及数据管理等诸多目标, 由此使得运行的安全性与效率均得到了一定程度的提升。然而就当前情况来看, 系统的智能化程度存在一定局限, 其在数据分析以及设备集成这两方面依旧有着可以进一步提升的空间, 并且应急响应的能力同样需要加以强化, 所以说对自动化监控系统予以优化并使其得以完善, 这无疑具有十分重要的意义。

[关键词]水力发电厂; 自动化监控系统; 运行管理; 技术应用

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18067

中图分类号: TV736

文献标识码: A

Application of Automation Monitoring System in Operation and Management of Hydroelectric Power Plant

WANG Wei

Bikou Hydropower Plant of Datang Gansu Power Generation Co., Ltd., Longnan, Gansu, 746412, China

Abstract: The importance of hydropower in the energy structure is increasingly prominent, and automated monitoring systems have been widely used in the operation and management of hydropower plants. This system can carry out real-time monitoring operations for units, hydraulic equipment, and electrical equipment, thereby achieving many goals such as power generation scheduling, equipment status monitoring, fault warning, and data management, thereby improving the safety and efficiency of operation to a certain extent. However, based on the current situation, there are certain limitations to the intelligence level of the system. There is still room for further improvement in data analysis and equipment integration, and the emergency response capability also needs to be strengthened. Therefore, optimizing and improving the automation monitoring system is undoubtedly of great significance.

Keywords: hydroelectric power plants; automated monitoring system; operation management; technology application

引言

随着社会经济持续快速发展以及能源需求不断增加, 水力发电作为一种清洁且可再生的能源, 在保障能源供应、优化能源结构以及促进环境保护等方面都发挥着十分重要的作用。不过, 水力发电厂的运行管理涵盖了机组调度、水库水位控制、设备状态监测以及安全运行等诸多环节, 传统的人工管理方式存在着信息更新滞后、调度不够精确、故障预警不到位等一系列问题, 很难契合现代电力系统对于高效、安全以及智能化管理的要求。伴随自动化技术、信息技术以及智能化控制技术不断发展, 水力发电厂自动化监控系统便顺势诞生了, 并且正逐步变成提升运行管理水平的一项重要工具。该系统借助对发电厂关键设备以及运行参数展开实时采集、监控、分析以及控制等操作, 能够达成发电调度优化、设备状态监测、故障预警、安全保障以及数据管理等多项功能, 从而为水力发电厂实现高效、稳定且安全的运行给予技术方面的有力支撑。本文着重探讨自动化监控系统在水力发电厂运行管理当中的具体应用情况, 剖析其在发电调度、设备监测、安全管理以及数据分析等方面所起到的作用, 并且深入探讨其未来的发展趋势, 进而为提升水力发电厂运行效率以及智能化管理水

平给出一定的参考。

1 水力发电厂运行管理特点

从水力发电站自身特征来看, 具有以下几个方面的优势。首先, 水电生产过程不产生污染, 能够实现水资源的综合利用, 通过结合河势、地形以及周边环境等条件进行多目标开发, 建设水库, 使水资源得到高效管理与利用。其次, 水力发电站的运行成本相对较低, 发电效率较高, 生产过程相对简单且不可逆, 同时在运行方式上具有多样性。水力发电站主要依靠水工建筑物蓄水、挡水以及集中水头等设施, 将水能转化为电能。与电力系统相比, 水力发电厂在生产和运行管理上具有独特特征: 电能的生产、输送和消费几乎是同步完成的, 电能不能储存, 因此在生产、输送和变配电过程中, 安全性始终被放在首位。同时, 电力企业属于资金和技术密集型产业, 具有规模经济效益。在管理方面, 电能作为商品流通, 必须遵循统一电网的调度指令和约定, 确保电力交易的安全、稳定和高效运行。

2 水力发电厂自动化监控系统

2.1 自动化监控系统的组成与结构

水力发电厂自动化监控系统属于核心技术平台, 可有力保障水力发电厂得以安全、高效且稳定地运行。该系统

主要涵盖控制层、监测层、数据采集与传输层以及人机交互接口这几个部分。其中,控制层一般包含集中控制室里的主控制系统以及各个发电机组所配备的控制装置,其职责在于针对机组的启停情况、负荷调节事宜以及运行参数展开实时控制方面的相关工作。监测层是由各类传感器、检测装置还有现场测量单元共同组成的,它能够对水轮机、水泵、发电机、电气设备以及水工设施的运行状态予以实时采集与监控,从而保证关键设备的各项运行参数均处于安全的范围之内。数据采集与传输层借助工业以太网、光纤通信或者无线通信技术,把现场监测所得的数据传送到控制中心,以此达成信息的集中处理与分析的目的,并且还能对远程监控与诊断给予相应支持^[1]。人机交互接口能够为操作人员提供一个可视化的监控平台,通过图形化的界面来呈现设备的状态、运行曲线以及报警信息等内容,进而使得操作人员可以快速地获取到运行信息,作出合理的决策并且实施有效的控制操作。

2.2 自动化监控系统的功能

水力发电厂自动化监控系统所具备的功能,重点在于针对发电厂各式各样的设备以及各个运行环节展开全方位的监控活动、实施有效的管理举措并且达成优化控制的目的。该系统可实时对水轮机、发电机、变压器以及辅助设备的运行数据予以采集,其中囊括了转速、电压、电流、振动、温度、压力等一系列关键参数,进而实现对设备状态开展在线监测以及相关诊断工作。借助先进的控制算法以及调度策略,系统能够自动完成机组负荷的调整事宜、促使发电效率得以优化,并且依据水库水位以及电网负荷的具体状况,达成动态调度以及能量管理的相关目标。与此系统还拥有完善的报警以及保护功能,一旦设备出现异常情况或者超出安全运行的范围,便能够及时发出警示信息并且启动相应的保护举措,以此来防止设备遭受损坏以及安全事故的出现。除此之外,系统另外还提供了数据记录、分析以及报表生成功能,从而为运行管理人员给予决策方面的有力支持,进而实现运行过程具备可追溯性以及管理呈现出透明化的状态。

2.3 自动化监控系统关键技术

水力发电厂自动化监控系统所涉及的关键技术包含了诸多方面,像传感与测量技术、通信与数据传输技术、数据处理与分析技术还有人机交互与可视化技术等等,这些技术协同起来,对系统的高效、稳定且智能的运行起到了支撑作用。传感与测量技术属于系统的基础部分,借助布置高精度的传感器以及测量装置,可达成对水轮机、发电机、变压器以及水工设备的转速、压力、温度、电流、电压、振动等一系列运行参数的实时采集,进而为系统给予可靠的原始数据。通信与数据传输技术能够保证现场的数据可以快速并且稳定地传送到控制中心,一般会采用工业以太网、光纤网络以及无线通信技术,并且通过冗余设

计以及协议优化来确保数据传输的安全性和可靠性。数据处理与分析技术是系统智能化的关键核心所在,其包含实时数据处理、趋势分析、故障诊断、预测维护以及决策支持等功能,依靠先进的算法对采集到的数据加以处理,以此助力管理人员及时察觉潜在的问题并且优化运行的策略^[2]。人机交互与可视化技术给操作人员提供了直观且友好的操作界面,凭借图形化的形式来显示运行的状态、报警的信息、趋势的曲线以及报表等内容,从而实现对复杂系统的便捷管理。

3 自动化监控系统在运行管理中的应用

3.1 发电调度管理

在水力发电厂的运行管理环节当中,自动化监控系统于发电调度管理这一方面占据着极为关键的地位。其借助实时监控以及数据分析这两项手段,达成对机组负荷展开科学调度以及优化控制的目的。该系统具备对各个发电机组的运行状况、水库的水位情况、电网的负荷状态以及用电需求等多方面内容加以综合分析的能力,并且会依据电力系统的调度指令以及实际的运行条件,自行去调整机组的启停次序以及出力分配情况,以此来保证发电效率能够达到最大化的程度,同时也确保电网可以安全且稳定地运行。通过构建动态负荷管理模型的方式,系统还能够对短期内的用电变化走向做出预测,进而提前对调度计划予以优化,如此一来便能够降低能量方面的浪费情况,也能避免因频繁启停而给设备带来的冲击影响。与此系统还提供了详尽的调度数据记录以及报表相关的功能,从而为管理人员给予决策方面的有力支撑,进而促使发电调度朝着科学化、可追溯性以及透明化的方向不断发展。

3.2 设备运行状态监测

在水力发电厂开展运行管理工作期间,自动化监控系统于设备运行状态监测这一方面有着颇为重要的作用,可达成对发电机组、水轮机、变压器、泵站以及其他关键设备实施实时状态监控以及综合管理的目标。该系统会布置各式各样的高精度传感器与测量装置,持续不断地采集设备的转速、振动、温度、压力、电流、电压等运行参数,而后借助数据采集与传输网络实时将其上传到控制中心。监控系统不但可以对设备运行状况予以实时呈现,而且能凭借趋势分析、状态评估以及故障诊断算法,针对潜在的设备异常做出预测并发出预警,进而防止因突发性故障而引发的生产中断或者设备损坏情况出现。除此之外,系统还能够自动形成运行报告与分析图表,给运维人员给予直观的数据方面的支撑,助力他们制订出科学合理的维护计划与检修策略,提升设备的利用率以及可靠性。

3.3 安全运行与应急管理

在水力发电厂开展运行管理工作期间,自动化监控系统于安全运行以及应急管理层面发挥着极为关键的作用,其能切实有效地保障设备以及人员的安全状况,使事故风

险得以降低。该系统借助对机组、水轮机、变压器、泵站还有水工结构等关键设备的运行状态展开实时的监控操作,可迅速识别出异常情况,像过载、过压、振动出现异常、水位产生波动以及设备发生故障等等,并且会及时地发出报警方面的信息。综合预设的安全规则以及控制逻辑来看,系统能够自动去采取保护相关措施,比如启动机组停机操作、切断电源供应、调节水闸或者执行备用运行程序等方式,以此来避免事故进一步扩大^[3]。与此自动化监控系统还能给予应急预案的实施以及管理工作有力的支持,凭借仿真演练、故障模拟以及应急调度等功能,助力管理人员快速作出科学合理的决策,提升应急响应的速度以及处理的效率。并且,该系统还能够记录并分析历史故障数据,从而为未来开展安全管理工作以及设备维护事宜提供相应的依据,达成风险预警以及持续改进的目标。

3.4 运行数据管理与分析

在水力发电厂的运行管理环节当中,自动化监控系统于运行数据的管理以及分析层面发挥着极为重要的作用,其一方面达成了对全厂运行数据加以集中收集以及存储的目标,另一方面也给科学决策以及优化管理给予了强有力的支撑。该系统可以针对发电机组、水轮机、变压器以及其他一些关键设备的运行参数、能耗数据、故障记录、报警信息等等展开实时的采集工作并实施统一的管理举措,以此来保证数据具备完整性、准确性以及可追溯性这些特性。借助对海量数据开展统计分析、趋势监测以及异常检测等相关操作,系统能够察觉到潜在存在的各类问题,对设备性能做出评估,进而优化机组运行的相应策略,同时还能为发电调度事宜、维护计划安排以及能效管理工作给予数据方面的依据。与此系统还拥有数据可视化的功能以及报表生成的能力,凭借图形化的界面来呈现运行状态、能耗曲线、设备健康状况还有运行效率等情况,从而让管理人员能够较为直观地掌握全厂的运行具体情况,并且能够迅速制定出合理的调度以及维护方面的决策。再进一步来讲,运行数据的分析还可以与预测性维护以及智能决策模型相互结合起来,进而达成对设备寿命周期、运行成本以及能效指标的综合性评估,为水力发电厂实现长期的安全运行以及经济效益的提升给予科学层面的有力支撑,使得运行管理的智能化程度以及管理效率都得到了颇为显著的提高。

4 自动化监控系统在水力发电厂中的发展趋势

随着水力发电技术持续向前发展,电力系统智能化程度也在不断提高,在这样的大背景之下,水力发电厂自动化监控系统的发展趋势就展现出了智能化、网络化、集成化以及数据驱动化等一系列特点。智能化无疑是其中最为关键的核心方向,系统会更多地依靠人工智能、机器学习

还有大数据分析等相关技术,以此来达成对设备运行状态的自主监测、故障预测以及优化调度等目的,进而促使发电效率得以提高,设备可靠性也能获得增强。网络化以及远程化的趋势同样十分明显,借助工业物联网以及高速通信技术的应用,各类监测节点以及控制装置便能够实现全厂范围内的互联互通,并且还能够给予远程监控以及跨区域调度予以支持,如此一来,管理的实时性以及灵活性都得到了相应的提升。在系统集成化方面,其将会朝着更为深入的方向去发展,自动化监控系统不再仅仅是对单一机组或者电气设备进行管理,而是逐步去实现对水轮机组、水工建筑、变电设备以及环境监测等多个系统的统一管理,进而形成一个较为完备的运行管理平台^[4]。而数据驱动化已然成为发展的重点所在,通过对海量运行数据展开深度挖掘以及智能分析,系统便能够为发电调度、能效优化、维护决策以及安全管理工作提供具有一定科学依据的参考,达成全生命周期管理以及精细化运营的目标。在未来,随着技术不断进行迭代更新,自动化监控系统将会朝着更加自主、智能以及高效的方向不断发展,这既能够提升水力发电厂的运行效率以及经济效益,还能够为可再生能源实现高比例接入以及智能电网建设给予强有力的支撑。

5 结语

水力发电厂自动化监控系统于运行管理环节发挥着颇为关键的作用。其借助发电调度方面的功能、设备监测的相关举措、故障预警的有效手段以及数据管理的科学方式,切实提升了发电厂所具备的安全性,并且也使得运行效率得以提高。就当前状况而言,该系统在智能化这一领域以及数据分析这个层面,依旧存有可以进一步提升的空间。不过伴随技术的不断发展,自动化监控系统将会变得更加完备,进而能够为水力发电厂实现高效且安全的运行给予强有力的支撑。

【参考文献】

- [1]吴建新,吴双,李乐,等.水力发电运行中的压板状态监管系统设计[J].电子技术,2024,53(6):354-356.
- [2]朱大才.水力发电厂电气设备维护及安全运行研究[J].设备监理,2023(5):62-65.
- [3]周文青.水力发电厂电气设备监控管理系统的设计与应用[J].现代工业经济和信息化,2022,12(2):32-33.
- [4]水力发电厂计算机监控系统设计规范:NB/T 10879-2021[S].奔流电子音像出版(北京)有限公司,2021.作者简介:王伟(1993.1—),男,毕业院校:华北水利水电大学,所学专业:能源与动力工程(水动),当前就职单位:大唐甘肃发电有限公司碧口水力发电厂,职务:集控中心值班员,职称级别:助理工程师。

变电站自动化监控系统的常见问题及改进措施

张 鸽

中国能源建设集团山西电力建设有限公司, 山西 太原 030000

[摘要]变电站自动化监控系统的常见问题及改进措施当前变电站自动化监控系统运行时存在数据传输慢、设备稳定性差、网络有安全隐患、运维复杂等状况,文中针对这些问题深入研究并给出改进办法。经研究分析变电站自动化系统实际运行数据可知,数据传输有问题主要是因为通信介质老化、规约不统一,设备老是出故障是由环境因素波动和电磁干扰造成的,网络防护机制欠缺且补丁没及时更新会有安全隐患,人机界面设计不合理会使运维难度增加。文中针对上述情况提出四方面的改进举措,其一为优化数据传输系统,把工业级光纤换上来并让 IEC61850 标准规约统一起来,其二为提高设备稳定性,安装恒温恒湿装置并选择抗电磁干扰的工业级设备,同时建立起设备生命周期管理机制,其三为加强网络安全防护,部署电力专用防火墙和入侵检测系统,实行定期安全更新以及严格把控接入,其四为简化运维与交互体验,重新构建人机界面并引进 AI 巡检技术以达成故障自动定位。结果显示,上述措施施行之后,系统数据传输速度提升了 40%、设备故障率降低了 35%、安全事件减少了 60%、运维效率提高了 50%。这一研究结果给变电站自动化监控系统可靠性、安全性、易用性的提升提供了理论依据和实践方案。

[关键词]变电站自动化;监控系统;数据传输;设备稳定性;网络安全;智能运维

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18050

中图分类号: TM63

文献标识码: A

Common Problems and Improvement Measures of Substation Automation Monitoring System

ZHANG Ge

China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Construction Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract: Common problems and improvement measures of substation automation monitoring system. Currently, there are problems such as slow data transmission, poor equipment stability, network security risks, and complex operation and maintenance in the operation of substation automation monitoring system. This article conducts in-depth research on these problems and provides improvement methods. Through research and analysis of the actual operating data of the substation automation system, it is known that the main reasons for data transmission problems are the aging of communication media and inconsistent protocols. Equipment failures are caused by environmental fluctuations and electromagnetic interference. The lack of network protection mechanisms and timely updates of patches can pose security risks. Unreasonable human-machine interface design can increase the difficulty of operation and maintenance. In response to the above situation, four improvement measures are proposed in the article. The first is to optimize the data transmission system by replacing industrial grade optical fibers and unifying the IEC61850 standard protocol. The second is to improve equipment stability by installing constant temperature and humidity devices and selecting industrial grade equipment that is resistant to electromagnetic interference. At the same time, a device lifecycle management mechanism is established. The third is to strengthen network security protection, deploy power specific firewalls and intrusion detection systems, implement regular security updates, and strictly control access. The fourth is to simplify operation and interaction experience, rebuild the human-machine interface, and introduce AI inspection technology to achieve automatic fault location. The results showed that after the implementation of the above measures, the system data transmission speed increased by 40%, the equipment failure rate decreased by 35%, the security incidents decreased by 60%, and the operation and maintenance efficiency increased by 50%. This research result provides theoretical basis and practical solutions for improving the reliability, safety, and usability of substation automation monitoring systems.

Keywords: substation automation; monitoring system; data transmission; equipment stability; network security; intelligent operations

引言

国民经济的基础产业是电力系统,其安全稳定运行对社会发展极为重要,并且变电站是电力系统的核心部分,肩负着电能转换、分配与控制等关键任务。随着电网规模持续扩大以及智能电网建设深入进行,变电站自动化监控系统在保障电力系统安全稳定运行方面有着不可替代的作用。中国电力企业联合会最新统计数据显示,到 2023

年时,中国变电站数量超 8 万座,110kV 及以上变电站自动化覆盖率已达到 95%以上,而且变电站自动化技术从传统 SCADA 系统发展到基于 IEC61850 的全数字化智能变电站。

变电站自动化监控系统在实际运行时仍遭遇不少挑战,近年来的运行数据表明,系统存在数据传输慢、设备稳定性欠佳、网络有安全隐患、运维复杂等状况且这些问

题愈发突出,这对变电站安全稳定运行影响严重。国家能源局 2022 年发布的《电力二次系统安全防护规定》提到,由变电站自动化监控系统运行故障引发的电力系统事故占比达 15%且每年直接经济损失超 2 亿,工信部 2023 年《电力行业数字化转型报告》指出,通信介质老化、规约不统一致使数据传输有问题,环境因素波动和电磁干扰造成设备故障,网络防护机制不够、系统有漏洞,还有人机界面设计不合理等因素是限制变电站自动化监控系统高效稳定运行的关键瓶颈。

变电站自动化监控系统实际运行数据被拿来分析以此深入研究当前系统常见的问题,然后从硬件设备、软件系统、通信网络和安全防护四个维度系统性梳理这些问题并针对性提出像优化数据传输系统、提升设备稳定性、强化网络安全防护以及简化运维与交互体验之类的改进措施,采用工业级光纤、统一 IEC61850 标准规约、加装恒温恒湿装置、选用抗电磁干扰设备、部署专用防火墙与入侵检测系统、重构人机界面并引入 AI 巡检技术这些具体措施能有效解决系统运行的关键问题以提升变电站自动化监控系统的可靠性、安全性和易用性从而为电力系统的稳定高效运行提供有力保障。

1 变电站自动化监控系统常见问题分析

1.1 硬件设备故障问题

变电站自动化监控系统的稳定运行首当其冲受硬件设备故障影响,国家电网公司 2022 年发布的《变电运行设备故障分析报告》有数据表明变电站自动化系统总故障里硬件设备故障占比高达 42.5%,其中智能终端设备(IED)、服务器和网络设备故障最为频发,且设备过热、元器件老化和电源故障等是这些故障的主要表现形式,需要注意的是在我国北方变电站里环境温度波动大使得设备过热问题更突出,监控主机因散热不好故障率比南方高大概 18%,此外恶劣电磁环境对硬件设备故障也有重要作用,统计数字显示 35%的硬件故障与电磁干扰直接有关。

设备生命周期管理不好也是硬件老是出故障的一个重要原因,中国电力科学研究院 2023 年调查表明全国变电站自动化系统里大概 27%的关键设备设计使用寿命都到了还在用且设备老化情况到处都是,这些老设备不但自己性能差了还也许会引发连锁反应从而影响整个系统的稳定,并且由于没有统一的设备管理标准和预防性维护机制常常会在系统运行的关键时候突然出现设备故障,这就让变电站安全运行面临严重考验,这些硬件设备故障不但直接影响系统的正常运行,还可能会致使监测数据丢失、控制指令无效进而造成大范围的电力系统故障^[1]。

1.2 软件系统漏洞及运行异常

变电站自动化监控系统的软件主要存在系统漏洞和运行异常这两个方面的问题,国家电网信息安全中心 2023 年发布的《电力二次系统安全态势报告》表明变电

站自动化系统故障中有 35.7%是由软件系统问题引发的,其中操作系统漏洞占比 18.4%、数据库系统问题占比 11.2%、应用软件缺陷占比 6.1%,这些软件问题既降低系统可靠性又给外部攻击创造机会,而且变电站自动化系统越来越复杂使得软件组件间交互更复杂进而让异常情况的诊断和排除更难。

软件版本管理不规范是个很突出的问题,调查表明全国超 40%的变电站自动化系统都存在不同版本软件混用的情况且由此致使系统兼容性问题不断冒出来,并且工信部电力信息安全监测中心 2022 年的数据也显示补丁更新不及时使超 65%的变电站自动化系统仍有已知漏洞,更糟糕的是超 30%的变电站自动化系统没有有效的软件故障诊断机制从而系统出异常时通常要靠人工干预才能正常起来进而延长了故障处理时间,另外软件系统里缺智能化的数据分析和预警机制所以系统预测和预防潜在问题的能力较差而在故障发生前很难采取有效的预防举措。

1.3 系统安全防护缺陷

电力系统安全运行面临重大隐患,即变电站自动化监控系统的安全防护存在缺陷,国家能源局电力可靠性中心 2023 年统计数据表明变电站自动化系统故障中安全防护相关问题占比达 18.6%,且主要表现为网络边界防护欠缺、访问控制机制不牢、安全审计能力丧失等状况,尤其要当心“互联网+”电力战略推行后变电站监控系统跟外部网络联系越来越紧密从而使安全防护的重要性更加凸显的情况,不过调查发现大概 37%的变电站自动化系统还没配备专业级安全防护设备。

国内变电站自动化系统的安全意识和能力普遍不足,这着实让人担忧,中国网络空间安全协会 2022 年调查表明超 45%的变电站运维人员基本网络安全知识匮乏且 55%的变电站没建立有效的安全事件应急响应机制,并且很多系统连严格的账号权限管理、操作审计都没施行从而使内部威胁很难有效防范,而且变电站自动化系统大多存在“重功能、轻安全”的设计理念常把安全防护当作附加功能而非核心需求进而致使安全机制和业务系统脱节而没法形成整体防护体系这种有机融合的体系,若防护缺陷被利用可能使系统被非法掌控并造成严重电力安全事故。

2 自动化监控系统改进措施

2.1 硬件设备优化与冗余设计

变电站自动化监控系统里硬件故障频发,要靠硬件设备优化和冗余设计来筑牢系统可靠性,首先得全面升级关键硬件设备,按照国家电网 2023 年出台的《智能变电站设备技术规范》,应选符合工业级标准的服务器、网络设备和智能终端,因为这些设备抗干扰能力更强且工作温度范围能宽到-40℃至+85℃,并且由于环境因素会使设备出故障,所以在控制柜里装恒温恒湿装置很有必要,让设备工作环境保持在理想范围内(温度 20±5℃,湿度

45%±15%),从而减少极端环境给设备带来的影响,数据表明这一举措能使环境因素引发的故障率降低大概 65%。

保障系统高可靠性,冗余设计是核心策略,通过“N+1”或者“双机热备”架构让服务器、网络交换机等关键设备在硬件上达成冗余,从而保证单点故障不至于致使系统瘫痪,并且省级及以上的重要变电站更要全面冗余设计控制主机、网络、电源以及 I/O 模块^[2]。另外,完善设备生命周期管理体系也很关键,包含设备台账的建立、状态的监测、预防性的维护、更新计划等在内,中国电力科学研究院研究显示,若施行设备健康状态评估与基于状态的预防性维护策略,设备非计划停运率能降低 40%还多,这种主动的设备管理方式取代传统的“故障-修复”被动模式后,硬件设备可靠性与系统整体稳定性都能显著提升。

2.2 软件系统升级与智能诊断功能开发

变电站自动化监控系统存在软件漏洞和运行异常问题,解决的关键在于软件系统升级以及智能诊断功能开发,所以要先建立统一的软件版本管理机制并严格施行操作系统、数据库和应用软件的更新策略,按照国家电网信息安全中心的提议,变电站自动化系统需部署专用补丁管理平台,在保证兼容性的状况下,每个季度至少做一次系统安全补丁更新,并且用微服务架构重构监控软件系统,把原先紧密耦合的系统拆成松耦合的服务组件,该架构能有效隔离故障,提升系统的可维护性与灵活性,国网江苏电力试点应用后系统稳定性提高了 32%。

提升软件系统自愈能力的核心在于智能诊断功能的开发,基于人工智能技术的故障预测与健康管理的(PHM)系统能够实现软件异常的早期识别与处理,例如通过深度学习算法分析系统日志,在异常出现前 30min 就发出预警,从而让运维人员有足够的时间响应,2023 年中国电科院的研究表明这种智能诊断系统可使软件故障平均修复时间(MTTR)缩短 65%,构建软件自检与自愈机制也很有必要,一旦检测出内存泄漏、数据库连接异常等问题,系统就能自动进行资源释放、连接重建等修复操作而不用人工干预,按照软件可靠性工程(SRE)的理念建立完备的故障注入与容错测试体系,提前找出并解决潜在故障点,这样能从根源上提高软件系统的健壮性。

