

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM



2025

第39卷 总第155期

東方電氣評論

DONG FANG DIAN QI PING LUN

- ◉ 中国发电设备专业技术期刊、首届《CAJ-CD规范》执行优秀期刊
- ◉ 《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》期刊源
- ◉ 《万方数据·数字化期刊群》全文收录
- ◉ 《中国核心期刊(遴选)数据库》期刊源
- ◉ 《中文科技期刊数据库》(维普网)全文收录
- ◉ 《中国期刊全文数据库(CJFD)》全文收录
- ◉ 《超星期刊域出版平台》全文收录

ISSN 1001-9006



中国东方电气集团有限公司 主办
四川省动力工程学会

东方电气评论

第三十九卷第一期

二〇二五年一月

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



公开 ISSN 1001-9006
发行 CN 51-1333/TM

第39卷第1期(总第155期)
出版日期:2025年1月25日

国内邮发代号:62-187
国内定价:8.00元



2025

第 39 卷第 1 期 总第 155 期
(双月刊, 1987 年创刊)

东方电气评论



目次

编辑委员会

主任委员: 胡修奎

副主任委员: 董娜 唐健

委员: 王大伦 王拯元 王 駿 艾 松 石清华
卢 洪 令红兵 冯 涛 刘泰生 刘德民
江国焱 孙 奇 李维成 李 婷 李曦滨
杨金炳 邹 杰 宋聚众 陈文学 范小平
周 杰 赵永智 钟连兵 袁 凌 莫尔兵
莫春鸿 铎 林 梁权伟 舒华安 曾明富
谢光有 鄢治国 赖成毅 雷 宇 潘绍成

秘书长: 唐健

主管: 中国东方电气集团有限公司

主办: 中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会

主编: 胡修奎

副主编: 董娜 唐健

本期责任编辑: 张媛

英文编辑: 李宏

编辑出版: 《东方电气评论》编辑部

地址: 成都市高新西区西芯大道 18 号

邮编: 611731

电话: 028-87898263

电子信箱: dfdqpl@dongfang.com

印刷单位: 成都市新都华兴印务有限公司

国内发行: 四川省报刊发行局

国外发行: 中国出版对外贸易总公司北京 782 信箱

基础研究

- 调相机定子绕组端部瞬态动力响应分析及试验研究 周俊鹏 何启源 范洋铭等(1)
- 基于圆柱模型的一维热应力计算方法研究 陈延强 杨灵(7)
- 联合循环机组碳排放因子计算及变工况特性分析 宋映波 彭益 胥波(12)

核能发电

- 大型核电汽轮机组高中压模块降负荷冷却过程安全性分析 章艳 段增辉 陈贝贝等(18)

水力发电

- 潼南电站三叶片灯泡贯流水轮发电机设计概述 施明星 郑棣(22)
- 混流式水轮机现代化更新改造技术 董晓宁 王勇刚(27)

风力发电

- 基于降低电流负载法的双馈风力发电机温升试验研究 邓开 罗小兵(32)
- 退役风电叶片回收再利用体系分析 鲁涛 薛麟嘉 胡世磊等(36)

数字制造

- 面向多级可信协同的发电装备智慧物联体系设计及应用 徐思源 李煜权 郑文涛等(43)
- 核电装备制造行业数字化工厂的 IPv6 网络设计 曹泽奇(49)
- 列管式换热器薄壁管板孔加工方法的探索研究 蒋志海 崔琳雨 杨军等(55)
- 叶片类零件多轴联动加工轮廓误差分析与控制技术研究 吴家奎 陈道全 何伟等(59)

电力电子与控制

- PLC 中电梯群控策略及算法实现 何惠冬 王治华(65)
- 抽水蓄能机组机械制动控制系统设计 闫浩 李静(72)

工程技术

- 电解铝烟温提升改造试验研究 刘庭江 唐豪杰 陈虹等(76)
- 风电机架焊接变形研究 刘明超 许健 王效宇(81)
- 简讯 (17)(21)(26)(54)(71)(80)(87)(88)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*q*A4*88*zh*p*¥8.00*750*16*2025-01

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



2025

2025-1-25 Vol. 39 No. 1
(Bimonthly, since 1987)

CONTENTS



BASIC RESEARCH

Transient Dynamic Response Analysis and Experiment of Condenser Stator End Winding ZHOU Junpeng, HE Qiyuan, FAN Yangming, et al(1)
One-dimensional Thermal Stress Calculation based on Cylinder Model

..... CHEN Yanqiang, YANG Ling(7)

Carbon Dioxide Emission Factor Calculation and Off-Design Conditions Analysis of Gas Turbine Combine Cycle SONG Yingbo, PENG Yi, XU Bo(12)

NUCLEAR POWER

Safety Analysis of Load Reduction Cooling for Large Nuclear Power Turbine HIP Structure ZHANG Yan, DUAN Zenghui, CHEN Beibei, et al(18)

HYDRAULIC POWER

Overview of Three-blade Bulb Type Hydro-generator Design for Tongnan Power Station SHI Mingxing, ZHENG Di(22)

Modernization and Retrofitting Technology of Mixed-flow Turbines DONG Xiaoning, WANG Yonggang(27)

WIND POWER

Research on the Application of Current Load Reduction Method to Temperature Rise Test of Doubly-fed Wind Turbine DENG Kai, LUO Xiaobing(32)

Analysis of Decommissioned Wind Power Blade Recycling System LU Tao, XUE Linjia, HU Shilei, et al(36)

DIGITAL MANUFACTURING

Design and Application of Industrial IoT Platform System for Power Generation Equipment Manufacturing Industry, Targeting Multi Level Trusted Collaboration and Edge Controlled Autonomy XU Siyuan, LI Yuquan, ZHENG Wentao, et al(43)

IPv6 Network Design for Digital Factory in the Nuclear Power Equipment Industry CAO Zeqi(49)

Study on Machining of the Tube Holes on the Thin-wall Tubesheet in Tubular Heat Exchanger JIANG Zhihai, CUI Linyu, YANG Jun, et al(55)

Research on Analysis and Control Technology of Contour Error in Multi Axis Machining of Blade Parts WU Jiakui, CHEN Daoquan, HE Wei, et al(59)

POWER ELECTRONIC CONTROL

Design and Implementation of Group Control Elevator Operation Strategy and Algorithm HE Huidong, WANG Zhihua(65)

Mechanical Braking Control System Design for Pumped Storage Unit YAN Hao, LI Jing(72)

ENGINEERING

Experimental Study on Improving the Temperature of Aluminum Electrolysis Waste Gas LIU Tingjiang, TANG Haojie, CHEN Hong, et al(76)

Research on Welding Deformation of Wind Power Racks LIU Mingchao, XU Jian, WANG Xiaoyu(81)

NEWS IN BRIEF (17)(21)(26)(54)(71)(80)(87)(88)

EDITORIAL BOARD

Chairman: HU Xiukui

Vice Chairmen: DONG Na, TANG Jian

Members: WANG Dalun, WANG Zhengyuan, WANG Ai, AI Song, SHI Qinghua, LU Hong, LING Hongbing, FENG Tao, LIU Taisheng, LIU Demin, JIANG Guoyan, SUN Qi, LI Weicheng, LI Ting, LI Xibin, YANG Jinbing, ZOU Jie, SONG Juzhong, CHEN Wenxue, FAN Xiaoping, ZHOU Jie, ZHAO Yongzhi, ZHONG Lianbing, YUAN Ling, MO Erbing, MO Chunhong, DUO Lin, LIANG Quanwei, SHU Huaan, ZENG Mingfu, XIE Guangyou, YAN Zhiguo, LAI Chengyi, LEI Yu, PAN Shaocheng

Chief Secretary: TANG Jian

Sponsor: Dongfang Electric Corporation

Chief Editor: HU Xiukui

Vice Chief Editors: DONG Na, TANG Jian

Executive Editor: ZHANG Yuan

English Editor: LI Hong

Edited and Published by:

Editorial Department of Dongfang Electric Review
No. 18 Xi Xin Avenue, Gao Xin Xi District, Chengdu,
Sichuan, P. R. China

Postal Code: 611731

Tel: 028-87898263

E-mail: dfdqpl@dongfang.com

Overseas Distribution by:

China National Publishing Industry Trading Corporation
(P. O. Box 782, Beijing, P. R. C.)

调相机定子绕组端部瞬态动力响应分析及试验研究

周俊鹏 何启源 范洋铭 王世建 肖翦 孙锋

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:以调相机定子绕组端部的汽端结构作为研究对象,考虑汽端实际结构,提出构件的等效模拟方法,建立汽端端部数字化机理的三维模型。首先采用电磁分析软件 JMAG 对汽端端部在额定负载下开展数值模拟,明确汽端端部线棒在额定负载作用下的电磁力密度及演变周期,并分析绕组线棒电磁力密度的特征和受力状态;其次运用 ANSYS 中 APDL 汇编语言编写数据转换程序将电磁分析的结果数据耦合到结构分析模型中,并对汽端结构开展瞬态动力响应分析;最后研究定子绕组端部随时间和空间分布的动力响应曲线及频谱结构。通过仿真结果和试验结果的对比分析,验证了定子端部磁固耦合瞬态动力响应仿真分析方法的可靠性和准确性,为后期汽轮发电机定子绕组端部结构的优化设计奠定技术基础。

关键词:调相机; 定子绕组端部; 电磁力密度; 瞬态动力响应; 试验

中图分类号: TM761.12

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)01-0001-06

Transient Dynamic Response Analysis and Experiment of Condenser Stator End Winding

ZHOU Junpeng, HE Qiyuan, FAN Yangming, WANG Shijian, XIAO Jian, SUN Feng

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: The turbine end of the condenser stator end winding was taken as a research object in this paper. A three dimensional finite element model of the stator end winding was established. Firstly, the periodical variation of electromagnetic force density in the stator end winding underrated load was obtained by numerical simulation with JMAG software. Secondly, the electromagnetic analysis results were coupled to the structural model for transient dynamic response analysis by ANSYS software. Finally, the dynamic response curve and spectrum structure of the stator end winding with time were obtained. The comparison demonstrates a high level of agreement between the numerical simulation and experimental results, which has proved the reliability and accuracy of the simulation analysis method. The conclusion can help to guide the optimization design of the stator end winding structure for the turbine generator.

Key words: condenser; stator end winding; electromagnetic force density; transient dynamic response; experiment

随着汽轮发电机组的容量和电磁负荷逐渐增大,电磁场也会相应的增强。汽轮发电机组在磁场和电场的作用下会使定转子系统的机电耦合和稳定性出现问题^[1-2],同时也会发生定子绕组端部的磁固耦合振动和动力响应等现象。汽轮发电机在运行时,定子绕组端部将会受到电磁场作用产生的

电磁力,进一步会发生端部振动响应。^[3]当端部振幅过大时,部件之间就会产生磨损,导致部件出现松动,则机组就不能正常运行。^[4]若发电机定子端部绕组在运行情况下出现安全隐患,将会给机组的安全稳定运行造成极大损失。^[5]因此,对汽轮发电机定子绕组端部的振动响应问题开展相关数值分

收稿日期: 2024-03-17

作者简介:周俊鹏(1984—),男,2012年毕业于华中科技大学固体力学专业,硕士研究生,高级工程师。现任职东方电气集团东方电机有限公司,主要从事大型发电设备结构刚强度及动力学研究方向工作。邮箱:63991317@qq.com。

析与试验研究具有非常重要的指导意义。

汽轮发电机定子绕组端部结构异常复杂,连接关系种类较多,同时端部处于复杂的空间磁场中,所以准确建立定子绕组端部的力学分析模型和电磁分析模型是振动研究的关键。国内外学者对汽轮发电机定子绕组端部在电磁力作用下动力学的问题做了大量的研究工作。Lin 等采用有限元法研究了磁固耦合作用下的感应电机端部变形。^[6-8] Albanese 等研究了汽轮发电机端部结构的电磁力并将电磁力导入结构模型进行谐响应分析。^[9-10] 赵洋等分析了 600 MW 汽轮发电机定子绕组端部在额定运行和故障工况下的电磁力并导入结构模型研究了动力响应的变化规律及优化设计。^[11-12]

本文以 300 Mvar 调相机定子绕组端部的汽端绑扎结构作为研究对象。首先建立定子绕组端部的三维有限元模型,其次在电磁分析软件 JMAG 对汽端端部在额定负载下开展数值模拟分析,获得端部绕组线棒在额定负载作用下的电磁力密度及变化规律;运用 ANSYS 中 APDL 汇编语言编写数据转换程序将电磁分析的结果数据耦合到结构分析模型中,并对汽端结构开展瞬态动力响应分析;最后研究定子绕组端部随时间和空间分布的动力响应曲线及频谱结构。通过仿真结果和试验结果的对比分析,验证了定子端部磁固耦合瞬态动力响应仿真分析方法的可靠性和准确性。

1 电磁场分析

在定子绕组端部三维瞬态电磁场的求解区域中(含导电介质的涡流区),采用 $\dot{A}-\varphi$ 三维有限元法表达的发电机定子绕组端部涡流场的控制方程为:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{A} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \dot{A} \right) + \sigma \frac{\partial \dot{A}}{\partial t} + \partial \nabla \varphi = \dot{J}_s \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \dot{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \varphi \right) = 0 \quad (2)$$

其中, φ 为标量位, $\dot{A}$ 为矢量位, $\dot{J}_s$ 为电流密度, μ 为磁导率。

非涡流区中,电磁场三维有限元控制方程为:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{A} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \dot{A} \right) = 0 \quad (3)$$

铁心轴向断面($z=0$)上的边界条件为:

$$\dot{A} = \dot{A}_0$$

$$\varphi = \varphi_0$$

求解区域外圆面和端面上的边界条件为:

$$n \cdot \dot{A} = 0$$

$$(\nu \nabla \times \dot{A}) \times n = 0$$

在全面考虑汽端结构的实际尺寸、涡流效应和非线性效应等因素的情况下,基于有限元法建立全三维结构的定子绕组端部电磁场分析模型。利用电磁分析软件研究汽端结构在额定工况下的电磁力密度及变化规律。电磁场分析模型包括定转子绕组、定转子铁心,铜屏蔽、压圈和压指等部件,见图 1 所示。



图 1 定子绕组端部电磁分析模型

将额定电流作为边界条件,加载到电磁分析模块中的三维定子绕组端部模型。运用电磁分析软件 JMAG 对定子绕组端部开展电磁仿真分析。通过分析获得定子绕组端部的磁场和电磁力密度在空间及时间上的分布,电磁力密度矢量见图 2 所示。

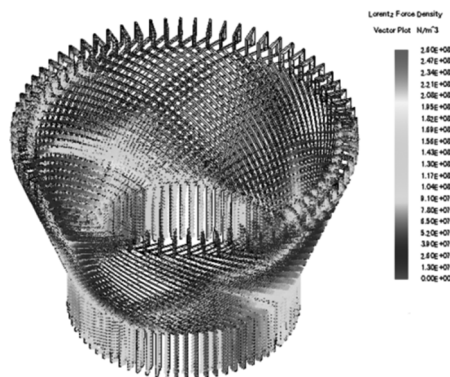


图 2 额定负载工况电磁力密度矢量图

为了深入研究定子绕组端部电磁力密度的分布规律,分析了鼻端直线段不同区域的电磁合力密度、径向电磁力密度、切向电磁力密度和轴向电磁力密度。鼻端直线段不同区域的分析监测点如图3所示,监测点在各个方向的电磁力密度如图4~图6所示。由分析可知,鼻端直线段的电磁力密度径向最大,切向次之,轴向最小。

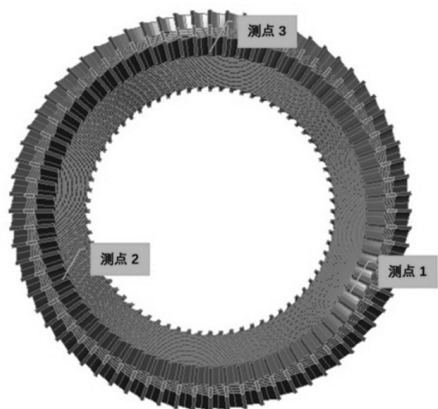


图3 监测点位置示意图

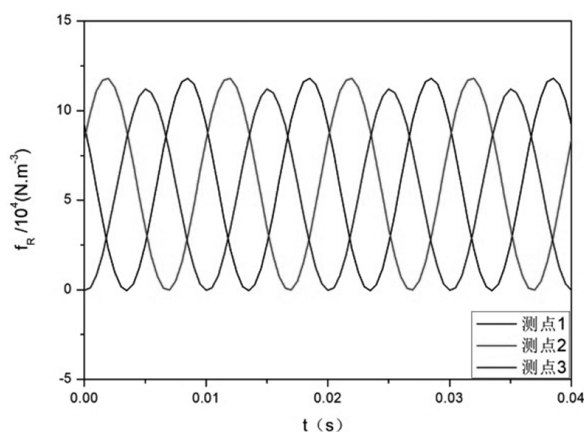


图4 监测点径向电磁力密度随时间变化曲线

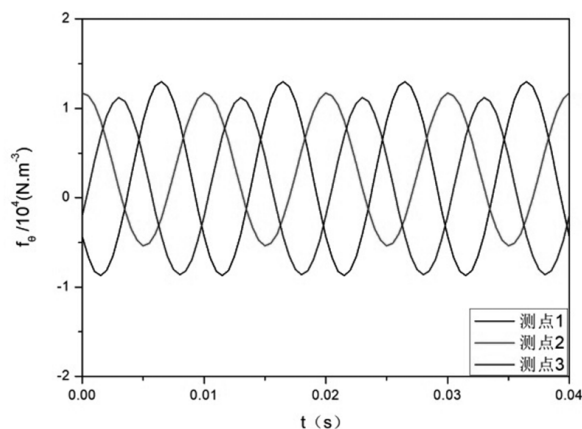


图5 监测点切向电磁力密度随时间变化曲线

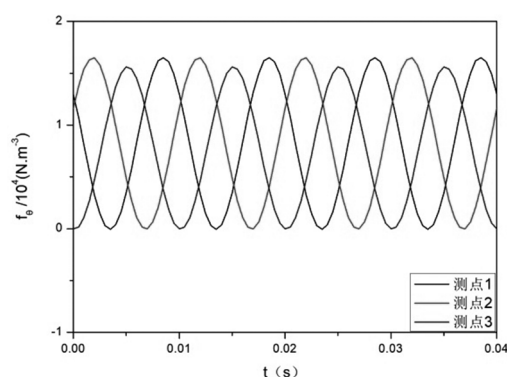


图6 监测点轴向电磁力密度随时间变化曲线

2 瞬态动力响应分析

瞬态动力学是分析结构在承受任意随时间变化载荷的动力学响应。非线性瞬态动力学的控制方程:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (4)$$

式(4)中, M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; F 是由作用在结构上的外载荷形成的结构节点动载荷向量。 $\ddot{u}$ 为节点加速度; $\dot{u}$ 为节点速度; u 为节点位移, (t) 为载荷作用时长。

调相机端部采用绑扎结构,部件较多且结构复杂。汽端是由端部压圈、铜屏蔽、绝缘支架、弹性支架、绑环、绕组线棒、绑带、层间垫块等组成一个整体。建立合理的数值分析模型是准确分析结构动力响应的关键,汽端的几何模型见图7所示。