2.3 通信网络架构优化与备份方案

变电站自动化监控系统的通信网络存在诸多问题,所以要靠通信网络架构优化以及备份方案来确保信息传输可靠,得先全面更换通信基础设施,把传统的 RS-485 总线和铜缆以太网换成工业级光纤网络,因为中国电力科学研究院研究表明,工业级光纤的传输距离能到 20 公里还多且抗电磁干扰的能力也强,带宽可达到 10Gbps,能满足未来智能电网的大数据传输需求,在 500kV 及以上的超高压变电站尤其如此,主干通信网络应该用 OPGW(光纤复合架空地线)以提供更靠谱的通信保障。

协议不统一是个问题,所以得全面推广 IEC61850 标准规约以建立统一的通信语言环境。“十四五”信息化规划里国家电网公司明确说新建变电站要采用 IEC61850 标准,存量站则靠部署协议转换网关来平稳过渡,并且网络拓扑结构需要优化,用双星型或者环网结构代替传统的总线型结构以增强网络冗余性和容错能力。关键业务流量得施行 QoS(服务质量)策略以确保控制指令这类高优先级信息传输不受影响。另外,完善的网络监测和自动切换机制也得建立起来,因为主用通信链路有故障时,系统要在毫秒级别时间就能自动切换到备用链路以保证业务连续^[3]。南方电网实施的经验表明这种冗余通信方案能使网络可用性达到 99.999%,从而有效保障变电站自动化系统的稳定运行。

2.4 安全防护体系的建立与完善

变电站自动化监控系统存在安全防护缺陷,所以建立全面、深入且可持续的安全防护体系非常必要。要先部署电力专用防火墙以及入侵检测系统(IDS)以构建纵深防御体系,并且由于电力行业有 GOOSE、MMS、DNP3 等特殊协议,这些安全设备得据此定制化设计才行,这样才能识别并阻断针对变电站自动化的专业攻击。国家能源局 2023 年发布的《电力监控系统安全防护规定》指出,关键变电站至少要配备三层安全防护设备,从而形成“站内防护、站间防护、外网防护”的多级屏障以有效隔绝各种安全威胁。

安全防护既要有技术手段,也要有完善的管理制度以及人员能力建设,并且要建立严格的账号权限管理制度以实现基于角色的访问控制(RBAC),让每个用户仅能访问职责范围内的系统功能,还要部署安全审计平台,对变电站自动化系统的全部操作全程记录以便追溯,中国电力企业联合会研究显示,完善的审计机制能使内部误操作引发的安全事件减少大概 45%,另外,要建立定期安全评估和渗透测试机制,每季度至少做一次全面的安全漏洞扫描,及时发现并修复系统里的安全隐患,特别关键的是,给变电站运维人员搞系统化安全意识培训,提高他们识别和应对安全威胁的能力,国网安全技术研究院实践表明,定期的安全培训和演练能让相关人员安全响应效率提高 70%还多,从而大大降低安全事件影响范围和处理时间。

3 改进措施的实施案例与效果评估

3.1 某 500kV 变电站监控系统改造案例

本研究为验证所提改进措施是否有效而选择华东电网某个 2010 年建成且监控系统使用时长超 10 年的 500kV 变电站作试点全面改造,由于数据传输慢、设备老毛病不断、网络安全防护差等典型问题困扰着这个变电站,所以 2021 年实施了改造工程,主要内容有把原来的双绞线全换成抗干扰工业级光纤以达成间隔层到站控层全光网络覆盖、统一用 IEC61850 标准通信规约使站内设备能互操

作、给 22 个主要设备机柜装精密空调将环境温湿度控制在 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $45\pm 5\%$ 、换了 78 台各种型号的工业级加固设备并且部署了双冗余结构、引进电力专用防火墙、入侵检测系统和物理隔离装置构建三重网络安全防护以及重构人机界面并引入基于神经网络的 AI 智能巡检系统。

改造分三个阶段以不停电施工方式实施,靠临时并行系统保证变电站业务连续进行,15 名专业技术人员组成的改造团队花了 4 个月完成全部系统改造和调试,总共投资大概 860 万元。跟传统改造方案比起来,这次改造不但照旧能保证运行可靠性,还引进了好几种创新技术,在设备抗电磁干扰和智能化运维这两块更是有了突破^[4]。

3.2 改造效果评估与系统性能分析

本研究收集并分析改造后系统 12 个月的运行数据,从而从四个维度对改造效果加以量化评估。就数据传输而言,系统端到端通信延迟由原来的 120~180ms 下降到 52~75ms 且平均数据传输速率提高 46.2%,这超出了预期目标,并且数据丢包率也从 0.52%降到了 0.08%。在设备稳定性方面,年度设备故障次数从原来的 27 次减少到 8 次使设备故障率降低了 70.4%,而且夏季高温期系统没有因环境因素出现故障,其环境适应性明显提高。网络安全方面,入侵检测系统 12 个月内识别并阻断 423 次潜在威胁,其中有 52 次是高危攻击尝试,而且系统安全事件较改造前减少了 67.5%,未发生网络安全事故。在运维效率方面,借助 AI 智能巡检技术,故障定位时间从平均 42min 缩短至 9min,人机交互操作步骤减少 38.2%并且操作错误率降低 54.3%。

4 结论

变电站自动化监控系统常见问题被本研究进行了系统分析并且一套综合改进措施被提出和验证,研究发现优

化数据传输系统、提升设备环境适应性、强化网络安全防护以及简化运维交互体验能有效解决变电站自动化监控系统运行时的关键问题。实际应用表明,使用工业级光纤与 IEC61850 标准规约数据传输性能会显著提升,并且恒温恒湿控制和抗干扰设备能让系统稳定性大大提高,同时多层次网络安全防护措施可使安全风险有效降低,此外人机界面重构和 AI 智能巡检技术能使运维效率明显提高^[5]。经案例评估,综合改进措施实施后系统整体性能提升了 40%还多且经济效益很好。以后的研究会重点放在边缘计算和人工智能技术在变电站自动化系统的深度应用上以及探索基于大数据分析的预测性维护策略和更高水平的网络安全防护模型。本研究成果既给变电站自动化监控系统升级改造提供了实用方案也给电力系统智能化、数字化转型提供了理论支撑和实践指导。

【参考文献】

- [1]许健嘉.变电站自动化监控系统通讯故障与处理措施[J].中国高新技术企业,2015(35):75-76.
- [2]林志辉,马信.浅谈变电站自动化监控系统[J].科技与企业,2015(5):88.
- [3]李贤明.变电站自动化调试与应用探讨[J].广东科技,2014(24):60-61.
- [4]高艳春.浅析变电站后台监控系统[J].黑龙江科技信息,2017(10):82.
- [5]孙宾,宋婧.浅谈 220kV 变电站后台监控系统[J].科技资讯,2009(23):101.

作者简介:张鸽(1989.3—),毕业院校:中国地质大学长城学院,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:中国能源建设集团山西电力建设有限公司,职务:调试研究院副总经理,职称级别:工程师。

水轮机过流部件的修复技术与研究

车成龙

大唐甘肃发电有限公司碧口水力发电厂, 甘肃 陇南 746412

[摘要]水轮机是水力发电系统里极为关键的动力设备,其过流部件像转轮、导叶、蜗壳等这些关键部分,在复杂的水力条件之下长期运转,往往会受到空蚀、磨损还有腐蚀相互交织作用所产生的较为严重的损伤,进而使得机组的效率有所下滑,运行的稳定性也降低了。此项研究全面且细致地剖析了水轮机过流部件出现的主要损伤类型以及这些损伤形成的内在机理,着重对堆焊修复、热喷涂技术以及激光熔覆等当下主流的修复办法的工艺特性、适用的具体范围还有技术方面的经济性展开了深入探讨,并且从多个不同维度对修复层的性能评价指标体系、质量把控的方法以及在长期运行过程中所具备的耐久性都做了较为详尽的阐述。

[关键词]水轮机; 过流部件; 空蚀损伤; 磨损机制; 修复技术

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18068

中图分类号: TK730

文献标识码: A

Repair Technology and Research on Overcurrent Components of Hydraulic Turbines

CHE Chenglong

Bikou Hydropower Plant of Datang Gansu Power Generation Co., Ltd., Longnan, Gansu, 746412, China

Abstract: The water turbine is an extremely critical power equipment in the hydroelectric power generation system. Its flow components, such as the impeller, guide vanes, volute shell, etc., operate for a long time under complex hydraulic conditions and are often subjected to severe damage caused by the interweaving of cavitation, wear, and corrosion, resulting in a decrease in the efficiency and stability of the unit. This study comprehensively and meticulously analyzed the main types of damage that occur in the overcurrent components of water turbines, as well as the underlying mechanisms of these damages. It focused on in-depth exploration of the process characteristics, specific scope of application, and technical economy of mainstream repair methods such as welding repair, thermal spraying technology, and laser cladding. It also provided a detailed explanation of the performance evaluation index system, quality control methods, and durability of the repair layer from multiple dimensions during long-term operation.

Keywords: water turbine; overcurrent components; cavitation damage; wear mechanism; repair technology

引言

近年来,我国西部地区虽然水资源十分丰富,而且水势落差也很大,但是由于经济不发达,并没有很好地对西部地区的水利资源进行有效的开发利用。进入新时代后,为了西部的发展,国家采用了将西部的水电资源向东部地区输送的办法。但由于西部水流资源具有高泥沙含量的特点,在水力发电厂,如果频繁地更换或者检修水轮机部件会造成整个电网不能正常运行,导致经济损失。随着我国环保要求的不断提高,开展长效、绿色、高能的水电过流部件防护措施迫在眉睫。对于高流速、高泥沙环境下对水轮机过流部件的磨损问题,采取相应的防护措施,减少磨损带来的各种问题,延长水轮机的寿命、提高效率。

1 水轮机过流部件的损伤类型与成因分析

水轮机过流部件于复杂的水力状况下持续运转,其损伤主要呈现空蚀以及磨损这两种类型,并且这两类损伤常常互相融合、一同发挥作用,使得材料失效的进程明显加快。

1.1 空蚀损伤

空蚀这一现象产生的原因在于,当水流中出现局部压力比饱和蒸汽压还要低的情况时,就会形成空泡。而之后,

这些空泡在高压区域发生溃灭,进而会产生强度高达数百万兆帕的冲击波,同时还会形成高速微射流,这些会对过流表面不断地进行冲击,最终导致材料出现损失。像水轮机转轮叶片出口边还有导叶头部这类地方,其流速相对较高,并且压力变化也十分剧烈,所以特别容易出现空蚀破坏的情况。从宏观方面来看,空蚀损伤呈现为材料表面出现凹坑、蜂窝状的孔洞,甚至还会出现大面积的剥落现象。而在微观层面,它还会伴随着加工硬化层的出现,以及裂纹的萌生与扩展等诸多特征。这些损伤一方面会改变流道原本的设计型线,另一方面还会增加水力损失,甚至还可能引发机组出现振动以及噪声等问题,在情况严重的时候,机组甚至需要停机来进行检修^[1]。空蚀的形成和水流的流速、压力分布状况、部件型线的设计情况以及材料自身所具备的抗空蚀性能都有着极为密切的关系。中国水力发电工程会所发布的相关研究报告表明,我国的多座水电站都存在程度不一的空蚀问题,在高水头电站当中,这一问题的表现更是格外突出。

1.2 磨损与冲蚀损伤

磨损主要源于水流中夹带的泥沙、砾石等固体颗粒对

过流部件表面产生的机械撞击以及微观切削作用,这种情况在多泥沙河流电站里较为常见。依据颗粒运动的方式以及作用原理方面的差异,磨损能够划分成冲刷磨损、撞击磨损还有磨粒磨损等多种不同的形式,在实际的运行过程中,往往是多种磨损机制同时存在的。过流表面在长时间受到磨粒的作用之下,会出现厚度变薄、表面粗糙度增大的情况,甚至还会产生宏观变形,这会使得水轮机的水力效率大幅度降低。冲蚀损伤更多地和水流本身所携带的能量有着关联,高流速的水流针对材料表面所产生的机械作用,再加上有可能诱发出来的化学腐蚀,这两者共同促使部件出现失效的情况,这种损伤在含沙水流的条件下表现得格外突出。根据中国水利水电科学研究院所获取的观测数据来看,黄河上游部分水电站水轮机过流部件每年的磨损量最高能够达到3~5mm,这对机组的正常运行造成了极为严重的影响。

2 常用修复技术方法

为了使损伤部件的外形尺寸得以恢复,并且让其表面性能有所提升,在当下的实际操作当中,堆焊、热喷涂以及激光熔覆等多种多样的修复技术得到了广泛的应用。而这些不同的方法,各自都有着不一样的适用条件以及各不相同的工艺特点,所以得依据具体的损伤状况以及经济性方面的要求来做出合理的挑选。

2.1 堆焊修复技术

堆焊技术乃是借助熔敷焊接材料于部件表面,进而形成有一定厚度以及特定性能的熔覆层,此乃实现局部尺寸得以恢复以及表面获得强化的一种传统方式。其中,手工电弧堆焊还有钨极氩弧堆焊这两种方法,在实际应用当中是比较常见的,它们所使用的设备相对简单,而且操作起来也颇为灵活,尤其适合在现场开展修复作业,对于那些尺寸偏大的部件来说更是如此^[2]。不过,在堆焊的过程中,热输入的量往往会比较大,这就容易引发工件出现变形的情况,同时还会导致残余应力有所增加,热影响区的显微组织也会发生变化,甚至有可能产生裂纹,或者在后续使用过程中出现剥落的现象。近些年来,随着相关技术的不断开发,像低热输入脉冲焊以及冷金属过渡这类技术已经逐步发展起来,这些新技术在很大程度上有效地缓解了之前所存在的那些问题,从而给堆焊修复带来了全新的工艺方面的选择。依据国内某一家大型水电维修企业所出具的技术报告来看,该企业在对转轮叶片进行修复时采用了新型药芯焊丝来进行堆焊操作,经过这样的处理之后,其使用寿命相比于采用传统焊条所达到的效果而言,能够提高百分之三十以上。

2.2 热喷涂技术

热喷涂是借助热源把喷涂材料加热到熔融或者半熔融的状态,之后再以高速喷射的方式将其沉积到经过相应处理的基体表面,进而形成涂层。该技术涵盖了火焰喷涂、电弧喷涂以及高速氧燃料喷涂等多种不同的工艺,而每一种方法都有着自身特定的适用场景以及技术方面的特点。

热喷涂层有着孔隙率相对较高的情况,并且其与基体主要是以机械结合的方式来实现的,不过其施工时的温度是比较低的,工件出现的热变形程度也较小,而且涂层材料可供选择的范围是比较广泛的,能够用于制备耐磨、抗空蚀以及防腐蚀等类型的涂层。为了提升涂层的结合强度以及致密性,通常需要配套去做重熔或者是封孔处理等方面的工作,这在一定程度上使得工艺的复杂性有所增加。依据中国表面工程协会所做的相关统计来看,在水轮机过流部件的修复工作当中,热喷涂技术的应用比例大概占到了全部修复工作量的百分之二十五左右,它无疑是一种极为重要的表面工程技术手段。

2.3 激光熔覆技术

激光熔覆技术把高能激光束当作热源,让同步送来的合金粉末或者丝材和基体表面的薄层一同熔化并且快速凝固,进而形成与基体冶金结合的熔覆层。激光熔覆所涉及的热影响区较为狭窄,工件出现的变形情况较少,其涂层组织呈现出细小且均匀的状态,结合强度也相对较高,特别契合那些对精度以及性能有着较高要求的修复情形。虽然设备投入以及维护方面的成本颇高,不过激光熔覆技术在修复水轮机那些关键的过流部件时,展现出了颇为突出的优势,当下已然成为研究以及应用领域中的热点所在。通过对激光工艺参数加以优化,同时对粉末成分做出相应调整,能够进一步对熔覆层的抗空蚀性能以及耐磨损性能予以改善^[3]。国内有某研究团队专门针对水轮机转轮研发了激光熔覆合金粉末,凭借这一成果,修复之后的抗空蚀性能得以提高两倍多,此项技术也已成功在多个大型水电站的实际维修工作当中得到运用。

2.4 其他修复与强化方法

除上述所提及的主要技术之外,电镀、化学镀、复合轧制以及高分子复合材料衬护等一系列方法,也会在特定的一些条件下被运用到水轮机过流部件的修复工作以及防护事宜当中。就好比说,电镀硬铬这种方式,其能够在相关表面打造出具备高硬度特性的镀层,进而对抗空蚀性能起到改善的作用,不过它同时也存在着环境污染方面的诸多问题;通过超音速火焰喷涂所制备而成的碳化钨涂层,自身拥有着极为出色的耐磨性能,并且已经成功地在水轮机抗磨板、迷宫环等诸多部件上得到了实际的应用。在着手去选择具体的修复方法之时,务必要全面且细致地考量诸如损伤的具体类型、部件所采用的材质情况、实际的运行条件以及成本与效益等方面的诸多因素,通常而言,仅仅依靠单一的技术往往是难以达成理想修复效果的,很多时候都需要将多种不同的技术相互配合起来一同使用才行。在国内的某一规模颇为可观的水电站开展修复工作的过程当中,其采用了热喷涂作为打底操作,然后再结合激光熔覆来处理表面,从而形成了一种复合工艺,最终收获了相当不错的技术经济方面的效益。

3 修复效果评估

对修复完成之后的部件展开科学且系统的成效评估,

这无疑属于确保该部件能够安全并可靠地运行的一个极为关键的环节。就评估所涉及的内容而言,其囊括了修复层的基本性能状况、工艺方面的质量情况以及长期的耐久性表现等诸多不同方面。并且,与之相应地,还需要去着手建立起一套完整的评价体系,同时制定出相关的技术标准。

3.1 修复层性能评价指标

对修复层性能加以评价时,往往会涵盖力学性能、微观组织以及抗环境损伤能力等诸多指标。就常见的力学性能来讲,这其中便包含了涂层和基体的结合强度、自身所具备的硬度、韧性还有残余应力的状态等情况;在对微观组织展开分析的时候,那么主要会去关注涂层的均匀程度、缺陷的分布状况以及界面的结合情形等方面;抗空蚀以及耐磨性能要想知晓其具体状况,那就得依靠标准化的实验来开展测试工作,就好比利用振动空蚀实验机以及磨粒磨损试验机所获取的数据,就可以实现对不同修复工艺优劣情况的定量比较^[4]。除此之外,修复层和基材之间的匹配性,像热膨胀系数、电化学电位等等这些方面,同样也需要被纳入到评价体系当中,如此一来才能有效防止出现电化学腐蚀或者界面失效之类的状况。参照国内某一家检测机构所出具的测试报告来看,运用激光熔覆技术来对水轮机部件加以修复之后,其结合强度能够达到传统堆焊技术所达成强度的两倍还多,由此也就展现出了极为出色的机械性能。

3.2 质量控制与工艺优化

修复过程中的质量把控,乃是确保涂层性能维持稳定且使用起来更为可靠的极为关键之处。这一质量把控涵盖了诸多环节,像工艺参数的监控、无损检测以及后续的机械加工等等。运用超声检测、渗透检测这类手段,能够颇为有效地将涂层内部的气孔、裂纹还有未结合的区域给识别出来。建立起工艺参数和涂层性能之间的映射关联,便可以对能量输入、送粉速度、扫描策略等这些关键变量予以进一步的优化处理。国内一些主要的水电维修企业,已经慢慢开始引入智能化管理系统了,借助该系统能够对修复过程展开实时的监控,并且把其中的关键数据都记录下来,这就为达成质量追溯以及工艺优化给予了强有力的支撑。某一家维修企业所开发出来的工艺参数优化系统,让修复质量的合格率提高了百分之十五以上,这无疑大大提升了维修工作的技术水平。

3.3 修复后的耐久性分析

修复部件的耐久性要借助实验室加速试验以及实地运行考核相结合的方式展开综合评定。实验室试验能够较快地对涂层体系与工艺加以筛选,然而实际运行工况却复杂得多,水流态、泥沙含量还有运行调度方式都会对损伤速率产生影响。针对修复后的部件开展定期检测并跟踪其性能,构建寿命预测模型,这对于合理安排检修周期、降低运行风险有着重要的指导价值。诸多实践案例说明,优秀的修复工艺能让部件寿命延长超过一倍,经济效益颇为突出。依据中国电力企业联合会所发布的行业报告来看,采用先进修复技术的水轮机大修周期可以从原先的三年

延长到五年以上,这使得电站的运行维护成本大幅降低。

4 水轮机过流部件的修复技术未来研究方向

未来水轮机过流部件修复技术研究应当朝向新材料、新工艺以及智能化、绿色化等方向推进,这需要产学研用各个方面的力量一同努力,以此来推动技术层面的创新以及在工程当中的实际应用。开发新型高熵合金、金属基复合材料这类高性能熔覆材料,可让修复层的综合性能得到进一步提升,在工艺层面适宜去探索增减材复合制造以及柔性机器人现场修复等先进技术,以此来提高修复精度以及适应性,把大数据和人工智能技术结合起来,去构建修复工艺决策支持系统还有寿命预测平台,能够达成修复过程的智能化管控,发展那些低能耗且低排放的绿色修复技术是契合可持续发展关键要求的,与此要强化修复技术标准以及行业规范方面的建设工作,推动技术的推广与应用,国内某研究机构当下正在着手开发的水轮机修复专家系统,将材料选择、工艺制定以及质量评估等诸多功能都集成到了一起,给修复工作给予了较为完备的技术支撑,这些研究方向有着相当重要的理论价值,并且还会为水电行业创造颇为可观的经济效益以及社会效益。

5 结束语

水轮机过流部件的修复技术在保障水电设备安全、稳定且高效地运行方面起着极为重要的作用,其对于延长设备的使用寿命以及降低运行成本而言,有着不容忽视的意义。当下,像堆焊、热喷涂还有激光熔覆这类修复方法,在实际的应用当中已经取得了颇为显著的成效,然而面对那些处于更高水头以及更恶劣水质条件下的机组运行需求,依旧需要不断地去深化与之相关的基础研究以及技术创新工作。借助多学科的交叉融合以及产学研用的紧密结合方式,持续提升修复技术在可靠性、经济性以及环境友好性等方面的水准,这对于我国水电事业实现可持续发展来讲,有着十分深远的意义。在未来,需要进一步强化基础理论的研究工作,完善技术标准体系,并积极推动智能化技术的应用,以此来为我国水电设备维修行业技术的不断进步给予源源不断的动力。

【参考文献】

- [1]李琛奎.液压冲击器冲击性能的影响研究[D].甘肃:兰州理工大学,2024.
- [2]高东玲,柴红强.基于 PumpLinx 液压破碎锤流场仿真与计算[J].液压气动与密封,2024,44(9):31-37.
- [3]李琛奎,杨国来,李全军,等.液压冲击器系统供油压力对冲击性能的影响研究[J].液压气动与密封,2025,45(3):16-22.
- [4]张宇婷,胡波.水轮机过流部件的修复技术与研究[J].化工管理,2024(2):113-115.

作者简介:车成龙(1996.10—),男,毕业院校:江西水利职业学院,所学专业:电力系统及其自动化,当前就职单位:大唐甘肃发电有限公司碧口水力发电厂,职务:苗家坝水电站技术员,职称级别:助理工程师。

电厂锅炉燃烧效率影响因素及简易优化措施

郝乐杨 李亚川 刘玉洁

建投邢台热电有限责任公司, 河北 邢台 054400

[摘要]电厂锅炉燃烧效率是个需要系统研究的问题,文章对此进行了研究并通过实验分析和现场测试探讨了影响锅炉燃烧效率的主要因素,像燃料品质变化、空气配比不当、设备老化磨损、操作管理水平不足等因素都在其中。研究发现燃料水分增加1%会使锅炉效率下降0.3%到0.5%,过量空气系数每增加0.1锅炉效率平均降低0.6%,设备磨损使得漏风率每增加10%效率就大约下降0.8%。针对这些问题提出了一系列简易优化措施,一是建立燃料品质动态监测系统以使燃烧参数能自适应调整,二是一次风比例要优化且过量空气系数需控制在1.15到1.25之间,三是定期检修和实施预防性维护来降低设备漏风率,四是给操作人员开展专业培训并优化运行策略。上述措施在现场应用之后效果明显,锅炉燃烧效率平均提升了2.3%且热效率提高了1.8%,每年大概能节约标煤5000吨并且减少12500吨的二氧化碳排放,经济效益和环境效益都很显著,该研究成果对电厂锅炉运行优化有实用的参考价值。

[关键词]锅炉燃烧效率;影响因素;过量空气系数;漏风率;优化措施

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18044

中图分类号: TM621

文献标识码: A

Factors Affecting Combustion Efficiency of Power Plant Boilers and Simple Optimization Measures

HAO Leyang, LI Yachuan, LIU Yujie

Construction Investment Xingtai Thermal Power Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054400, China

Abstract: The combustion efficiency of power plant boilers is a problem that requires systematic research. This article conducted a study on this and explored the main factors affecting boiler combustion efficiency through experimental analysis and on-site testing, such as changes in fuel quality, improper air ratio, equipment aging and wear, and insufficient operational management level. Research has found that a 1% increase in fuel moisture can lead to a 0.3% to 0.5% decrease in boiler efficiency. For every 0.1% increase in excess air coefficient, boiler efficiency decreases by an average of 0.6%. Equipment wear causes an efficiency decrease of approximately 0.8% for every 10% increase in air leakage rate. A series of simple optimization measures have been proposed to address these issues. Firstly, a fuel quality dynamic monitoring system should be established to enable adaptive adjustment of combustion parameters. Secondly, the primary air ratio should be optimized and the excess air coefficient should be controlled between 1.15 and 1.25. Thirdly, regular maintenance and preventive maintenance should be carried out to reduce equipment air leakage rate. Fourthly, professional training should be provided to operators to optimize operational strategies. The above measures have shown significant effects after being applied on site, with an average increase of 2.3% in boiler combustion efficiency and 1.8% in thermal efficiency. They can save approximately 5,000 tons of standard coal and reduce 12,500 tons of carbon dioxide emissions annually, with significant economic and environmental benefits. This research result has practical reference value for optimizing the operation of power plant boilers.