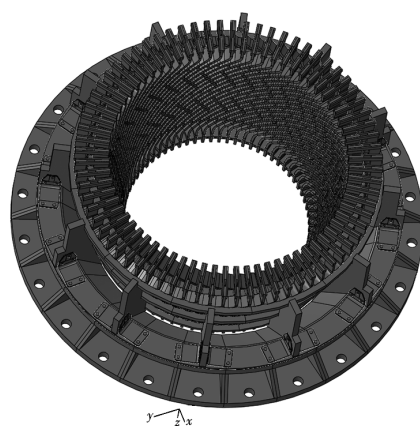


图7 汽端几何模型

本文中定子绕组端部的瞬态动力响应是由电磁分析软件 JMAG 和结构分析软件 ANSYS 共同完成。由于 JMAG 电磁软件数值分析得到的端部电磁力密度数据不能直接耦合到 ANSYS 软件中结构分析模块进行瞬态动力响应分析,所以本文运用

ANSYS 中 APDL 汇编语言编写数据转换程序将电磁分析的结果数据耦合到结构分析模型中,解决了从电磁到结构的耦合问题,为 JMAG 软件和 ANSYS 软件之间的磁固耦合提出一种新方法。

本文中磁固耦合的思路:首先为了确保电磁参数和结构参数转换的准确性,电磁分析和结构分析中定子绕组端部线棒的三维几何模型必需是相同的;其次运用编写的 APDL 语言程序将电磁分析中的端部线棒电磁力密度转换成电磁力,再耦合到结构分析软件中对应的端部线棒几何模型上;接着在完整的定子绕组端部模型上设置接触状态和边界条件(端部的线棒直线段做轴向和周向约束,端部的压圈做固定约束)并完成瞬态动力响应分析;最后得到定子绕组端部的时间位移曲线并通过傅里叶变换得到相应的 FFT 频谱结构。

通过数值分析,重点研究图 3 中三个不同监测点的位移响应曲线。考虑到轴向电磁力密度最小,因此结果只分析了径向位移 U_R 和切向位移 U_θ 随时间变化的曲线如图 8~13 所示。从图中可以得到,各监测点的径向位移都大于切向位移,定子绕组端部主要表现为径向变形。

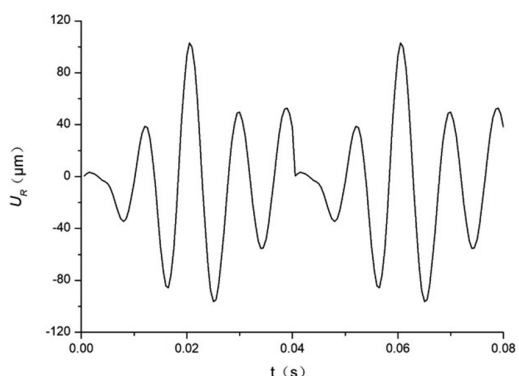


图 8 监测点 1 径向位移

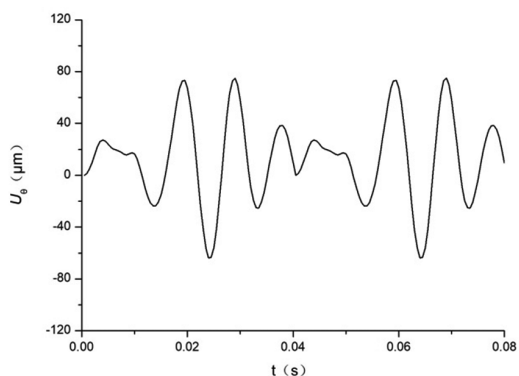


图 9 监测点 1 切向位移

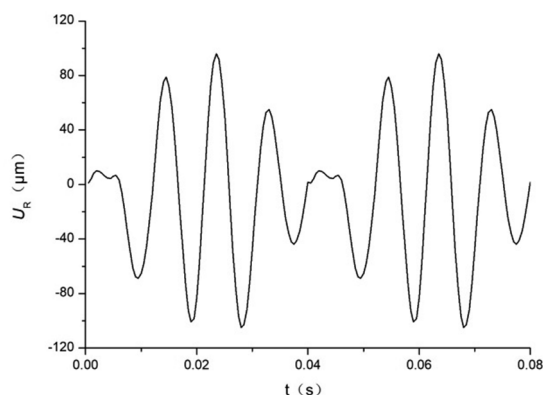


图 10 监测点 2 径向位移

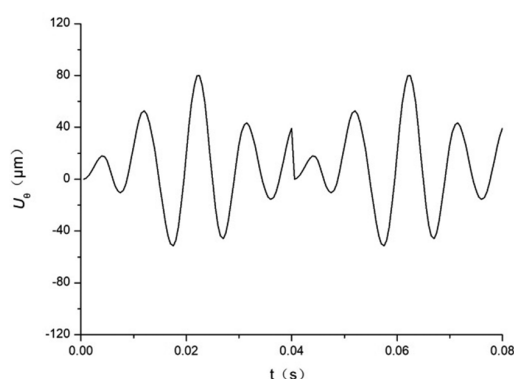


图 11 监测点 2 切向位移

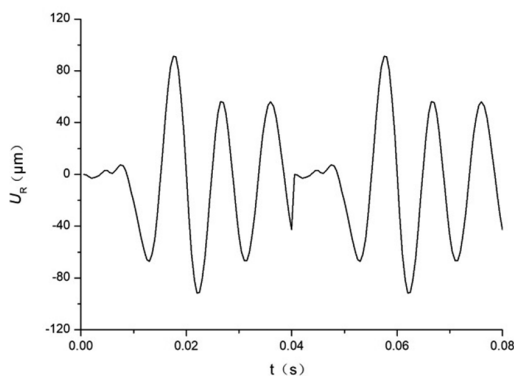


图 12 监测点 3 径向位移

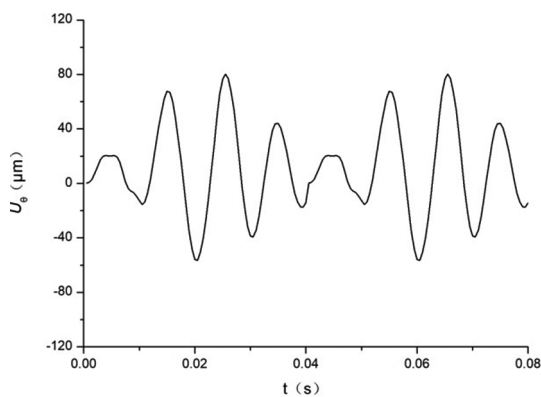


图 13 监测点 3 切向位移

3 响应试验研究

汽轮发电机中定子绕组线棒的直线段在定子槽内固定良好,即使受电磁力作用也不会产生较大振动。定子绕组端部的渐开线部分由于绑带及垫块固定,其变形也相对较小;而鼻端的约束相比渐开线部分更弱,所以鼻端的振动是整个端部最强的区域。为了便于和数值分析的结果做对比,试验的测点和数值分析的监测点位置相同,在线棒的鼻端直线段径向和切向各布置一个测点,见图14所示。

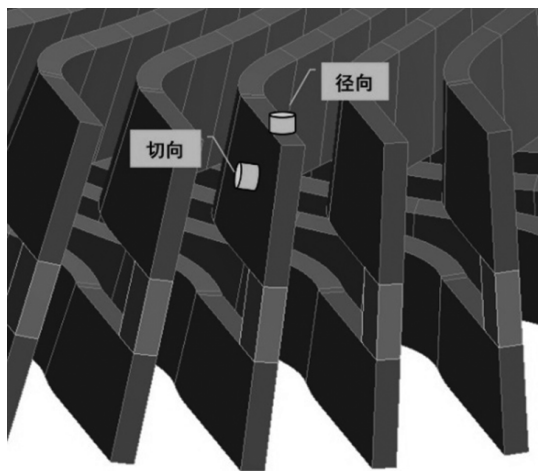


图14 传感器安装示意图

端部绕组及引线振动测试传感器类型均为光纤加速度传感器。光纤加速度传感器频响范围为20 Hz~400 Hz,灵敏度为100 mV/g。鉴于鼻端直线段的径向位移大于切向位移,因此本文只将试验数据中鼻端径向的频谱结构和数值分析结果做对比研究,见图15~20所示。

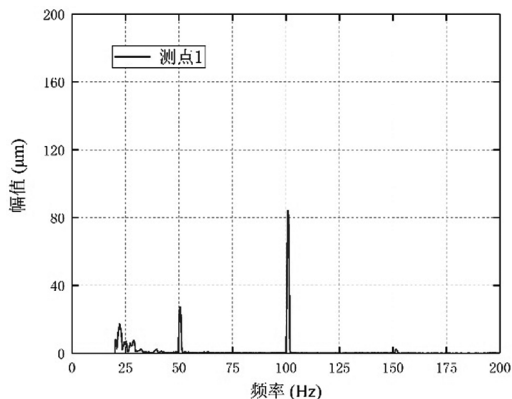


图15 测点1 径向频谱图(试验值)

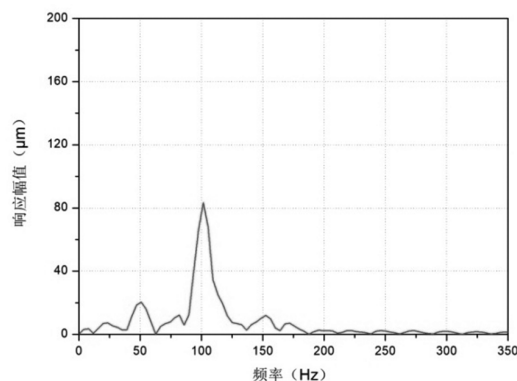


图16 测点1 径向频谱

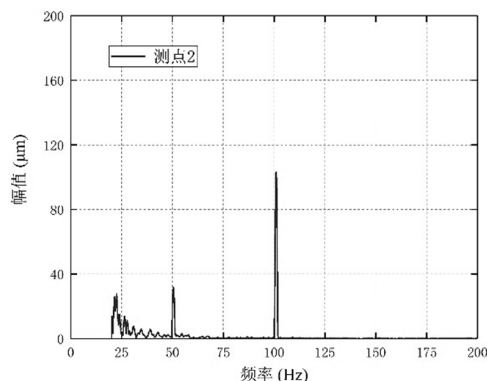


图17 测点2 径向频谱图(试验值)

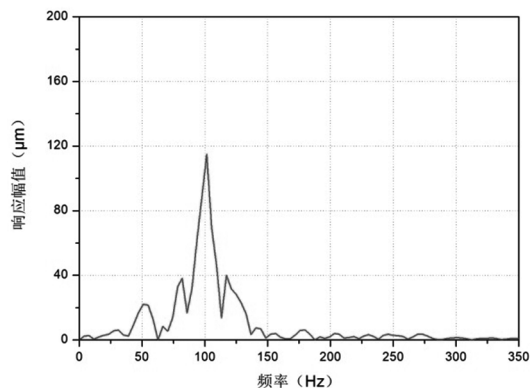


图18 测点2 径向频谱图(仿真值)

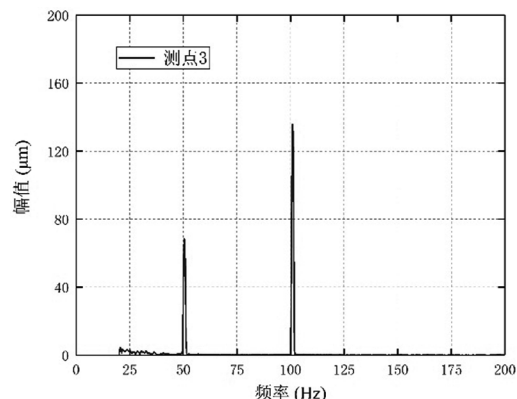


图19 测点3 径向频谱图(试验值)

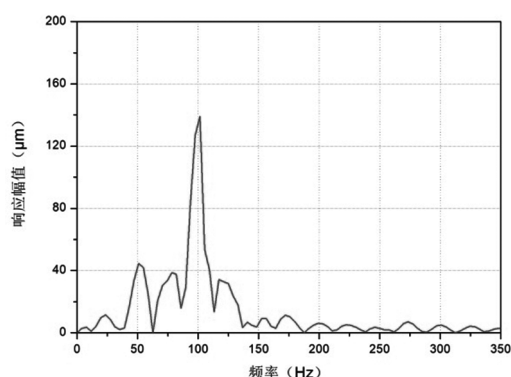


图 20 测点 3 径向频谱图(仿真值)

通过试验结果和仿真分析结果的频谱对比分析可知,端部线棒的径向响应幅值,三个监测点的试验值和仿真值吻合较好,进一步验证该项磁固耦合仿真分析方法可靠准确。

4 结语

本文以调相机定子绕组端部的汽端结构为研究对象,首先对汽端结构做电磁场分析得到电磁力密度,再由 ANSYS 中 APDL 编程语言将电磁分析结果耦合到结构分析模块上开展瞬态响应分析,最后将试验结果和仿真结果对比分析。通过分析得到以下结论:

(1)定子绕组端部在额定负载时,端部电磁力密度随时间呈两倍工频的周期性变化规律;不同位置的鼻端直线段电磁力密度变化规律一致:径向电磁力密度最大,轴向电磁力密度最小。

(2)通过汇编语言的二次开发能够解决从 JMAG 软件到 ANSYS 软件之间的磁固耦合问题。通过磁固耦合分析可知,鼻端直线段的径向位移大于切向位移,定子绕组端部主要表现为弯曲变形。

(3)瞬态动力响应的仿真结果和试验结果吻合较好,说明该项磁固耦合仿真分析方法可靠准确。为后期研究更大功率、更大容量汽轮发电机的稳定性以及定子绕组端部结构的优化设计奠定技术

基础。

参考文献:

- [1] 汪耕,王作民,邵亚声等. 汽轮发电机的振动问题(上). 振动与冲击,1999,18(4):1-5
- [2] Noah, Sherif T, Sundararajan, et al. Sundararajan. Significance of considering nonlinear effects in predicting the dynamic behaviour of rotating machinery[J]. Journal of Vibration and Control, 1995, 1: 431-458
- [3] 姚肖方. 汽轮发电机定子绕组端部受力特性分析[D]. 保定:华北电力大学,2013
- [4] 吴疆. 基于 ANSYS 的汽轮发电机定子端部绕组振动特性分析[D]. 保定:华北电力大学,2014
- [5] 叶志明,何福保,徐福娣. 大型汽轮发电机的若干力学问题[J]. 力学与实践,1992,14(6):1-7
- [6] Lin R, Arkio A N. 3D finite element analysis of magnetic forces on stator end-windings of an induction machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11):4045-4048
- [7] Lin R, Laiho A N, Haavisto A, et al. End-winding vibrations caused by steady-state magnetic forces in an induction machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(7):2665-2674
- [8] Lin R. Electromagnetic and mechanical finite element analysis of end region of large-sized three-phase squirrel-cage induction machines[D]. Finland, Greater Helsinki: Aalto University, 2010
- [9] Albanese R, Calvano F, DalMut G, et al. Electromechanical analysis of end-windings in turbogenerators[J]. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2011, 30(6):1885-1898
- [10] Albanese R, Calvano F, Dalmut G, et al. Coupled three-dimensional numerical calculation of forces and stresses on the end winding of large turbo generators via integral formulation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2):875-878
- [11] 赵洋. 大型汽轮发电机定子端部电磁力作用动态响应分析[J]. 电工技术报, 2016, 31(5):199-206
- [12] Zhao Yang, Yan Bo, Zeng Chong, et al. Optimal scheme for structural design of large turbogenerator stator end winding[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(4):1423-1432

欢迎投稿,欢迎订阅!

基于圆柱模型的一维热应力计算方法研究

陈延强 杨灵

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文将对有限长圆柱模型和无限长圆柱模型的一维热应力计算方法进行研究, 理清了无限长圆柱模型和有限长圆柱模型的假设条件的区别, 为后续转子热应力计算模型奠定基础。该文还对比了差分法和有限元法下圆柱温度和各应力分量, 并以某高压转子为实例计算了转子冷态启动下温度和热应力。结果表明自编程序计算速度快, 计算精度满足工程使用要求, 为在线监测转子热应力提供支撑。

关键词: 热应力; 有限差分法; 有限元法

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)01-0007-05

One-dimensional Thermal Stress Calculation based on Cylinder Model

CHEN Yanqiang, YANG Ling

(Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, one-dimensional thermal stress calculation methods of finite and infinite cylindrical models are studied, and the differences between the assumptions of infinite and infinite cylindrical models are clarified, which lays a foundation for subsequent thermal stress calculation models of rotors. The temperature and stress components of the cylinder are compared between the difference method and the finite element method, and the temperature and thermal stress of a high pressure rotor are calculated by taking it as an example. The results show that the self-programmed calculation speed is fast and the calculation accuracy meets the requirements of engineering application, which provides support for on-line monitoring of rotor thermal stress.

Key words: thermal stress; finite difference method; finite element method

随着电力工业的发展, 尤其是最近“碳中和”理念的提出, 大容量火电机组参与调峰运行是必然的趋势。为了保证调峰机组的安全运行, 提高机组的经济性, 有必要对转子热应力计算开展研究。

国内外对转子热应力研究较多, 黄世勇等^[1-2]采用有限元法计算了不同运行工况下转子的瞬态温度场, 然后基于间隔耦合方法计算了转子瞬态应力场; 袁建宝等^[3-5]采用基于热固耦合的有限元法计算了转子瞬态热应力; 武新华等^[6]对比了控制模型法和一维差分法在计算转子热应力时的差异; 黄柳燕^[7]采用二维差分法对转子热应力进行计算, 并

与有限元结果进行了对比。

基于圆柱的力学模型是在线计算转子热应力的一种快速便捷可靠的计算方法, 但以往对于圆柱模型的研究仅限于热应力计算方法研究, 均未涉及圆柱模型假设条件的研究。因此, 本文将对有限长圆柱力学模型和无限长圆柱力学模型的一维热应力计算方法进行研究, 对比了差分法和有限元法下圆柱温度和各应力分量, 并以某高压转子为实例计算了转子冷态启动下温度和热应力。结果表明自编程序计算速度快, 计算精度满足工程使用要求, 为在线监测转子热应力提供支撑。

收稿日期: 2024-06-20

作者简介: 陈延强(1989—), 男, 2015年毕业于大连理工大学固体力学专业, 硕士研究生, 工程师。现任职于东方汽轮机有限公司产品研发中心, 主要从事新产品研究方向转子轴承设计研发工作。

1 温度和热应力计算理论

在变工况下,当转子表面和中心存在较大温差时,热流基本上是沿径向的,此时可认为转子径向温度梯度是导致转子热应力的主要因素。计算有限长或无限长圆柱体在给定表面换热系数下的温度变化以及热应力,方法如下:设圆柱半径为 R ,径向温度梯度分布为 $f_1(r)$,蒸汽温度为 t_f ,为导热系数,为导热系数, α 为换热系数, C_p 为比热, N 为径向离散节点数, E 为弹性模量, ν 为泊松比, β 为线膨胀系数,则圆柱体导热方程^[8]为:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (\tau > 0, 0 < r < R) \quad (1)$$

$$\tau = 0, t = f_1(r) \quad (2)$$

$$r = 0, \frac{\partial t}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$r = R, -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha(t - t_f) \quad (4)$$

根据式(1)可得圆柱体内部节点的离散差分格式^[8]:

$$t'_i = \frac{F_0}{2} \left[\left(2 - \frac{\Delta r}{r_i} \right) t_{i-1} + \left(\frac{2}{F_0} - 4 \right) t_i + \left(2 + \frac{\Delta r}{r_i} \right) t_{i+1} \right] \quad (5)$$

$$\text{式中 } F_0 = \frac{\lambda}{\rho C_p (\Delta r)^2} \quad (6)$$

根据式(3)和式(4),考虑到热平衡,可得边界条件处的差分方程^[8],

$$t'_1 = (1-k)t_1 + kt_2 \quad (7)$$

$$\text{其中 } k = \left(\frac{8r_1 + 4(\Delta r)}{4r_1 + \Delta r} \right) F_0 \quad (8)$$

$$t'_N = \frac{m_1 t_{N-1} + m_2 t_f - (m_1 + m_2 - m_3) t_N}{m_3} \quad (9)$$

$$\text{其中 } m_1 = 2r_N - \Delta r \quad (10)$$

$$m_2 = 2r_N B \quad (11)$$

$$m_3 = \frac{1}{F_0} (r_N - \Delta r) \quad (12)$$

$$B = \frac{\alpha \Delta r}{\lambda} \quad (13)$$

$$\text{圆柱横截面平均温度为: } T = \frac{2}{R^2} \int_0^R t r dr \quad (14)$$

$$\text{外表面热应力: } \sigma_{\text{表面}} = \frac{E\beta}{1-\nu} (T - t) \quad (15)$$

$$\text{中心处热应力: } \sigma_{\text{中心}} = \frac{E\beta}{2(1-\nu)} (T - t) \quad (16)$$

根据以上公式可进行有限长或无限长圆柱温度和径向和切向热应力计算。

有限长圆柱模型和无限长圆柱模型的差别主要在轴向应力,无限长圆柱模型基于平面应变假设,轴向应力满足公式(17),而有限长圆柱轴向应力在无限长圆柱模型基础上放松了两端的约束,使得两端“自由”,即应用圣维南原理,使得两端轴向应力为零。

$$\sigma_z = \nu (\sigma_r + \sigma_t - \beta T_{\text{温差}}) \quad (17)$$

式中 σ_r 表示径向应力, σ_t 表示切向应力。

2 温度和热应力计算

2.1 无限长圆柱温度和热应力计算

基于无限长圆柱模型假设,分别使用差分法自编程序和有限元软件 ABAQUS 计算了圆柱温度和热应力。

算例:材料弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,换热系数为 3 500 W/(m²·℃),比热为 804 J/(kg·℃),密度为 7 760 kg/m³,导热系数为 26.4 W/(m·℃),线膨胀系数为 14×10⁻⁶ ℃⁻¹,初始温度为 150 ℃,蒸汽温度为 287 ℃,计算时间为 4 000 s。

在整个时间历程上,两种计算方法计算中心温度最大差异为 1.2 ℃(出现在第 4 000 s),结果见图 1。在整个时间历程上,表面温度最大差异为 7.3 ℃(出现在第 12 s),表面温度计算结果见图 2。图中 FEM 表示有限元法, FDM 表示有限差分法,后续图中不再赘述。

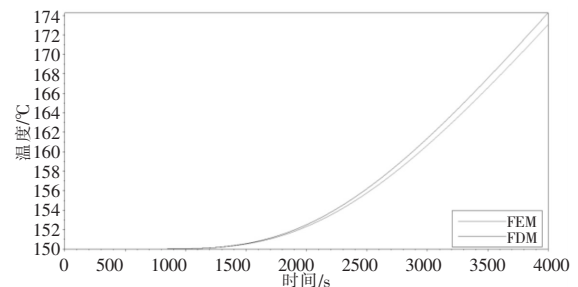


图1 转子中心温度

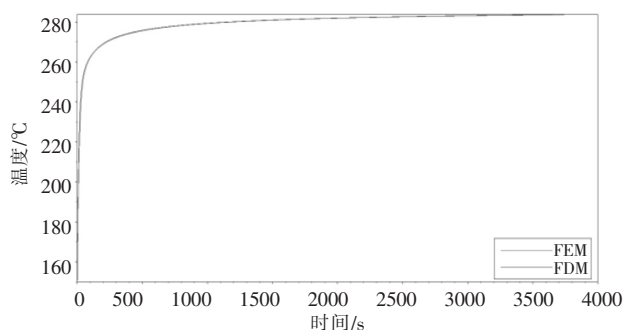


图2 转子表面温度

中心处径向、切向应力见图3。表面切向应力见图4。

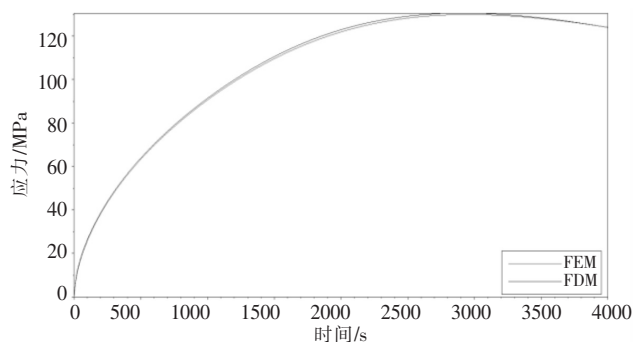


图3 中心处径向、切向应力

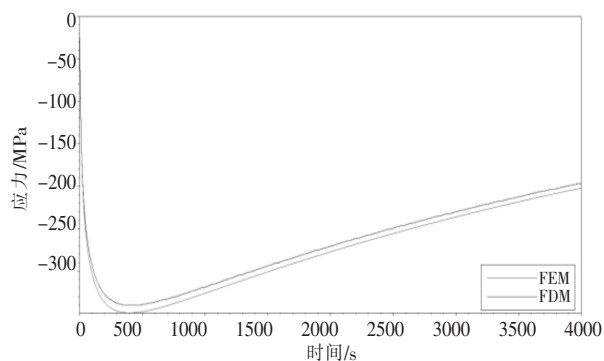


图4 表面切向应力

中心轴向应力见图5。表面轴向应力见图6。

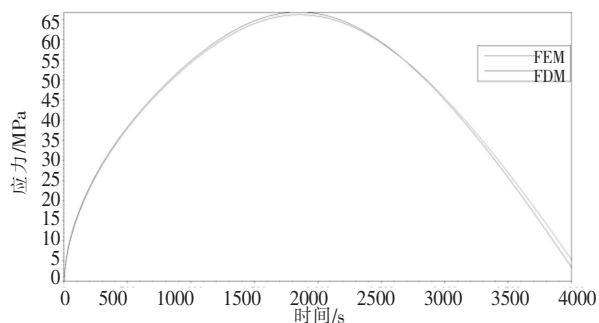


图5 中心轴向应力

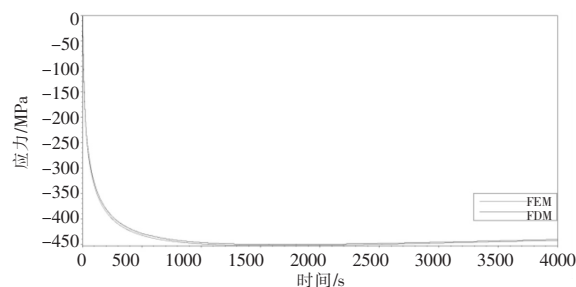


图6 表面轴向应力

2.2 有限长圆柱温度和热应力计算

基于有限长圆柱模型假设,分别使用差分法自编程序和有限元软件 ABAQUS 计算了圆柱温度和热应力。算例参数同第 2.1 部分。有限长圆柱模型和无限长圆柱模型的差别主要在轴向应力,因此温度、径向应力和切向应力的对比本部分不再赘述。

有限长圆柱中心轴向应力见图7,表面轴向应力见图8。

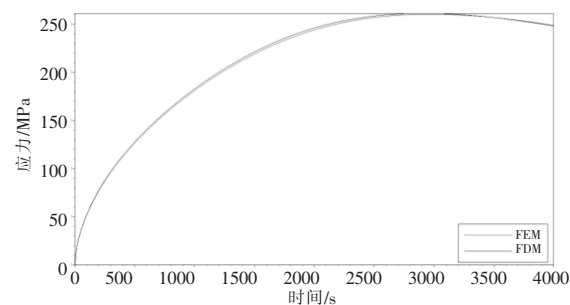


图7 中心轴向应力

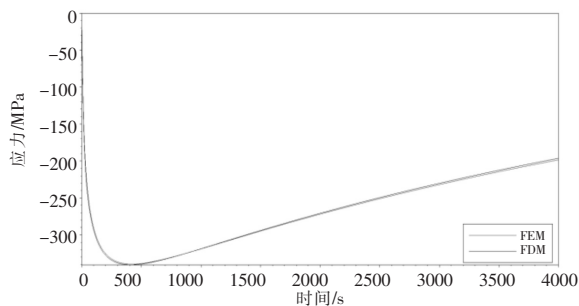


图8 表面轴向应力

2.3 结果讨论

根据 2.1 和 2.2 计算结果,考虑实际转子结构存在一定量的轴向传热,必然存在轴向应变,这与平面应变的假设是不完全相符的。其次有限长圆柱模型计算转子两端面轴向应力为零这也是和实际情况相符合的,而无限长圆柱模型算得转子两端面轴向应力不为零。总之,有限长圆柱模型考虑了轴向应变,较无限长圆柱模型更符合实际情况。

3 不同换热系数下有限长圆柱温度和热应力计算

下面使用差分法自编程序计算了不同换热系数下有限长圆柱温度和热应力。

算例:材料弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,换热系数为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \sim 4\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,比热为 $804 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,密度为 $7\,760 \text{ kg}/\text{m}^3$,导热系数为 $26.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,线膨胀系数为 $14 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,初始温度为 $150 \text{ } ^\circ\text{C}$,蒸汽温度为 $300 \text{ } ^\circ\text{C}$,计算时间为 $3\,600 \text{ s}$ 。

经计算,中心温度、表面温度与不同换热系数计算结果见图 9 和图 10。

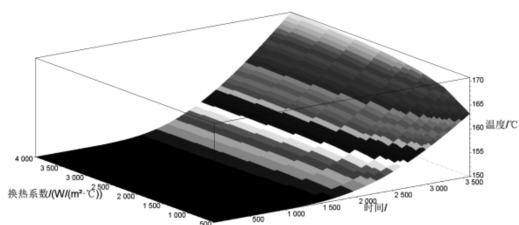


图 9 中心温度

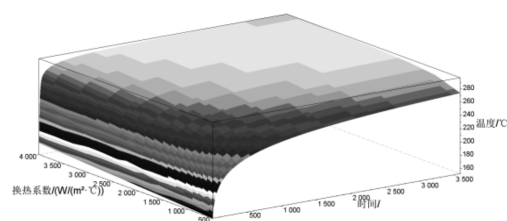


图 10 表面温度

中心径向、切向应力与不同换热系数计算结果见图 11,表面切向、轴向应力与不同换热系数计算结果见图 12。

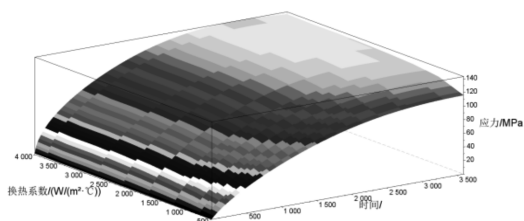


图 11 中心径向、切向应力

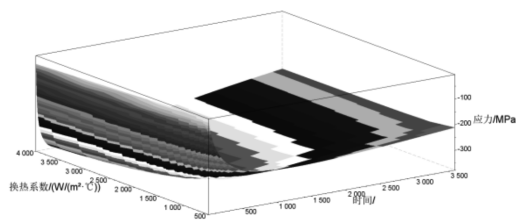


图 12 表面切向、轴向应力

表面切向、轴向应力与不同换热系数和平均温差计算结果见图 13。

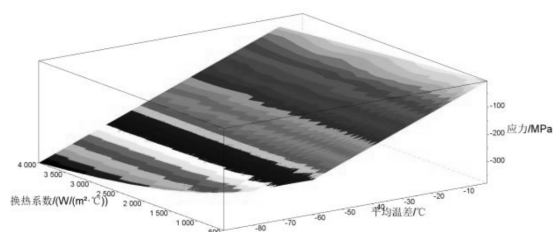


图 13 表面切向、轴向应力与不同换热系数和平均温差
圆柱切向应力公式如下

$$\sigma_{\theta} = \frac{E\beta}{(1-\vartheta)r^2} \left(\frac{r^2}{R^2} \int_0^R T r dr + \int_0^r T r dr - T r^2 \right) \quad (18)$$

当 $r=R$ 时,公式(17)则变成:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_z = \frac{E\beta}{(1-\vartheta)} (T_{\text{平均}} - T_{\text{表面}}) \quad (19)$$

由公式(19)可知,在表面温度与平均温差一定时,表面切向应力相同,该现象可从图 13 中看出(图中应力相同颜色相同)。

4 某项目高压转子冷态启动热应力计算

下面使用有限元软件 ABAQUS 和差分法自编程序计算了某项目高压转子温度和热应力。初始温度为 $150 \text{ } ^\circ\text{C}$,冷态启动时长为 $16\,200 \text{ s}$ 。蒸汽温度和换热系数见图 14 和图 15。

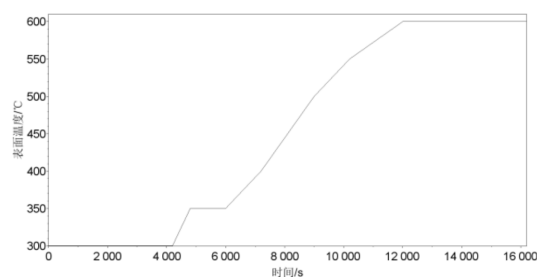


图 14 冷态启动蒸汽温度

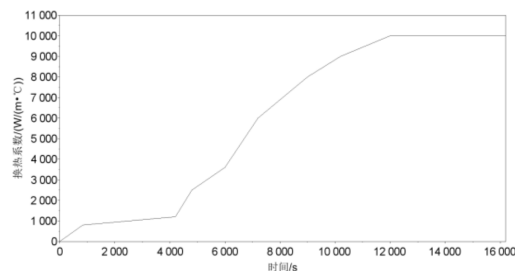


图 15 冷态启动换热系数

经计算,中心温度、表面温度计算结果见图 16

和图 17。

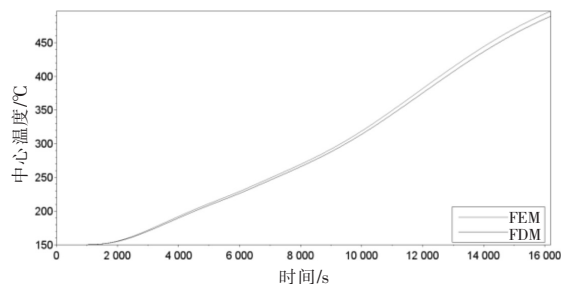


图 16 中心温度

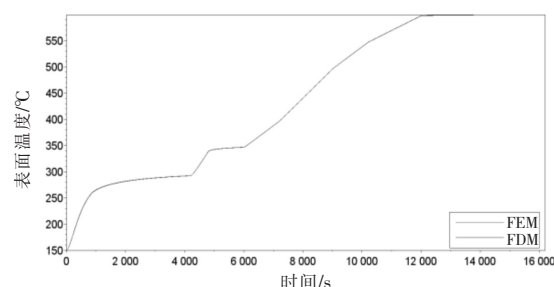


图 17 表面温度

经计算,中心 MISES 应力、表面 MISES 应力计算结果见图 18 和图 19。

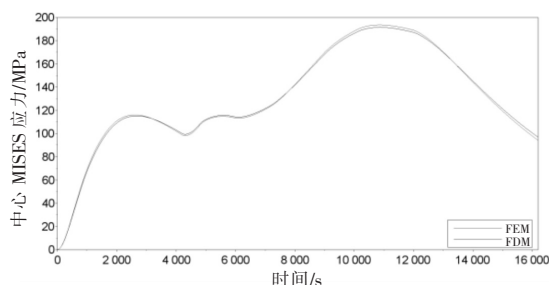


图 18 中心 MISES 应力

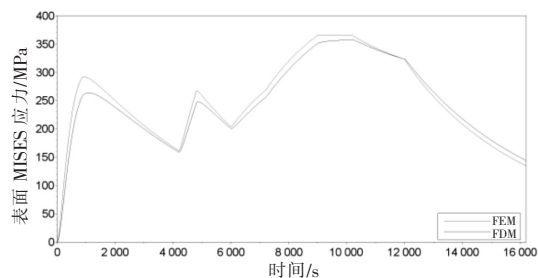


图 19 表面 MISES 应力

在整个时间历程上,两种计算方法计算中心温度最大差异为 7.6 °C (出现在第 16 200 s);两种方法计算表面温度极小,见图 17。

在整个时间历程上,两种计算方法计算中心最

大 MISES 应力差异为 2.0 MPa;两种方法计算表面最大 MISES 应力差异为 7.8 MPa。

5 结语

本文对有限长圆柱模型和无限长圆柱模型的一维热应力计算方法进行研究,分析结果表明:

(1)理清了无限长圆柱模型和有限长圆柱模型的假设条件的区别,为后续转子热应力计算模型奠定基础。

(2)分别使用差分法自编程序和有限元软件计算圆柱温度和各应力分量,结果显示自编程序解非常接近有限元解,不同换热系数下温度和热应力的结果与预期符合,计算精度满足工程使用要求,并以某高压转子为实例计算了转子冷态启动下温度和热应力。结果表明自编程序求解速度远快于有限元软件,将为在线监测转子热应力提供支撑。

参考文献:

- [1] 黄世勇. 汽轮机转子热应力及寿命分析[D]. 哈尔滨工业大学,2007
- [2] 刘平. 某大型发电汽轮机转子热应力数值研究[J]. 计算机辅助工程,2006(S1):344-348
- [3] 袁建宝,徐自力,李溶江,等. 基于热固双向耦合模型的二次再热超临界汽轮机超高压转子热应力研究[J]. 东方汽轮机,2016(1):15-19
- [4] Patil D, Rao D K, Roy T. Coupled Thermo-Mechanical Transient Stress Analysis of Functionally Graded Gas Turbine Rotor[C]// ASME 2015 Gas Turbine India Conference. American Society of Mechanical Engineers,2015
- [5] Rzdakowski R, Lampart P, Kwapisz L, et al. Transient Thermodynamic, Thermal and Structure Analysis of a Steam Turbine During Its Start-Up[C]// Asme Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air,2010
- [6] 武新华,宋春汀,张新江,等. 汽轮机转子热应力简化计算公式的选取[J]. 汽轮机技术,2000(1):20-23
- [7] 黄柳燕,荆建平,孟光. 采用平均温度计算汽轮机转子热应力的二维差分法[J]. 汽轮机技术,2014(5):332-334
- [8] 中国动力工程学会. 火力发电设备技术手册 第二卷[M]. 机械工业出版社,1999
- [9] 铁木辛柯. 弹性理论[M]. 高等教育出版社,2013

联合循环机组碳排放因子计算及 变工况特性分析

宋映波 彭益* 胥波

东方电气股份有限公司, 成都 611731

摘要: 为掌握联合循环机组碳排放因子变工况特性, 本文以当前国内装机量最大的 M701F4 型燃气轮机为研究对象, 基于某项目实际运行条件及理论计算, 对各负荷段, 以及常规范围内不同环境温度、大气压力、湿度、燃料特性等输入条件下的二氧化碳总排放量以及单循环、联合循环碳排放因子进行定量分析, 可为联合循环电厂低碳运行提供指导, 为电厂参与碳排放权交易市场以及联合循环机组减碳技术开发提供支撑。

关键词: 燃气轮机; 燃气-蒸汽联合循环; 二氧化碳排放因子; 变工况分析

中图分类号: X7773; TM73

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)01-0012-06

Carbon Dioxide Emission Factor Calculation and Off-design Conditions Analysis of Gas Turbine Combine Cycle

SONG Yingbo, PENG Yi*, XU Bo

(Dongfang Electric Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: To understand the off-design characteristics of the carbon emission factor of combined cycle units, this paper takes the M701F4 gas turbine, which has the largest installed capacity in China, as the research object. Based on the actual operating conditions and theoretical calculations of a certain project, this paper conducts a quantitative analysis of the total carbon dioxide emissions and single-cycle and combined-cycle carbon emission factors under various load sections and input conditions such as different ambient temperatures, atmospheric pressures, humidity, and fuel characteristics within the conventional range. This can provide guidance for the low-carbon operation of combined cycle power plants, and support for power plants to participate in the carbon emission trading market and the development of carbon reduction technologies for combined cycle units.