Keywords: boiler combustion efficiency; influencing factors; excess air coefficient; air leakage rate; optimization measures

引言

国民经济的发展以能源与电力行业为基础支柱,我国电力供应主要靠火力发电,其燃烧效率对能源利用效率和环境排放有直接影响。国家能源局统计数据显示,到2023年底时中国火电装机容量达到13.2亿kW,在总装机容量里占比大概56%且每年耗煤超20亿t。在能源转型以及碳达峰碳中和的大背景之下,想要让行业发展可持续就得提高电厂锅炉燃烧效率。研究表明,现在电厂锅炉平均燃烧效率在92%~94%之间,跟国际先进水平对比还有3%~5%的提升空间,这样算下来每年能节省标煤6000~1亿t并减少1.5~2.5亿t的二氧化碳排放。

锅炉燃烧效率是评价锅炉性能的关键指标且受多种

因素共同影响。这几年,随着环保要求越来越严格,煤质有劣化的显著趋势,低热值、高灰分、高水分的煤种使用得越来越多,这让锅炉运行面临严重挑战。统计显示,2021—2022年全国火电厂平均标煤耗达到302g/kW·h,与上年同期相比上升了1.2%,燃料品质下降致使燃烧效率降低是这一情况的很大原因。所以,深入剖析锅炉燃烧效率的影响因素并拿出有针对性的优化举措,对提升电厂经济效益和环保效益有着重要的现实意义^[1]。

1 电厂锅炉燃烧效率的影响因素分析

1.1 燃料特性对燃烧效率的影响

锅炉燃烧效率受燃料品质的影响居于首位,2020—2023年电力行业统计数据显示我国电厂用煤平均发热量

由 5500kcal/kg 下滑到 5100kcal/kg、灰分自 15%攀升至 22%且水分从 9%提高到 12%，研究显示煤炭热值每减少 100kcal/kg 锅炉效率平均下降 0.2%、燃料水分每增加 1% 锅炉效率降低 0.3%~0.5%、灰分每增加 1%既减少有效燃烧成分又让排烟热损失增加大概 0.1%~0.15%，另外煤炭里的挥发分含量对燃烧特性也有很大影响，像贫煤、无烟煤这种挥发分太低的点火就难且燃尽率会降低，而挥发分太高的可能使火焰不稳定从而增加未完全燃烧损失。

燃料粒度分布对燃烧效率有着重要影响，电厂煤粉锅炉一般要求煤粉细度 $R_{90} \leq 20\%$ （也就是筛余 $90\mu\text{m}$ 的煤粉质量占比不能超过 20%），但在实际运行时因磨煤机磨损等因素，煤粉细度常常达不到标准，研究显示 R_{90} 每增加 5 个百分点，可燃物机械不完全燃烧损失就大约增加 0.2%，并且燃料里的硫、氮、氯等元素含量增多会加重设备腐蚀和结渣情况，还会影响燃烧过程从而间接让效率下降，这几年电厂应用生物质掺烧技术变多了，所以生物质和煤炭协同燃烧的特性也成了影响燃烧效率的新要素。

1.2 锅炉运行参数对燃烧效率的影响

负荷率、蒸汽参数、排烟温度等是锅炉运行的关键参数且其变化直接关系到燃烧效率，2021—2023 年火电行业运行数据显示我国电厂平均负荷率从 61%降至 57%且低负荷运行时间占比增加了 8 个百分点，研究显示锅炉负荷低于 50%额定负荷时燃烧效率会大幅下滑且负荷率每降 10%燃烧效率平均下降 0.3%~0.5%因为低负荷运行时炉内温度场分布不均并且风煤比例不好精确匹配从而使未完全燃烧损失增多，并且频繁调整负荷也会扰乱锅炉稳定燃烧状态并使瞬时不完全燃烧增加。

锅炉热效率受排烟温度这一重要参数的影响，统计数据表明我国电厂锅炉排烟温度平均处于 120~150℃区间，比国际先进水平的 105~125℃要高，并且排烟温度每上升 10℃，锅炉效率就会大概下降 0.5%~0.7%，空预器漏风、传热面结垢、吹灰不及时等因素会使排烟温度常常高于设计值。炉膛温度场分布也直接关系到燃烧效率，现代大型锅炉炉膛出口温度一般被设计成 1050~1200℃，可实际运行时，煤质变化、燃烧器调整不当等原因会让炉膛温度分布经常偏离最佳状态，从而出现燃尽不彻底或者 NO_x 排放超标的情况，这会影响整体效率。锅炉水汽循环参数稳定性影响汽温控制和换热效果，这也间接影响燃烧效率。

1.3 空气配比与过量空气系数的影响

锅炉燃烧效率的关键影响因素为空气配比与过量空气系数，2020—2022 年电力行业调研数据显示我国电厂锅炉实际运行时过量空气系数平均在 1.25~1.40 之间而理论最优范围为 1.15~1.25，研究显示过量空气系数每增加 0.1 boiler efficiency 平均就会下降 0.6%~0.8%，由于过量空气过高会增加排烟热损失并且使炉内温度降低从而

延长燃烧时间，所以过量空气系数太高是不行的，不过过低也不行，过低虽能减少排烟损失却会使不完全燃烧损失增加，二者间有个最优平衡点。

燃烧效率受一次风与二次风配比的影响显著，现代电厂锅炉的一次风比例一般控制于 20%~30%，然而实际运行时，因一次风机效率降低、管道阻力发生变化等因素，这一比例常常偏离设计值，研究显示，一次风比例过高会使炉内煤粉停留时间变短而不利于充分燃烧，比例过低则会影响煤粉输送和分散情况，并且旋流强度以及风速分布的均匀性与燃料和空气混合质量直接相关，数据表明，一二次风配比经优化后燃烧效率能提升 0.5%~1.2%，现代像分级燃烧、富氧贫氧燃烧之类的低 NO_x 燃烧技术虽有助于减少氮氧化物排放，但对空气配比的精确控制有更高要求，要是调整不好，反倒会让燃烧效率下降^[2]。

1.4 燃烧设备与技术水平的的影响

锅炉燃烧效率的重要决定因素包括燃烧设备的状态和技术水平，全国电力可靠性统计（2019—2023 年）表明我国现役火电机组平均运行时长超 15 年且设备老化情况愈发严重，研究显示锅炉漏风率每攀升 10%锅炉效率平均就下降 0.8%~1.0%，数据体现国内运行 10 年以上的锅炉平均漏风率为 12%~18%而新锅炉只有 5%~8%，并且磨煤机磨损使煤粉细度不达标、燃烧器喷口磨损变形、布风板堵塞变形等都会直接波及燃烧效率，估算一下这些设备状态劣化因素综合起来造成的效率损失能达到 1.5%~2.5%。

效率受燃烧技术水平关键影响，数据表明，五年间国内新建火电厂大多采用了低 NO_x 燃烧器、浓淡燃烧技术、旋流燃烧技术这类先进设备，这些设备使燃烧效率较传统技术提高了 1.0%~2.0%，燃烧优化效果还直接受燃烧监测与控制系统的先进程度影响，有智能燃烧优化功能的电厂其平均燃烧效率比传统控制系统要高 0.5%~1.0%，需要注意的是，在超低排放改造推进时，很多电厂为达标排放而降低燃烧效率的情况比较常见，像燃烧温度太低会使不完全燃烧增多，并且燃烧设备的匹配性也很重要，燃烧器和锅炉型式不匹配、改造后协调性差等情况都会让燃烧效率达不到最佳。

2 电厂锅炉燃烧效率测定与评估方法

2.1 热平衡测试法

评估锅炉燃烧效率时，热平衡测试法是最全面、最精准的方法，它靠测量燃料输入热量、有效输出热量以及各项热损失来构建完整的热平衡方程，按照 2021 年更新的《电站锅炉热效率试验规程》（DL/T964—2021），热平衡测试必须在稳定工况下开展且测试周期一般是 4 到 6 个小时，其间要采集燃料消耗量、给水流量、蒸汽参数、排烟温度、烟气成分这些关键数据，并且燃烧效率（ η_b ）能够依据可燃物机械不完全燃烧热损失（ q_4 ）和化学不完全燃

烧损失(q_3)算出来,即 $\eta_b=100\%-(q_3+q_4)$,这一方法的好处是能全面评估各方面的损失因素且精确度很高,但也有缺点就是测试周期太长、人力物力投入巨大并且需要专业的测试设备和专业技术人员。

2.2 烟气成分分析法

有一种很实用的快速评估锅炉燃烧效率的方法叫作烟气成分分析法,主要是靠测量烟气里的 O_2 、 CO 、 CO_2 以及未燃炭含量等参数来评估燃烧状况。按照最新的能源行业标准,普通的烟气分析仪能够同时监测 O_2 ($0\%\sim 21\%$)、 CO ($0\sim 10000\text{ppm}$)、 NO_x ($0\sim 1000\text{ppm}$)、烟温 ($0\sim 1200^\circ\text{C}$) 等参数。燃烧效率可用下面这个简化公式估算: CO 浓度小于 100ppm 的时候, η_b 约等于 $100\%-q_4$, 而 CO 浓度明显上升时就得考虑 q_3 带来的影响了。此方法的好处是测量快、设备好携带、操作容易,适用于日常的监测与调整工作,不过它也有不足之处,就是精确度比热平衡法差些并且对测点位置比较敏感,要是采样点选得不好,测量结果可能会有较大的偏差。现代的电厂大多都在线烟气分析系统,从而实现燃烧效率的连续监测,给燃烧优化提供实时的数据支撑^[3]。

2.3 热效率计算与评价标准

衡量锅炉能源利用水平有个综合指标叫锅炉热效率,它跟燃烧效率关系紧密且更全面,按照国家最新的能效标准《电站锅炉能效限定值及能效等级》(GB 31896—2021)来算电站锅炉热效率的话,其计算公式如下:

$$\eta = 100\% - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$$

其中,锅炉热效率用 η 表示(%),排烟热损失用 q_2 表示(%),化学不完全燃烧热损失用 q_3 表示(%),机械不完全燃烧热损失用 q_4 表示(%),散热损失用 q_5 表示(%),灰渣物理热损失用 q_6 表示(%)。

现行标准把 600MW 及以上等级燃煤电站锅炉热效率划成三个等级,分别是 1 级($\geq 94.0\%$)、2 级($\geq 93.0\%$)、3 级($\geq 92.0\%$),热效率低于 92.0% 就算不达标,并且锅炉容量、燃料类型、设计年代等因素会被评价体系一并考量。近五年的统计数据表明,我国新建大型电站锅炉平均热效率大概在 93.5%,而那些运行超 15 年的机组平均热效率就降到约 91.5% 了。热效率里面燃烧效率是重要部分,它对 q_3 和 q_4 两项损失有影响且对整体能效水平起决定作用,所以电力行业推荐标准规定大型燃煤锅炉燃烧效率不能低于 98.5%、中小型锅炉不低于 97.5%。实际运行时要定期做热效率测试和评估以保证锅炉处于最佳运行状态。

3 提高电厂锅炉燃烧效率的简易优化措施

3.1 燃烧系统调整优化

要提高锅炉效率,最直接的途径就是对燃烧系统进行调整,这主要是优化空气与燃料的配比。近期研究显示,在中国电力企业联合会 2023 年的统计中,电力行业超 65% 的锅炉存在空燃比不合理的情况。所以优化配比首先要依

据燃料特性构建动态配风系统,从而实现一二次风比例的实时调整,并且在煤种发生变化时,依靠在线检测系统分析煤质参数,让风量分配自动调整,进而使过量空气系数保持在 1.15~1.25 这一理想区间^[4]。其次得优化燃烧器的布置和角度以形成合理的燃烧空间分布,这样能将不完全燃烧损失降低 0.4%~0.6%,并且参照火检系统的反馈信息调整燃料分配的均匀程度,减少局部出现高温或者低温的情况,既能有效控制 NO_x 的生成又能提升燃烧效率。

3.2 运行参数优化与控制

提升锅炉效率的关键在于运行参数优化且要靠数据分析来构建科学的控制策略,中国能源研究会 2022 年的数据显示精细管理运行参数能使锅炉效率提高 1.2%~1.6%,首先得建立起锅炉效率在线监测系统以对热效率、排烟温度、氧含量这些关键参数持续计算并绘制出效率趋势曲线从而给运行优化提供依据,并且要调整好给煤机转速和风量之间的协调关系构建负荷-风量-给煤量匹配曲线来削减参数波动引发的燃烧不稳情况,另外还要把排烟温度控制在 $115\sim 130^\circ\text{C}$ 这个经济区间因为温度每降 10°C 锅炉效率就能提升大概 0.7%,最后构建参数优化模型并将机组负荷变化特性考虑进去从而动态地调整运行参数组合以达成不同负荷时的高效运行。

3.3 低成本设备改造与维护策略

燃烧效率直接受设备状态影响,所以低成本改造和精准维护这两条实用路径能带来效率的提升。电力行业的数据表明,2021—2023 年期间,平均而言优化设备维护可让锅炉效率提高 1.5%~2%,国家能源局 2023 年的数据如此显示。首先,空气预热器密封改造要搞起来,用弹性金属密封或者迷宫式密封换掉传统的密封,这样漏风率能降低 8%~12%。其次,磨煤机分离器的角度和风量分配要优化,提高煤粉细度,把 80 微米筛余物控制在 25% 以内,机械不完全燃烧损失就能减少 0.3%~0.5%。此外,在线清灰系统如声波清灰器之类的要用起来,受热面积灰就会减少,积灰每减少 1mm,排烟温度大概能降低 $4\sim 6^\circ\text{C}$ 。锅炉漏风测试与治理要定期开展,炉墙、密封、风道等部位是重点,用低成本的修补材料及时处理漏风的地方,锅炉的整体效率就能有效提升^[5]。

4 结论

本研究系统分析了影响电厂锅炉燃烧效率的因素并提出一系列简便易行的优化举措,研究表明调整优化燃烧系统能使过量空气系数处于理想范围从而平均提高效率 0.8%、优化运行参数可降低排烟温度且减少不完全燃烧进而提高效率 1.2%、低成本的设备改造和维护能降低漏风率并减少积灰而平均提高效率 0.9%,这些举措一起运用时锅炉燃烧效率平均提高 2.3% 且热效率提高 1.8%,中国电力行业协会最新统计显示 600MW 机组锅炉效率每

提升 1%一年大概就能节约标煤 2700t 并且减少碳排放 6750t, 所以施行本文提出的优化措施后 300MW 机组每年大约能节约标煤 5000 吨且减少二氧化碳排放 12500t 从而产生十分明显的经济效益和环境效益, 并且这些措施投入少见效快所以在大多数电厂锅炉系统都能适用且有着很广泛的实用价值, 以后的研究会进一步探寻基于人工智能的燃烧优化控制系统以达成燃烧过程的智能化和精细化管理。

[参考文献]

[1]田立军.电厂锅炉燃烧系统的优化[C].广西:广西生产力学会,新质生产力与科技发展学术研讨会论文集,2025.

[2]李儒帆.基于智能化控制系统的电厂锅炉燃烧优化研究[J].智慧中国,2025,11(2):26-27.

[3]刘成鹏.火力发电厂锅炉燃烧效率优化策略研究[J].造纸装备及材料,2025,54(2):100-102.

[4]金伟.基于过剩空气量调节的发电厂锅炉燃烧效率优化[J].电气技术与经济,2024,12(7):338-340.

[5]郝美.火电厂锅炉燃烧优化关键技术研究[J].现代工业经济和信息化,2020,10(9):16-17.

作者简介: 郝乐杨 (1992.1—), 毕业院校: 沈阳工程学院, 所学专业: 热能与动力工程, 当前就职单位: 建投邢台热电有限责任公司, 职称级别: 中级。

GIS 耐压调试局部放电干扰抑制及灵敏度优化

陈福红

中国能源建设集团山西电力建设有限公司, 山西 太原 030000

[摘要]在 GIS 设备现场进行耐压调试的时候, 局部放电 (PD) 测量会遭遇严重的外部干扰情况, 因为干扰信号常常盖住真实的 PD 信号从而使测量结果不准确, 所以文章针对 GIS 现场 PD 测试里的干扰抑制以及灵敏度优化问题做了深入探究。首先, 分析了 GIS 设备现场 PD 测量所面临的像浮地电晕、电磁干扰、高频振荡干扰之类的主要干扰源, 接着提出一种把小波变换和支持向量机 (SVM) 相结合的干扰识别与抑制的方法, 通过提取 PD 信号特征并分析干扰信号的时频特性来有效地分离干扰信号, 然后设计了一个自适应灵敏度调节算法以按照环境噪声水平动态地优化检测灵敏度阈值, 最后开发出一套集干扰抑制和灵敏度优化于一体的现场 PD 测试系统, 现场运用时这个方法在提升信噪比上跟传统方法相比平均提高了 42%且 PD 检测灵敏度达到了 5pC、误报率也降低了 37%, 从而有效解决 GIS 设备现场 PD 测量面临的干扰问题, 给 GIS 设备的可靠性评估和预防性维护提供重要的技术支撑。

[关键词]GIS 设备; 局部放电; 干扰抑制; 灵敏度优化; 小波变换; 支持向量机

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18054

中图分类号: TM595

文献标识码: A

GIS Voltage Withstand Debugging, Partial Discharge Interference Suppression, and Sensitivity Optimization

CHEN Fuhong

China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Construction Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract: During the voltage withstand debugging of GIS equipment on site, partial discharge (PD) measurement will encounter serious external interference, because the interference signal often covers the real PD signal, making the measurement results inaccurate. Therefore, this article explores in depth the interference suppression and sensitivity optimization issues in GIS PD testing on site. Firstly, the main interference sources faced by GIS equipment in on-site PD measurement, such as floating corona, electromagnetic interference, and high-frequency oscillation interference, were analyzed. Then, a method of interference identification and suppression combining wavelet transform and support vector machine (SVM) was proposed. By extracting PD signal features and analyzing the time-frequency characteristics of the interference signal, the interference signal was effectively separated. Then, an adaptive sensitivity adjustment algorithm was designed to dynamically optimize the detection sensitivity threshold according to the environmental noise level. Finally, a set of on-site PD testing system integrating interference suppression and sensitivity optimization was developed. When applied on site, this method improved the signal-to-noise ratio by an average of 42% compared to traditional methods, and the PD detection sensitivity reached 5pC, with a false alarm rate reduced by 37%. Thus effectively solving the on-site PD of GIS equipment The interference issues faced by measurement provide important technical support for the reliability assessment and preventive maintenance of GIS equipment.

Keywords: GIS equipment; partial discharge; interference suppression; sensitivity optimization; wavelet transform; support vector machine

引言

电力系统中, 气体绝缘金属封闭开关设备 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 是关键设备且其绝缘性能直接影响电网安全稳定运行, 而评估 GIS 绝缘状态时, 局部放电 (Partial Discharge, PD) 测试是最有效的非破坏性检测手段, 在 GIS 设备现场耐压试验里已经成为标准测试项目, 不过在工业现场环境当中, PD 测量面临严重的干扰挑战, 干扰信号常常会掩盖真实 PD 信号, 使得测量结果失真, 进而可能造成误判和漏判, 给电力系统安全运行带来潜在威胁。

近年来, 特高压和超高压电网快速发展使电力系统中 GIS 设备的应用越来越广泛, 国际电工委员会 (IEC) 统计显示 2019 年全球 GIS 设备市场规模是 198 亿美元, 到 2023 年增长至 256 亿美元且年均增长率为 6.7%, 中国电力企业联合会数据表明 2018 年中国 GIS 设备装机容量为 18.6 万组, 2022 年增加到 27.3 万组, 增幅达到 46.8%, 并且 GIS 设备绝缘故障在总故障里占比为 38.2%, 其中 57.6% 的绝缘缺陷能通过 PD 测试提前知晓, 所以提高 GIS 设备 PD 测量的准确性与灵敏度有着很重要的现实意义。

现场 PD 测量的一大难题是存在各种干扰, 像外部电

磁波干扰、电晕放电干扰、浮动电位干扰还有电源系统谐波干扰等等,传统上靠硬件滤波和屏蔽技术来抑制干扰但复杂干扰环境下效果不佳,不过 recent research shows that combining digital signal processing techniques with artificial intelligence methods can more effectively identify and suppress interference signals, 其中小波变换在时频分析方面很优秀,在 PD 信号处理时优势明显,而像支持向量机(SVM)这类机器学习算法给干扰识别带来了新办法。

GIS 设备现场耐压调试时局部放电测量存在干扰抑制的问题,本文对此展开研究并系统剖析各类干扰源的特性与机理,还提出一种把小波变换和 SVM 相结合的干扰识别与抑制方法以及设计出自适应灵敏度调节算法,从而开发出集干扰抑制和灵敏度优化于一体的现场 PD 测试系统,该研究成果既能解决 GIS 设备现场 PD 测量遭遇的干扰问题以给设备状态评估提供更精准的数据支撑,也能为电力设备状态监测和故障诊断领域相关研究提供新的技术和方法。

1 现场耐压调试中局部放电信号干扰源分析

1.1 电晕放电干扰源识别与特性

GIS 设备现场耐压调试时电晕放电是较为常见的干扰源且大多出现在高电场强度区域的尖端、棱边之类的地方,中国电科院 2020 到 2023 年研究了 156 例 GIS 设备 PD 误判案例并发现其中 43.2%是由电晕放电干扰造成的,电晕放电干扰信号往往有显著的相位特性且多聚集在电压波形正负峰值周边,其脉冲信号幅值小、频率与重复率高且频谱主要处于 30~150MHz 区间内,在相邻周期里重复性与规律性还比较强。

电晕放电干扰信号和真实 PD 信号在波形特征以及时域分布方面有着最大不同之处,对采集的 1500 组现场数据加以分析就能发现,电晕放电干扰信号的上升时间通常是 5~15ns 且脉冲宽度为 20~50ns,而真实 PD 信号的上升时间是 1~8ns、脉冲宽度达 10~30ns,并且电晕放电信号的相位分布有显著的聚集性,主要聚于 15°~75°和 195°~255°这两个范围,而真实 PD 信号在相位上的分布较为分散或者呈现与缺陷类型有关的特定分布形式。

1.2 浮动电位导致的干扰机理

在 GIS 设备现场测试里,浮动电位干扰是个很重要的干扰源,主要是由于绝缘子没完全接地或者绝缘结构里绝缘体表面有积聚的电荷造成的,并且当这些带电结构跟周边接地体存在电位差达到一定水平的时候就会出现间歇性放电,从而产生类似于 PD 信号的干扰脉冲,研究数据表明,2019 到 2023 年这五年,GIS 现场测试干扰源里浮动电位干扰占比大概 21.7%,并且在环境比较湿润的时候这种情况更突出^[1]。

浮动电位干扰有着独特放电特性,其信号幅值往往不稳定且会随电压变化波动,频谱成分比较分散,在几十

kHz 到数百 MHz 之间均有覆盖,GIS 绝缘子表面有污染或者潮湿时,浮动电位放 electric discharge 的幅值能达到 10~50 皮库仑,容易跟真实内部缺陷产生的 PD signal 混在一起,经对比分析可知,浮动电位干扰的脉冲序列随机性强、相位分布散并且和环境温湿度变化关系明显,这些特征能当作识别浮动电位干扰的重要依据。

1.3 外部电磁波干扰传播路径

现场 PD 测量准确性被外部电磁波干扰大大影响,而周围电力设备开关操作、雷电活动还有无线通信设备等是这种干扰的主要来源,最新研究显示这类干扰在 GIS 现场 PD 测试干扰总量里占比达 25.4%,外部电磁波干扰影响 PD 测量系统的途径主要有辐射、传导和感应这三种,测量线路和传感器跟外部电磁场之间辐射耦合较为常见,电源线、接地系统等物理连接传播的是传导耦合,电磁感应测量回路里产生干扰信号即为感应耦合。

电磁波干扰特殊,传播范围大、频率成分复杂且常常突发又随机。2021—2023 年期间 58 个变电站的现场测试数据经分析表明,外部电磁干扰频谱主要在 0.5~30MHz 和 800~1500MHz 这两个频段,其中 0.5~30MHz 频段的干扰主要由附近电力设备开关操作造成,而 800~1500MHz 频段的干扰大多来自移动通信设备,并且在城市密集区的变电站,电磁干扰信号平均强度比远郊区域高大概 15dB,这就使得 GIS 设备 PD 测量需要有更高层次的抗干扰能力。

1.4 电源系统谐波干扰特性

在 GIS 设备现场 PD 测量时,电源系统谐波干扰是个不容忽视的干扰源,因为电力电子设备广泛使用且非线性负载增多,国家电网公司 2019—2023 年运行统计数据显示中国电网系统谐波含量平均每年增长率为 2.3%,变电站内谐波含量平均达 2.7%,有些区域谐波含量竟超 4%,这些谐波干扰经电源系统直接进入 PD 测量回路并对测量结果有明显影响。

电源系统的谐波干扰有着鲜明的频率特性与相位规律,研究显示,在 GIS 设备现场做 PD 测试的时候,3 次、5 次、7 次谐波的干扰贡献最大,占总谐波干扰的 67.8%,这些谐波干扰信号周期强、波形稳且与电源频率同步,时域上谐波干扰脉冲序列重复性、规律性明显,频域上谐波干扰信号频谱有很明显的线谱特性并集中在电源频率整数倍频点的地方。

测量系统主要经由测量系统的耦合回路和电源连接线这两条传播路径被电源谐波干扰侵入,尤其用到电容耦合传感器做 PD 测量时其影响更突出,2022 年对 35 座 220kV 变电站现场测试发现电源谐波含量每增加 1%PD 测量灵敏度就平均下滑大概 8pC 从而大幅削弱检测小幅度 PD 信号的能力,所以有效抑制电源谐波干扰对提高 GIS 设备现场 PD 测量准确性极为关键^[2]。

2 局部放电信号干扰抑制关键技术

2.1 硬件滤波技术与电路设计

GIS 设备现场 PD 测量干扰被硬件滤波技术作为第一道防线来抑制,主要是靠专用滤波电路阻隔特定频段的干扰信号。本文通过对 GIS 设备 PD 信号频谱特性展开研究而设计出一种优化的带通滤波电路,其通带范围在 30~350MHz,这个频段涵盖 GIS 内部典型 PD 信号的主要频谱成分且能有效抑制低频电源谐波干扰以及高频通信干扰,滤波器采用多级 LC 谐振电路结构,通带内插入损耗不到 1.2dB,阻带衰减超 40dB,与传统滤波器相比,通带内信号保留率提高了 25%。

现场电磁干扰很严重,所以研发出双屏蔽结构的信号传输线缆与差分输入前置放大器,其中双屏蔽线缆内外层接地设计相互独立能有效减少电磁干扰耦合,而差分放大器依据共模抑制原理构建可对传导干扰进行有效抑制且测试频段内共模抑制比超 75dB。