Key words: gas turbine; gas turbine combine cycle; carbon dioxide emission factor; off-design condition analysis

1 我国碳排放现状

2023 年, 全球共产生碳排放约 374 亿吨, 其中中国约 126 亿吨, 占全球 33.7%。中国年人均碳排放量 8.9 吨, 已超过欧日等发达经济体, 低于美国年人均 13.3 吨(图 1~2)。^[1]

“将力争 2030 年前达到二氧化碳排放峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。”整体实现“碳达峰, 碳中和”是我国一项长期重要任务。中国电力行业碳排放占比约总碳排放的 48%^[2], 约 60.5 亿吨, 是实现“碳达峰, 碳中和”的主战场之一。

收稿日期: 2024-08-22

作者简介: 宋映波 (1990—), 男, 2013 年毕业于哈尔滨工程大学热能与动力工程专业, 本科, 工程师。先后从事燃气轮机设计、燃气轮机技术管理工作。现在东方电气股份有限公司产业发展部主要从事产业管理工作。

彭益 (1984—), 男, 2007 年毕业于四川大学热能与动力工程专业, 本科, 工程师。先后从事核电站核岛系统调试, 气电、煤电项目管理等工作。现在东方电气股份有限公司产业发展部主要从事项目管理工作。邮箱: pengyi@dongfang.com

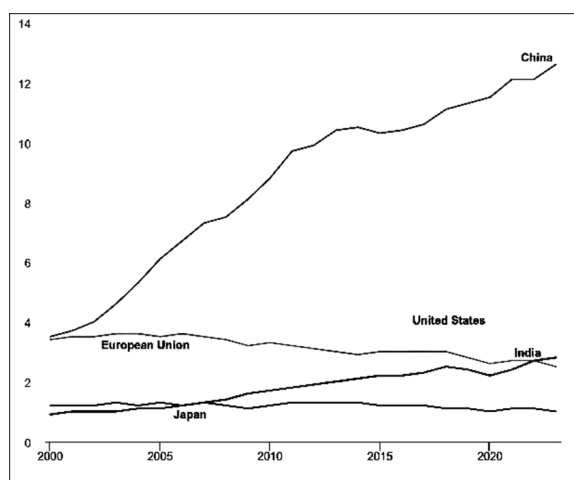


图1 2000~2023年各国(地区)二氧化碳总排放量

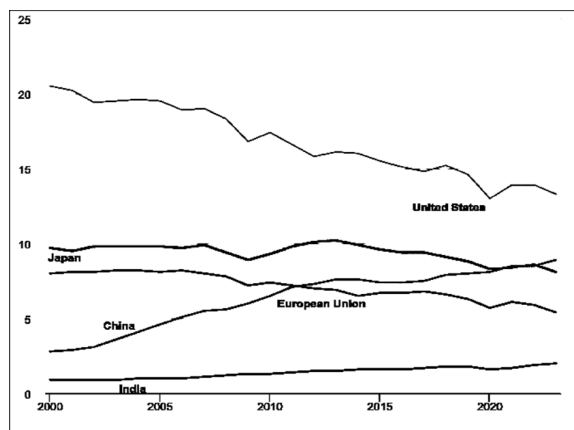


图2 2000~2023年各国(地区)人均二氧化碳排放量

构建安全高效、清洁低碳、柔性灵活、智慧融合的新型电力系统是实现“双碳”目标的关键载体。

2 燃气轮机在新型电力系统中的作用

现有技术水平下,先进等级燃气轮机联合循环效率可达64%,可靠性大于99.5%,在单循环运行模式下可在0%~100%负荷稳定运行,燃气轮机启动时间约20分钟,升降负荷率50 MW/min。具备较高的效率、可靠性及灵活性。

在“碳达峰·碳中和”目标下,我国风、光等可再生能源装机迅速增长,电力系统需要稳定的调峰支撑电源以保证系统安全。灵活、可靠、高效的气电有望成为主要的调峰电源。

目前,国内燃气轮机主要以天然气为燃料,将不可避免的产生碳排放,研究分析不同工况下燃气轮机二氧化碳排放强度对支撑我国气电产业未来发展具有重要的意义。

3 现有发电行业碳排放强度核算方法

目前电力行业广泛使用的二氧化碳计算方法为碳排放因子法,也是IPCC(政府间气候变化专门委员会)推荐的温室气体排放计算方法。即把有关人类活动发生程度的信息(称为“活动数据”; Activity Data, AD)与量化单位活动的排放量或清除量系数(即排放因子; Emission Factor, EF)结合起来,简单用公式表示为: $E = AD \times EF$ 。具体到电力行业即为单位兆瓦时发电量所产生的二氧化碳排放。

我国于2013年首次发布了《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》,并于2022年12月发布了《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》。^[3]但针对燃气轮机碳排放核算未有单独的规定。

2021年全国电力二氧化碳排放因子为556.8 kg/MWh,化石能源电力二氧化碳排放因子为842.6 kg/MWh。^[4]较发达经济体有较大差距,2022年,美国电力部门二氧化碳排放因子为390 kg/MWh^[5],2021年欧盟电力部门二氧化碳排放因子为237 kg/MWh。^[6]

4 燃气轮机碳排放计算模型

出于排放控制的目的,现代燃气轮机燃烧器不再是仅采用扩散燃烧,而多采用扩散加预混的形式,并且会在高负荷段切换预混为主或全预混燃烧,以控制NO_x排放。

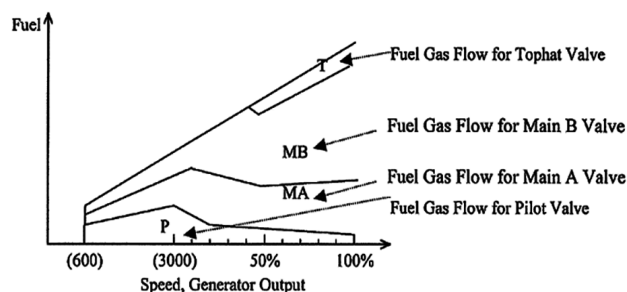


图3 M701F4型燃气轮机燃料流量控制策略

以三菱重工M701F4燃气轮机为例,其燃烧器喷嘴流量控制策略如下,其中除P(Pilot)喷嘴为扩散燃烧外,其余为预混燃烧。

根据相关研究^[7],燃烧器主燃区按不同燃空比,可能发生化学反应方程式如下:

$$\begin{aligned} & C_xH_y + \frac{n_a}{n_f} (O_2 + 3.76N_2) \rightarrow \begin{cases} (1 - \frac{4}{2x+y} \frac{n_a}{n_f}) C_xH_y + 3.76 \frac{n_a}{n_f} N_2 + \frac{2y}{2x+y} \frac{n_a}{n_f} H_2O + \frac{4x}{2x+y} \frac{n_a}{n_f} CO & 0 < \frac{n_a}{n_f} \leq \frac{x+y}{2+4} \\ \frac{y}{2} H_2O + 3.76 \frac{n_a}{n_f} N_2 + (2x + \frac{y}{2} - 2 \frac{n_a}{n_f}) CO + (2 \frac{n_a}{n_f} - x - \frac{y}{2}) CO_2 & \frac{x+y}{2+4} < \frac{n_a}{n_f} < x + \frac{y}{4} \\ x CO_2 + \frac{y}{4} H_2O + 3.76 \frac{n_a}{n_f} N_2 + (\frac{n_a}{n_f} - x - \frac{y}{4}) O_2 & \frac{n_a}{n_f} \geq x + \frac{y}{4} \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

式(1)中, n 为摩尔量(n_a 为空气摩尔数, n_f 为燃气摩尔数)

燃烧器变工况效率与燃烧器进气流量, 进气温度以及进气压力相关, 燃烧器变工况效率可由下式计算:

$$\eta_B = \sum_{i=0}^5 a_i \cdot Load^i \quad (2)$$

式(2)中, η_B 为燃烧器效率, $Load$ 为燃烧器负荷因数, a_j 的取值见下表:

表 1 燃烧器效率变工况计算系数

系数	值
a_0	9.97×10^{-1}
a_1	$-4.568\ 246 \times 10^{-5}$
a_2	$3.000\ 07 \times 10^{-6}$
a_3	$-8.737\ 18 \times 10^{-8}$
a_4	$3.979\ 23 \times 10^{-10}$
a_5	$-5.469\ 7 \times 10^{-13}$

燃烧器负荷因素 $Load$ 定义如下:

$$Load = \frac{m_{a,2}}{V_B p_2^{1.8} 10^{0.00145(T_2-400)}} \quad (3)$$

式(3)中, $m_{a,2}$ 为燃烧器进口质量流量, V_B 为燃烧器容积, T_2 为燃烧器入口温度, p_2 为燃烧器入口压力。

5 碳排放因子计算及变工况分析

基于上述模型, 可对燃气轮机不同工况下碳排放量进行模拟计算。以燃气轮机 ISO 工况为基准工况(15℃、101.325 kPa、60%相对湿度), 选取负荷, 环境温度、湿度、压力, 以及燃料碳氢比等相关影响因素进行单变量分析, 得出其对二氧化碳排放量、二氧化碳排放因子的影响。

本文选取目前我国国内装机最大的三菱重工 M701F4 型燃气轮机为研究对象。该型燃气轮机 ISO 工况主要参数如表 2:

表 2 M701F4 型燃气轮机性能指标

型号/单位	M701F4
生产厂商	三菱重工-东方电气
单循环发电出力(MW)	318
单循环发电效率(%)	39.90
联合循环发电出力(MW)	474
联合循环发电效率(%)	59.43
排气温度(℃)	597
排气量(t/h)	~2 600

基准设计燃料如下:

表 3 设计燃料组分

类别	组份(Mol %)
C1	96.226
C2	1.77
C3	0.3
IC4	0.062
NC4	0.075
IC5	0.02
NC5	0.016
C6	0.051
C7	0.038
CO ₂	0.473
N ₂	0.967
H ₂ S	0.002

5.1 负荷率对二氧化碳排放因子的影响

计算 ISO 工况 M701F4 燃气轮机不同负荷段, 单循环及联合循环不同负荷情况下碳排放量、二氧化碳排放因子(kg/MWh)变化情况如图 4、图 5、图 6 所示:

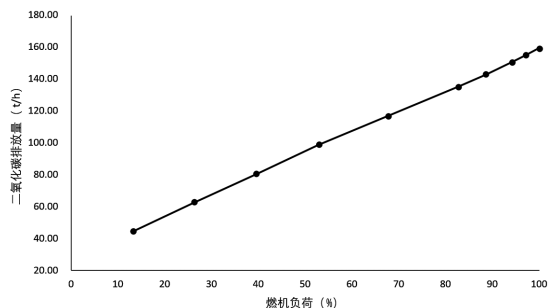


图 4 不同燃机负荷下对应碳排放量

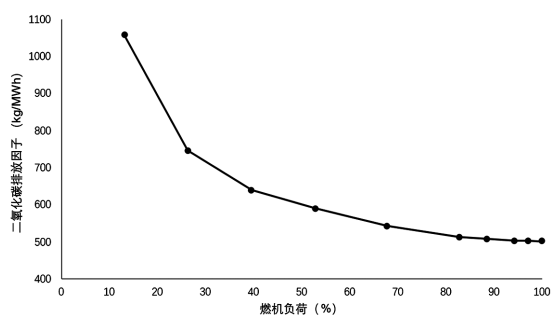


图5 ISO 工况单循环二氧化碳排放因子

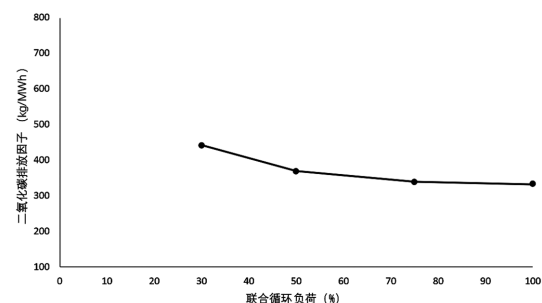


图6 ISO 工况联合循环二氧化碳排放因子

图4为不同负荷下燃气轮机总碳排放量,其与燃机负荷大致成线性关系,ISO 工况满负荷碳排放量约 159 t/h,负荷每降低 1 %,二氧化碳排放量增加约 1.36 t/h。

图5为ISO 工况单循环二氧化碳排放因子,单循环满负荷条件下,燃气轮机二氧化碳排放因子约 501 kg/MWh,低于 30 %负荷后排放因子增长较快。

图6为ISO 工况联合循环二氧化碳排放因子,机组满负荷运行约为 335 kg/MWh,变化趋势与单循环基本一致,数值较单循环低约 33.3 %。

5.2 进气温度对二氧化碳排放因子的影响

燃气轮机进气参数对其出力、效率等均有较大影响,计算不同进气温度下,单循环及联合循环不同负荷情况下碳排放量、二氧化碳排放因子 (kg/MWh) 变化情况如图7、图8、图9所示:

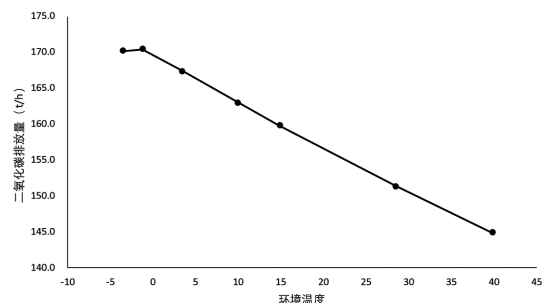


图7 不同进气温度下对应碳排放量

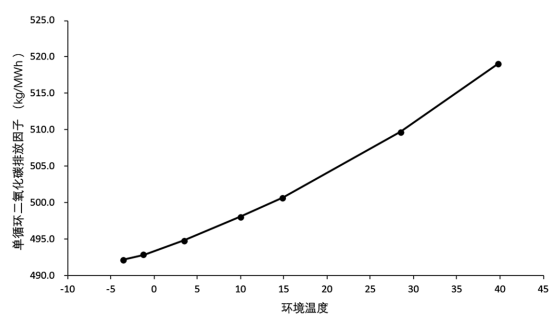


图8 不同进气温度下单循环二氧化碳排放因子

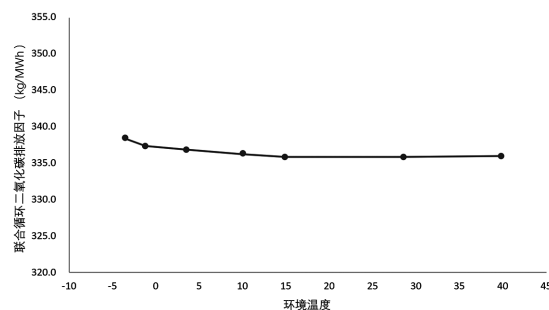


图9 不同进气温度下联合循环二氧化碳排放因子

图7为不同进气温度下燃气轮机总碳排放曲线。进气温度越低,燃机出力越大,相应的碳排放量也越大,平均每降低 1 摄氏度,总碳排放量增加 0.63 t/h。图中拐点为机组到达最大出力限制,出力不再随气温降低而增加。

图8为不同进气温度下单循环单位发电量碳排放曲线。环境气温每降低增加 1 ℃,碳排放量增加 0.4~0.8 kg/MWh。

图9为不同进气温度下联合循环单位发电量碳排放曲线。随环境温度降低,燃机排气量(质量)增加,联合循环汽轮机出力增加,二氧化碳排放因子总体基本保持不变。

5.3 进气压力对二氧化碳排放因子的影响

计算不同大气压力下,单循环及联合循环不同负荷情况下碳排放量、二氧化碳排放因子 (kg/MWh) 变化情况如图10、图11、图12所示:

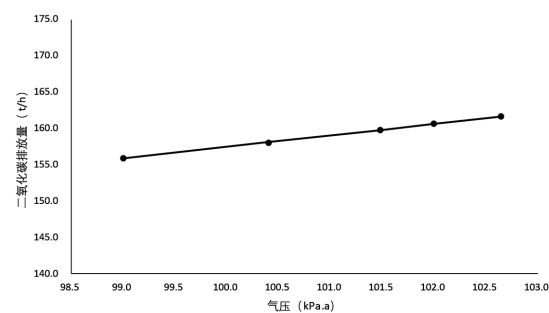


图10 不同气压对应碳排放量

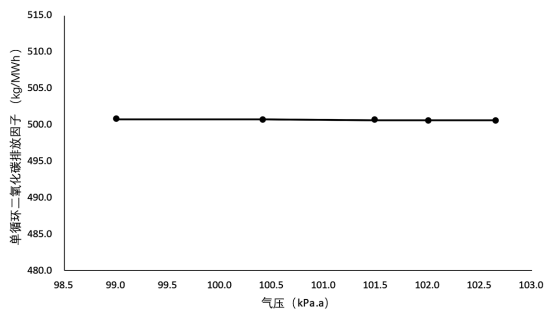


图 11 不同气压下单循环二氧化碳排放因子

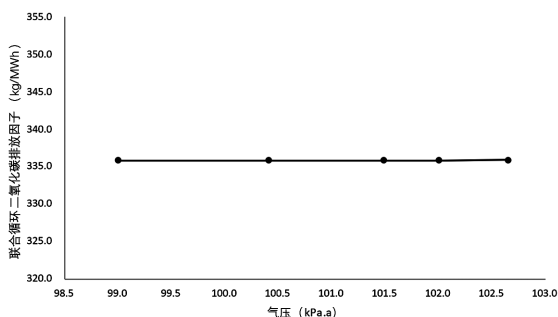


图 12 不同气压下联合循环二氧化碳排放因子

可知,进气压力对燃气轮机总碳排放量影响较小,气压每降低 1 kPa,总碳排放增加 1.58 t/h。进气压力对单循环二氧化碳排放因子、联合循环二氧化碳排放因子影响可忽略不计。

5.4 进气湿度对二氧化碳排放因子的影响

计算不同相对湿度下,单循环及联合循环不同负荷情况下碳排放量、二氧化碳排放因子 (kg/MWh) 变化情况如图 13、图 14、图 15 所示:

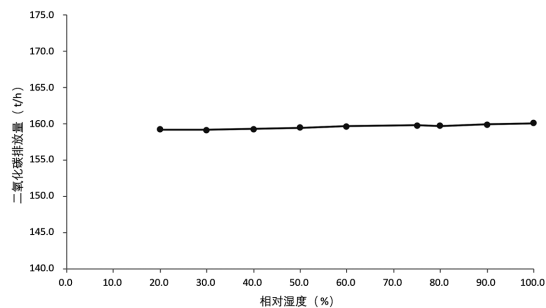


图 13 不同相对湿度对应碳排放量

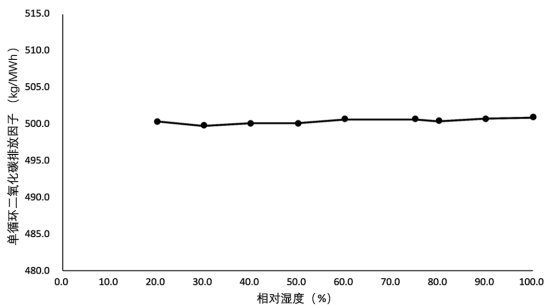


图 14 不同相对湿度下单循环二氧化碳排放因子

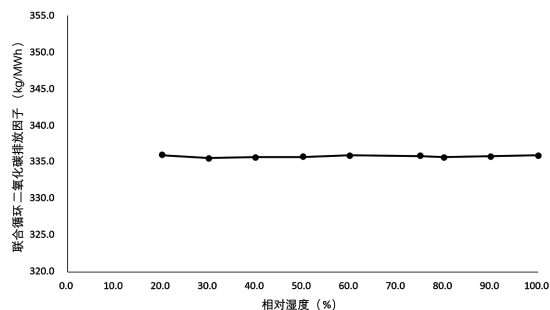


图 15 不同相对湿度下联合循环二氧化碳排放因子

大气湿度对燃气轮机总碳排放量、单循环二氧化碳排放因子、联合循环二氧化碳排放因子影响均较小,可忽略不计。

5.5 燃料碳氢比对二氧化碳排放因子的影响

国内重型燃气轮机电厂以天然气单燃料运行为主,氢碳比是反映天然气化学组成的重要参数。计算不同碳氢比下,单循环及联合循环不同负荷情况下碳排放量、二氧化碳排放因子 (kg/MWh) 变化情况如图 16、图 17、图 18 所示:

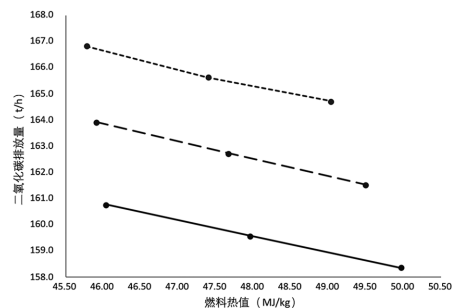


图 16 不同燃料碳氢比、热值对应碳排放量

图 16 反映不同燃料碳氢比、热值对应碳排放总量影响。相同碳氢比下,热值每降低 1 MJ/kg,二氧化碳碳排放总量平均增加 0.64 t/h;相同热值下,碳氢比每降低 0.15,二氧化碳碳排放总量平均增加 3.0 t/h。

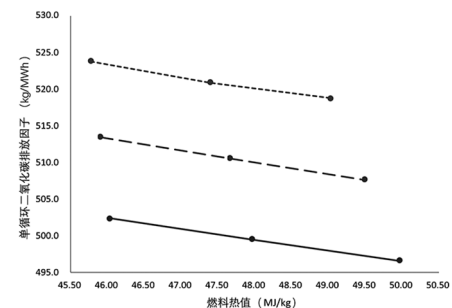


图 17 不同燃料碳氢比、热值下单循环二氧化碳排放因子

图 17 反映不同燃料碳氢比、热值对单循环二氧化碳排放因子的影响。相同碳氢比下,热值每降低 1 MJ/kg,二氧化碳排放因子平均增加 1.54 kg/MWh;

相同热值下,碳氢比每降低 0.15,二氧化碳排放因子平均增加 10.8 kg/MWh。

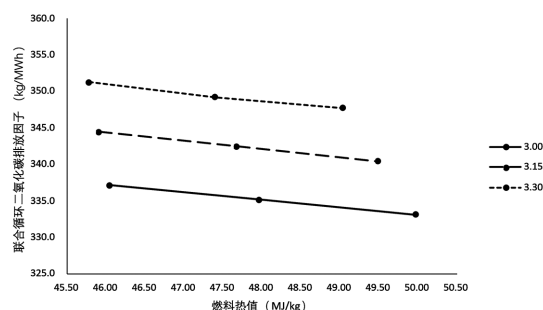


图 18 不同燃料碳氢比、热值下联合循环二氧化碳排放因子

图 18 反映不同燃料碳氢比、热值对联合循环二氧化碳排放因子的影响。相同碳氢比下,热值每降低 1 MJ/kg,二氧化碳排放因子平均增加 1.08 kg/MWh;相同热值下,碳氢比每降低 0.15,二氧化碳排放因子平均增加 7.10 kg/MWh。

6 结语

(1) M701F4 型燃气轮机单循环一般二氧化碳排放因子约为 501 kg/MWh,联合循环约为 335 kg/MWh,低于 2021 年化石能源电力二氧化碳排放因子 842.6 kg/MWh,及同年度全国电力二氧化碳排放因子 556.8 kg/MWh。提高燃气轮机及燃气-蒸汽联合循环发电设施占比,对减低我国电力二氧化碳排放因子具有积极意义。

(2) 50 %以上负荷段,联合循环碳排放因子随负荷降低增加较少,在此负荷段可充分发挥联合循环机组调峰作用而不用过多考虑机组碳排放因子的增加。

(3) 机组进气温度对单循环机组碳排放因子有

较大影响,设置进气冷却装置可一定程度降低单循环机组碳排放因子,但对联合循环影响较小。

(4) 进气压力及进气湿度对单循环及联合循环碳排放因子影响都较小,可忽略不计。

(5) 提升燃料单位质量热值,以及降低燃料碳氢比可有效降低机组碳排放因子,而使用掺氢燃料可同时满足上述两点,是未来进一步降低燃气轮机碳排放的重要研究方向。

参考文献:

- [1] IEA. CO₂ Emissions in 2023 [R]. (2024-3) [2024-7-11]. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
- [2] IEA. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China [R]. (2021-9) [2024-8-16] <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>
- [3] 吴昊,任鑫,朱俊杰. 发电行业二氧化碳排放监测技术现状与综述[J]. 热力发电,2023,52(7):1-13
- [4] 生态环境部,国家统计局. 关于发布 2021 年电力二氧化碳排放因子的公告 [R]. (2024-04-12) [2024-8-16]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk01/202404/t20240412_1070565.html
- [5] U. S. Energy Information Administration. How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of U. S. electricity generation? [R]. (2023-12-7) [2024-8-22]. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>
- [6] European Environment Agency. Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe [R]. (2024-6-14) [2024-8-22]. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>
- [7] Zhang Y, Liu P, Li Z. Gas turbine off-design behavior modelling and operation windows analysis under different ambient conditions [J]. ENERGY,2023,262(PartA).

集团要闻

“东波一号”成功下水

2025 年 1 月 4 日报道,东福研究院自主研发的新型振荡水柱式波浪能发电装置“东波一号”已于 2025 年元旦前夕成功下水,研发团队跨年连续作战,正在海试现场开展装置在真实海况下的运行联调,以确保“东波一号”尽快投入试验运行。

来源:东方电气公众号

大型核电汽轮机组高中压模块降负荷冷却过程安全性分析

章艳 段增辉 陈贝贝 刘伟鹏 杨世香

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳, 618000

摘要: 大型核电汽轮机组高中压合缸结构具有热容量大, 停机后冷却较慢的特点。文章介绍了一种加快高中压缸停机冷却速度的降负荷冷却方案。结合电厂实际运行数据对整个高中压模块在降负荷冷却过程中温度、应力及间隙变化进行了详细的定量分析。在保证机组安全性的前提下, 加快机组的冷却, 缩短检修停机时间, 有非常迫切的现实意义与经济价值。

关键词: 核电汽轮机; 降负荷; 快速冷却; 安全性

中图分类号: TM623

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)01-0018-04

Safety Analysis of Load Reduction Cooling for Large Nuclear Power Turbine HIP Structure

ZHANG Yan, DUAN Zenghui, CHEN Beibei, LIU Weipeng, YANG Shixiang

(Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: The HIP combined cylinder structure of large nuclear power turbine units has the characteristics of large thermal capacity and slow cooling after shutdown. The article introduces various load reduction cooling schemes for HIP cylinder. A detailed quantitative analysis was conducted on the temperature, stress, and gap changes of the entire HIP module during the load reduction cooling process based on actual operating data of the power plant. Accelerating the cooling of the unit and shortening maintenance downtime while ensuring its safety has urgent practical significance and economic value.

Key words: nuclear turbine; reduce load; rapid cooling; security

国内某大型核电汽轮机其高中压合缸结构是该机型的显著特点, 也是其高效性的体现。高中压合缸机组的单向流量大, 汽缸的个头大, 热容量大, 停机后冷却较慢, 相较于低压缸薄壁结构为机组冷却主要难点。要达到开缸的温度要求, 需要较长时间。这就延长了机组的大修时间, 降低了机组的可用率。因此在确保高中压模块结构安全性前提下, 采取适当的停机优化措施, 加快机组高中压缸的冷却, 缩短检修停机时间, 具有非常大现实意义与经济价值。

1 高中压模块结构简介

大型核电高中压缸模块三维结构如图 1 所示。该高中压缸模块主要包括: 高中压缸、中压排汽缸、转子及其动叶、隔板及其静叶、高压端轴封、中压端轴封以及高中压间过桥汽封等结构。高中压汽缸为单层缸结构, 整体结构尺寸约为长 10.2 m×宽 6.4 m×高 6.9 m。在水平中分面处分为上下半, 采用螺栓连接; 高中压缸和中压排汽缸采用螺栓沿机组轴向连接; 高压缸为上下半汽缸各 2 个进汽口, 中压缸上半为 2 个垂直进汽口, 其下半为 2 个水平进汽口; 整个高中压缸采用上猫爪支撑方式; 高中压转子为

收稿日期: 2024-08-05

作者简介: 章艳(1983—), 女, 高级工程师, 2006年毕业于哈尔滨工程大学, 现就职于东方汽轮机有限公司, 从事汽轮机产品设计研究工作。

分段焊接结构。

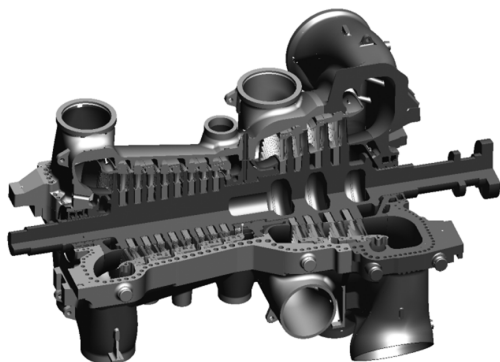


图1 核电高中压模块三维模型

2 机组停机过程简介

核电高中压气缸其部分壁温测点位置示意如图2所示。

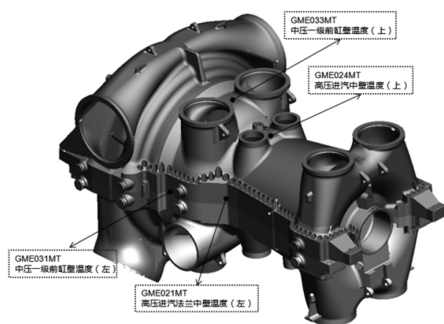


图2 温度测点位置示意图

某核电机组停机过程中,高压进汽中壁温度(上)、中压一级前缸壁温度(上)2个位置测点温度随功率及转速变化曲线如图3所示。从曲线可以看出,停机盘车后,高压进汽中壁温度由164℃自然冷却至120℃约为90h,平均温降率约为0.45℃/h;而这之前的降负荷过程约为6h,该过程中,高压进汽中壁以及中压一级前缸壁温度均下降较快,温降率约为12~17℃/h。

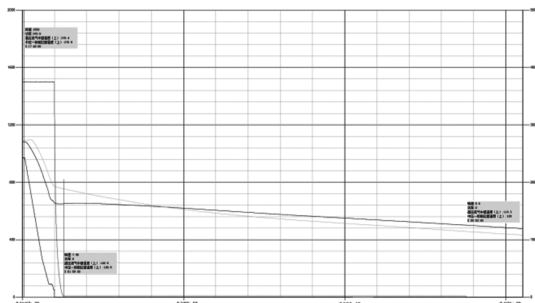


图3 某机组停机高中压缸温度变化实测曲线

同型号核电机组停机过程高压、中压进气缸壁温度随时间变化实测曲线如图4所示:从图中可以看出在降负荷过程末段低负荷时刻高压进气缸壁温度约为170℃,中压进气缸壁温度约为196℃,维持该低负荷3h左右,再降转速盘车,此时高压进气缸壁温度约为151℃,中压进气缸壁温度约为142℃。即该低负荷冷却过程高压进气缸壁平均温降率为5.4℃/h,中压进气缸壁平均温降率为15.4℃/h。通过该降负荷冷却过程,使得机组停机盘车时高中压缸初始温度降低,后续自然冷却时长得以缩短。

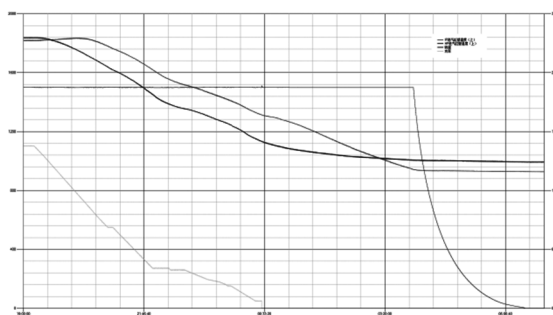


图4 某机组降负荷冷却过程温度实测曲线

综合上述两次停机过程高中压缸实测温度数据来看,机组停机过程中:

- (1) 停机盘车后,高中压缸自然冷却温降率低,耗时长。
- (2) 高中压缸降负荷过程温降率较大,采取优化降负荷冷却过程,可降低自然冷却初始缸温,进而缩短自然冷却时长。

3 降负荷冷却安全性分析

为了分析降负荷冷却过程对高中压模块结构安全性影响,选取包括高中压缸、中压排汽缸、转子及其动叶、隔板及其静叶、高压端轴封、中压端轴封以及高中压间过桥汽封在内的整个高中压缸模块为分析对象。

3.1 降负荷冷却过程温度场分析

在低负荷冷却过程中,对流换热主要包括:

- ① 汽缸外壁通过保温层与大气进行自然对流换热;
- ② 汽缸内壁、转子及其动叶、隔板及其静叶、过桥汽封及端轴封等结构与蒸汽进行强制对流换热;
- ③ 转子的支撑轴承和推力轴承位置与润滑油进行热量交换。

高中压模块降负荷冷却初始温度场如图 5 所示。

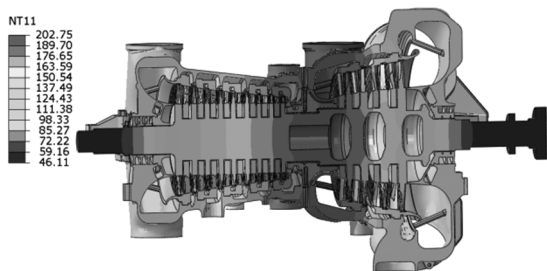


图 5 初始温度场

基于上述初始温度场,分析低负荷并隔离 MSR 第 2 级再热 2 小时工况。该过程中高压进气内壁、中压进气内壁以及过桥汽封位置随时间变化曲线如图 6 所示。从初始温度场,经低负荷隔离 MSR 第 2 级再热 2 小时后,高压进气内壁温度由 183 ℃、中压进气内壁温度由 204 ℃,均下降为 163 ℃左右,对应温降率分别为 10 ℃/h、20 ℃/h;过桥汽封位置温度由 188 ℃下降为 180 ℃。即过桥汽封仍是冷却较慢的结构位置,结合高中压缸自然冷却慢的特点,可投入快速冷却装置,东方汽轮机公司已完成各快冷方案相关分析设计工作。

降负荷冷却过程中高压进气内壁及中压进气内壁温降率与高中压缸初始温度场有直接关系,可以通过观测高压进气内壁、中压进气内壁温降率来控制低负荷阶段时长。

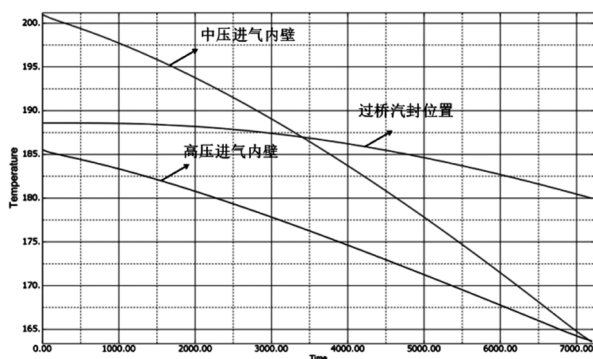


图 6 低负荷冷却过程汽缸温度变化曲线

3.2 降负荷冷却过程应力分析

采用低负荷隔离 MSR 第 2 级再热冷却 2 小时温度后汽缸应力场如图 7 所示。从图中可以看出汽缸整体应力较低,最大应力位于中压下半进汽腔室附近,该位置应力随时间变化曲线如图 8 所示。转子应力场如图 9 所示,最大应力位于中压第 3 级围

带位置,应力约为 200 MPa,其中由转子离心力载荷引起的应力约为 120 MPa。即降负荷冷却过程中汽缸及转子强度满足设计要求。



图 7 高中压汽缸应力场

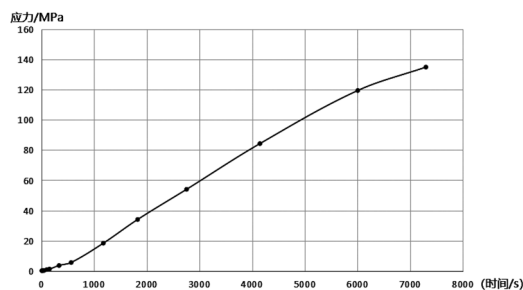


图 8 汽缸最大应力位置应力变化曲线

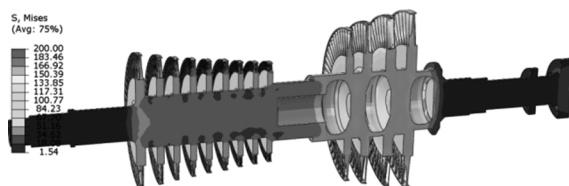
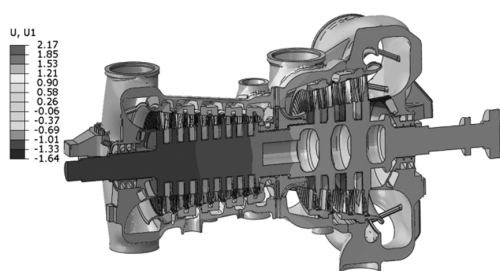


图 9 高中压转子应力场

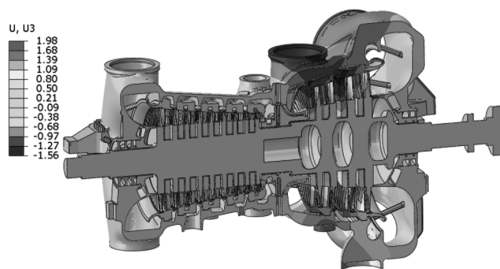
3.3 降负荷冷却过程间隙分析

采用低负荷隔离 MSR 第 2 级再热低负荷冷却 2 小时过程中高中压通流内部与高中压缸内壁、中压排汽缸内壁、转子及其动叶、隔板及其静叶、各段汽封等部件发生不同程度的表面换热。由于各部件结构尺寸、材料差异,对应热膨胀也存在一定差异,因此需对低负荷冷却过程中高中压缸动静部件间间隙变化进行分析,保证机组的安全性。汽缸低负荷冷却 2 时变形如图 10 所示。

分别提取动静部件间径向及轴向间隙变化,其变化值较机组径向及轴向设计间隙安全余量较大,在此低负荷冷却过程中高中压汽缸动静部件间不会发生碰磨。



(a) 轴向变形



(b) 天地向变形

图 10 高中压模块变形云图

4 结语

通过对大型核电汽轮机组高中压模块降负荷

冷却过程有限元分析以及机组运行验证均表明:采用降负荷冷却可缩短高中压缸停机冷却时间方案是可行的。

参考文献:

- [1] 史进渊. 汽轮机传热设计原理与计算方法[M]. 北京:中国电力出版社,2023
- [2] 涂雪红. 某大型压点汽轮机自启动过程控制设计[J]. 东方汽轮机,2024(1):51-54
- [3] 张亚平. 百万等级核电汽轮机组转子热应力计算和控制[J]. 东方汽轮机,2018(1):60-65
- [4] 伍赛特. 核电汽轮机结构设计及运行特点研究[J]. 科技创新与应用,2021(16):99-103
- [5] 黄海跃. 核电厂汽轮机热应力控制技术的研究[D]. 上海交通大学,2010
- [6] 闵渊. 1 520 MW 核电汽轮机甩负荷动态特性研究[J]. 东方汽轮机,2017(4):72-80

集团要闻

东方电气连续入选央企十大国之重器

2025 年 1 月 1 日,国务院国资委新闻中心正式发布 2024 年度央企十大国之重器,由东方电气研制的“全球最大海上风力发电机组”成功入选。继“全新一代 18 兆瓦海上直驱风电机组”后,东方电气海上风电产品再次入选央企十大国之重器。

此次评选活动综合了媒体报道和网友推荐,从 2024 年中央企业建设的重点项目中精心选出 20 项既有传播“热度”又有创新“力度”的大国重器,并在网络发起投票,吸引超 118 万网友参与,综合网友投票情况和专家意见,评选出“2024 年度央企十大国之重器”由东方电气研制的拥有完全自主知识产权的全球最大的 26 兆瓦级海上风力发电机组于 2024 年 10 月 12 日下线,该机组是目前全球单机容量最大叶轮直径最长的海上全国产化风电机组,供应链完全自主可控,为助力我国构建新型电力系统,实现“双碳”目标提供了坚强的技术支撑。

该机组在年平均 10 米/秒的风速下,单台机组每年可输出 1 亿度清洁电能,可满足 5.5 万户普通家庭一年的生活用电。每年输出的清洁电能可节约标准煤 3 万余吨,减少二氧化碳排放 8 万余吨。

建设“国之重器”,担当“国之重任”,服务“国之大者”。2025 年,东方电气将继续坚持科技自立自强,不断突破核心技术,为助力新型电力系统建设贡献力量。

来源:东方电气网

潼南电站三叶片灯泡贯流水轮发电机设计概述

施明星 郑棣

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:本文论述了潼南三叶片灯泡贯流水轮发电机电磁方案设计和定子、转子、轴承和通风冷却系统等主要结构设计特点。针对潼南水轮发电机的容量小但电压等级高、磁极数量多、定子直径大和定子铁心短等特点,进行电磁比选设计和结构优化设计,解决了电磁负荷匹配和结构刚度弱等难题,为三叶片灯泡贯流水轮发电机的设计开发提供参考。

关键词:三叶片;灯泡贯流水轮发电机;电磁比选;结构优化;电磁负荷;结构刚度

中图分类号:TV734.21

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)01-0022-05

Overview of Three-blade Bulb Type Hydro-generator Design for Tongnan Power Station

SHI Mingxing, ZHENG Di

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: The electromagnetic design for Tongnan three-blade bulb type hydro-generator and the main structural design of stator, rotor, bearing and ventilation cooling system are introduced in this paper. According to the characteristics of the Tongnan hydro-generator, such as low capacity but high voltage level, more poles, large stator diameter, short stator core and so on, the electromagnetic comparison design and structural optimization design are carried out, which solves the problems of electromagnetics load matching and structural stiffness, and provides reference for the design and development of the three-blade bulb type hydro-generator.

Key words: three-blade; bulb type hydro-generator; the electromagnetic comparison design; structural optimization; electromagnetics load; structural stiffness

潼南电站位于重庆潼南县境内的涪江下游河段,共装设3台单机容量为14 MW三叶片灯泡贯流式水轮发电机组,额定水头5.5 m,水轮机转轮直径为6.20 m,转轮型式为三叶片。潼南电站3台机组全部由东方电机供货,是东方电机设计制造的首个三叶片灯泡贯流式水轮发电机组。随着开发条件较好的水电站资源开发殆尽,而低水头的三叶片灯泡机组发展迅速。一方面是开发条件所限,另一方面是三叶片转轮能量参数高,可节省电站建设投

资。^[1]但是潼南水轮发电机具有容量小但电压等级高、磁极数量多、定子直径大和定子铁心长度短等特点,面临电磁负荷匹配和结构刚度弱等难题。本文主要从电磁设计和主要结构设计、通风冷却系统等几个方面来介绍潼南电站三叶片灯泡贯流水轮发电机的设计特点。

1 发电机基本参数

发电机基本参数如表1所示。

收稿日期:2024-01-03

作者简介:施明星(1986—),男,2010年毕业于浙江大学控制理论与控制工程专业,工学硕士,高级工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事水轮发电机设计工作。邮箱:Shimx8259@dongfang.com。

表1 发电机基本参数

名称/单位	参数
型号	SFWG14-72/7070
额定容量/MVA	15.22
额定功率/MW	14
功率因数	0.92(滞后)
额定电压/kV	10.5
额定电流/A	836.7
额定转速/(r·min ⁻¹)	83.3
飞逸转速/(r·min ⁻¹)	260
相数	3

2 发电机电磁设计特点概述

最大水头低于10 m的低水头径流式水电站,一般选用三叶片转轮灯泡贯流机组。这种机型特点是水头低、转速低、容量小,相对于四叶片、五叶片机组,发电机电磁设计具有单机容量小但电压等级高、磁极数量多、定子直径大和定子铁心长度短等特点。三叶片灯泡贯流机组的发电机电磁设计与4叶片、5叶片机组差别主要在槽数选择方面,随着容量和电压等级的变化,有多种方案可以选择,而且极数更多,槽数更难选择。贴壁或框架的机座结构、波绕或叠绕的线圈形式,造成了电磁方案的不同组合,需要进行多种方案比选。三叶片灯泡贯流式水轮发电机容量一般都小于20 MW,在该容量范围内,发电机电压等级可以取6.3 kV或者10.5 kV。单机容量较小,电压等级如果较高,定子线圈采用单支路、槽内两导体的杆式波绕布置,无法得到较合理的电磁参数,只能通过多支路、槽内多导体的叠绕组来调整。因此,潼南发电机额定电压为10.5 kV,额定功率为14 MW,为了得到较好的电磁参数和电磁负荷匹配,电磁方案采用2支路、486槽和槽内多导体的圈式叠绕方案。

3 发电机主要结构设计概述

3.1 总体结构概述

潼南水轮发电机为三叶片灯泡贯流式水轮发电机,采用水平灯泡式结构布置方式,整体结构特点就是直径大、轴向长度短。

3.2 定子结构设计概述

潼南发电机定子制造在厂内叠片下线装配完成后,整体发运到电站现场。定子机座为钢板焊接

的轴向V型筋框架式结构。定子铁心采用优质低损耗的薄硅钢片叠压而成。铁心长度700 mm,内径 $\phi 6\ 660$ mm,外径 $\phi 7\ 070$ mm。定子铁心与机座的固定采用浮动双鸽尾结构,以适应定子铁心的热膨胀。定子铁心采用绝缘穿心螺杆并在穿心螺杆的上游侧增设蝶形弹簧的方式来压紧,以保证铁心长期压紧而不松动。整个定子绕组的连接采用两支路圈式叠绕方式。

由于三叶片灯泡贯流式水轮发电机的定子直径大、铁心相对较短等特点,定子的刚度相对偏弱。另外,定、转子之间的间隙值小,为使定子能够安全可靠地套入转子内,在定子起吊和安装过程中,如何防止起吊变形来减少其对定子性能影响尤为突出。因此在该机组发电机定子结构设计中,通过适当增加定子外壁和V型筋等部件的钢板厚度来提高其强度和刚度,并且需进行定子各起吊工况的有限元刚度分析计算,使得定子机座刚度满足在放置位置和起吊方式下的受力与变形的要求,见图1~4。

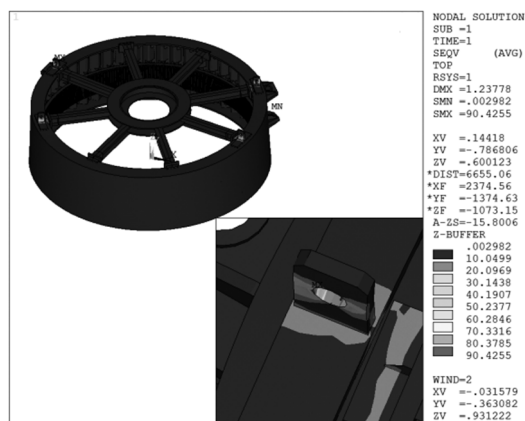


图1 垂直起吊工况等效应力分布图

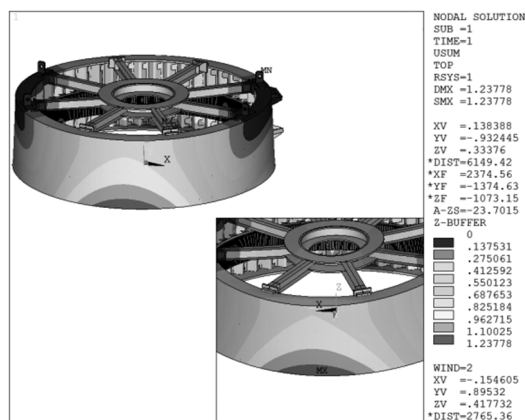


图2 垂直起吊工况综合位移分布图

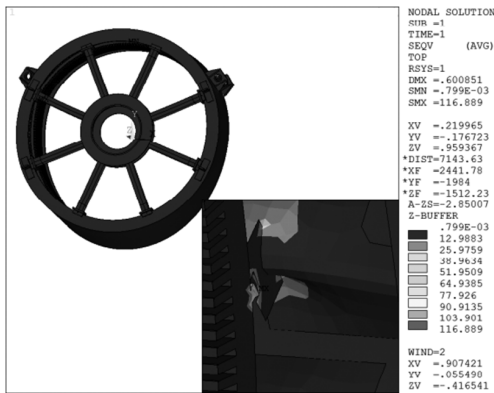


图3 卧式起吊工况等效应力分布图

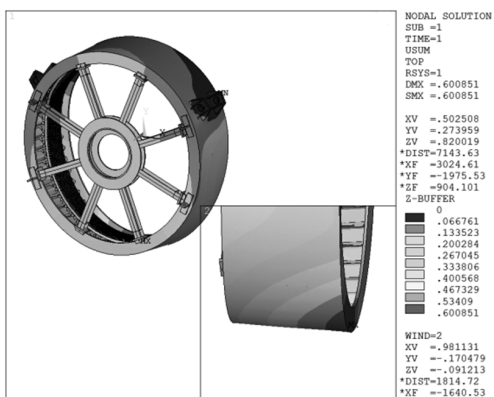


图4 卧式起吊工况综合位移分布图

3.3 转子结构设计概述

转子结构主要包括转子支架和磁极等部件。磁极装配采用螺栓把合的方式固定在转子支架上。转子支架为后倾斜支臂圆盘式焊接结构,由中心体轮毂、斜支臂和磁轭圈焊接而成。转子支架中心体直接与水轮机主轴法兰相接,利用6- $\Phi 105/\Phi 195$ 销套传递扭矩。由于三叶片灯泡贯流水轮发电机的转子支架直径大、轴向长度较小,因此在转子支架设计时要特别注意刚度匹配问题。在潼南发电机转子支架结构设计时,采取了以下措施:

- (1)适当增加转子支架斜腹板的厚度。
- (2)在保证施焊空间的条件下,尽可能布置更多数量的斜腹板。

(3)进行转子支架有限元刚强度分析计算,根据计算结果再进行结构优化,保证转子支架具备足够的刚强度。

3.4 组合轴承结构设计概述

发电机的组合轴承包括正、反向推力轴承和分块瓦卧式径向轴承。正、反向推力瓦和径向瓦由同一轴承支架支撑,并以主轴本体作为镜板和轴颈。轴向推

力负荷和径向负荷由轴承支架传递到水轮机座环上。对于三叶片灯泡贯流水轮发电机的轴承结构设计来说,除了考虑推力轴承和径向轴承本身的承载能力外,还需要重点关注轴承支架的刚度问题。因为轴承支架的轴向长度也比较小,形状比较扁,这样轴承支架在承受推力负荷时就更容易变形。在潼南发电机轴承支架结构设计时,采取了以下措施:

- (1)增加轴承支架的外壁钢板厚度和轴承支架的支撑筋板厚度。
- (2)进行轴承支架刚强度有限元分析计算,根据计算结果再进行结构优化,保证轴承支架具备足够的刚强度。

4 通风冷却系统设计概述

4.1 通风系统设计

潼南水轮发电机采用密闭强迫循环双路轴径向的混合通风冷却系统。在发电机上游侧安装6台轴流风机作为通风系统的主要压力源。冷却空气从风机的出口流出,进入发电机内部,在发电机内不停地进行循环,吹拂发电机发热部件,冷却空气将发电机内的热量带到空气冷却器内与冷却水进行热交换。发电机内的空气不停地进行循环,保证电机线圈及铁心的温度在允许的范围之内,以确保发电机的安全稳定运行。

为了满足发电机的冷却需求,利用网络法^[2]进行电机风阻特性求解,在此基础上以满足需求风量并留合适的裕度为目标,进行风机选型,最终得到风机的工作点及电机的总风量见图5。对于潼南水轮发电机实际的通风结构,最终选定的6台轴流风机并联工作可以提供25.0 m³/s风量,单台风机的工作点为(1 000 Pa,15 000 m³/h)。

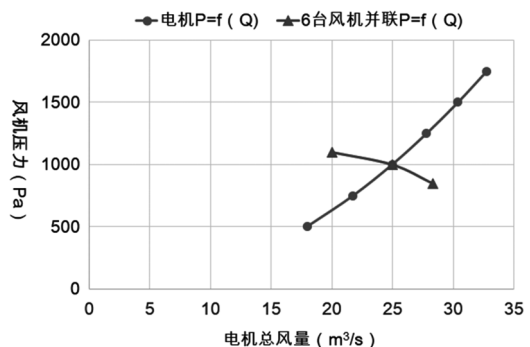


图5 风机工作点求解

基于大型 CFD 仿真软件 Fluent,对潼南发电机额定运行时转子线圈、定子线圈、定子铁心主要发热部件温度进行仿真分析,得到各部件的温度分布见图 6 和图 7,温升计算结果见表 2。

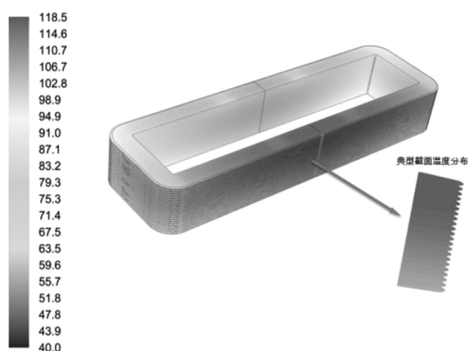


图 6 转子线圈温度分布(℃)

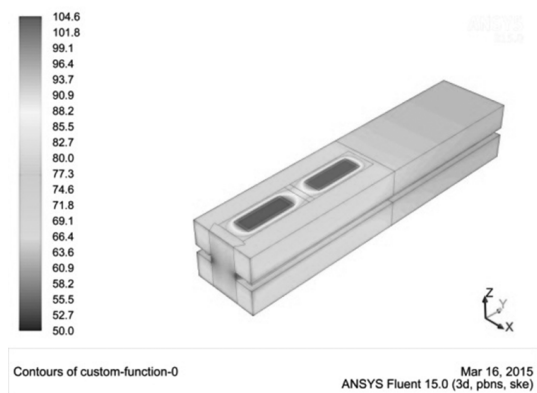


图 7 定子线圈、铁心温度分布(℃)

表 2 计算温升

定子线圈(RTD)	定子铁心(RTD)	转子线圈平均温升
45.3	29	65.7

4.2 正、反向智能切换的冷却供水系统设计

三叶片灯泡贯流电站的水头一般较低,电站的上、下游水位差很小,而且一般这些流量大、水头低的河流一般为多泥沙河流。因此,贯流机组尤其是三叶片灯泡贯流机组需采用正、反向供水系统,来防止单向供水引起冷却器堵塞而影响机组正常运行。

灯泡贯流式水轮发电机传统的冷却水正、反向供水系统为通过四个操作阀门手动切换来实现冷却水正、反向供水,操作非常不便,而且容易操作错误。随着时代的发展,现在电站对系统智能化、可靠性和便捷性要求越来越高,传统的冷却水正、反向供水系统已不能满足电站智能化的要求。

为了改善这种情况,对潼南发电机空冷器的供水系统管路进行优化设计,如图 8 所示。将传统的四个操作阀门的功能用 SZF 双向供水转阀来实现,简化了管路系统结构并优化了发电机进入筒下端的结构布置空间和进入筒下端的检修空间,通过 SZF 双向供水转阀的智能控制器,可以根据电站实际情况设置正、反向自动循环切换时间,来实现供水系统的正、反向智能切换,并且可以实现远程操控,操作人员在中控室即可实现对冷却水正反冲切换操作,无需派人进入到发电机内部进行四个阀门的繁琐切换操作。

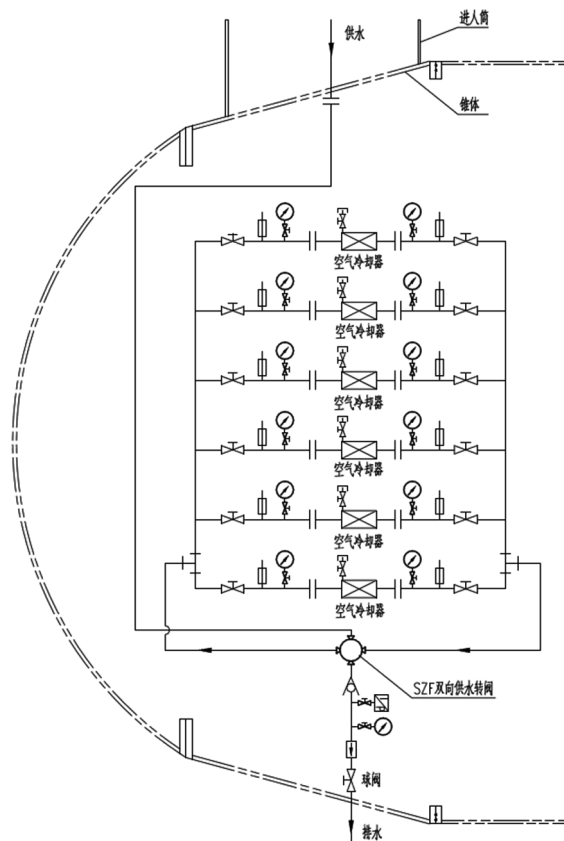


图 8 正、反向智能切换供水系统示意图

5 结语

潼南水轮发电机组已全部成功投产发电,机组运行平稳,瓦温、振动、摆度等各项参数均满足合同及规范要求,发电机各部件运行参数见表 3。潼南水轮发电机是东方电机设计制造的单机容量 14 MW 且第一台投运的三叶片灯泡贯流式水轮发电机。它的成功投运,对今后三叶片灯泡贯流水轮发电机的设计开发具有重要借鉴意义。