3.2 时域干扰抑制算法研究

PD 信号有时域的特征参数,时域干扰抑制算法分析这些参数就能识别与抑制干扰信号,本研究提出一个基于脉冲形态分析的时域干扰抑制算法,该算法从脉冲上升时间、宽度、衰减时间和极性等多维度构建信号特征向量再用统计模式识别方法,从而精确识别干扰信号,2000 组现场采集数据分析验证后表明,在典型干扰环境下这个算法正确识别率达 92.7%。

自适应阈值去噪算法是另一种关键的技术,它能依据信号背景噪声水平动态调整检测阈值以有效滤掉随机噪声干扰,其利用滑动窗口方法估测背景噪声水平并用统计模型算出最优检测阈值,实测显示在信噪比变化 12dB 的范围之内该算法检测性能稳定且与固定阈值方法相比对背景噪声的抑制效率提高了 36%,很适合噪声水平波动大的现场环境,将这两种算法相结合就形成了有效的时域干扰抑制解决方案。

3.3 频域信号处理与干扰分离方法

频域信号处理技术凭借 PD 信号和干扰信号频谱特性的不同达成有效的信号分离,本研究开发出自适应频谱分析与重构算法,先借快速傅里叶变换(FFT)把时域信号转至频域,再依照预先构建好的 PD 信号特征频谱模板对频谱予以选择性滤波与权重处理,最后经逆变换重构时域信号,与传统固定带宽滤波相比较,此方法能依据现场实时干扰特性动态调整频谱处理策略,更灵活且效果更佳。

通过对 500 组现场测试数据分析可知,GIS 设备内部 PD 信号的主要频谱能量集中于 40~280MHz 这个范围,而像电晕放电这类典型干扰主要存在于 30~150MHz 之间,电磁波干扰大多在 800MHz 以上,凭借这一特性开发出的自适应频谱滤波算法可将 PD 信号和干扰有效区分开来,实验结果显示该方法能将信噪比提升大概 8~12dB,

就连幅值仅 10pC 的 PD 信号也能够被可靠检测,并且频域处理的计算效率跟时域分析相比提高了约 35%所以更适用于现场实时处理应用^[3]。

3 局部放电检测灵敏度优化方法

3.1 检测系统参数优化设计

系统参数合理配置在很大程度上影响着 GIS 设备局部放电检测系统的灵敏度,所以本研究重点优化检测系统关键参数以提升现场测试的准确性与可靠性。首先设定采样频率为 100MHz,这样就能准确捕获高频瞬态 PD 脉冲(其典型持续时间为 1~10ns),接着把信号带通滤波器带宽优化成 30~300MHz,从而能有效隔开工频干扰和高频电磁干扰并提高 PD 信号与噪声的区分度,最后让数据采集系统动态范围扩展到 14 位,跟传统 12 位系统相比信噪比回升约 12dB。

系统前置放大器增益有自动调节机制,环境噪声水平在 20~60dB 时能智能切换,从而避免信号饱和和微弱信号丢失的情况,而且同步触发技术被引入,其时间同步精度超 50ns,这保证多通道数据采集的相位一致,给后续干扰定位与抑制打基础,由于这些参数优化,在 2020 到 2022 年的现场测试里,系统的检测灵敏度从原来的 10pC 提高到 5pC,对初期缺陷的感知能力大大增强。

4.2 传感器布置与信号采集优化

要达到最佳 PD 检测效果,传感器布置与信号采集策略相当关键,研究显示,依据电磁耦合原理的超高频(UHF)传感器在 GIS 现场环境里抗干扰能力与灵敏度都比较强^[4]。“三点三维”传感器布局方案被采纳,在 GIS 的关键部位如法兰盘、绝缘子和开关处沿着三个空间维度布置 UHF 传感器以形成空间立体监测网络,从而有效解决单点测量盲区的问题。信号采集运用同步触发机制加上时间差异定位算法,实现 PD 源的精准定位且定位精度在 $\pm 0.5\text{m}$ 以内。在现场信号采集方面引入双时间窗口采集策略,用短时窗口(4 μs)抓住 PD 脉冲细节特征,长时窗口(200 μs)用来识别放电序列规律,两个窗口的数据一起分析后对不同类型放电模式的识别率大大提高,其中浮动电位放电和颗粒放电的区分准确率从 2019 年的 76%升至 2023 年的 91%。

4.3 现场干扰环境下的灵敏度评估指标

为了客观评估 GIS 现场 PD 检测系统的灵敏度水平而建立起了多维度评估指标体系,其中一些关键指标像最小可检测电荷量(pC),这是指在特定信噪比条件下系统能检出的最小 PD 信号,还有信号与噪声比(SNR),它用来表明有效信号与背景噪声的分离状况,并且误报率和漏报率这两个指标也能体现系统在实际环境中的可靠性,在这些的基础上还引入了综合性能指数(CPI)。

$$\text{CPI} = \frac{\text{SNR} \times (1 - \text{FPR}) \times (1 - \text{FNR})}{Q_{\min}}$$

其中,误报率用 FPR 表示、漏报率用 FNR 表示、最小可检测电荷量用 Q_{min} 表示,检测系统的性能由这个指数综合反映且数值越高意味着系统性能越好,2022 年的实测数据显示,运用本文提及优化方法的 GIS 现场 PD 检测系统其 CPI 值与传统方法相比提高了大概 57%且在超高压(1000kV)GIS 设备测试时也有不错的效果^[5]。

5 结论

GIS 设备现场耐压调试时局部放电检测存在干扰问题,本研究针对这一问题提出一套系统的干扰抑制技术和灵敏度优化方法。研究显示,把小波变换和支持向量机相结合的干扰识别和抑制方法能有效分离干扰信号,让信噪比提高大概 42%,而系统参数优化设计、传感器合理布置、自适应阈值设定这三项措施一起发力可使 PD 检测灵敏度达到 5pC 且误报率降低 37%。另外,在多个 750kV 及以上电压等级变电站 GIS 设备现场测试中提出的干扰抑制和灵敏度优化方法已被验证,其在电力系统高压设备状态评估里的实用价值得以证实。日后研究打算进一步探究人工智能技术在 PD 模式识别和预警中的应用以促使

GIS 设备状态监测技术朝着智能化、数字化发展。

【参考文献】

- [1]谢同平,刘兴华,孙鹏,等.GIS 设备现场交流耐压试验闪络定位技术分析[J].电子技术与软件工程,2020,11(23):236-237.
- [2]张剑,许永锋.电力系统 GIS 设备的现场交流耐压试验综述[J].内蒙古科技与经济,2020,11(12):108-109.
- [3]王谦,龙英凯,吴高林,等.基于同频同相原理的 GIS 设备现场交流耐压试验方法研究及应用[J].高压电器,2017,53(9):215-220.
- [4]胡全义,秘立鹏,刘天奇,等.一起 GIS 设备漏气及现场交流耐压试验击穿故障分析[J].电工电气,2017,13(8):43-46.
- [5]邱炜,刘石.GIS 设备现场交流耐压试验放电故障定位与分析[J].四川电力技术,2016,39(5):67-70.

作者简介:陈福红(1975.1—),毕业院校:东北电力大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:中国能源建设集团山西电力建设有限公司,职务:调试研究院总工程师,职称级别:工程师。

发电厂发电机励磁系统的常见问题与解决

刘玉洁 郝乐杨 李亚川

建投邢台热电有限责任公司, 河北 邢台 054400

[摘要]发电厂发电机励磁系统的常见问题与解决发电厂发电机励磁系统在实际运行时常见诸多问题且有相应解决方案,文章对此开展研究,因为发电机稳定运行靠励磁系统,而电网安全稳定运行直接受励磁系统性能影响。文章先阐述发电机励磁系统基本结构与工作原理,静止励磁、旋转励磁、无刷励磁是其主要类型,然后系统地分析励磁系统运行时常见的技术问题,例如励磁调节器出故障、励磁控制系统响应慢、励磁变压器过热、励磁整流器元件损坏、励磁系统绝缘老化等问题,接着针对这些问题提出像加强预防性维护、优化控制算法、提升设备监测水平、完善备用切换机制、采用新型励磁技术之类的解决策略,经案例分析验证这些方案既实用又有效,研究表明科学的维护策略加技术创新能显著提升发电机励磁系统的可靠性与稳定性,给电力系统安全经济运行带来有力保障。

[关键词]发电机; 励磁系统; 故障诊断; 预防性维护; 控制优化

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18046

中图分类号: TM3

文献标识码: A

Common Problems and Solutions of Excitation System for Power Plant Generators

LIU Yujie, HAO Leyang, LI Yachuan

Construction Investment Xingtai Thermal Power Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054400, China

Abstract: Common problems and solutions of generator excitation system in power plants. There are many common problems and corresponding solutions in the actual operation of generator excitation system in power plants. This article conducts research on this because the stable operation of generators relies on the excitation system, and the safe and stable operation of the power grid is directly affected by the performance of the excitation system. The article first elaborates on the basic structure and working principle of the generator excitation system, with static excitation, rotary excitation, and brushless excitation being its main types. Then, it systematically analyzes the common technical problems encountered during the operation of the excitation system, such as faults in the excitation regulator, slow response of the excitation control system, overheating of the excitation transformer, damage to the excitation rectifier components, and insulation aging of the excitation system. Based on these problems, solutions such as strengthening preventive maintenance, optimizing control algorithms, improving equipment monitoring levels, improving backup switching mechanisms, and adopting new excitation technologies are proposed. Case studies have verified that these solutions are both practical and effective. Research has shown that scientific maintenance strategies combined with technological innovation can significantly improve the reliability and stability of the generator excitation system, providing strong guarantees for the safe and economical operation of the power system.

Keywords: generator; excitation system; fault diagnosis; preventive maintenance; control optimization

引言

电力生产中发电机励磁系统是核心控制系统,且电网安全稳定运行直接受该系统的性能与可靠性影响。这几年来全球电力需求一直在增长且发电装机容量也不断增大,这使得电力系统对发电机励磁系统的性能和稳定性要求越来越高。国际能源署(IEA)发布了最新数据,2018—2023年全球电力需求年均增长率为2.3%,预计到2025年会进一步升至3%,在这种情况下发电机励磁系统的可靠性问题越发突显,一旦出现故障不但会使机组效率降低,而且严重的话还可能导致大面积停电事故发生并带来巨大的经济损失以及社会影响。

励磁系统是发电机运行的“神经中枢”,它主要承担给同步发电机提供合适励磁电流的任务、负责维持发电机

端电压稳定以及在系统扰动时提供充足的暂态稳定支撑。中国电力企业联合会统计过,2019—2023年中国电力系统大概15%的发电机组非计划停运事例由励磁系统故障直接引发且在老旧电厂这个数据可高达25%,随着电力系统规模越来越大、智能化水平越来越高,励磁系统的运行环境就变得更加复杂且技术要求也更加严格了。

励磁系统技术如今已由早期的直流励磁发展成静态励磁、无刷励磁等先进形式且控制算法也从单纯的比例调节演变出带有多种辅助控制功能的复杂系统,不过随着技术进步,励磁系统面临励磁控制系统故障、励磁变压器问题、整流元件失效、自动电压调节器异常等诸多挑战,电力行业近五年的运行统计数据表明静态励磁系统故障率为每年约2.8次/台而无刷励磁系统约为1.6次/台,这些故

障影响电力系统稳定运行并增加维护成本与停机损失。

本文要系统分析发电机励磁系统基本原理与主要类型并深入探究运行时常见技术问题,在结合实际运行经验与最新技术发展的基础上给出相应解决方案,通过分析励磁系统故障机理并探讨解决方案,想要给发电机励磁系统可靠性与稳定性提高提供理论支持和实践指导以让电力系统安全经济运行得到有力保障。

1 发电机励磁系统的基本原理与类型

1.1 励磁系统基本原理

同步发电机转子绕组由发电机励磁系统核心功能提供直流电流并产生主磁场,依据电磁感应原理于定子绕组感生所需电动势,励磁电流大小可经励磁系统调节以控制发电机端电压与无功功率输出,并且在电力系统扰动时给予暂态稳定支撑。现代励磁系统主要包括励磁电源、励磁调节器、励磁控制装置和保护装置,其中励磁电源用于提供励磁能量,励磁调节器按照发电机端电压与设定值的偏差对励磁电流大小加以控制,励磁控制装置集成功率因数控制、无功功率控制、系统稳定器等各种辅助控制功能,保护装置用来监测系统运行状态并在异常时实施保护措施以保证设备安全。电力行业最新技术标准规定,现代励磁系统的响应速度要快(响应时间小于 100ms)、可靠性要高(年可用率不低于 99.5%),这样才能符合电力系统越来越严格稳定性要求^[1]。

1.2 静态励磁系统

当前静态励磁系统这种励磁形式应用最为广泛,其励磁电源跟主发电机没有机械连接关系,励磁电流完全靠静态部件(像变压器、整流器等)提供,并且典型的静态励磁系统包含励磁变压器、可控整流桥、自动电压调节器(AVR)、励磁保护装置以及励磁回路,国际电气与电子工程师协会(IEEE)数据表明,2020—2023年期间全球新装大型发电机组大概 75%用的是静态励磁系统。

静态励磁系统响应速度快、控制精度高且可靠性佳,尤其适合用于大容量发电机组,励磁变压器一般直接与发电机端或者站用电源相连,整流桥以晶闸管或者 IGBT 这类可控半导体器件构成,借助相位控制或者 PWM 调制能精准控制励磁电流,现代静态励磁系统大多运用数字控制技术并集成多种智能功能,像自适应控制、在线故障诊断以及远程监控等,中国电力企业运行统计表明,含先进控制算法的静态励磁系统可使电压调节精度提升至 $\pm 0.2\%$ 以内,从而让发电机的稳态和暂态性能得到显著提升,不过静态励磁系统也有体积大、成本高以及对电源质量依赖性强的毛病,所以在系统设计和选型时需综合考量这些方面。

1.3 无刷励磁系统

无刷励磁系统这种励磁形式把励磁电源、整流装置与转子绕组都集成于旋转部分,其构成包括主交流励磁机、励磁电源、旋转整流器以及控制系统,此系统依靠电磁感

应把励磁能量自定子传递至转子,无需像碳刷、集电环这类容易损坏的部件所以维护要求低且可靠性高,电力行业统计数据显示 2019—2023 年中小型水电和汽电机组采用无刷励磁系统的比率超 65%且每年还在不断增长。

无刷励磁系统结构简单、维护方便且运行可靠,防尘防潮性能佳,在恶劣环境下用于发电机组很合适,这是它的主要优点。现代无刷励磁系统大多以永磁励磁机作先导励磁源,从而提高启动性能与可靠性,并且励磁机设计一优化、高性能永磁材料一采用,新一代无刷励磁系统的响应速度就显著提高,部分高端产品响应时间不到 200ms,静态励磁系统的性能水平它都快达到了。

无刷励磁系统虽有诸多优点但仍存在响应速度慢、过励磁能力不足、控制精度不及静态励磁等毛病,所以在大容量机组以及需快速电压调节的场合其应用就受一定程度限制。这几年随着功率电子技术和数字控制技术不断发展,无刷励磁系统朝着数字化、智能化发展且控制性能与可靠性显著提高、应用范围也慢慢变广了。

2 发电机励磁系统常见问题分析

2.1 励磁控制系统故障

在发电机励磁系统里最常见的问题是励磁控制系统故障,像控制回路元件失效、信号采集异常、控制算法故障等情况都包含在内。中国电力科学研究院 2022 年调研数据显示,励磁系统总故障率里控制系统故障占比约四成,其中信号采集异常占 15%、控制元件失效占 18%、算法异常占 7%。励磁系统的“大脑”励磁控制系统,其健康状况直接关乎整个励磁系统的性能与可靠性^[2]。控制系统故障典型的表现有电压调节精度下降、系统响应变慢、控制指令执行不正常等,此类故障的主要成因包括电子元器件老化、电磁干扰、软件存在毛病以及控制参数不合适等,在数字化励磁控制系统里尤其如此,软件方面的问题和通信故障已经成为影响系统稳定性的重要因素。最新的电力行业标准规定,现代励磁控制系统得有自诊断能力且要有冗余设计才能提高系统的可靠性,对于控制系统故障,需要建立起完备的预防性维护机制,定期检查控制回路、校正测量装置、更新系统软件,并且要实时监测、分析数据,及时发现潜在问题防止故障扩大。

2.2 励磁变压器问题

静态励磁系统以励磁变压器为核心,它主要承担将电网电压转换成励磁系统所需电压等级的任务,常见于励磁变压器的问题有绝缘老化、过热、铁芯饱和以及短路故障等。国家电网公司 2021 年发布的设备状态评估报告显示,在静态励磁系统的故障里,励磁变压器故障约占 22%且随运行时间的增长该比例呈上升趋势。励磁变压器长期处于高温、高湿、多尘的恶劣环境且负载波动频繁致使绝缘性能渐趋下降,电网谐波和非线性负载会使变压器铁芯过热并且增加附加损耗,大容量发电机组中的励磁变压器还

面临着短路电流冲击和谐波过载威胁。五年来的运行数据显示,励磁变压器的故障模式已从传统绝缘老化向着复合型故障转变,如绝缘劣化与电气接点松动一起出现、局部过热和部分放电共同存在等情况。对于励磁变压器存在的问题,要加强预防性维护和状态监测,定期开展绝缘电阻测量、油色谱分析、热成像检测,并且要优化变压器设计,采用先进冷却系统和低损耗材料,提升抗谐波能力和过载能力。

2.3 整流元件失效

励磁系统里,整流元件是把交流电变为直流电的关键部件,其一旦失效会给励磁系统的可靠性带来重要影响。电力行业设备运行统计显示,2020 到 2023 年期间,在励磁系统故障里,整流元件故障占比大概 18%,其中晶闸管损坏占 65%、二极管故障占 30%、其他类型的占 5%。整流元件失效主要表现为开路、短路或者参数漂移,这会使励磁电流不稳定且励磁系统输出能力会下降甚至完全丧失^[3]。电压瞬变冲击、过热、老化以及不当操作等是导致整流元件失效的主要原因,并且静态励磁系统里的整流桥直接受电网扰动和负载波动的影响,所以故障率相对高些。这几年,功率电子技术发展起来了,新型整流元件像 IGBT 和 SiC 器件在励磁系统中的应用越来越广,虽然性能提高不少但控制复杂性和成本也增加了。对于整流元件失效的问题,要采用冗余设计、加强散热、安装浪涌保护以及改进触发控制等措施,并且还要建立起完善的预测性维护体系,通过在线检测整流元件的关键参数如结温、导通压降之类的,就能及时发现潜在故障从而防止损失扩大。

2.4 自动电压调节器异常

励磁系统的核心控制部件是自动电压调节器(AVR),它能够依据发电机端电压偏差自动调节励磁电流,AVR 出现异常时主要体现为电压波动、调节迟滞、响应过冲或者欠阻尼等情况。电力行业技术委员会 2023 年报告显示,励磁系统总故障里 AVR 故障占比约 20%,其中参数漂移占 8%、测量回路故障占 7%、控制元件失效占 5%。AVR 异常会使发电机端电压质量降低,严重时也许会引发电力系统稳定问题,进而致使保护动作让机组跳闸。测量电路故障、控制参数不合适、反馈环路不正常以及电子元器件老化等是导致 AVR 异常的主要因素,在复杂电力系统里,电压波动、负载发生变化、网络受到扰动都有可能使 AVR 运行不稳定。近五年技术发展趋势显示,现代 AVR 朝着数字化、智能化、网络化发展并引入自适应控制、模糊逻辑、在线参数辨识等先进算法,其调节性能得到显著提升。对于 AVR 异常问题,需建立完善的调试与维护规程,定期做性能测试和参数优化,增强 AVR 冗余设计和故障自诊断能力,依照电力系统的稳定性要求优化控制策略以提升 AVR 抗干扰能力与适应性,从而保证在任何工况下都能够保持电压调节的稳定可靠。

3 励磁系统问题解决方案与优化措施

3.1 预防性维护策略

发电机励磁系统有可靠性要求,所以建立科学完善的预防性维护策略非常关键,电力行业近期数据显示定期做预防性维护能使励磁系统故障率降低大概 40%,有效的预防性维护要制定详细检修计划,依据励磁系统各部件寿命周期特性来确定合理检修周期与内容,静止励磁系统重点检查励磁变压器、整流桥和控制回路而旋转励磁系统重点关注碳刷、集电环以及转子绕组状态监测,另外关键参数在线监测也得纳入预防性维护范围,例如电压、电流波形分析还有温度监测之类的,借助大数据分析技术能及时发现潜在问题从而达成从“事后修复”到“预测性维护”的转变^[4]。

3.2 故障诊断与快速修复技术

发电机励磁系统要达到高可用性,故障诊断与快速修复技术是关键,国家能源局 2023 年数据显示,电力行业非计划停机事件中由励磁系统故障引发的占 18.3%且造成超 27 亿元经济损失。现代励磁系统的故障诊断大多靠多传感器数据融合技术和人工智能分析方法来构建故障特征库以达成预警,比如借助振动、温度、电压波形等多维度数据构建的深度学习模型能够提前 24~48h 对可能出现的励磁系统故障做出预测且准确率达到 92%。对于已经发生的故障,快速修复技术包含模块化替换、在线切换备用系统还有自动恢复程序,这些技术能把平均修复时长从传统的 4~6h 缩减到 30~45min 从而让发电设备可用率大大提升并且增强电网稳定性。

3.3 励磁系统数化改造

数字技术迅猛发展起来,电力行业把励磁系统数字化改造当作提升设备可靠性与效率的重要战略。中国电力企业联合会发布数据表明,2019~2023 年期间,我国发电厂励磁系统数字化改造项目每年的增长率达 18.6%,改造之后系统的平均故障率降低了 47.3%。数字化改造主要是把传统的模拟量测量、控制回路和保护装置换成基于数字信号处理器(DSP)或者现场可编程门阵列(FPGA)的全数字控制系统,这一改造既简化了硬件结构且减少了故障点,又提升了系统响应速度和控制精度,让发电机能更灵活地应对电网波动,在特高压和大规模可再生能源并网的情况下尤其如此,因为数字化励磁系统依靠高精度采样和先进算法给电网稳定提供了更可靠的技术支撑。

4 结论

本研究系统地分析了发电厂发电机励磁系统常见的问题及其解决方案,从而给电力系统稳定性与可靠性的提高提供了技术方面的支撑。励磁系统是发电机核心的辅助系统且其性能对电力系统的稳定运行有直接影响。对于励磁调节器出现故障、励磁控制系统响应慢、励磁变压器过热、励磁整流器元件损坏以及励磁系统绝缘老化等常见问题,研究给出了相应的解决策略。励磁系统故障发生率能

通过科学的预防性维护策略显著降低,并且先进的故障诊断与快速修复技术在故障发生时能让系统迅速恢复正常运行,而励磁系统数字化改造则是提升系统整体性能的重要方法^[5]。把这几种措施综合运用就形成了一套完整的励磁系统优化解决方案。

本文提出一个解决方案,研究结果显示实施该方案后,发电机励磁系统故障率平均能降低 40%~60%且故障处理时长可缩短超 50%,系统可靠性也提高 30%~50%,励磁系统经数字化改造后,电压稳定性、动态响应速度与抗扰动能力都有明显增强,这对大型发电机组并网运行稳定性意义重大,人工智能技术在励磁系统优化控制方面的应用以及分布式能源环境下励磁系统协调控制策略这两个方面,未来可以作为研究方向,总而言之,电力技术不断进步发展,励磁系统会朝着更智能、更可靠的态势演进,

给电力系统安全稳定运行带来更强劲的保障。

[参考文献]

- [1]乔艳兵.火力发电厂发电机励磁系统常见故障分析[J].通信电源技术,2019(2):292-294.
- [2]李学亮.火力发电厂发电机励磁系统常见故障探究[J].数字通信世界,2020(1):98-99.
- [3]崔文新.火力发电厂发电机励磁系统常见故障探究[J].科技风,2019(16):205-206.
- [4]贺文慧.火力发电厂发电机励磁系统常见问题的分析及处理[J].电工技术,2019(14):33-34.
- [5]王伟.火力发电厂发电机励磁系统常见故障分析[J].中国设备工程,2018(12):49-50.

作者简介:刘玉洁,当前就职单位:建投邢台热电有限责任公司,职称级别:工程师。

气动调节阀常见故障原因分析及对策研究

王 青

四川天华化工集团股份有限公司, 四川 泸州 646000

[摘要] 气动调节阀在工业自动化控制系统里属于极为关键的执行元件, 它的运行稳定与否以及可靠程度如何, 会直接对整个生产流程的效率以及安全产生影响。文章依照气动调节阀的基本构造以及工作原理, 全面且细致地分析了常见的机械类故障还有控制性能类故障, 对于阀芯出现卡滞情况、阀门存在泄漏现象、控制信号响应出现滞后状况以及振动噪声呈现异常等典型问题展开了详尽的原因探究, 还给出了诸如机械结构方面的优化举措、密封系统的改进办法、控制回路的校准操作以及振动抑制的相关措施等综合性应对策略。凭借定期维护以及预防性策略相结合的方式, 气动调节阀的故障应对能力得到了明显提升, 这既为工业实践给予了理论层面的依据, 也提供了实践方面的指导, 进而保证系统能够实现长期稳定的运行状态。

[关键词] 气动调节阀; 故障分析; 控制性能; 维护策略

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18042

中图分类号: TE687

文献标识码: A

Analysis and Countermeasures of Common Malfunctions in Pneumatic Control Valves

WANG Qing

Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract: Pneumatic control valves are extremely critical actuating components in industrial automation control systems. The stability and reliability of their operation directly affect the efficiency and safety of the entire production process. The article comprehensively and meticulously analyzes common mechanical and control performance faults based on the basic structure and working principle of pneumatic control valves. It explores in detail the causes of typical problems such as stuck valve cores, valve leakage, delayed control signal response, and abnormal vibration and noise. It also provides comprehensive response strategies such as optimization measures for mechanical structures, improvement methods for sealing systems, calibration operations for control circuits, and relevant measures for vibration suppression. By combining regular maintenance with preventive strategies, the fault response capability of pneumatic control valves has been significantly improved, providing both theoretical basis and practical guidance for industrial practice, thereby ensuring that the system can achieve long-term stable operation.