表 3 发电机各部件运行参数

	名称	1#机	2#机	3#机
负荷	有功/MW	14.11	14.05	13.69
	无功/Mvar	3.7	2.69	2.38
温升	定子线圈/K	50	47	45
温度	正推力瓦/℃	43	44	42
	反推力瓦/℃	33	34	33
	径向瓦/℃	40	41	39
振动	组合轴承径向 Y/ μm	6.3	4.5	4.6
	组合轴承径向 X/ μm	13	9.3	13.7
	组合轴承轴向 Z/ μm	28.5	21.7	15.5
摆度	组合轴承径向 Y/ μm	35.9	34.7	34.1
	组合轴承径向 X/ μm	37.7	44.2	35.4

参考文献:

- [1] 田树棠. 贯流式水轮发电机组实用技术 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2010
- [2] 陈锡芳. 水轮发电机结构运行监测与维修 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2008
- [3] 廖毅刚. 大型灯泡贯流式水轮发电机通风系统研究[J]. 东方电气评论,2003(17):42-46]

集团要闻

刷新纪录！坦桑尼亚最大水电站实现“一年六投”

2024 年 12 月 31 日,坦桑尼亚最大水电站——朱利诺水电站实现机组“一年六投”,刷新坦桑尼亚水电站建设纪录。电站年发电量突破 31 亿度,占坦桑尼亚全国总发电量 40% 以上,有力支撑坦桑尼亚电网稳定运行。

朱利诺水电站是坦桑尼亚乃至整个非洲在建的最大的水电站之一,东方电气为电站建设提供全部水轮机、发电机、主进水阀等成套设备研制、供货、安装、调试与试运行等服务,刷新了当时中国自主品牌一次性出口容量最大的水电设备合同纪录。

该电站装有 9 台 235 兆瓦的混流式发电机组,总装机容量高达 2115 兆瓦,是坦桑尼亚优先发展的重大项目,也是关系到坦桑尼亚电力生产和稳定供应的重点项目。2024 年 2 月,首台机组投产发电。

电站机组自投运以来,不仅显著提升了坦桑尼亚电力供应能力,还为其战略性工程中央铁路提供了持续稳定的电力保障,成功推动该铁路于今年 6 月份正式进入商业运行,为当地经济发展和民生改善注入了强劲动力。

朱利诺水电站的成功运营,不仅大幅增强了坦桑尼亚电网的稳定性,更展现了中国在水电领域的技术实力和国际合作能力。

近年来,东方电气积极服务高质量共建“一带一路”,已通过提供设备或工程承包服务模式参与了非洲 30 多个电站项目建设,累计向非洲客户提供了 90 余台机组,电站装机容量超 11000 兆瓦。

2024 年以来,东方电气成立非洲区域经营中心,进一步强化非洲区域经营主体责任,不断推进业务重心前移,推动属地化经营水平提升。今年 9 月,东方电气签约埃塞俄比亚科伊沙水电站机电成套项目合同,成为目前中国自主品牌出口非洲的单机容量最大水电项目,将提供包括全部 6 台套 300 兆瓦水轮发电机组在内的厂房、开关站机电设备及其安装服务。同月,坦桑尼亚副总理兼能源部长比泰科为东方电气在非洲的第一个水电 EPC 项目——坦桑尼亚马拉加斯水电站 EPC 项目奠基。

共建“一带一路”高质量发展新阶段,东方电气将围绕中非“十大伙伴行动”,进一步巩固和扩大在非洲市场的业务布局,为非洲国家打造“绿色增长引擎”注入绿色动力。

来源:东方电气网

混流式水轮机现代化更新改造技术

董晓宁 王勇刚*

甘肃盐锅峡发电有限公司, 甘肃 永靖 731601

摘要:混流式水轮机是安装在水电站最多的机型,凡是水头在 20~750 m 范围内均可以采用混流式水轮机。我国 20 世纪 70、80 和 90 年代设计制造和安装的水轮机已经运行了 30~50 年,水轮机性能、运行范围和部件及其配套系统已经不能满足现代电网运行方式对水轮机的需求,须采用现代化技术进行更新改造,以适应新的电网安全、高效运行。

关键词:现代化; 更新改造技术; 混流式水轮机

中图分类号:TV734.1

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)01-0027-05

Modernization and Retrofitting Technology of Mixed-flow Turbines

DONG Xiaoning, WANG Yonggang*

(Gansu Yanguoxia Power Generation Co., Ltd., 731601, Yongjing, Gansu, China)

Abstract: The most Francis turbines are installed in the hydro power station from head of 20 m to 750 m. The turbines designed and manufactured in the 70th~90th of the twentieth century have operated for many years of 30 to 50 years. The quality of turbine performance, operating limits, parts and auxiliary devices have not able to meet modern electrical market requirements. The Francis turbines need to carry out updating and reconstruct with modern technology.

Key words: modern upgrading; reconstruction technology; Francis turbine

在 20 世纪 70~80 年代设计制造的混流式水轮机,已经运行了 30~50 年不等,水轮机接近或超出《GB/T15468-2020 水轮机基本技术条件》第 5.11 节规定的 40 年使用寿命。

当时设计制造的混流式水轮机是根据型谱进行选型设计,不是专门针对电站的实际运行情况,进行开发研究的适用模型水轮机。水轮机效率低,空化性能较差,压力脉动较大,以及叶片进口边正、负压面存在脱流而产生的水力振动。加之,转轮叶片、导叶均采用人工打磨而成的表面型线,由于安装和调试技术限制,水力不平衡产生的径向力较大,普遍存在水导轴承的摆度较大,顶盖水平及垂直振动偏大等缺点。

在运行中,主轴密封和导叶轴颈漏水量较大,

顶盖排水泵频繁启动抽水;导叶立面和端面密封性能差,导致导叶漏水量较大至机组蠕动;导叶接力器无论是环形接力器还是直缸接力器均存在一定量的漏油现象;接力器活塞采用铸铁活塞环,运行时间长后,活塞环与缸之间的间隙不断磨损变大,活塞两侧的差压越来越小,导致导叶操作困难。所有这些问题的存在,影响了机组安全稳定运行。

20 世纪 70~80 年代设计制造的混流式水轮机无论是产品质量要求,还是水力性能(效率、压力脉动和空化性能),或是运行中存在的问题,均需要采用现代技术进行设计、制造、安装和调试技术进行更新改造,提升水轮机综合性能,增强安全稳定运行能力,提高电站的发电量。

收稿日期:2024-05-23

作者简介:董晓宁(1970—),男,甘肃盐锅峡发电有限公司执行董事,高级工程师,长期从事水电站安全生产技术管理工作。

王勇刚(1973—),男,青海黄河水电公司积石峡发电分公司总经理,高级工程师,长期从事水电站安全生产技术管理工作。邮箱: wangyonggang@spic.com.cn。

1 现代电力市场的需求

电力系统在 2021 年开始执行《GB/T40595-2021 并网电源一次调频技术规定及试验导则》，规定接入 35 kV 及以上电压等级的储能电站、风电、光伏等并网电源按照该标准执行。

该标准第 7.4 节对“一次调频限幅”规定：①非额定有功功率工况下，水发电机组参与一次调频负荷变化幅度应不设限制；②机组额定有功功率运行时应参与一次调频，增负荷方向一次调频功率变化幅度应小于 8 % 额定有功功率，减负荷方向一次调频功率变化幅度应不设限制；③水头不足导致机组功率无法达到额定有功功率工况时，机组最大出力下增负荷方向一次调频调节幅度应不小于 8 % 额定有功功率。

2021 年前投入运行的电站，水轮机的能量、空化和稳定性是不具备《GB/T40595-2021 并网电源一次调频技术规定及试验导则》中第 7.4 节规定的能力的。水轮机更新改造后，是完全具备那样能力的。

包括机组自动发电控制（AGC）和机组调相运行等均对水电机组提出了相应要求。

2 现代化更新改造技术

2.1 CFD 水力设计技术

随着计算流体力学（CFD）数值求解技术和计算机软硬件技术的发展，混流式水轮机通流部件的复杂三维粘性流动分析计算，能够分析计算蜗壳、座环、导叶、转轮和尾水管的流动状态和流动特征，优化水轮机通流部件的几何尺寸，特别是转轮的翼型尺寸（图 1）。

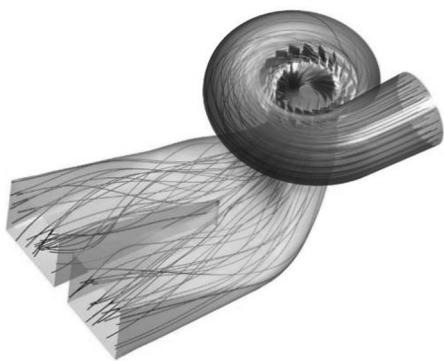


图 1 全流道计算示意图

蜗壳进行 CFD 数值优化设计，获得其水头损失和可视化的流动状态，通过蜗壳压力梯度、出流角

度和空间流线的分析，多次反复优化蜗壳断面，以获得合理的水头损失，形成最佳的环量，以及最佳的固定导叶进口来流。

固定导叶与活动导叶组成的双列叶栅进行 CFD 数值优化设计，优化蜗形和非蜗形部分固定导叶的进出口安放角和翼型，为活动导叶提供最佳的入流，优化活动导叶转角、翼型和布置圆，使活动导叶对来流处于最佳的适应性，同时使出流对转轮叶片头部的冲击减低至最小（图 2）。

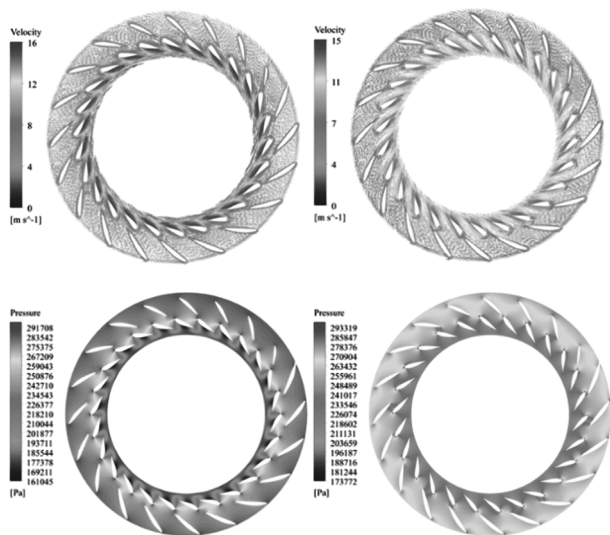


图 2 双列叶栅压力与速度计算示意图

水轮机水力设计的大量优化设计集中于转轮，优化转轮叶片翼型、转轮出口流速和环量分布、叶片压力分布和流线、能量损失、叶片进水边脱流空化和叶型空化等（图 3）。

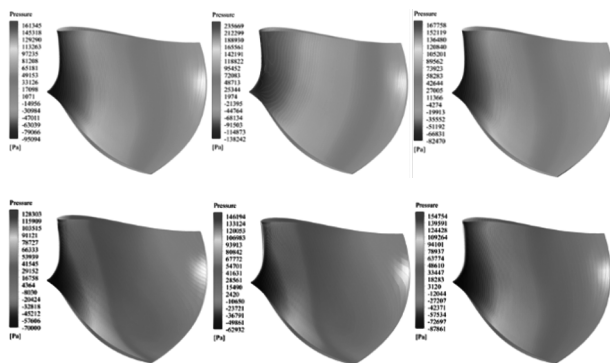


图 3 不同工况转轮叶片压力面和背面压力分布示意图

尾水管水力优化是尾水管几何形状对转轮出流的适应性，优化尾水管几何型线、过流面积变化规律和肘管的曲率变化，以减少尾水管压力脉动及水力损失，增加尾水管回收能量的能力（图 4）。

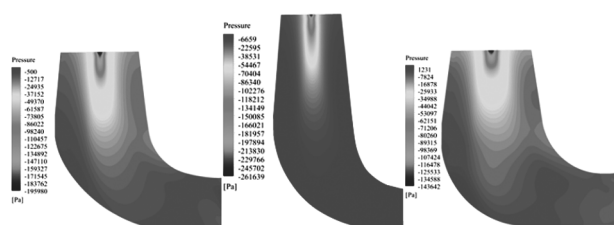


图4 不同工况尾水管压力分布示意图

2.2 结构设计技术

混流式水轮机采用经典设计与有限元计算相结合的技术,提高了大部件的刚强度和抗疲劳特性,特别是转轮的刚强度和抗疲劳特性。

导叶端面 and 立面的防漏水设计,大大减小了立面和端面的漏水,减小机组蠕动的可能性,延长了机组制动部件的寿命,减小了因蠕动而产生的导轴承瓦面磨损。导叶轴颈不漏水,减少了顶盖排水泵启动次数。

导叶接力器活塞和端面径向密封的设计技术,采用柔性组合密封代替铸铁金属密封,保证了活塞平稳顺畅动作而不窜油,保证了活塞两侧的操作差压。接力器操作活塞杆与接力器缸盖的端面轴向密封可以数十万次动作而不漏油。

蜗壳和尾水管进人门把合螺栓采用抗疲劳和抗腐蚀设计,保证了进人门的安全稳定。

2.3 调相运行的结构设计技术

2.3.1 带进水蝴蝶阀和球阀

这类水轮机均为中小型混流式,可采用水泵水轮机成熟的调相运行结构技术,导叶立面和端面密封、主轴密封、上下止漏环型式和冷却管路、压水管路和回气管路及水力量测管路的设计均与水泵水轮机设计一致。机组压水启动需要的 SFC 容量也能满足设计要求,成熟可靠。

2.3.2 带筒阀

这类水轮机均为大型混流式,可采用水泵水轮机成熟的调相运行结构技术,导叶立面和端面密封、主轴密封、上下止漏环型式和冷却管路、压水管路和回气管路及水力量测管路的设计均与水泵水轮机设计一致。机组压水启动需要的 SFC 容量需要论证研究,SFC 容量是否可行。

2.3.3 无进水蝴蝶阀、球阀和筒阀

这类水轮机均为大型或巨型混流式,可采用水泵水轮机成熟的调相运行结构技术,导叶立面和端面密封、主轴密封、上下止漏环型式和冷却管路、压

水管路和回气管路及水力量测管路的设计均与水泵水轮机设计一致。导叶在调相期间的漏水量需要严格的控制,机组压水启动需要的 SFC 容量需要论证研究,SFC 容量是否可行。

2.4 AI 智慧诊断技术

采用 AI 智慧技术使水轮机运行状态精确地数字化感知,由计划检修到运行状态检修,使检修有的放矢,减少无为的检修,保证水轮机安全稳定运行。

影响水轮机安全稳定运行的重要螺栓,如顶盖与座环把合螺栓、支持盖与顶盖把合螺栓、蜗壳进人门把合螺栓和尾水管进人门把合螺栓等采用螺栓测力传感器智能监测螺栓松动、断裂故障和疲劳状况,并自动预测螺栓疲劳寿命。

水轮机振动诊断分析,实现顶盖/支持盖振动及轴心轨迹、压力脉动和压力等的波形和频谱分析,对振动进行分析诊断,提出解决方案。

对水导轴承的瓦温和油温进行实时监测,根据水导轴承的设计数据和实际运行数据,判断水导轴承的工作状态,对水导轴承运行温度异常现象进行分析诊断,提出合理的解决方案,防止产生烧瓦事故。

2.5 制造技术

转轮叶片和导叶采用全不锈钢 ZG04Cr13Ni4Mo 材料,经 VOD/AOD 精炼铸造成型,铸件含碳量低于 0.03 %,铸件缺陷大幅度减少,质量得到了大大改善。

采用数控加工代替手工打磨叶片和导叶,保证其线型满足设计要求,保证了流动的均匀性,减小了作用在转轮上的不平衡径向力,提供了叶片抗泥沙磨损能力。

采用数控加工叶片肩部几何尺寸,保证了与轮毂间隙的均匀性,减小了此处的间隙空蚀。叶片外缘采用数控加工的裙边,减小了转轮室与叶片的间隙空蚀和泥沙磨损。

采用机械人焊接代替手工焊接,保证焊缝质量。数控加工导叶上、中和下轴孔,保证轴孔的同心度和圆度。采用数字模拟导水机构预装配,缩短了导水机构制造周期。

2.6 安装调试技术

由于运输条件得到了大幅度改善,大部件分瓣

数减少,安装和维修变得更简单了,减少了漏水的地方。

整个机组安装完成后,不仅要求转动部件进行盘车,还要进行机组的动平衡,减小了作用在机组转动部件不平衡的径向力,大幅度减小了机组导轴承的径向和垂直振动,机组振摆值小于 $100\ \mu\text{m}$,提供了机组安全运行的稳定性。

3 更新改造方案、目的和改造范围

3.1 更新改造方案

电站业主进行改造时,明确水轮机是否需要一次调频和 AGC 运行,水轮机长期安全稳定运行范围,以及最大水头和最小水头是否有变化。确定机组额定转速是否需要改变,以便水轮机处于更好的运行范围。

3.2 更新改造目的

(1)原水轮机设计运行寿命到期,必须进行更新改造,消除安全隐患,延长水轮机运行寿命。

(2)消除原水轮机运行缺陷,满足现代电网 AGC 运行、一次调频和调相运行要求。

(3)更新改造增容,更新改造提效,增加电站发电量。

(4)消除水轮机重大缺陷,如振动和叶片裂纹等。

(5)更新改造为全负荷全水头运行水轮机。

(6)提高部件的抗疲劳特性。

(7)提高水轮机转动部件和操作动作部件的抗磨特性。

3.3 更新改造范围

为了达到更新改造目标,更新改造后的水轮机满足当今电网的需求。从设计角度出发,首先建议水轮机除了埋入部件外,其他部件均进行更新改造,对原水轮机主要埋入部件进行寿命评估以满足现代电网运行需求,使水轮机运行性能达到按现有标准体系设计制造的水轮机水平。

根据部件运行现状,可以适当选择更新改造部件。

如果机组需要调相运行,尾水管锥管四周的混凝土是否适合重新浇筑。

4 现代化更新改造典型案例

国内发电设备制造厂家哈尔滨电机厂有限责

任公司(以下简称哈尔滨电机)和东方电气集团东方电机有限公司(以下简称东方电机)在混流式水轮机现代化更新改造取得了不俗的业绩,先后更新改造了白山、丰满、新丰江、枫树坝、刘家峡、岩滩、凤滩、映秀湾、龚嘴、盐锅峡、东江、乌溪江、大朝山、安康、柘林、宝珠寺、福堂、小关子、大广坝、委内瑞拉古里、柘溪、池潭和李家峡 5#等电站混流式水轮机。下面以东方电机成功改造的安康和大朝山等水电站更新改造和运行情况进行说明。