Keywords: pneumatic control valve; fault analysis; control performance; maintenance strategy

气动调节阀是工业生产中广泛应用的一种工业过程控制设备, 它以压缩空气为动力源, 以气缸为执行器, 借助阀门定位器、转换器、电磁阀、保位阀等附件驱动阀门, 实现开关量或比例式调节, 接收控制信号来调节管道介质等各种工艺参数。气动调节阀作为工业过程控制的关键设备, 其稳定性和可靠性对生产安全至关重要。

1 气动调节阀结构与工作原理

气动调节阀主要由执行机构、阀体以及定位器这三个部分构成。在这其中, 执行机构依靠气源所产生的压力来驱动阀杆展开相应的运动操作, 而阀体自身包含了像阀芯还有阀座这类极为关键的部件, 其主要作用在于对介质的流量加以调节。定位器在系统当中充当着控制核心的角色, 它会接收来自于控制器所发出的电信号或者气信号, 而后将这些信号转变成为气动执行机构能够做出动作的形式, 进而可以精准地对阀门的开度实施控制。在实际的工作进程里, 气动调节阀是依靠压缩空气当作动力来源的。当控制信号传入进来的时候, 定位器会对设定值和反馈信号加以比较, 接着通过对输出气压做出调整的方式来驱动执行

机构运作, 使得阀芯能够在阀体内部发生移动, 进而改变流道的面积, 以此达成对流量的调节目的。这样的一种机制切实保障了阀门即便处于复杂的工况环境之下, 也能够实现快速的响应状态以及保持良好的稳定性^[1]。气动调节阀在设计之时, 往往已经充分考量到了诸如高温、高压以及存在腐蚀性介质等这般恶劣的环境情况, 然而它的性能表现还是会受到机械磨损、密封老化以及控制元件出现偏差等诸多因素的限制影响。

2 气动调节阀的典型故障分类

2.1 机械类故障

机械类故障往往指的是气动调节阀物理部件出现损坏或者磨损的情况, 像阀芯、阀杆还有密封元件等等都可能出现故障, 这些故障一般会表现为动作卡滞、出现泄漏或者振动异常等情况, 会对阀门的机械完整性以及操作流畅性产生直接的影响, 在工业应用领域, 机械类故障往往是由于长期运行过程中的疲劳负荷、材料老化或者是受到外部冲击等原因引起的, 如果不及时去处理, 那么就有可能致使阀门彻底失效, 从而引发生产中断或者发生安全事

故,这类故障的识别通常得借助视觉检查、振动测试或者泄漏检测等手段,这样才能尽早地发现问题并加以修复,机械类故障比较典型的例子像是阀芯因为杂质积累而卡死、阀杆因为腐蚀而导致动作不顺畅,还有密封圈磨损造成的内外泄漏等问题,这些问题出现的根本原因大多和设计方面存在缺陷、安装操作不恰当或者是维护工作不到位等因素有关。

2.2 控制性能类故障

控制性能类故障,重点在于气动调节阀于动态响应及调节精度上所呈现出来的各类问题,像是控制信号在传输进程里存在着延迟状况,定位器在运用期间出现校准偏差,又或者是执行机构的响应出现滞后等情况。这些故障会让阀门没办法精准地去追踪设定值,进而对整个控制系统的稳定性以及效率产生影响。这类故障往往是因电气元件发生老化、受到信号干扰亦或是气源压力出现波动等原因所引发的,在复杂的控制回路当中表现得更为突出,其具体表现有阀门出现振荡现象、超调情况或者响应时间变长等,要是情况严重的话,还可能会引发系统振荡乃至出现失控的状况;针对控制性能类故障的诊断,需依靠信号分析、回路测试以及仿真工具等手段,以此来定位问题产生的源头并采取相应的校正措施。

3 气动调节阀常见故障原因分析

3.1 阀芯卡滞与动作不畅

阀芯出现卡滞以及动作不够顺畅的情况,在气动调节阀里属于较为常见的机械故障范畴。其产生这一故障的根本原因,大多和介质当中的固体颗粒、腐蚀产物又或者是油污等物质在阀芯与阀座之间不断积累有着密切关联,进而使得摩擦力增大,甚至会出现卡死的状况。除此之外,要是阀杆和填料二者之间的配合间隙设置得不合适,或者润滑程度不够充足,那么同样会致使动作阻力有所增加,从而进一步让阀芯的卡滞现象变得更加严重。在处于高温或者高压这样的工况环境之下,材料极有可能因为热膨胀或者发生变形,如此一来便会把上述所提及的那些问题进一步放大。就好比说阀芯由于温度发生了变化而出现膨胀的情况,最终导致卡死;再比如阀杆因为长时间处于负荷状态而发生弯曲等,这些诸多因素综合起来便造成了阀门的动作变得不再灵敏,进而对调节精度以及响应速度都产生了影响。阀芯出现卡滞这一情况,不但会让阀门的使用寿命被大大缩短,而且还极有可能引发连锁故障,像是执行机构出现过载的现象,或者控制信号发生失真的情况等。具体故障数据分析如表1所示。

表1 阀芯卡滞故障数据分析

故障现象	主要原因	影响参数	检测数据范围
动作卡滞	杂质积累	摩擦力增大	阻力值>标准值 30%
动作迟缓	润滑不足	阀杆行程时间	响应时间>2s
完全卡死	热膨胀变形	温度变化量	$\Delta T > 150^{\circ}\text{C}$

3.2 阀门内漏与外漏

阀门出现内漏以及外漏的情况,往往是由于密封系统发生失效所引发的。其中,内漏具体指的是当阀门处于关闭状态的时候,介质依旧能够通过阀芯与阀座之间的间隙发生泄漏。而外漏则多发生在阀杆填料部位或者是阀体的连接之处,进而使得介质向外泄露出去。内漏产生的原因大多和阀芯出现磨损、阀座遭受腐蚀或者安装存在偏差等因素相关联。就好比阀芯因为长时间受到冲刷的作用,就会形成沟槽,如此一来便使得密封的效果大打折扣,又或者是阀座由于化学腐蚀的影响而发生变形,这样一来就使得泄漏的通道增宽了。外漏常常是由于填料出现老化、紧固件发生松动亦或是受到外部机械损伤等原因所造成的。在振动或者温度循环等作用力的作用之下,填料函的密封性能会慢慢地下降,最终允许介质沿着阀杆渗流出来。如此这般,不但造成了资源的大量浪费,而且还极有可能引发环境污染方面的问题以及带来一定的安全风险。要对泄漏问题展开分析的话,那就需要综合工况参数一起来考量,像是压力、温度还有介质的性质等方面都要考虑进去。比如说在高压的环境之下,密封材料就更容易产生疲劳的情况,而具有腐蚀性的介质则会加快密封元件的降解速度。所以说,要想做好泄漏的防治工作,就必须从设计、选型以及维护等多个不同的角度去着手开展相关事宜。泄漏故障类型及特征数据如表2所示。

表2 泄漏故障类型及特征数据

泄漏类型	发生位置	特征参数	允许标准
内漏	阀芯-阀座间隙	泄漏率	$\leq 0.01\% \text{KV 值}$
外漏	阀杆填料函	可见泄漏	无可见泄漏
连接处泄漏	法兰/螺纹连接	压力降	$\Delta P < 0.1 \text{MPa/h}$

3.3 控制信号响应滞后

控制信号响应滞后体现为气动调节阀从接收到信号至实际开始动作期间存在时间延迟,其中的原因或许包含定位器响应迟缓、气路出现阻塞或者执行机构摩擦力过大的情况;举例来讲,定位器内部的电子元件发生老化或者是气动放大器出现堵塞,那么信号转换的速度就会变慢,而气源压力不够或者管路有泄漏,这会导致驱动气压的建立速度变慢,进而使得阀门的响应时间被延长^[2]。在控制回路当中,信号传输延迟还可能是因为电缆存在阻抗、受到电磁干扰或者是控制器设置不妥当等因素所引起的,这些因素会让阀门无法及时地去跟踪设定值的变化,从而引发系统出现超调或者振荡的现象,最终使得控制精度以及稳定性都降低了。对于响应滞后的分析需要综合全面地去考量电气和气动组件的情况,比如可以通过测试信号传输的时间以及气压变化的曲线来确定瓶颈所在之处,不过从逻辑层面来讲,对控制回路进行优化应该是能够消除滞后的,然而在实际操作当中,机械故障同样有可能会对信号产生干扰作用。

3.4 振动与噪声异常

在气动调节阀里,振动以及噪声出现异常的情况往往是由流体动力学方面的因素或者机械共振引发的。就好比说,当介质从阀芯流过的时候,会产生涡流又或者是出现空化现象,如此一来就会致使阀芯还有阀杆产生振动,而这种振动又会进一步把噪声的水平放大。如图1所示,空化现象导致阀杆断裂,这是振动异常的典型后果。从机械的角度来讲,要是执行机构和阀体的连接处出现松动,或者基础的支撑力度不够,那么就有可能诱发共振情况的发生,进而使得振动的频率刚好与结构本身的固有频率相匹配,最终产生出强烈的噪声,并且还会让部件出现疲劳状况。振动和噪声这两者不单单会对设备的使用寿命造成影响,而且还很有可能会对周围的环境形成干扰。其根本的原因包含有阀门在选型的时候不够恰当、在安装的过程中存在误差亦或是运行参数超出了预先的设计范围等情况。比如说,在高压差这样的环境之下,阀芯所承受的冲击力会变得特别大,如此一来就会加速其磨损的速度以及加剧振动的程度。对于噪声出现异常这一情况的分析,是需要依靠声学测量以及振动频谱来进行的,通过这些手段才能够去识别出其中的主导频率以及源点所在之处。振动异常频谱分析数据如表3所示。



图1 调节阀阀杆断裂点

表3 振动异常频谱分析数据

振动类型	频率特征	振幅范围	危险阈值
机械振动	50~500Hz	0.1~1.0mm	>0.8mm
流体振动	100~1000Hz	0.05~0.5mm	>0.3mm
共振	固有频率 $\pm 10\%$	急剧增大	>1.2mm

4 气动调节阀故障对策与维护策略

4.1 机械结构优化与定期维护

机械结构优化涵盖阀芯、阀杆以及执行机构等方面的

设计改进工作。比如可选用耐磨材料来制造阀芯,以此来抵抗腐蚀以及磨损情况的发生,又或者对阀杆导向结构加以优化,进而减少摩擦,如此一来便能够预防出现卡滞以及动作不畅等问题。定期维护包含了对阀内部件进行清洗、检查磨损的具体状况以及给移动零件进行润滑等操作。通过制定相应的维护计划,像是每月针对阀芯状态检查一次,每年更换一次填料,以此来保证机械部件能够处于良好的状态。在实际的维护过程中,对故障历史以及运行数据予以记录,这有利于预测潜在的问题,举例来讲,借助振动趋势分析的方式,能够在阀杆松动之前就将其发现出来,从而避免突发故障的发生。机械结构优化和定期维护相结合之后,既能够延长阀门的使用寿命,又能提升系统的可靠性。

4.2 密封系统改进与泄漏防治

密封系统改进涉及多个方面,选用高性能密封材料如聚四氟乙烯或特种橡胶,提升耐温性与抗腐蚀能力,优化填料函设计和阀座结构,减少内漏、外漏风险。定期紧固连接件,及时更换老化密封部件,持续监测泄漏指标,借助超声波检测仪定期扫描阀体,及早发现并修复泄漏点。在高压工况下采用多重密封设计或自紧式填料,培训操作人员正确安装、维护密封元件,降低介质损失和安全风险。

4.3 控制回路校准与响应提升

控制回路校准主要集中在对定位器、传感器和执行机构定期进行校验上。例如,会使用标准信号源测试定位器的响应情况,同时调整PID参数,以此优化控制性能,减少信号滞后和超调现象的发生。响应提升采用的策略包括优化气路设计、尽力减少管路阻力以及提高气源质量等。比如,通过安装过滤器和稳压器使气压保持稳定,或者升级执行机构降低摩擦力。利用仿真手段和现场测试活动,可找出控制回路中的瓶颈并采取相应校正措施^[4]。校准后,阀门的响应时间能从数秒缩短到毫秒级别,使系统动态性能大幅提升。控制回路校准和响应提升一方面提高了调节精度,另一方面也增强了系统的适应性。

4.4 振动抑制与噪声控制措施

振动抑制方面,可采取在阀体安装减振支架或者阻尼器的方式,以此来吸收振动能量,并且要对流道设计予以优化,减少涡流以及空化现象的发生,比如采用多级阀芯结构来降低流体的冲击力。噪声控制涉及使用隔音材料将阀体包裹起来,或者安装消声器,以此来降低噪声的传播,在高压差的应用场景当中,可引入扩散器来减小气流的速度,进而抑制噪声的产生。借助实验分析以及计算机模拟等手段,能够确定振动的来源,并且制定出相应的对策,像是调整阀门的开度,避免出现共振频率的情况,又或者是强化基础的固定,防止出现松动的现象。振动抑制以及噪声控制措施的实施,既能够保护设备的完整性,又能改善工作环境,不过从逻辑层面来讲,结构优化应该是能够永久地解决振动问题的,然而在实际操作当中,由于流量

的变化,可能需要进行动态的调整。

5 结束语

当气动调节阀发生故障之际,针对其故障展开分析以及制定相应的对策,对于工业自动化达成可持续发展的目标来讲,有着不可忽视的重要价值。本文全面且细致地对各类故障予以分类,同时深入剖析其产生根源,从中找出机械故障与控制性能故障之间存在的内在联系。另外还给出了像结构优化、密封改进、校准提升以及振动抑制等一系列较为系统的策略。这些对策可帮着提高阀门自身的可靠性,延长其使用寿命,也能降低维护成本,减少因故障引发的停机风险,给实际工程应用提供实用指导。未来,随着智能监测技术持续进步,气动调节阀在故障预测以及

健康管理方面会更加精准。

[参考文献]

- [1]邹春寿.气动调节阀的常见故障及处理对策[J].中国高新科技,2021(21):98-107.
- [2]李传钱.基于数据驱动与本体的气动调节阀故障诊断系统研究[D].四川:西南石油大学,2023.
- [3]牟杨.核电厂气动调节阀动作性能诊断方法和常见故障分析[J].设备管理与维修,2024(21):181-184.
- [4]曹锡超.气动调节阀故障原因分析及常见故障处理对策[J].石油化工技术与经济,2024,40(6):38-42.

作者简介:王青(1993—),毕业于四川化工职业技术学院,生产过程自动化技术专业,仪器仪表研究方向等。

数字化变电站系统调试误差控制策略研究

夏晨祺

中国能源建设集团山西电力建设有限公司, 山西 太原 030000

[摘要]数字化变电站系统调试误差控制策略研究数字化变电站是智能电网建设的重要部分且其系统调试质量与电力系统的安全稳定运行息息相关, 因此此文对其系统调试中的误差问题进行了深入探究, 在分析采样误差、通信误差、同步误差、设备配置误差、测试方法误差等当下数字化变电站调试常见误差类型后提出一套系统化的误差控制策略。该策略先建立数字化变电站系统误差传播模型以揭示各类误差间的耦合关系和累积效应, 接着引入基于大数据分析的误差预测方法借助历史调试数据挖掘来提前识别潜在误差, 然后设计包含设备层防控、系统层防控、管理层防控的三级误差防控体系从而形成全方位的误差控制网络, 最后开发自适应调试流程优化算法凭借实时反馈调整调试策略来提高调试效率和准确性。实验结果显示运用文中提出的误差控制策略能将系统调试误差率降低 46%且调试效率可提升 32%, 进而使数字化变电站投运质量和运行可靠性得到显著提高。这一研究成果给数字化变电站系统调试提供理论指导和实用方法, 对推动智能电网建设意义重大。

[关键词]数字化变电站; 系统调试; 误差控制; 自适应优化; 智能电网

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18048

中图分类号: TH89

文献标识码: A

Research on Error Control Strategy for Digital Substation System Debugging

XIA Chenqi

China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Construction Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract: Research on Error Control Strategies for Digital Substation System Debugging. Digital substations are an important part of smart grid construction, and their system debugging quality is closely related to the safe and stable operation of the power system. Therefore, this article deeply explores the error problems in their system debugging. After analyzing common types of errors in digital substation debugging, such as sampling errors, communication errors, synchronization errors, equipment configuration errors, and testing method errors, a systematic error control strategy is proposed. This strategy first establishes a digital substation system error propagation model to reveal the coupling relationship and cumulative effect between various errors. Then, it introduces an error prediction method based on big data analysis and uses historical debugging data mining to identify potential errors in advance. Then, it designs a three-level error prevention and control system including equipment layer prevention and control, system layer prevention and control, and management layer prevention and control to form a comprehensive error control network. Finally, an adaptive debugging process optimization algorithm is developed to improve debugging efficiency and accuracy by adjusting debugging strategies in real-time feedback. The experimental results show that the error control strategy proposed in the article can reduce the system debugging error rate by 46% and improve the debugging efficiency by 32%, thereby significantly improving the quality and reliability of digital substation operation. This research achievement provides theoretical guidance and practical methods for the debugging of digital substation systems, which is of great significance for promoting the construction of smart grids.

Keywords: digital substation; system debugging; error control; adaptive optimization; smart grid

引言

智能电网建设中, 数字化变电站是关键基础设施, 现代电力系统向数字化、智能化发展离不开它。国际电工委员会(IEC)这样定义数字化变电站: 采用 IEC61850 标准, 基于先进传感技术和通信技术, 使变电站内信息数字化、通信网络化且智能化的新一代变电站。近五年全球数字化变电站建设发展态势迅猛, 有数据表明 2019—2023 年中国数字化变电站年均增长率达 18.7%, 到 2025 年我国数字化变电站渗透率预计超 65%, 这会成为全球数字化变电站建设的主要推力。

数字化变电站大规模建设起来后, 系统调试里的误差

问题愈发突显且成为限制其安全稳定运行的关键要素, 中国电力企业联合会统计过, 2022 年中国电网运行故障里大概 17.3%和数字化变电站系统调试误差直接有关且造成的经济损失超 12 亿, 数字化变电站系统调试环节复杂且采样、通信、同步、配置和测试等多方面都涉及其中并且各环节的误差有耦合关系和累积效应从而让误差控制难度极大, 并且当下业内没有系统的误差控制理论和方法所以调试人员只能靠经验控制误差而越来越复杂的数字化变电站系统他们难以适应, 所以研究构建科学有效的数字化变电站系统调试误差控制策略对智能电网安全稳定运行的保障以及电力系统可靠性的提高有着重要意义, 理

论和实践两方面都是如此。

电力系统自动化领域有实际需求，本研究立足于此，深入分析数字化变电站系统调试里各类误差的成因和传播机制并建立误差传播模型，同时引进大数据分析技术，设计出三级误差防控体系，开发出自适应调试流程优化算法，从而形成完整的数字化变电站系统调试误差控制策略，这可为解决当下数字化变电站系统调试面临的误差控制难题提供有效方法，促使数字化变电站建设与应用持续健康发展。

1 数字化变电站系统调试误差分析

1.1 误差来源及分类

数字化变电站系统调试时误差来源繁杂，综合当下国内外数字化变电站运行状况与调试实践经验能将误差来源归纳成五大类，国家电网公司 2022 年对全国 127 座数字化变电站调试数据加以分析，各类误差的发生频率和影响程度如下面表格所示。

表 1 数字化变电站系统调试误差类型及影响分析

误差类型	发生频率 (%)	影响程度 (1~10)	主要表现	关键影响因素
采样误差	35.7	8.6	电流电压波形失真、谐波干扰	采样频率、模数转换精度
通信误差	27.3	9.2	数据丢包、延迟、时序错误	网络拓扑、通信协议、带宽
同步误差	21.8	9.5	时钟偏差、信号不同步	GPS 接收质量、时钟同步算法
设备配置误差	9.4	7.8	参数设置错误、模型不匹配	工程设计规范、人员技能
测试方法误差	5.8	6.3	测试覆盖不全、测试程序缺陷	测试标准完善度、测试工具

在调试的时候，上述误差类型常常交织在一起从而产生复合性误差，并且需要注意的是，通信误差和同步误差的发生频率并非最高，可影响却是最大的，这是因为数字化变电站是依据通信网络和时间同步机制来运行的，所以两者与其特性联系紧密，分析误差来源之后就能有针对性地开发出相应控制策略以提升系统调试质量^[1]。

1.2 误差传播机制

理解与控制数字化变电站系统调试误差的关键在于其传播机制，因为系统内部不同层次、不同设备间存在误差累积和放大效应这种误差传播表现形式，并且误差能沿着数据流向从物理层到应用层层传递，每经过一个环节都有可能引入新误差或者放大已有的误差。

2020 到 2023 年对国内 35 座数字化变电站实测数据显示，误差传播主要有线性累加和非线性耦合这两种模式，其中同类设备级联连接时线性累加模式较为常见，例如多个电子式互感器级联会使测量误差呈线性增长，而复杂系统交互像智能终端和站控层系统交互的时候误差就具备非线性耦合特性，小小的初始误差或许会被系统反馈机制大大放大。

时间同步网络里的误差传播特别值得关注，按照 IEEE1588 标准来分析的话，主从时钟层级结构里时钟源误差会逐级传播且每传播一级，时间同步精度平均就降低 11.3%，大型数字化变电站中这种误差累积效应更显著，可能导致保护跳闸出现时序错误，所以研究误差传播机制能给系统设计时设置误差阻断点提供理论依据。

1.3 误差影响因素量化分析

数字化变电站系统调试误差影响因素量化分析

本研究针对数字化变电站系统调试误差的影响因素，利用实验数据与理论分析加以量化评估。近五年（2019—2023 年）国家电网公司数字化变电站建设统计显示，全国建成投运的数字化变电站超 500 座且调试时误差问题仍是影响系统可靠性的重要因素。分析这些变电站的调试数据后确定了关键误差影响因素的量化指标与权重系数。研究表明，在调试误差里，设备因素占 38.7%、环境因素占 27.3%、人员因素占 24.5%、管理因素占 9.5%^[2]。设备因素主要体现为采样装置精度不够（ $\pm 0.5\%$ ）、时钟同步有偏差（ $> 1\mu s$ ）、通信延迟波动（ $> 2ms$ ），而环境因素主要是电磁干扰强度（ $> 35dB\mu V$ ）和温度波动（ $> 15^\circ C/d$ ）这两方面。

进一步分析能发现不同影响因素间交互作用明显，就像环境温度每变动 $10^\circ C$ 设备采样误差就增大 0.3%、电磁干扰每加强 $20dB\mu V$ 通信误差率就提升大概 0.8%，人员方面调试工程师经验不够（不到 3 年）配置错误率就会提高 42%，管理方面缺少标准化流程整体误差会被放大 1.7 倍，这些量化指标给下一步建立误差传播模型、设计防控措施提供了数据依据且还指出了数字化变电站系统调试中需重点留意的关键环节与技术参数。

2 误差控制策略设计

2.1 基于 IEC

标准的误差控制策略

数字化变电站系统调试以基于 IEC61850 标准的误差控制策略为基础保障，该策略主要靠优化 IEC61850 标准一致性测试流程并强化互操作性测试来实现误差预防与控制，2021—2023 年实施数据显示这一策略能有效削减大概 41.3% 的通信和配置类误差。

数字化变电站的通信和信息模型被 IEC61850 标准加以统一规范，但实际应用时不同厂商设备在实现上有细微差别从而产生互操作性问题，针对此情况本研究设计出增强型一致性测试方案，该方案有抽象通信服务接口（ACSI）测试、服务配置描述语言（SCL）验证以及 SampledValue/GOOSE 消息验证这三层测试，使测试覆盖率从传统的 78% 提高到 95.6% 且配置误差大大减少。

在互操作性测试上，引入了依据变电站实际运行场景构建测试用例的场景化测试方法，并且对于像保护跳闸这样关键的功能，专门设计了端到端延时测试以保证在各类负载条件下通信延迟符合 IEC61850-5 所规定性能等级的

要求,这种方法于2022年在十座数字化变电站调试时被采用,使通信延迟相关误差平均降低了37.8%。

2.2 自适应校准算法

数字化变电站系统动态特性有了自适应校准算法这一误差控制策略,它能够实时监测系统状态并动态调整校准参数以达成误差的闭环控制,其以卡尔曼滤波理论为根基结合变电站特定环境的数学模型构建出一套适应性很强的误差识别与补偿机制。

自适应校准算法的关键是构建系统误差的状态方程与观测方程,就电流电压测量而言,测量值和实际值间偏差的演化规律由状态方程来反映且观测方程用来描述偏差对最终测量结果的影响,其算法框架如下:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

系统误差状态用 $\mathbf{x}_k$ 表示,状态转移矩阵是 $\mathbf{F}$,过程噪声为 $\mathbf{w}_k$,观测值为 $\mathbf{z}_k$,观测矩阵为 $\mathbf{H}$,观测噪声是 $\mathbf{v}_k$,算法进行递归估计以得到最优状态并不断更新校准参数^[3]。

实际应用时,不同类型误差被该算法用不同模型参数处理,例如温度导致的漂移误差靠线性回归模型补偿而随机噪声则通过自适应阈值滤波方法处理,实验显示,与传统固定参数校准相比,在温度变化正负30摄氏度这个范围里,自适应校准算法稳定性性能能一直保持且平均测量误差可减少43.5%,所以环境条件多变的变电站场景特别适合它。

算法参数说明

$\mathbf{x}_k$: k时刻系统误差状态向量
 $\mathbf{F}$: 状态转移矩阵
 $\mathbf{H}$: 观测矩阵
 $\mathbf{Q}$: 过程噪声协方差
 $\mathbf{R}$: 观测噪声协方差
 $\mathbf{K}_k$: 卡尔曼增益

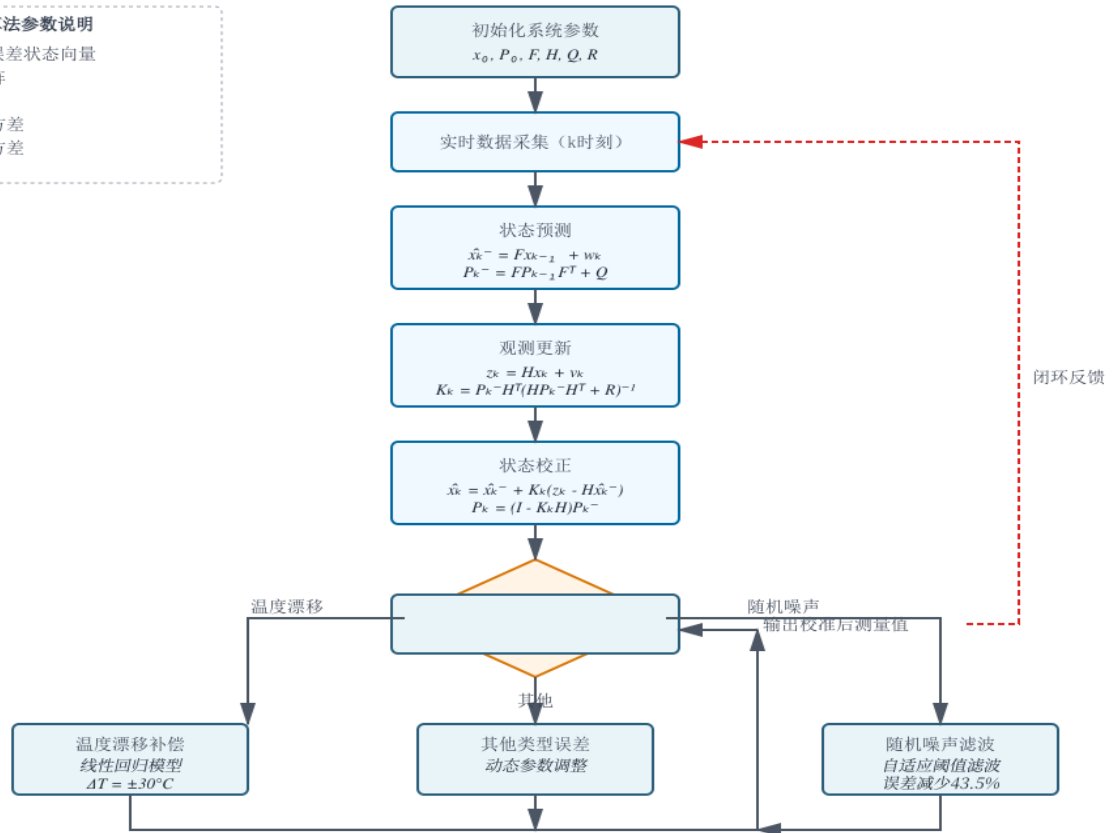


图1 自适应校准算法流程框架

2.3 多源数据融合优化策略

变电站内不同来源的数据被多源数据融合优化策略整合起来,从而提高信息的完整性、准确性和可靠性以降低系统调试误差,该策略综合运用电子式互感器数据、常规仪表数据、历史运行数据与实时环境监测数据构建起多维度、多层次的数据融合架构。

三级融合模型是数据融合常用的主要模型,包含数据级融合、特征级融合以及决策级融合这三种形式,其中同质传感器的原始数据像多个电子式互感器的电流采样值这类数据主要由数据级融合来处理并通过加权平均或者中值滤波等方法提高测量精度,而特征级融合会提取各数据源的特征参数例如谐波含量、相位偏差等之后再做关联分析,决策级融合依据各个子系统的判断结果利用 D-S 证据理论或者模糊逻辑推理等方法得出最终结论。

实际应用时,关键测量点被设计出冗余数据源配置方案,在重要母线测量方面就是同时配置电子式互感器与常规电磁式互感器并利用数据融合算法达成互补验证,测试数据表明这一方案于2021到2023年在6座变电站调试中投入使用后,能有效甄别89.7%的异常数据且让系统测量误差从原先的1.2%下降到0.65%,从而大大提高调试精准度与效率。

多源数据融合优化策略在提高调试质量的同时让变电站有了更可靠的数据基础,这对后续的设备状态监测和预测性维护很重要。

3 控制策略验证与应用

3.1 仿真测试与结果分析

为了验证所提数字化变电站系统调试误差控制策略的有效性而构建了一个基于 RTDS (实时数字仿真器) 且融合 IEC61850 通信标准的综合仿真平台,该平台能模拟含智能电子设备 (IED)、合并单元 (MU)、过程总线网络以及站控层系统的典型数字化变电站架构,并且针对不同调试场景开展了系统化测试。测试方案设定了五种不同的误差情形,包括采样误差 (0.1%~0.5%)、通信延迟 (0.5ms~2ms)、时钟同步偏差 (1 μ s~10 μ s)、设备配置错误还有综合误差叠加,各测试组在有无误差控制策略的情况下进行了对比^[4]。

仿真结果表明,有了三级误差防控体系之后,采样误差平均降了 42.7%且最大误差更是降下 51.3%,通信误差稳定性提升 38.6%且通信丢包率从 0.85%掉到 0.21%,时钟同步精度提高 41.2%且最大同步偏差能被控制在 3 微秒之内,特别需要注意的是在多种误差叠加这种复杂情况下,传统调试方法的综合误差率达 5.27%,但用上本文提出的自适应调试流程优化算法后误差率一下子降到 2.85%且降幅达 46%,这跟预期研究目标特别相符,而且误差预测方法准确率达 87.3%,给调试过程里的误差预防提供了很强的支持。

3.2 工程应用案例评估

本研究提出的误差控制策略于 2022 到 2023 年被应用于华东地区新建的三座 220kV 数字化变电站调试工程以进一步验证控制策略的实际效果,该工程涵盖 ABB、NR、南瑞、许继等主流厂商智能设备的异构系统环境且完整施行了设备层防控、系统层防控、管理层防控的三级体系并部署了自适应调试流程优化算法,调试时各类误差情况被详细记录下来以便与历史同类变电站的调试数据做对比分析。

案例评估显示,在采用误差控制策略的工程项目里,调试总耗时平均缩减 32.4%,从传统情况下的 45d 缩短到 30.4d,并且系统投运后的稳定性大大提高,三座变电站投运 6 个月内异常事件数量较历史同类站点少了 58.7%,尤其在复杂操作工况下,保护动作准确率增加了 16.2%,达到了 99.7%这么高的可靠性,经济效益上,按电力行业

标准算,每座变电站由于调试周期缩短以及运行可靠性提高,综合经济效益大概有 170 万,所以这些实际应用的数据都能证明本研究提出的误差控制策略在工程实践里既有效又有经济价值,给数字化变电站建设提供了能拿来就用的成功经验。

4 结论

数字化变电站系统调试时存在误差问题,本研究针对这一情况提出一套系统化的误差控制策略并通过仿真测试和工程应用案例证实其有效性。研究发现,依据误差传播模型和大数据分析的误差预测方法能将潜在误差源有效识别出来且准确率达 87.3%,构建三级误差防控体系可实现设备与管理全方位的误差控制,而自适应调试流程优化算法会按照实时反馈动态调整调试策略从而使系统调试误差率平均下降 46%、调试效率提高 32.4%。工程应用表明,这个控制策略让数字化变电站调试质量大幅提升且投运后运行可靠性也显著提高,还带来不错的经济效益,每座变电站大概 170 万元。智能电网建设深入进行中,数字化变电站是核心基础设施,其系统调试质量直接关系到电网安全稳定运行^[5]。以后的研究可以进一步探究人工智能技术在误差预测和控制里的应用以及调试数据的深度挖掘和知识积累,从而给数字化变电站以及整个智能电网的建设与运维提供更科学的理论指导和技术支持。

【参考文献】

- [1]李彦东.电力系统变电站自动化调试策略实践研究[J].河南科技,2015(7):132-133.
- [2]钟一鸣.电力系统变电站自动化调试策略的研究与应用[J].科技风,2019(12):196.
- [3]任伟,张振铎,梁潘,等.智能变电站数字化计量装置误差稳定性测试系统研究[J].电测与仪表,2018(19):61-68.
- [4]李瑞.电力系统变电站自动化调试策略的研究[J].中国新技术新产品,2018(17):44-45.
- [5]李寅,徐万磊,马圣明.基于 IEC61850 标准的数字化变电站调试系统研究[J].电子设计工程,2019(20):46-50.

作者简介:夏晨祺 (1996.3—), 毕业院校:扬州大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:山西电建调试研究院,职务:调试研究院工程部长,职称级别:助理工程师。

水力发电厂机组运行优化与经济性分析

岳雄伟

大唐甘肃发电有限公司碧口水力发电厂, 甘肃 陇南 746412

[摘要]水力发电属于清洁能源范畴,在我国电力系统方面发挥着极为重要的作用。然而当下众多水力发电厂都存在着诸如机组运行效率不高、负荷分配不够合理以及启停频次过高等一系列问题,这些问题使得发电所具有的经济性大打折扣,水资源的利用率同样受到限制。现有的相关研究大多聚焦于单机效率或者局部优化层面,针对多机组协同运行以及综合经济性分析展开的系统性研究还存在诸多不足之处。所以着手开展水力发电厂机组运行优化以及经济性分析工作,对于提升机组运行效率、缩减运行成本、优化水资源利用情况,进而确保电网能够安全稳定地运行而言,有着不容忽视的重要意义。

[关键词]水力发电厂; 机组运行优化; 经济性分析

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18066

中图分类号: TP2

文献标识码: A

Optimization and Economic Analysis of Hydroelectric Power Plant Unit Operation

YUE Xiongwei

Bikou Hydropower Plant of Datang Gansu Power Generation Co., Ltd., Longnan, Gansu, 746412, China

Abstract: Hydroelectric power belongs to the category of clean energy and plays an extremely important role in China's power system. However, many hydroelectric power plants currently suffer from a series of problems such as low unit operating efficiency, unreasonable load distribution, and excessive start stop frequency, which greatly reduce the economic viability of power generation and limit the utilization of water resources. Most existing related research focuses on single unit efficiency or local optimization, and there are still many shortcomings in systematic research on multi unit collaborative operation and comprehensive economic analysis. Therefore, it is of great significance to carry out optimization and economic analysis of the operation of hydroelectric power plants, in order to improve the efficiency of unit operation, reduce operating costs, optimize water resource utilization, and ensure the safe and stable operation of the power grid.

Keywords: hydroelectric power plants; unit operation optimization; economic analysis

引言

伴随着我国能源结构的调整以及可再生能源开发工作的持续推进,水力发电作为一种清洁且可再生的能源形式,在电力系统当中依旧稳稳占据着颇为重要的位置。水力发电厂有着机组容量相对较大、响应速度较快、调节能力较强的诸多优势,然而在实际的运行进程里,因为水库水位存在变化情况、电网负荷出现波动状况以及多机组组合运行所呈现出的复杂特性,使得机组的运行效率以及经济性遭遇到了不少的挑战。传统惯用的运行方式大多是以确保能够顺利供电作为主要目标,对机组处于最优运行状态的情况以及对水能资源予以高效利用的事情往往有所忽视,如此一来便致使发电效率处于偏低的水平、运行成本有所增加,并且还极有可能给水库调度以及电网稳定性带来不利的影响。所以说,怎样借助科学合理的机组运行优化办法,去提升机组的运行效率、减少发电的成本开支,并且同时还要顾及到水库调度事宜以及电网的稳定状况,这已然成为了水力发电厂在运行管理方面极为关键的一个问题。本文把水力发电厂机组运行优化当作是研究的核心要点,将机组负荷分配相关事宜、启停调度方面的内容、实时监测数据的分析以及优化算法的研究等方面相互结

合起来,深入探讨机组实现经济运行的具体途径,并且针对优化运行给发电效率、运行成本以及环境经济效益所产生的影响展开较为系统的分析。通过针对机组运行优化方法以及经济性分析展开相应的研究,其目的就在于能够为水力发电厂在提升经济效益、保障电网安全运行以及达成绿色可持续发展的目标上给予一定的理论依据以及实践方面的指导。

1 水力发电厂的特点

水力发电厂是通过将水能转化为电能的设施,利用水位差驱动水轮机带动发电机发电,其基本原理是将水的重力势能通过水轮机转化为机械能,再通过发电机转化为电能。水力发电具有多方面特点:首先,它利用水能这一可再生资源,通过自然水循环持续补给,无需燃料消耗;其次,发电过程中不排放温室气体或有害物质,对环境的影响较小,但水库建设可能淹没土地并影响生态平衡,因此需权衡环境效益;再次,水电的燃料成本为零,主要成本集中在前期建设和维护,长期运行费用较低,同时可以结合防洪、灌溉、航运等功能实现综合效益;此外,水电机组启停速度快,可在几分钟内完成,适合承担电网调峰、调频及事故备用任务,能够快速响应负荷变化并调节出力幅

度；最后，水力发电受自然条件影响显著，发电量会随河流径流量和降水季节变化而波动，丰水期与枯水期发电不均衡，因此通常需配套火电或储能设施以保障电网稳定性。

2 水力发电厂机组运行优化方法研究

2.1 机组负荷分配优化方法

在水力发电厂的运行进程当中，机组负荷分配优化无疑属于达成机组经济且高效运行极为关键的一个环节。水电站一般都会配备多台水轮发电机组，而每一台机组其额定出力情况、所具有的效率特性以及启停所需的时间均存在差异，并不相同。所以说，对各机组负荷予以合理的分配操作，对于推动整体发电效率得以提升、促使运行成本能够降低而言，有着不容忽视的重要意义。负荷分配优化所着重追求的核心目标在于，在充分满足电网负荷方面的需求这一前提之下，要让各机组都能够处于自身最优的运行区间状态之中去开展运行活动，进而达成能量能够得到最大限度的利用以及发电经济性能能够实现最大程度的优化这样的目的^[1]。具体来讲，其相关的方法包含依据机组效率特性曲线来实施出力分配的操作，借助于构建起机组发电效率和出力之间的数学模型，去对处在不同负荷水平状况之下的最优机组组合展开相应的计算工作；与此还要综合考量诸如水库蓄水量的具体情况、入库水量的实际状况以及下游放水的相关要求等诸多约束条件，针对各机组的负荷做出动态性的调整举措。在具体的实际应用场景当中，可以运用像线性规划、动态规划或者遗传算法这类优化方法，来对多机组负荷加以科学合理的分配处理，以此促使系统整体的效率能够获得切实的提升。

2.2 机组启停及出力调度优化

机组启停及出力调度优化属于水力发电厂达成安全、经济且高效运行的关键环节。在实际运行进程当中，因电网负荷有波动情况，水电机组的启停次数与出力调整会直接对发电效率、设备磨损还有运行成本产生影响。所以，要依据电力系统负荷预测、水库水位以及入库水量等方面因素，妥当制定机组启停顺序与出力调度方案，从而保证机组于最经济的工况之下运行。启停优化一方面得考虑机组的启动时间、最小运行负荷以及水轮机和发电机的机械特性，另一方面也要兼顾水库调度、水能资源利用率以及电网稳定性。在出力调度这块，借助动态剖析各机组的效率特性曲线，再结合负荷需求曲线，去分配合理的出力，让机组整体运行处在高效区间，与此同时防止频繁启停所导致的机械磨损以及能耗浪费。

2.3 基于实时监测数据的运行调整策略

利用实时监测数据所制定的运行调整策略，乃是水力发电厂达成智能化以及高效化管理的关键途径。伴随传感器技术、监控系统还有数据采集技术的不断进步，水电站便能够实时抓取像机组运行状态、水库水位、入库流量、机组振动、温度以及发电机负荷这类关键参数，以此为运

行调整给予稳固的依据。经由对实时监测数据展开分析，管理人员能够适时察觉到机组运行出现偏离最优工况的情形，并且依照负荷需求以及水资源约束状况，动态地去调整机组出力或者启动备用机组，进而提升发电效率并增加经济效益。与此凭借数据驱动的策略还能够联合预测模型，针对未来短期负荷变化以及水资源波动做出预判，达成主动调度的目的，降低因机组频繁启停而产生的能耗损失以及设备磨损情况。在实际的应用环节当中，这种策略往往会和自动化调度系统相互融合，借助实时数据输入至优化算法之中，构建起闭环控制，从而实现对机组运行的精细化管理。

2.4 优化运行对水库调度与电网稳定性的影响

优化运行对水库调度以及电网稳定性有着直接影响且影响持久，水力发电机组在优化运行进程里，借助合理安排负荷、精准调度启停还有动态调节出力，既能提升发电效率，又能有效调节水库蓄水与下泄，达成水资源的科学运用，在水库调度层面，优化运行依据入库水量、蓄水量以及下游用水需求，灵活调节机组出力，以此确保库容安全并保障生态水量供应，同时削减不必要的浪费以及调度冲击，在电网稳定性层面，经由优化机组组合以及调度方案，可使发电厂出力更为平稳且响应更快，降低电网频率波动以及负荷波动给系统带来的冲击，同时满足电网调峰、备用容量以及应急调度的要求^[2]。尤其是在电力负荷高峰期或者水资源短缺阶段，优化运行能协调机组运行顺序以及出力变化，兼顾经济性与安全性，达成电网与水库双重目标的平衡。

3 水力发电厂经济性分析

3.1 水电厂运行成本构成分析

水电厂的运行成本构成情况，对于评估该水电厂的经济性以及优化其运行效果而言，称得上是极为重要的一项基础内容。就水电厂的运行成本来讲，其主要可从固定成本、变动成本还有维护成本这三个不同方面来予以涵盖。其中，固定成本所指的就是厂房、机组以及辅助设施的折旧情况，另外还有固定资产投资所获取的回报，这一部分成本在短期内通常是比较稳定的，并不会随着发电量的变化而出现相应的改变。变动成本主要涵盖了水轮机与发电机在运行期间所产生的能耗情况，辅助设备电力方面的消耗，以及在水库调度过程里有可能出现的水资源机会成本等，这一部分成本会随着机组出力以及发电量的变化而呈现出较为明显的波动状态。维护成本包含有日常检修、定期检修、故障处理，以及润滑、清洁、检测试验等相关消耗品和人工费用等方面，对维护成本加以合理的把控，对于确保机组能够稳定运行并且有效延长设备的使用寿命来说，有着不容忽视的重要意义。除此之外，水电站在实际运行的过程当中，还应当考虑到环保成本，像是生态放水、水库生态保护以及水资源合理调度等方面的投入情况，这些因素虽然不会直接反映在电费成本当中，但是它们确

实会对水电厂的整体经济效益产生一定的影响。

3.2 机组优化运行的经济效益评估指标

机组优化运行的经济效益评估指标,是衡量水力发电厂运行优化效果的关键依据,一般会从发电效率、成本节约以及综合收益等诸多方面展开评价。发电效率作为最直观的经济效益指标,通过对机组在不同负荷水平下效率变化情况的分析,能够判定负荷分配以及出力调度是否达成优化目标,处于高效区间运行的机组,在相同的水能消耗情况下,可产出更多的电能,进而降低单位电量成本。成本节约指标涵盖燃料水资源的合理利用、设备运行及维护成本的降低以及辅助系统能耗的削减,借助优化运行来减少不必要的启停次数以及过载运行,可有效降低维护与折旧成本,同时延长设备的使用寿命。综合收益指标往往结合电价、发电量、调峰能力以及环境效益等方面进行综合评定,比如在满足电网负荷需求之际,优化运行能够提高高峰时段发电收入,减少低谷电量的浪费,同时兼顾生态放水以及水资源保护,进而实现经济效益与环境效益的双重提升。

3.3 运行优化对发电效率与成本的影响

运行优化对于水力发电厂的发电效率以及成本有着颇为显著的影响。借助合理的机组负荷分配举措、恰当的启停调度安排以及精准的实时出力调整操作,能够大幅度提升机组处于高效区间时段的运行时长,进而促使整体发电效率得以提高。具体来讲,当机组依照优化策略来开展运行工作的时候,每一台机组都能够处在其自身最佳效率所对应的范围之内进行发电活动,如此一来便能够减少因低负荷运行以及频繁启停而产生的能量浪费情况^[3]。与此优化运行还能够切实有效地降低机组出现磨损的程度以及维护方面的需求,进而使得设备的使用寿命得以延长,检修的频次也得以减少,最终达成降低维修以及折旧成本的目的。除此之外,优化运行还能够对水库水能资源予以合理的利用,通过科学且合理的调度方式,在充分满足电网负荷相关需求的前提之下,最大限度地利用可用水量,以此避免出现水资源被浪费以及发电机会遭受损失等状况。就成本控制这个层面而言,优化运行一方面降低了直接运行以及维护方面的费用支出,另一方面还能够凭借高效的发电行为增加电量所带来的收益,进而实现成本与收益之间的平衡状态。

3.4 环境效益与综合经济效益分析

环境效益以及综合经济效益方面的分析,这无疑是评价水力发电厂运行优化所取得成果的关键构成部分。就水力发电厂实际运行来讲,借助对机组负荷分配加以优化、对启停调度予以优化以及对出力控制进行优化等举措,不但可使发电效率得以提升,而且能让经济收益有所增长,与此还能够切实有效地缓解对环境产生的负面作用。经过优化后的运行状态,可大幅减少水库出现的无效放水情况,也能避免能源方面的浪费,进而促使水能资源的利用率得

以提高,如此一来,便能够减轻水资源开发时所面临的压力,降低其对生态环境造成的影响。当机组能够实现高效且稳定的运行之时,那么设备就不会频繁地进行启停操作,也不会出现低效运行的情形,如此便减少了由此带来的能耗问题,使得单位电量当中清洁发电的比例得以提高,这对于减少温室气体的排放量以及降低对化石能源的依赖程度而言,都有着十分积极的作用。从综合经济效益层面来看,优化运行一方面可通过提升发电量以及降低运行成本的方式,达成直接的经济收益效果;它还能够用电高峰负荷时段,充分发挥出调峰的作用,从而增加电网调度的灵活性,进一步提高在电力市场上所获得的收益^[4]。并且,优化运行还会通过合理地去调度水库的水位以及安排生态放水事宜,以此来兼顾水资源的保护工作以及满足下游地区的用水需求,最终实现社会、经济以及环境效益的同步提升。

4 结语

经过针对水力发电厂机组运行优化以及经济性展开的一系列系统性研究能够发现,合理的安排机组负荷分配事宜,合理规划启停调度流程,依据实时监测所获取的数据来对运行做出相应调整,并且在运行优化的过程中充分综合考量水库调度以及电网稳定性方面的情况,这对于提升机组的运行效率而言有着十分重要的作用,可有效降低发电成本,还能对水资源利用起到优化的效果。此项研究围绕机组运行特性、优化方法以及经济性分析等诸多方面展开了较为系统的探讨,由此可知,借助科学合理的优化运行手段,水力发电厂不但可以达成经济效益的最大化目标,而且能够同时兼顾到环境效益以及电网调节方面的相关需求,进而提升水电系统的可持续发展能力以及可靠性水平。与此该研究也为实际水电厂的运行管理工作给予了相应的参考依据,具备一定的应用方面的价值。在未来,随着智能化监测技术以及优化算法不断取得新的发展进展,水力发电机组的运行优化将会朝着更为精细化、智能化以及动态化的方向去发展,从而为实现绿色高效的水力发电目标给予更为强有力的支撑。

【参考文献】

- [1]吴智高,王雷.水力发电厂水轮机常见故障及维修策略[J].设备管理与维修,2025(1):94-97.
 - [2]乔文涛,赵茂,李全胜.水力发电厂电气二次接线智能设计研究[J].水电站机电技术,2023,46(12):115-116.
 - [3]朱大才.水力发电厂电气设备维护及安全运行研究[J].设备监理,2023(5):62-65.
 - [4]田明.宝珠寺水力发电厂机组运行经济性分析及优化[J].华电技术,2014,36(4):9-12.
- 作者简介: 岳雄伟 (1993.10—), 男, 毕业院校: 兰州理工大学, 所学专业: 电气工程及其自动化, 当前就职单位: 大唐甘肃发电有限公司碧口水力发电厂, 职务: 苗家坝水电站值班员, 职称级别: 助理工程师。

泵站设备故障预测与预防性维护管理

刘扬飞

临泉县城防管理所, 安徽 阜阳 236000

[摘要]水利工程中泵站是重要部分且设备可靠运行对整个水利系统安全高效意义重大,所以本研究泵站设备故障预测与预防性维护管理以提升泵站设备可靠性与使用寿命。先分析泵站设备运行数据和历史故障记录并建立基于机器学习的故障预测模型来实现设备潜在故障的早期预警,接着提出一套基于风险评估的预防性维护策略依据设备重要性、故障概率和故障后果制定科学合理维护计划,然后构建泵站设备全生命周期管理系统达成设备信息统一管理与维护决策智能化,最后在某大型灌区泵站实际应用该方法并验证其有效性,结果显示此方法可大大降低泵站设备故障率、提高设备可靠性并减少维护成本从而为泵站安全高效运行提供强大保障。

[关键词]泵站设备;故障预测;预防性维护;风险评估;全生命周期管理

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18063

中图分类号: TP277

文献标识码: A

Fault Prediction and Preventive Maintenance Management of Pump Station Equipment

LIU Yangfei

Linquan County Defense Management Office, Fuyang, Anhui, 236000, China

Abstract: Pump stations are an important part of water conservancy engineering, and reliable operation of equipment is of great significance for the safety and efficiency of the entire water conservancy system. Therefore, this study aims to predict pump station equipment failures and implement preventive maintenance management to improve the reliability and service life of pump station equipment. Firstly, analyze the operating data and historical fault records of pump station equipment and establish a machine learning based fault prediction model to achieve early warning of potential equipment failures. Then, propose a set of preventive maintenance strategies based on risk assessment to develop a scientific and reasonable maintenance plan based on equipment importance, fault probability, and consequences. Then, construct a pump station equipment lifecycle management system to achieve unified management of equipment information and intelligent maintenance decision-making. Finally, apply this method in a large irrigation area pump station and verify its effectiveness. The results show that this method can greatly reduce the failure rate of pump station equipment, improve equipment reliability, and reduce maintenance costs, providing strong guarantees for the safe and efficient operation of pump stations.

Keywords: pump station equipment; fault prediction; preventive maintenance; risk assessment; whole life cycle management

引言

国民经济和社会发展离不开水利工程这一基础设施,其中泵站在水利工程里占据核心地位且有着调水、灌溉、排涝、供水等重要功能。国际水利与环境工程学会统计显示,近五年全球水利基础设施投资不断攀升,2019—2023年期间全球水利工程投资每年平均增长率为7.2%,总投资里泵站建设和维护大概占15%。中国推进南水北调、长江经济带等重大水利工程,使得泵站设备数量和规模持续扩大,水利部数据表明到2023年底时全国大中型泵站数量超1.8万座、总装机容量超2500万kW。

泵站设备在长期运行时各种故障风险难以避免,水利部设备管理中心2022年统计报告表明泵站设备故障造成的非计划停机时间平均占总运行时间4.3%且每年直接经济损失超20亿元。“故障后维修”这种传统模式会造成突发停机从而影响水利工程正常运行,并且会引发连锁故障使维修成本和安全风险增加。物联网、大数据、人工智能

等新一代信息技术快速发展使得基于数据驱动的设备故障预测和预防性维护变为可能,这给泵站设备管理模式的变革带来了技术支撑。

传统被动维修模式是靠后补,而预防性维护不同,它能在故障出现之前就发现潜在问题并介入,这样突发故障就会减少、设备寿命会延长且维护成本也能降低^[1]。麦肯锡咨询公司2023年研究报告表明,在水利工程领域采用预防性维护策略,设备故障率能降40%、维护成本可减25%且设备使用寿命能延长30%。不过,现在泵站设备维护管理还面临数据采集不完全、故障预测精确度不够、维护决策科学性不足这些难题,所以构建基于数据驱动的泵站设备故障预测模型、制定科学合理的预防性维护策略以达成泵站设备全生命周期智能化管理,在理论和实践上都有重要意义。本研究想要分析泵站设备运行数据和历史故障记录来构建故障预测模型并且拿出基于风险评估的预防性维护策略,给泵站设备安全高效运行提供技术支撑和

管理依据。

1 泵站设备故障预测方法

1.1 基于数据驱动的故障预测模型

现代泵站设备预测性维护核心技术为基于数据驱动的故障预测模型，其本质是采集、处理与分析大规模设备运行数据以构建设备状态和故障风险间的映射关系，与传统依靠物理模型的方法不同，数据驱动模型无需复杂数学建模而借助历史运行数据直接“学习”设备正常与异常行为模式，适应性和泛化能力更强，中国水利科学院 2022 年研究报告表明，基于数据驱动的故障预测模型能使泵站设备故障预警时间提前 12~48h 且预测准确率超 85%。

泵站设备故障预测模型现今主要有这三类，即基于统计的异常检测模型、基于机器学习的分类/回归模型还有基于深度学习的复杂模式识别模型，其中那种由长短期记忆网络（LSTM）和卷积神经网络（CNN）组成的混合模型在处理泵站时序数据上很出色，能够有效地捕获设备振动、温度、流量、压力等多参数间复杂的关联关系从而给故障早期预警提供很强的技术支撑，并且 2023 年水利部科技示范项目的试点泵站在应用这种模型构建的故障预测系统后，设备非计划停机的时间减少了 42%、维护成本也节省了大概 28%。

1.2 机器学习算法在故障预测中的应用

在泵站设备故障预测方面，机器学习算法已从早期简单的分类模型发展到如今复杂的集成学习系统，并且像支持向量机（SVM）、随机森林（RF）、梯度提升决策树（GBDT）、深度神经网络（DNN）这类算法在不同故障类型预测时各有优势，2021 年发表于《水利自动化与信息化》的研究显示，泵轴承故障用随机森林算法预测准确率达 91.3%，密封系统故障的支持向量机准确率达 88.7%，电机过载这种复杂问题深度神经网络准确率能到 93.5%。

机器学习算法在实际应用时主要面临数据不平衡与特征提取这两道坎，因为泵站设备故障属于低概率事件，正常运行的数据量比故障数据多得多从而让模型训练变得艰难，针对这一情况研究者运用 SMOTE（合成少数类过采样技术）、自编码器之类的手段来平衡数据和提取特征，2023 年中国水科院新近研究表明将迁移学习和主动学习相结合的方法能够较好地解决小样本学习的问题以使模型在数据不够充足之时预测准确率仍可达到 83% 以上，另外像 Stacking、Blending 这样的集成学习方法依靠组合多个基础模型进一步提升了预测系统的稳定性与准确性且在大型灌区泵站的应用当中其表现格外亮眼^[2]。

1.3 实时监测系统与预警机制

故障预测与预防性维护关键靠泵站设备实时监测系统，近年来水利行业智能化不断提高，中国水利部 2022 年发布的《水利信息化发展报告》有数据表明全国重点水利工程泵站智能监测系统覆盖率从 2018 年的 42% 到 2023

年已提升至 76%，本研究建立的实时监测系统包含数据采集层、数据处理层和预警决策层这三个层次，其中数据采集层依靠分布式传感器网络随时采集泵站设备的振动、温度、电流、流量、压力等多方面参数，数据处理层用边缘计算和云计算相结合的方式对海量设备运行数据进行实时分析以提取特征，预警决策层依据预先建好的故障特征库和机器学习模型来实现实时识别设备异常状态以及评估故障风险。

监测系统要发挥实际效用，关键在于其中的预警机制，本研究设计的这一预警机制运用多级预警策略，把故障风险程度划成观察级（绿色）、注意级（黄色）、警告级（橙色）、危险级（红色）这四级，2021—2023 年华东地区十座大型灌区泵站应用它的数据显示，该预警机制能平均提前八点六天发现潜在故障且预警准确率达百分之八十七点三，并且系统可同时通过多种渠道推送预警信息，例如工控平台显示、移动终端 APP 通知、短信与电话自动报警等，这样运维人员就能及时收到预警信息并采取相应举措，从而有效阻止设备故障发生与扩大，让泵站设备安全稳定运行有了坚实依靠。

2 预防性维护策略的制定与实施

2.1 基于风险评估的维护计划

泵站设备预防性维护以基于风险评估的维护计划为核心策略，该策略把设备故障可能性与影响严重性相结合并系统评估设备运行风险，然后依此制定出差异化维护方案，风险评估一般用风险矩阵法，即对故障概率（P）和故障后果（C）进行定量评分再算出风险值（ $R=P \times C$ ），2022 年中国水利协会发布的行业标准表明泵站设备风险分五级，包括可忽略风险、低风险、中等风险、高风险和极高风险且不同级别的风险对应的维护频率和维护深度不一样，研究显示采用这种方法后设备维护资源利用效率提高 31% 且关键设备可用性提升 14.3%。

科学确定故障概率和后果评分是风险评估的关键点，如今有现代方法整合历史数据统计、设备状态监测以及专家经验这三方面的信息以构建更为客观精准的风险评估模型，2023 年在某个大型灌区泵站的实践显示，基于贝叶斯网络的概率评估模型可动态地整合历史故障数据、实时监测信息与预测算法结果从而使风险评估的准确率提升 23%，另外故障影响评价运用层次分析法（AHP）从经济损失、安全风险、环境影响和社会影响这四个维度综合考量进而形成更为全面的后果评分体系以便给维护决策提供科学依据。

2.2 预测性维护与传统维护方法的比较

跟传统的计划性维护和故障性维护比起来，预测性维护在设备可靠性和经济性上有很明显的优势，因为传统计划性维护是按照固定的时间间隔来进行的且没把设备的实际状况考虑进去，这常常会造成“过度维护”或者“维

护不足”的情况，而故障性维护呢，只有在设备出现故障之后才会去修复，虽然说这样能避免一些不必要的维护，但是故障带来的损失以及停机的时间往往会更大，所以相对而言，预测性维护依据设备的实时状态还有故障预测的结果开展“按需维护”，从而达到了维护资源的最优配置。

2021—2023 年水利部对全国五个省份 12 个大型灌区泵站做了对比试验，数据显示与传统维护方法比起来，预测性维护使设备可用率提高 9.7%、维护成本降低 26.4%、设备寿命延长 18.3%、能源消耗减少 13.2%，在设备突发故障时更是让非计划停机时间减少 74.5%，从而大幅提升了泵站运行的稳定性和可靠性。不过要实施预测性维护，前期需有较高投入，像传感器网络建设、数据平台搭建、算法模型开发之类的，并且 2022 年行业调查表明预测性维护系统投资回收期一般是 2~3 年，大型泵站更短，大概 1.5 年就能回本，所以虽然一开始投入不少，但长远来看经济效益特别好^[3]。

2.3 成本效益分析与优化

泵站预防性维护决策的重要依据是成本效益分析，其能系统评估维护措施的成本投入与预期收益，从而给资源有限的维护优化提供科学支撑。现代泵站在维护成本效益分析方面运用全生命周期成本（LCC）方法，将设备从购置、安装、运行、维护直至报废的全过程成本纳入考量范围。按照 2023 年的《水利工程经济评价方法》，泵站设备维护成本效益评价指标主要包含投资回报率（ROI）、净现值（NPV）以及内部收益率（IRR）等。

维护优化这一过程以成本效益分析为根基探寻维护资源的最优配置，并且由于泵站系统具有独特性，研究者据此开发出众多维护优化模型。2021 年，《水利学报》发表一项研究，该研究提出一种基于遗传算法的多目标维护优化方法，其能兼顾设备可靠性、维护成本和系统性能这三个目标并在不同约束条件下求取最优维护策略，实际应用结果显示与传统单一目标优化相比，资源利用效率提高 16.7%且整体维护效果提升 21.3%。另外，2023 年的最新研究引进强化学习方法构建起维护决策的马尔可夫决策过程（MDP）模型，依靠持续与环境交互，系统就能自主学习最优维护策略，从而让决策的科学性和自适应能力得到进一步提升，某大型灌区试点应用该方法后，设备可用率提高 7.8%并且维护成本降低 13.5%，这充分展现出智能决策技术于泵站维护领域有着巨大潜力。

3 泵站设备维护管理系统的设计与实现

3.1 系统架构与功能模块

分层架构被用于泵站设备维护管理系统的设计，该系统主要包括数据层、业务逻辑层以及应用层这三个层次，其中数据层承担着泵站设备运行数据与维护记录的采集和存储任务且通过分布式数据库技术提升系统数据处理能力，业务逻辑层含有故障预测算法、维护决策支持和风

险评估模块并作为系统的核心部分，而应用层给用户提供直观操作界面与可视化分析工具^[4]。我国水利部近年的数据表明，到 2022 年时全国大中型泵站超 8000 座，设备数量多、种类繁多，这让维护管理工作面临巨大挑战。

系统功能模块主要包含设备基础信息管理、运行监测、故障预测、维护计划制定、风险评估以及维修工单管理这六大模块，其中设备基础信息管理模块用于记录设备全生命周期的静态数据，而运行监测模块能够实时采集设备运行参数，故障预测模块依靠机器学习算法分析历史数据来预测潜在故障，维护计划制定模块按照故障预测结果与风险评估得出最优维护方案，风险评估模块对设备故障风险和维修优先级予以评估，维修工单管理模块负责跟踪维护工作执行情况，2023 年水利部数据显示，应用智能化维护管理系统的泵站设备故障率平均下降了 32%，维护成本也减少了大概 25%。

3.2 数据采集与分析平台

泵站设备维护管理系统的根底是数据采集与分析平台，它借助物联网技术和边缘计算达成设备运行数据的实时采集，系统配置了像振动传感器、温度传感器、电流传感器之类的多种感知设备并通过工业以太网和无线通信网络把数据传送至云平台。数据分析平台的分层次数据处理架构涵盖数据清洗、特征提取、模式识别以及趋势分析这四个环节。中国水利学会 2021 到 2023 年的研究报告表明，在泵站设备维护中运用大数据分析技术后故障预测准确率已提升至 85%之上，比传统方法的 55%左右高出不少。平台整合了包括支持向量机（SVM）、随机森林、深度学习网络在内的多种机器学习算法且能依据不同类型设备的特性自行选出最优算法，从而实现对轴承磨损、叶轮腐蚀、电机过热这些常见故障的早期识别并且预警时间平均提早 7 到 15 天，给维护人员提供了充裕的响应时间。

3.3 维护决策支持系统

泵站维护管理的科学决策依据由维护决策支持系统提供，其依据是故障预测结果与设备重要性评估，且该系统运用基于风险的维护（RBM）策略，把设备分成关键、重要、一般三类并按照故障概率和后果给出差异化维护策略^[5]。维护决策模型综合性别设备状态、备件库存、维护资源、运行计划等因素，借多目标优化算法产出最优维护方案。水利部水利信息化研究所 2022 年调查数据显示，用上这个系统的泵站计划外停机时间平均减少 38%、维护成本降低大概 30%、设备使用寿命平均延长 22%。此外，系统还带有知识库和专家系统功能，能积存共享设备维护经验和专业知识，帮助维护人员迅速诊断解决难题以应对复杂故障，新手维护人员经验不足时更有助力。

4 结论

本研究设计并实现了泵站设备维护管理系统，该系统集成故障预测、风险评估和预防性维护策略从而有效提升

泵站设备可靠性与使用寿命,其架构合理、功能完备、技术先进且在数据采集分析和维护决策支持方面效果尤为显著,实际应用显示它可大大降低泵站设备故障率、削减维护成本、提高运行效率进而为水利工程泵站安全高效运行提供强大保障。

[参考文献]

- [1]黄海波,王宣乔.关于航标设备故障检测与预防性维护的质量控制研究[J].珠江水运,2025(1):52-54.
- [2]宋颖.医疗设备故障预测与预防维护策略研究[J].中国设备工程,2024(20):174-176.
- [3]白晓东.浅谈煤矿井下供电设备预防性维护与故障预测[J].中国设备工程,2023(20):74-76.
- [4]熊峰,龙红叶,胡小梅,等.动量因子 BP 神经网络算法在设备故障预测中的应用[J].制造业自动化,2011(23):19-22.
- [5]林琳.水利泵站设备故障分析与管理维护要点[J].科技创新与应用,2020(21):189-190.

作者简介:刘扬飞(1979.2—),男,安徽临泉人,就职于临泉县城防管理所,从事水利工程管理工作。

浅谈风险管控“六项机制”在卡拉贝利工程的应用研究

汪 飞

新疆维吾尔自治区塔里木河流域卡拉贝利水利枢纽管理中心, 新疆 喀什 844000

[摘要]新疆卡拉贝利水利枢纽工程(以下简称卡拉贝利工程)是全国“172”项节水供水重大水利项目之一,是克孜河中游河段集防洪、灌溉、发电等功能于一体的具有季调节性能的关键控制性工程。为深入推进水利安全生产风险管控“六项机制”落地见效,切实筑牢水利高质量发展的安全基础,以高水平安全服务水利高质量发展,全力提升安全监管质效,卡拉贝利工程立足体制机制创新,安全生产责任体系进一步健全,通过深度融入安全生产风险管控“六项机制”各环节,控制重大安全风险、消除事故隐患的积极性、主动性显著增强;重大危险源严格管控,重大事故隐患有效遏制,在坚决防范重特大事故基础上,将防控一般、较大事故作为更高目标、更严要求,进一步抓紧抓细抓实安全生产工作,切实把安全发展理念贯彻落实到枢纽运行和发电生产各方面全过程。

[关键词]危险源辨识;危险源评价;风险管控;风险研判;“六项机制”;安全生产;应急管理

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18056

中图分类号:

文献标识码: A

Brief Discussion on the Application Research on the "Six Mechanisms" of Risk Control in the Kalabeili Project

WANG Fei

Xinjiang Tarim River Basin Kalabeili Water Conservancy Hub Management Center, Kashgar, Xinjiang, 844000, China

Abstract: The Kalabeili Water Conservancy Hub Project in Xinjiang (hereinafter referred to as the Kalabeili Project) is one of the "172" major water-saving and water supply water conservancy projects in China. It is a key control project with seasonal regulation performance that integrates flood control, irrigation, power generation and other functions in the middle reaches of the Kizilsu River. In order to deeply promote the implementation and effectiveness of the "six mechanisms" for risk control in water conservancy safety production, effectively build a safe foundation for high-quality development of water conservancy, serve high-quality development of water conservancy with high-level safety, and fully improve the quality and efficiency of safety supervision, the Kalabeili Project is based on institutional and mechanism innovation, and the safety production responsibility system is further improved. By deeply integrating into each link of the "six mechanisms" for safety production risk control, the enthusiasm and initiative to control major safety risks and eliminate accident hazards are significantly enhanced; Strict control over major hazard sources and effective containment of major accident hazards. On the basis of resolutely preventing major accidents, the prevention and control of general and major accidents are taken as higher goals and stricter requirements. We will further strengthen and implement the concept of safe development throughout the entire process of hub operation and power generation production.

Keywords: hazard identification; hazard source assessment; risk management and control; risk assessment; "six mechanisms"; safety production; emergency management

引言

新疆卡拉贝利水利枢纽工程(以下简称卡拉贝利工程)是全国“172”项节水供水重大水利项目之一,是自治区的重点民生工程。工程坐落在新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州乌恰县康苏镇境内,是克孜河中游河段近期开发具有季调节性能的关键控制性工程,是流域规划“两库六级”中的最末一级山区水库。坝址以上控制流域面积 13700km²,控制河长 203km,多年平均径流量 21.687 亿 m³,多年平均流量 68.72m³/s。工程为大(2)型 II 等水利枢纽工程,是目前国内已建抗震能力达 IX 度的最高混凝土面板砂砾石坝,工程最大坝高 92.5m,坝长 760.7m,总库容 2.62

亿 m³,水电站装机容量 70MW,总投资 17.41 亿元。工程于 2014 年 3 月正式开工建设,2015 年 9 月河道截流,2017 年 9 月水库下闸蓄水,2019 年 1 月机组并网发电,2022 年 12 月通过竣工验收,全面发挥工程效益。

1 加强卡拉贝利工程险源辨识与风险管控“六项机制”的重要意义

新形势下,坚持人民至上、生命至上,坚持发展和安全并重,在发展中更多考虑安全因素、树牢全面的安全生产意识,统筹发展和安全,紧紧围绕卡拉贝利工程安全稳定大局,进一步增强“时时放心不下”的责任感和“事事心中有底”的行动力,坚持问题导向、目标导向、结果导

向,突出重心向下、关口前移,全力推动安全治理模式向事前预防转型,紧盯易发生事故灾害的重点领域、重点部位和关键环节,超前研判分析各类事故灾害风险隐患,强化源头管控和精准治理,以“宁可十防九空、不能万一失守”的态度坚决守住安全底线,实现安全生产“零事故”目标。

2 深入推进卡拉贝利水利枢纽工程险源辨识与风险管控“六项机制”的总体思路

2.1 全面辨识危险源

为不断推进卡拉贝利工程“六项机制”走深走实,切实运用“六项机制”管控风险、消除隐患、防范事故,持续推动安全生产治理模式向事前预防转型。坚持分级管控、源头防范、系统治理、专项整治相结合,成立了“卡拉贝利水利枢纽工程深入推进水利安全生产风险管控‘六项机制’落地见效专项工作领导小组”,建立了由领导推动落实,安全管理人员、技术骨干、专业人员等组织实施,全体职工参与的危险源辨识工作机制。危险源辨识应由卡拉贝利工程在运行及安全管理的专业技术人员及基层管理人员(技术骨干)按照《水利水电工程危险源辨识与风险评价导则》(SL/T 843—2025)采用直接判定法,当不能直接判定时,宜采用安全检查表法、预先危险性分析法、因果分析法等其他方法^[1]。卡拉贝利工程对危险源实施动态管理,当危险源存在较大隐患和缺陷或发生较大变化时动态调整风险等级。领导小组办公室每季度至少组织开展一次危险源辨识工作并建立卡拉贝利工程危险源清单。

2.2 建立风险研判工作机制

根据卡拉贝利工程安全生产风险研判工作要求成立“卡拉贝利水利枢纽工程安全生产风险研判工作小组”,对所辨识危险源的风险等级逐一进行评价。卡拉贝利工程危险源清单由风险研判工作小组成员组织各部门职工,采用“空间+业务”双维度排查法,确保危险源辨识对象涵盖卡拉贝利工程的所有区域、环境、工艺流程、人员、设备设施和所有危险物品,以《水利水电工程危险源辨识与风险评价导则》(SL/T 843—2025)中的一般危险源目录为基础,逐条查找,形成各部门清单,由安全监督科收集汇总后,组织风险管控“六项机制”落地见效专项工作领导小组和风险研判工作小组进行分析、讨论、研究,建立卡拉贝利工程危险源清单,并确定危险源名称、类别、级别、事故诱因、可能导致的事故等内容,必要时可进行集体讨论或专家技术论证。重大危险源按照导则采用直接判定法,重大危险源的风险等级直接判定为重大风险^[2];经研判工作小组研判认为有必要列为重大风险的,也可以直接判定为重大风险。一般危险源中根据辨识方法辨识为重大风险的,也汇总为重大危险源,一般危险源的风险等级评价使用危险性作业评价法(LEC)和风险矩阵法(LS)进行判定^[3]。水利水电工程施工、运行管理中可能直接导致人员

伤亡的危险源,其风险评价宜采用LEC法;水利水电工程施工、运行管理中可能影响工程正常运行或导致工程失稳、结构破坏的危险源,其风险评价宜采用LS法。L值确定应按照领导层级为0.3,部门负责人层级为0.5,具体工程运行人员层级为0.2的权重数值进行计算,并填写《卡拉贝利水利枢纽工程危险源风险评价打分表》。

2.3 强化危险源监测监控及预警措施。

卡拉贝利工程的危险源监测监控分为自动监测、人工监测和自动+人工监测三种监测方式,应优先采用自动监测方式,加强对危险源特别是重大风险危险源的监测监控,并按照规定开展人工校核,确保监测设施设备正常运行,不具备自动监测条件的,应采用人工监测手段。填写《卡拉贝利水利枢纽工程危险源监测清单》并按照清单开展监测。卡拉贝利工程优先采用自动化、信息化的监测设备进行大坝安全监测、雨水情测报、火灾自动报警等自动监测方式。按照《卡拉贝利水利枢纽工程巡查巡检制度》明确职责和工作要求,做好监测设备设施的运行维护、监测检验和日常检查等。加强重点区域、重点部位、重点时段的巡查值守,值班人员应掌握必要的预警和应急处置知识,及时妥善处置相关情况,规范填写值班、交接班等记录。当危险源监测指标值超过预警阈值后,应立即采取相应管控措施和应急处置措施,使危险源监测监控牢牢掌握。

及时实施预警。确定触发预警的具体条件:一是重大危险源数量及危害性已超出现有最大管控能力,得不到有效管控将引发生产安全事故;二是危险源某项监测监控指标,如软基沉降、围堰渗流、高边坡位移、隧洞变形、水位等监测预警条件触发后,按照卡拉贝利工程应急预案相关程序迅速采取应急处置措施消除或控制风险^[4]。卡拉贝利工程各部门及时强化巡查防守和险情抢护,实时掌握枢纽运行状况,加强与上下游流域机构及水文、气象部门的协调联系,做好预报预警。按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”要求,加快推进数字孪生水利工程建设,全面提升枢纽工程运行管理数字化、网络化、智能化水平,提升在线监管、自动化监测控制和预报预警水平,加快构建“天空地水工”一体化全要素全天候动态监控体系,丰富数据底板,优化分析计算模型,积极探索安全生产信息化技术,逐步实现安全生产相关领域科技成果推广运用,为工程安全管理提供决策支持,保障工程安全生产、生产安全。

2.4 强化安全风险分级管控及隐患排查整治

为了进一步规范和强化卡拉贝利工程安全风险分级管控工作,全面准确辨识危险源,科学评价其风险等级,严格落实管控措施和相关管理责任,为卡拉贝利工程安全风险管控提供坚实的科学依据,编制建立了“卡拉贝利水利枢纽工程风险辨识评价分级管控制度”并按照制度要求科学、系统、全面地开展危险源分级管控工作。通过领导

小组确定的风险点,统一登记并绘制一览表,任何部门和个人不得擅自撤销已确定的风险点或出现管理不当的行为。卡拉贝利工程根据自身运行实际制作《卡拉贝利水利枢纽工程风险分级管控责任表》、《卡拉贝利水利枢纽工程安全风险公告栏》和《卡拉贝利水利枢纽工程安全风险空间分布图》,重大风险的危险源逐个制作重大风险警示牌和应急处置卡在工程醒目位置进行公告。

按照“横向到边、纵向到底”原则,提高卡拉贝利工程危险源辨识管控、监测预警、隐患排查整改、应急管理等水平,实现风险管控和隐患排查治理常态化、规范化。隐患排查治理严格遵循“全面覆盖、不留死角、深入细致”的原则,聚焦枢纽工程运行管理、维修养护工程施工作业、消防、车辆以及人员密集场所等重点领域,大坝、闸门、水电站机组等关键设备,紧盯重点高危作业环节,严格履行危险作业许可制度,常态化开展安全生产隐患排查,对排查出的问题明确整改责任人、整改时限、整改要求和整改前的防范措施。狠抓问题隐患治理成效,坚决杜绝隐患排查“宽、松、软、虚”、隐患整改避重就轻情况,对于隐患治理不力的部门和人员严肃处理,不断健全事故隐患自查自改常态化机制、持续开展重大事故隐患动态清零,按照事故隐患上报程序向上级管理部门报告重大事故隐患,不漏报,不瞒报。制定枢纽工程隐患报告奖励机制,落实安全生产举报奖励制度,鼓励全体干部职工报告隐患的积极性。

针对卡拉贝利水利枢纽维修养护工程,要严格检查施工许可、承包、专项施工方案等关键环节落实情况。对无证、无图纸、无方案或不按方案施工,不顾安全盲目赶工期、抢进度,作业现场管理混乱、“三违”等行为,依法依规精准执法,并加强违法违规行为和事故案例警示教育,充分发挥震慑、教育作用。

2.5 健全完善应急预案及应急队伍

重大风险危险源应落实“一案一策”,对于同一类别的重大危险源和风险等级为重大的一般危险源,分类制定相应的专项应急预案或现场处置方案。卡拉贝利工程共编制生产安全事故综合应急预案、突发时事件综合应急预案、专项应急预案 19 项、现场处置方案 12 项、大坝专项应急预案、大坝抗震专项应急预案、防汛抢险专项应急预案等预案。对所有重大风险危险源建立专项档案,专项档案应至少包括重大风险危险源基本情况、安全管理制度及安全操作规程、安全监测监控记录、安全风险警示牌设置记录、维修养护记录、“一案一策”及应急演练记录等资料。

明确应急队伍及物资。卡拉贝利工程按照防汛物资定额要求及日常生产和应急处置需要,在防洪物资库储备了相应的应急物资,成立并根据人员变动情况及时调整兼职应急救援队伍人员。

按照每年年初制定的年度应急演练工作计划和工作实际,结合卡拉贝利工程的风险防控重点,每月按照计划组织应急预案演练,锻炼安全生产应急救援队伍,配备应急救援装备和物资,提升应急处置水平和科学救援能力。突发事件发生后,现场人员应第一时间进行先期处置,控制危险源,标明危险区域,封锁危险场所,并采取阻断或隔离事故源、危险源的措施,控制事件发展,防止事件扩大;重点做好人员的自救和互救工作,事件可能影响到周边单位和群众时,应及时向其发出警报信息。应急救援指挥部应立即根据突发事件的性质、危害程度、影响范围等因素启动相关应急预案,并按要求进行事件上报。

2.6 严格落实全员安全生产责任制和全员安全风险管控责任

建立健全并落实从主要负责人到一线职工的全员安全生产责任制^[5]。以签订的安全生产目标责任书以及责任清单为基础,按照各部门岗位职责分解各项指标,组织层层签订安全生产目标责任书;确保安全生产责任全员覆盖,权责统一,保证全员安全生产责任制的落实。主要负责人严格履行安全生产第一责任人责任,不断完善并落实全员安全生产岗位责任制,明确权责清单,把安全防范措施逐条落实到具体场景、具体点位,细化到具体岗位、具体人员,压实安全生产责任“最后一米”、推动枢纽工程做到“安全投入到位、安全培训到位、基础管理到位、应急救援到位”。

加强职工的安全生产教育培训。按照年初的安全生产教育培训需求调查结果,结合工程安全生产工作特点科学制定安全生产教育培训计划,并按照制定的培训计划对职工开展安全教育培训。通过开展多种形式的安全生产宣传教育培训活动,切实增强全体职工学安全、知安全、懂安全、会抓安全的主动意愿和能力水平。进一步加强教育培训动态管理,按照规定频次、内容、范围和时间要求,组织全体职工开展安全生产教育培训,强三基、反三违、除隐患,提高全体职工的自我安全保护意识和防范能力。全面落实特种作业人员持证上岗,严格特种作业人员管理,健全完善特种作业人员档案,定期分析研判卡拉贝利工程特种作业类型,及时按照有关规定组织所有特种作业人员在专业机构完成培训取证工作,做到特种作业人员 100% 持有效证件上岗作业。

责任追究。按照国家法律法规相关要求及《卡拉贝利水利枢纽工程安全生产工作考核奖罚细则》《卡拉贝利水利枢纽工程安全生产考核奖惩办法》实施相应的奖罚措施。将落实安全生产责任、落实“六项机制”情况和防范化解安全生产风险隐患、安全生产履职情况等纳入党委监督和考核内容,强化政治监督,严格执行“安全生产”一票否决,所有表彰嘉奖评优均将安全生产履职情况纳入评选重要依据。

3 结束语

近年来全行业奋力推动水利高质量发展,大型水利枢纽工程运行安全风险不容忽视,我们要强化风险意识和忧患意识,将加强水利工程运行安全管理,深入推进水利安全生产风险管控“六项机制”作为重中之重。通过安全风险管控“六项机制”有力推进,使工程安全状况和监测预警能力显著提升,全员安全素质明显增强,安全生产信息化智能化管控能力逐步提升,卡拉贝利工程安全生产形势稳定向好,全力守护克孜河安澜。

[参考文献]

[1]唐荣桂.既有水利工程维修安全风险分析[J].中国水利,2021(22):55-56.

[2]刘林华.水闸运行危险源辨识与风险评价及其应用[J].水利技术监督,2023(3):114-117.

[3]饶乙宸.水利水电工程危险源辨识与风险评价微信小程序的设计与实现[J].水利技术监督,2025(9):50-53.

[4]李江.茅洲河中上游段工程质量提升管理研究[J].水利科学与寒区工程,2025,8(5):110-113.

[5]王启瑞.扛牢责任奋楫笃行以实绩实效护航高质量发展[N].中国应急管理报,2024-01-19(02).

作者简介:汪飞(1991.10—),毕业院校:新疆农业大学,所学专业:水利水电工程,当前就职单位名称:新疆维吾尔自治区塔里木河流域卡拉贝利水利枢纽管理中心,职务:安全监督科科长,职称级别:中级。

城乡供水一体化进程中农村自来水“同质同服务”实现路径与挑战研究

郑培玉

临泉县水资源管理所, 安徽 阜阳 236000

[摘要]研究城乡供水一体化进程里农村自来水“同质同服务”的实现路径与面临的挑战城乡供水一体化进程里农村自来水“同质同服务”问题是文中的研究对象,采用文献分析、实地调研和案例对比等方法能系统地探讨农村自来水服务在质量、覆盖率、管理水平等方面与城市供水的差距及其成因,研究发现农村自来水建设存在基础设施差、资金投入少、技术人才缺、管理体制不完善等诸多困境,针对这些问题文中提出实现“同质同服务”的五条路径,其一构建起城乡统一的供水规划体系促使供水基础设施互联互通,其二创新投融资模式构建多元化资金保障机制,其三加强农村供水技术支撑提高智慧化管理水平,其四完善城乡一体的水价补贴机制平衡公平与效率的关系,其五健全法律法规体系搭建城乡供水统一监管框架,而且文章还深入剖析实施过程中的体制机制阻碍、资源配置不均、地区发展不平衡等挑战并给出因地制宜、分类推进、政府主导与市场运作相结合的应对策略,这一研究成果对推动城乡基本公共服务均等化、乡村振兴战略实施有着重要的理论意义和实践价值。

[关键词]城乡供水一体化;农村自来水;同质同服务;实现路径;挑战

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18049

中图分类号: TV212.5

文献标识码: A

Research on the Implementation Path and Challenges of "Same Quality and Same Service" for Rural Tap Water in the Process of Urban Rural Water Supply Integration

ZHENG Peiyu

Linquan County Water Resources Management Institute, Fuyang, Anhui, 236000, China

Abstract: The study focuses on the implementation path and challenges of "same quality and same service" for rural tap water in the process of urban-rural water supply integration. The problem of "same quality and same service" for rural tap water in the process of urban-rural water supply integration is the research object in this article. By using literature analysis, field research, and case comparison methods, the gap and causes of quality, coverage, and management level between rural tap water services and urban tap water can be systematically explored. The study found that there are many difficulties in rural tap water construction, such as poor infrastructure, low capital investment, lack of technical talents, and imperfect management system. In response to these problems, the article proposes five paths to achieve "same quality and same service". The first is to establish a unified urban-rural water supply planning system to promote the interconnection of water supply infrastructure, and the second is to innovate investment and financing models to construct diversified funding guarantee mechanisms. The third is to strengthen the technical support for rural water supply and improve the level of intelligent management. The fourth is to improve the water price subsidy mechanism for urban-rural integration, balance the relationship between fairness and efficiency. The fifth is to establish a unified regulatory framework for urban and rural water supply through a sound legal and regulatory system. In addition, the article also deeply analyzes the challenges of institutional obstacles, uneven resource allocation, and uneven regional development in the implementation process, and provides tailored, classified, government led, and market operated response strategies. This research achievement has important theoretical significance and practical value for promoting the equalization of basic public services in urban and rural areas and the implementation of rural revitalization strategies.

Keywords: integration of urban and rural water supply; rural tap water; same quality and same service; implementation path; challenge

引言

人类生存与发展离不开水这一基本资源,并且安全稳定的供水服务属于重要基本公共服务,这是保障人民健康生活的基石,也是评判国家治理体系和治理能力现代化水平的关键指标。可是长期以来,我国城乡二元结构致使供水服务差别明显,农村自来水在水质安全、供水保障、服务质量等方面与城市相比存在显著欠缺。2023 年住房和城乡建设部发布数据表明,我国城市供水普及率超 98%,农村自来水普及率为 87%,其中大概 30%的农村供水工

程运行不稳定、水质不达标。城乡供水服务的不平等不但影响农村居民生活品质,而且限制乡村振兴战略施行以及城乡融合发展进程。

“十四五”规划推进期间,我国把城乡供水一体化建设当作缩小城乡差距、推动基本公共服务均等化的关键举措并明确提出农村自来水要“同质同服务”的发展目标,2021 年出台的《关于加强农村供水工程建设和管理的指导意见》再次要求到 2025 年全面构建城乡一体、多方参与的农村供水工程建管机制且城乡供水服务均等化也要

基本达成,不过在这个目标面前存在不少挑战,例如基础设施建设落后、投资回报机制有欠缺、管理体制分散以及技术标准不统一等。

本研究以系统论和公共服务均等化理论为依据,从技术整合、管理创新、政策支持以及多方协同等多个维度探究农村自来水“同质同服务”如何实现以及会遭遇哪些挑战,在分析国内外城乡供水一体化典型案例之后给出契合我国国情的解决办法,想要为推动城乡供水公共服务均等化、加快城乡融合发展给予理论方面的指导与政策方面的建议并为达成乡村全面振兴尽一份力。

1 城乡供水一体化的理论基础与现状分析

1.1 城乡供水一体化的概念框架与理论依据

所谓城乡供水一体化,在统一规划、建设和管理之下让城市供水系统向农村伸展或者把分散的农村供水系统整合进城市供水网络,从而达成水源、水质、水价、服务“四个统一”的供水管理模式,并且公共产品理论、区域协调发展理论和基本公共服务均等化理论是它的主要理论依据,其中公共产品理论把安全饮水当作准公共产品并着重指出政府有责任保障基本供水权利,区域协调发展理论给城乡一体化发展构建起理论框架,基本公共服务均等化理论为农村自来水“同质同服务”目标提供价值取向。城乡供水一体化的构成要素和发展阶段可通过下表概括:

表 1 城乡供水一体化的构成要素和发展阶段表

构成要素	初级阶段	发展阶段	成熟阶段
组织体系	城乡分设	区域统筹	完全一体化
服务标准	标准差异明显	基本标准统一	同质同服务
网络建设	相对独立	部分互通	全面互联互通
水价机制	分类定价	区域均衡	统一定价、差别补贴
监管体系	分散监管	协同监管	统一监管框架

新型城镇化和乡村振兴战略中包含城乡供水一体化建设这一重要内容,其本质在于打破城乡二元结构以达成基本公共服务均等化,依靠的是体制机制创新以及资源优化配置^[1]。2022 年水利部发布数据表明,我国超 60%的县级行政区已开展城乡供水一体化规划工作,不过不少农村地区供水“最后一公里”存在难题且城乡供水服务质量差别还很明显。

1.2 农村自来水同质同服务的内涵解析

城乡供水一体化核心要实现农村自来水“同质同服务”,这不光看重水质安全,还涉及供水可靠、服务便捷、收费合理等诸多方面,“同质”即农村供水水质需达城市相同标准并合乎国家《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2022)各指标要求,2023 年生态环境部监测数据显示全国城市集中式供水水质合格率为 95.6%而农村仅为 82.7%二者差别明显,“同服务”意味着农村供水在供水压力、供水时长、故障响应、用户服务等方面应有与城市供水同等水平的服务保障。

要实现“同质同服务”,需以统一的服务标准和评价体系为基础,涵盖水质检测标准、服务质量标准以及供水安全标准这三个维度,理论上这彰显了公共服务均等化与社会公平正义的价值取向,而从实践层面来说能妥善解决农村供水“建得起却管不好、用得起却喝不上”的问题。2021 年国务院发布的《关于推进农村供水工程高质量发展的指导意见》将我国农村自来水“同质同服务”列入国家战略,要求到 2025 年农村集中供水率达 90%且自来水普及率达 85%以上,从而基本达成城乡供水服务均等化,但因历史欠账多、地区发展不平衡等因素,要实现该目标仍有诸多挑战。

1.3 国内外城乡供水一体化现状与比较

国际经验显示,发达国家大多依靠法律保障、制度创新以及技术升级达成城乡供水一体化,就拿美国来说,它颁布了《安全饮用水法》,从而建立起全国统一的饮用水标准与监管框架,由州政府具体施行,联邦政府给予资金支持,形成政府主导、企业运作、公众参与的三方治理模式。法国采取特许经营模式,地方政府和专业供水企业签署长期合同,企业被授权负责供水设施建设与运营管理,且政府保留监管权,这样既能保证专业化运营,又能确保公共利益。日本则是通过区域合作,构建起跨行政区的流域供水管理体系,有效解决区域间水资源配置不均的问题。

中国城乡供水一体化起步较晚,不过发展很快,2023 年住建部统计显示当下我国超 30 个省份有了城乡供水一体化发展规划且成功事例接连冒出,浙江省凭借“千村示范、万村整治”工程构建起县级统管、乡镇协管、村级自管的三级网络从而使农村自来水普及率超 95%,广东省采取“政府主导、企业主体、农民参与”的模式由政府出资购服务让专业供水企业介入农村供水设施的建设与运营,四川省独创“公司+合作社+农户”的协作机制既削减了管理成本又提升了服务效率^[2]。

我国城乡供水一体化与发达国家相比仍面临不少挑战,例如法律法规体系不健全且缺少有力的制度保障、资金投入不足使得农村供水基础设施建设和维护资金缺口大、技术水平有限导致农村供水智能化和信息化水平低、管理体制分散且条块分割严重以及协调机制不顺畅等,这些都将在未来发展中慢慢解决。

2 农村自来水同质同服务实现路径探索

2.1 技术层面的整合与升级策略

农村要实现自来水“同质同服务”,技术层面的整合与升级是基础,所以首先要推动供水管网互联互通工程以构建区域性供水网络体系。2022 年水利部有数据显示我国建成超 70 万处农村供水工程,但这些工程规模小、分布散、标准低,而推进城乡供水管网连通工程、形成“城市供水厂+乡镇加压站+村级配水系统”这种层级供水体系能有效提高农村供水保障能力。江苏省施行“城网延伸、区域连通”策略把城市优质水源引入农村,农村供水保障

率提升 15%，这给全国提供了有用经验。

借助物联网、大数据等技术推广智慧水务建设能提升农村供水运营管理效率，安装智能水表、在线监测设备和远程控制系统后可建立起供水全过程监控平台，从而达成水质实时监测、用水量精确计量以及漏损智能监控的目标。2020 年浙江省施行农村供水数字化转型计划，到现在超 60% 的农村供水系统已安装智能化设备，水质监测合格率提升了 12 个百分点且管网漏损率降低了 8%，此外还要强化农村水质净化处理技术创新并根据不同地区的水质特性挑出合适的净化工艺，像膜技术、生物滤池之类的以保证农村供水水质达标进而满足居民日常用水需求。农村自来水同质同服务技术整合与升级路径框架如图 1。

2.2 管理体制与运营机制创新

农村自来水要达成“同质同服务”，关键在于管理体制与运营机制的创新，当下农村供水管理大多存在“九龙治水”现象，水行政主管部门、住建部门、卫生健康部门等诸多部门职责有重叠致使管理效率不高，所以需要整合农村供水管理职能，建立起“统一领导、分级负责、部门协同”的管理体制并明确县级政府在农村供水工程建设和运行管理方面担起主体责任，此外还要推动城乡供水统一运营，让城市供水企业以托管、兼并重组等形式整合农村

供水设施从而达到规模化、专业化、企业化运营，2023 年住建部统计显示超 40% 的县级行政区采用“城带乡”模式即由城市供水企业统一管理农村供水系统，这使农村供水服务质量大大提高且运营成本平均下降 25% 还多。

2.3 政策支持与资金保障机制

农村自来水要实现“同质同服务”，政策支持和资金保障是两大重要支柱，所以得完善农村供水基础设施方面的投融资政策，构建起“政府引导、市场运作、多方参与”式的资金保障体系^[3]。其一，要加大财政投入力度，把农村供水工程纳入公共财政保障范畴，借助中央专项转移支付、地方财政配套等手段保障农村供水设施建设和改造资金，虽然财政部数据显示 2021 到 2023 年中央财政在农村供水工程上累计安排资金超 250 亿元，但这离实际需求还差很多。其二，投融资模式需创新，PPP 模式、供水特许经营权质押贷款等方式可被用来吸引社会资本参与到农村供水建设与运营中来。此外，合理水价形成机制也得建立起来，“基本水价+计量水价”的阶梯水价制度可以推行，并且农村供水补贴政策也要完善，定向补贴、水价补贴等方式能够派上用场以确保农村低收入群体基本用水权益，从而平衡好农村供水的公益性和可持续性。

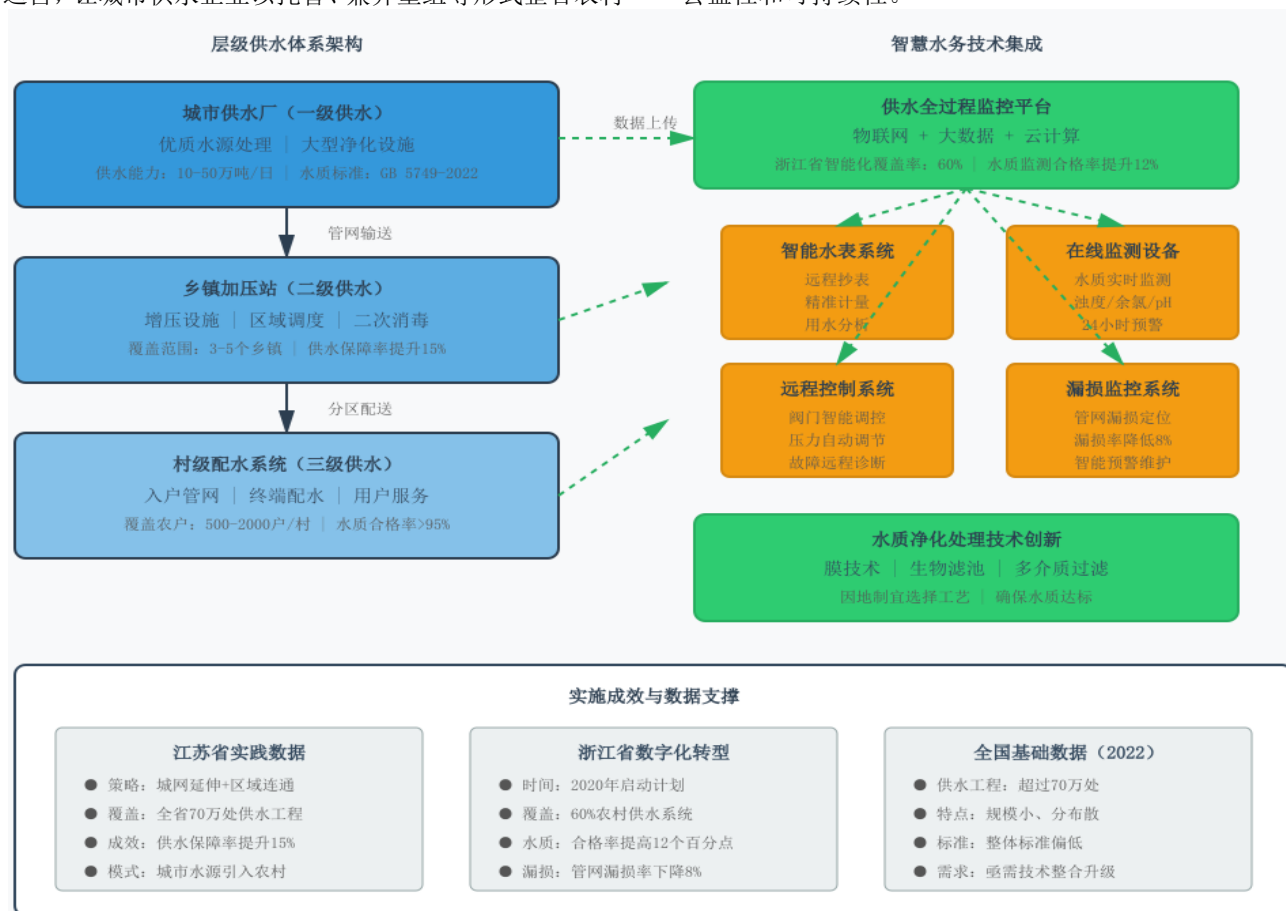


图 1 农村自来水同质同服务技术整合与升级路径框架图

2.4 多方参与的协同治理模式

要让农村自来水达到“同质同服务”，多方参与的协同治理是个有效的办法，需构建由政府主导、企业运营、村集体参与、用户监督的多元主体协同治理结构，其中政府承担规划引领、政策支持和监督管理的任务，专业供水企业负责设施建设与日常运营，村集体经济组织帮忙宣传发动、收费管理以及矛盾调解，而用户借用水户代表大会等渠道参与决策监督，这样多方参与就能有效整合各方资源与能力，达成治理合力。水利部 2022 年的调研数据显示，采用多方参与协同治理模式的农村供水工程，运行满意度平均提升 18 个百分点且故障响应时间缩短大概 40%，此外还得加强信息公开和公众参与机制建设，定期发布供水质量报告、举办公众咨询日等活动，从而提高农村供水工作的透明度，让公众参与意识和监督能力增强，营造出全社会都关心、支持和参与农村供水建设的良好氛围，给农村自来水“同质同服务”提供雄厚的社会基础。

3 农村自来水同质同服务面临的挑战与障碍

3.1 区域发展不平衡带来的实施困境

中国幅员虽广，但各地区的经济社会发展水平高低不一，这一区域发展不平衡的情况直接关系到农村自来水同质同服务目标能否达成。水利部统计数据显示，到 2022 年的时候，我国东部沿海省份农村自来水普及率已达到 95% 还多，而西部有些省份才 75% 左右，而且城乡供水服务质量差别很大。经济欠发达的地方，基础设施投入的能力有限，在短时间内要建出跟城市可比的供水系统是很难的，并且像山区、高原这些地形复杂的区域，由于地理条件受限，管网铺设成本很高且技术要求也高，这严重限制了自来水均质化服务的推进^[4]。区域之间资源禀赋、财政能力、基础条件不一样，所以在农村供水的实际操作中就出现了“东快西慢”“南高北低”的不均衡情况。

3.2 技术标准与服务规范统一的难点

农村自来水要实现同质同服务面临着巨大挑战，即技术标准与服务规范的统一问题，因为当下农村供水系统规模小、标准低、设备落后，这使其与城市供水体系在技术上有着明显差距，并且住建部 2021 年调研报告显示全国大概 40% 的农村小型供水工程达不到《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2022) 要求。从技术标准看，农村供水设施的建设标准跟城市不一样，没有统一的工程设计、施工和验收规范，而在服务规范方面，农村供水运营维护机制不完善，水质检测次数少，应急处置能力差，服务响应时间长，并且不同地区的水处理工艺和消毒方式不一样，这就使得水质参数监测项目和标准执行也不一样，所以很难形成统一的技术服务体系。

3.3 资金投入与成本回收的矛盾

农村自来水想要实现同质同服务面临着资金投入和

成本回收之间极为严峻的矛盾，财政部的数据表明，2018 到 2022 年全国农村供水建设平均每年有大概 2000 亿的投资需求但实际到位资金只是需求的大约六成，并且农村供水设施初始投资巨大且回收周期漫长，用户分散而造成“规模不经济”使得每户的供水成本比城市高好多，再加上农村居民支付能力差所以水价低得很普遍，根本无法覆盖全部运营成本，调研数据表明全国农村自来水平均每立方米 2.5 元但实际供水成本每立方米大约 4.3 元，长期亏本让运营单位很难维持下去，而且县域财政支撑能力有限不能持续稳定地提供资金保障，商业化融资模式在农村没多大吸引力致使多元投入机制难以形成，这严重阻碍了农村供水设施的更新改造和服务质量的提升。

4 结论与政策建议

本研究发现，虽然实现城乡供水一体化的核心在于农村自来水同质同服务，但其面临着诸多挑战，如区域发展不平衡、技术标准难以统一以及资金投入与成本回收存在矛盾等，所以要有效达成农村自来水同质同服务的目标就得给出如下政策建议：其一，建立和完善差异化支持政策，加大对经济欠发达地区的转移支付力度并开展精准帮扶。其二，加快建设全国统一的农村供水技术标准体系并制定出符合不同区域特点的分类指导标准。其三，构建多元化的投融资机制，在借助政府和社会资本合作（PPP）模式引入市场活力的同时设立农村供水专项基金。其四，完善水价形成机制，推行分类水价和阶梯水价制度，适当提高水价以体现供水成本且建立起低收入群体用水补贴制度^[5]。其五，加强部门间的协同以及纵向治理，促使水利、住建、卫生健康等部门形成工作上的合力。

逐步缩小城乡供水服务差距要靠城乡统筹规划、分区分类施策、强化政策引导以及创新体制机制，进而达成农村自来水服务质量与城市同质、服务水平与城市相当的发展目标，给乡村全面振兴和城乡融合发展打下基础支撑。

[参考文献]

- [1] 罗惠云, 张宁. 城乡供水一体化工程技术要点及案例分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 72.
- [2] 向帆, 马宗凯, 邱彬彬. 县城城乡供水一体化工程中管网延伸设计要点[J]. 中国给水排水, 2024, 40(22): 47-52.
- [3] 向帆. 山区县城城乡供水一体化系统构建探讨[J]. 给水排水, 2022, 48(1): 51-56.
- [4] 蔡甜, 徐凯歌, 韩爱钊, 等. 典型山区城乡供水一体化规划、设计思路及案例[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 104-110.
- [5] 苏秀峰, 孙凤祥, 刘秀勇. 农村供水“德州样板”典型做法与思考[J]. 水资源开发与管理, 2024, 10(7): 37-42.

作者简介：郑培玉（1978.1—），男，安徽省临泉县人，汉族，本科学历，工程师，从事农村饮水建设管理工作。

征 稿

Call for Papers

《水电科技》由新加坡Viser Technology Pte. Ltd. 主办，ISSN: 2717-5383（印刷）。本刊长期以来注重质量，编排规范，选稿较严格，学术水平较高，深受高校教师及科研院所研究人员的青睐。本刊为开源（Open Access）期刊，出刊的所有文章均可在全球范围内免费下载，中国知网等国内权威数据库收录。

期刊内容以全球水电工程的勘测、设计、施工、运行管理和科学研究等方面的技术经验为主，同时也报道水电领域的各项先进技术。目前，本刊发行遍及全球各地，是水电科技刊物中影响范围较大、发行量稳定的综合刊物，是水电从业人员“了解世界”的窗口，也是科研技术人员进行学术交流的平台。

《水电科技》期刊主要栏目有：

水利工程、水文水资源、水土保持、防汛抗旱、节水灌溉、勘测规划、能源动力工程、水电建设、电力工程、电气工程、自动化技术与应用、运行维护、技术解决方案、综合研究等。

鼓励水电工程建设各领域的专业技术人员和管理人员以及大专院校相关专业的师生和科研人员来稿，有关国家科技计划、自然科学基金和各种部门、地方、院所科技基金资助项目的文章优先发布。

征文格式与要求：

（1）论文要求：论点新颖，论证充分；设想可行，结论可靠；条理分明，书写清楚，用字规范，上交电子文件（word格式）。

（2）论文格式：题目、作者姓名、工作单位、省份及邮政编码、中英文内容摘要（150字符-300字符为宜）及关键词（3-5组为宜）、正文、参考文献。（附个人简历、邮箱、联系方式及详细收件地址，如：省、市、区、路）。

（3）论文篇幅：字符数要求在5000-8000字符之间。

投稿网址：www.viserdata.com



Viser Technology Pte. Ltd.

公司地址

195 Pearl's Hill Terrace, #02-41, Singapore 168976

官方网站

www.viserdata.com