4.1 安康水电站

改造前,最大水头 $88.0\ \text{m}$,额定水头 $76.2\ \text{m}$,最小水头 $57.0\ \text{m}$,水轮机型号 HL220-LJ-550,额定转速 $107.1\ \text{r/min}$,水轮机额定出力 $204.1\ \text{MW}$ 。改造后,最大水头 $88.0\ \text{m}$,额定水头 $76.2\ \text{m}$,最小水头 $57.0\ \text{m}$,水轮机型号 HLD825-LJ-580.4,额定转速 $107.1\ \text{r/min}$,水轮机额定出力 $224\ \text{MW}$,增容 9.8% 。

更新改造范围:转轮、主轴、主轴密封、水导轴承、底环、基础环局部改造、导叶、顶盖、导叶操作机构及控制环、导叶接力器和主轴中心孔自然补气装置等。

更新改造后,水轮机加权平均效率提高了约 12.7% ,即在相同的水头和流量下发电量增加约 12.7% ,最优效率提高了约 3% ,额定效率提高了约 4% ,空化裕量提高了约 37% 。

更新改造后,当机组带满负荷 50% 额定负荷下,水导轴承 Y 方向的摆度由 $430\ \mu\text{m}$ 下降到约 $110\ \mu\text{m}$ 。

4.2 大朝山水电站

改造前,最大水头 $82.9\ \text{m}$,额定水头 $73.0\ \text{m}$,最小水头 $59.01\ \text{m}$,水轮机型号 HLD267-LJ-604,额定转速 $115.4\ \text{r/min}$,水轮机额定出力 $229.6\ \text{MW}$ 。改造后,最大水头 $82.9\ \text{m}$,额定水头 $75.0\ \text{m}$,最小水头 $59.07\ \text{m}$,水轮机型号 HLD1095B-LJ-605,额定转速 $115.4\ \text{r/min}$,水轮机额定出力 $229.6\ \text{MW}$,不增容。

更新改造范围:仅更换转轮,其他部件不更新改造。

更新改造后,水轮机加权平均效率提高了 1% ,空化性能与改造前基本相当,尾水管压力脉动下降了约 60% ,无叶区压力脉动下降了 50% ,全负荷范围内转轮的静应力和动应力分别下降了 38% 和 57% ,水轮机在全负荷和全水头范围内安全稳定运行。

更新改造后,在5个毛水头68.1 m、73.37 m、76.74 m、81.55 m和83.46 m的现场试验中,从空载至满负荷229.6 MW,除了高水头机组带40 MW时水导轴承最大摆度174.8 μm ,其他水头和其他工况下,水导摆度几乎均小于100 μm ,顶盖水平振动30 μm 以下,顶盖垂直振动小于60 μm 。

更新改造后,转轮采用全不锈钢整体转轮,材料为ZG04Cr13Ni5Mo。在空载和全负荷运行2 000小时后,并包括在叶道涡初生线和发展线附件运行工况,转轮叶片无裂纹,无空蚀。在全负荷范围内水轮机顶盖、水轮机顶盖压力脉动、水导摆度和水车室内噪音等参数指标与改造前相比有了实质性改善提升,完全能够满足0~100 %P负荷安全稳定运行要求。

4.3 李家峡水电站5#

李家峡水电站5#在一期建设中,已经完成了尾水管肘管和扩散段的建设,在此基础上新设计制造转轮、导水机构、主轴、水轮机导轴承、尾水管锥管、导叶接力器和主轴中心孔自然补气装置。

最大水头135.6 m,额定水头125.0 m,最小水头114.5 m,水轮机型号HLD1192-LJ-642.6,额定转速125.0 r/min,水轮机额定出力408.2 MW。

水导X方向的最大摆度值为88 μm ,水导Y方向的最大摆度值为100 μm ,水导摆度在全负荷段基本处在《GB/T15468-2020 水轮机基本技术条件》A区。

顶盖X向水平振动为35 μm ,顶盖Y向水平振动为21 μm ,顶盖X向垂直振动为22 μm ,顶盖Y向垂直振动为32 μm ,顶盖水平振动垂直振动在全负荷段波动较小、较为平稳。完全满足《GB/T15468-2020 水轮机基本技术条件》的相关要求,机组在全负荷范围内可安全稳定运行。

电站现场实测无叶区压力脉动在小开度低负荷范围呈先小幅上升后下降;尾水管进口压力脉动幅值在小开度低负荷范围相对较大,机组在部分负荷工况受典型尾水涡带的影响,引起水导摆度小幅波动,对上导、下导、机架振动、定子基座和顶盖产生的影响非常小。

4.4 福堂水电站

改造前,最大水头184.02 m,额定水头159.3 m,最小水头146.1 m,水轮机型号HLD307-LJ-290,额定转速272.73 r/min,水轮机额定出力92.3 MW。

改造后,最大水头184.02 m,额定水头159.3 m,最小水头146.1 m,水轮机型号HLD1101B-LJ-295,额定转速272.73 r/min,水轮机额定出力92.3 MW,不增容。

更新改造范围:仅更换转轮,其他部件不更新改造。

更新改造后,水轮机最高效率提高了约0.4%,额定效率提高了0.2%,空化裕量提高了65%。

更新改造后,水导轴承摆度在全负荷段基本处在B区以内,在75~90 MW工况位于A区,完全满足相关标准的要求,机组在全负荷范围内可安全稳定运行。

更新改造后,在全负荷范围内,顶盖水平和垂直振动不大于50 μm ,波动较小、较为平稳,远低于相关标准限制值以内,在全负荷范围内可安全稳定运行。

4.5 柘溪水电站2#机组

改造前,最大水头74.0 m,额定水头60.0 m,最小水头47.0 m,水轮机型号HL220-LJ-410,额定转速136.4 r/min,水轮机额定出力77.1 MW。改造后,最大水头74.0 m,额定水头60.0 m,最小水头47.0 m,水轮机型号HLD1110-LJ-429,额定转速136.4 r/min,水轮机额定出力86.73 MW,增容12.5%。

更新改造范围:转轮、主轴、主轴密封、水导轴承、底环、基础环局部改造、导叶、顶盖、导叶操作机构及控制环、导叶接力器和主轴中心孔自然补气装置等。

更新改造后,最优效率提高了约3.5%,空化裕量提高了约40%。

更新改造后,在全负荷范围内,水导摆度满足《GB/T15468-2020 水轮机基本技术条件》的相关要求,顶盖水平和垂直振动小于60 μm ,机组在全负荷范围内可安全稳定运行。

5 结语

混流式水轮机采用现代技术更新改造后,大幅度提供了水轮机效率,降低了空化性能,降低了尾水管压力脉动,提高了水轮机安全性,机组振摆值达到精品机组要求,可以满足AGC和一次调频运行要求,增加了发电量,增加机组运行的功能性和灵活性。

基于降低电流负载法的双馈风力发电机温升试验研究

邓开¹ 罗小兵²

1. 乐山职业技术学院, 四川 乐山 614000; 2. 东方电气(乐山)新能源设备有限公司, 四川 乐山 614000

摘要:本研究运用降低电流负载的方法对 3.4 MW 双馈型风力发电机进行了温升试验,结果表明降低电流负载法得到的电机温升值与全功率试验下的电机温升值吻合度较高,误差仅为 1 K 左右。该方法可在容量较小的试验站试验较大功率电机的情況下使用,对电机试验设备能力不足或不具备全功率试验条件的情况下做温升试验有重要实践指导意义。

关键词:温升试验; 热试验; 降低电流负载法; 等效负载法

中图分类号: TM343.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)01-0032-04

Research on the Application of Current Load Reduction Method to Temperature Rise Test of Doubly-fed Wind Turbine

DENG Kai¹ LUO Xiaobing²

(1. Leshan Vocational and Technical College, 614000, Leshan, Sichuan, China;

2. Dongfang Electric(Leshan) New Energy Equipment Co., Ltd., 614000, Leshan, Sichuan, China)

Abstract: The temperature rise test of 3.4 MW double-fed wind turbine is carried out by reducing the current load method. The results show that the motor temperature rise obtained by reducing the current load method is in good agreement with the motor temperature rise under the full power test, and the error is only about 1 K. This method can be used in the test station with small capacity to test the high power motor, and has important practical significance for the motor test equipment with insufficient capacity or without full power test conditions.

Key words: temperature rise test; heat test; reducing current load method; equivalent load method

风能是取之不尽、用之不竭的无公害能源之一。我国风能资源丰富,可开发利用的风能储量约 10 亿 kW,其中陆地上风能储量约 2.53 亿 kW,海上可开发和利用的风能储量约 7.5 亿 kW。双馈型风力发电机在我国经过十几年的发展已日趋成熟,产品容量也越来越大,然而发电机试验装备的建设周期往往落后于产品开发,在实际生产中经常遇到试验装备容量不足或不具备全功率试验条件的情况,降低电流负载法成为了解决该难题的有效方法之一。

发电机的温升试验又称热试验^[1],其目的是

通过试验求得电机按所规定的工作制定额运行到热稳定状态(短时工作制除外)后,电机绕组和其他部件的温升或温度值。^[2]电机温升的高低直接关系着电机绝缘类型的选择和绝缘寿命的长短,影响到电机效率、成本等重要指标^[3],因此温升试验是电机试验中最重要的试验之一。^[4]本次试验采用了额定功率 3.4 MW、额定电压 690 V 的双馈型风力发电机进行试验,试验步骤和方法严格按照发电机试验的相关国家标准^[3,6-7]进行,以验证降低电流负载法温升试验的可行性和准确性。

收稿日期: 2024-11-11

作者简介: 邓开(1987—),男,讲师、高级工程师,2010年6月毕业于西南交通大学电气工程及其自动化专业,学士学位,高级工程师。现就职于乐山职业技术学院,讲师,长期从事发电机试验、新能源光伏发电技术应用研究工作。

1 电机的发热损耗

空载损耗,电机空载运行时的输入功率 P_0 就是电机的空载损耗,它包括铜耗 I^2R 、铁耗和风摩耗。^[3]

定子铜耗: $P_{\text{culs}} = 1.5I_1^2R_s$ 。 (1)

转子铜耗: $P_{\text{culr}} = 1.5I_2^2R_r$ 。 (2)

风摩耗:认为风摩耗 P_{fw} 与负载无关。

铁耗:由铁耗与 U_0/U_N 的关系曲线可知,运行电压 U 恒定时,铁耗基本恒定不变。

杂散损耗: P_s 是指总损耗中未计入定子损耗、转子损耗、风摩损耗和铁耗的那部分损耗,其经验公式为

$$P_s = \frac{(I_1^2 - I_0^2)}{(I_N^2 - I_0^2)} \times P_1 \times [0.025 - 0.005 \lg P_N] \quad (3)$$

综上所述,定子铜耗、转子铜耗、杂散损耗与运行电流的平方成正比,转速一定时,风摩耗为确定不变的某一数值,当风力发电机在额定电压运行时,其铁耗也是固定为某一值。所以,当发电机在额定电压、额定转速、额定功率因数下降低功率运行时,总损耗约等于一个固定损耗加上一个与电流平方有关的变化损耗。

2 电机的散热

热传递过程是由导热、热对流、热辐射三种基本热传递方式组合形成。^[5] 在一定的条件下,如确定的表面传热系数、对流导热率等可以近似地认为传热物体间温度差的线性关系。风力发电机多数配有空气冷却器,因此热对流在发电机的散热上处于主导地位。当发电机的散热与发热到达平衡状态时,则发电机到达了热稳定,此时考察部件的温

度与环境温度之差就称为温升,单位 K。

3 试验方法

本次试验的对象是额定功率 3.4 MW、额定电压 690 V、额定电流 2 845 A 的双馈型风力发电机。双馈型风力发电机和三相交流异步电动机在原理上存在一定差异,因此参考了一般异步电机的试验要求,拟定了以下等效负载试验法。^[6-7]

3.1 试验状态 A

使双馈异步风力发电机在额定电压 690 V 和额定频率 50 Hz 下以 1 000 kW 运行至热稳定,得到此时的温升 $\Delta\theta_A$ 。并记录下此时的三相平均电流 I_A 。各试验数据见表 1,绘制功率为 1 000 kW 时的温升曲线,如图 1。从表 1 温升试验数据可知: $(I_A/I_N)^2 = (845.5/2\ 845)^2 = 0.12$, $\Delta\theta_A = 32.3 - 11.1 = 21.2$ 。

3.2 试验状态 B

使双馈异步风力发电机在额定电压 690 V 和额定频率 50 Hz 下以 2 500 kW,运行至热稳定,得到此时的温升 $\Delta\theta_B$ 。并记录下此时的三相平均电流 I_B 。各试验数据见表 2,绘制功率为 2 500 kW 时的温升曲线,如图 2。从表 2 温升试验数据可知: $(I_B/I_N)^2 = (2\ 103.1/2\ 845)^2 = 0.54$, $\Delta\theta_B = 57.8 - 11.7 = 46.1$ 。

3.3 额定温升的估算

以 $(I/I_N)^2$ 为横坐标,温升 $\Delta\theta$ 为纵坐标建立直角坐标系。标出 A $[(I_A/I_N)^2, \Delta\theta_A]$ 点和 B $[(I_B/I_N)^2, \Delta\theta_B]$ 点,连接 A、B 两点并延长至横坐标 $(I/I_N)^2 = 1$ 处,此点对应的纵坐标 $\Delta\theta$ 就是额定功率 3 400 kW 对应的温升值 $\Delta\theta_N$ 如图 3。可以通过解方程的方法得到额定负载处的温升约为 70.7 K。按照上述方法整理表 1、表 2 得到表 3。

表 1 功率为 1 000 kW 时的温升试验数据

时间 min	电压 (V)	电流 (A)	功率 (kW)	环境温度 (℃)	绕组温度 1 (℃)	绕组温度 2 (℃)	绕组温度 3 (℃)
0	691.1	843.2	1 005.7	10.4	11.4	11.3	11.4
30	690.5	842.4	1 003.9	10.8	23.7	23.6	23.6
50	690.8	846.2	1 008.8	10.9	29.5	29.3	29.4
60	691.2	838.0	999.6	10.9	31.1	30.3	30.9
70	690.8	841.9	1 003.7	11.0	31.7	30.9	31.5
80	690.9	848.0	1 011.2	11.0	32.0	31.2	31.7
90	690.2	845.5	1 007.1	11.1	32.3	31.5	31.9

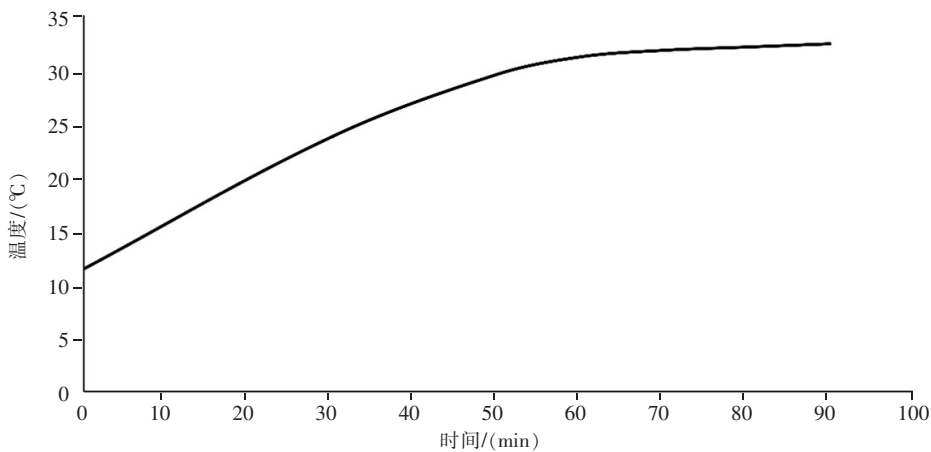


图1 功率为1 000 kW时的温升试验曲线

表2 功率为2 500 kW时的温升试验数据

时间(min)	电压(V)	电流(A)	功率(kW)	环境温度(℃)	绕组温度1(℃)	绕组温度2(℃)	绕组温度3(℃)
100	691.7	2 100.9	2 507.4	11.1	36.6	35.5	35.7
120	690.3	2 105.4	2 507.5	11.2	48.1	47.0	47.2
140	691.0	2 105.9	2 510.7	11.4	53.8	52.7	52.9
150	690.6	2 110.0	2 514.2	11.5	55.7	54.8	54.9
160	690.5	2 105.3	2 508.3	11.6	57.3	56.3	56.7
170	690.5	2 108.4	2 512.0	11.6	57.6	56.6	56.9
180	691.4	2 103.1	2 508.8	11.7	57.8	56.9	57.2

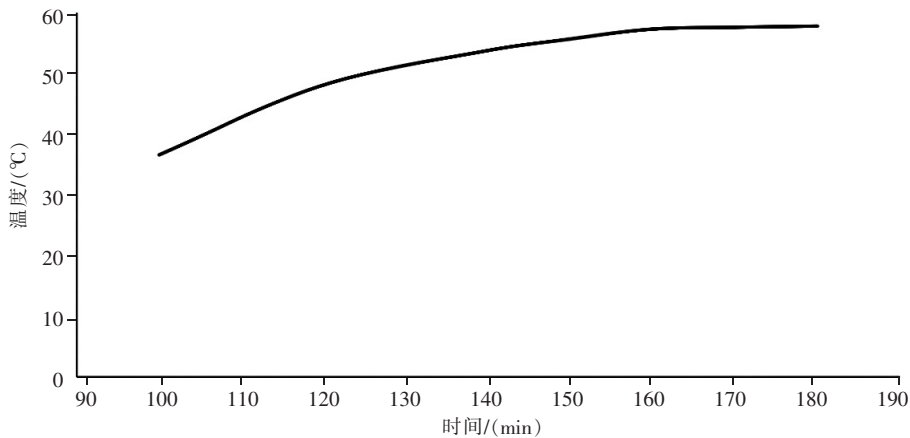


图2 功率为2 500 kW时的温升试验曲线

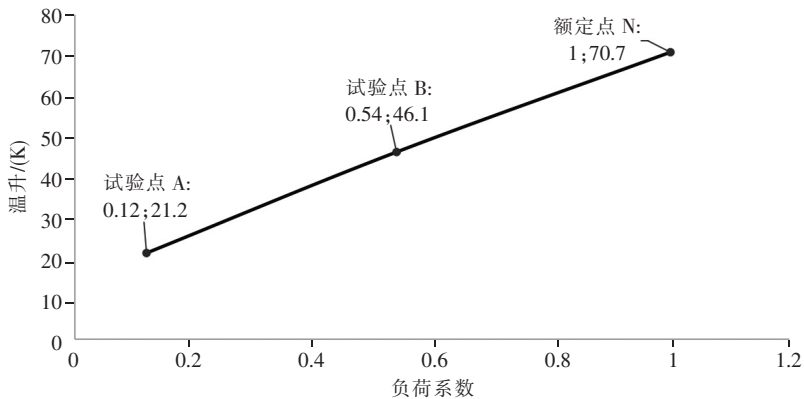


图3 图解法绘制的风力发电机温升计算图

表 3 额定温升的估算值

电机编号	$(I_A/I_N)^2$	$\Delta\theta_A(K)$	$(I_B/I_N)^2$	$\Delta\theta_B(K)$	$\Delta\theta_N(K)$
1#	0.12	21.2	0.54	46.1	70.7

3.4 额定功率的温升试验

测试全功率试验时风力发电机的温升。使双馈异步风力发电机在额定电压 690 V 和额定频率 50 Hz 下以额定功率 3 400 kW,运行至热稳定,得到

此时的温升 $\Delta\theta_N$,并记录额定功率下的三相平均电流 I_N ,各试验数据见表 4。从表 4 温升试验数据可得: $\Delta\theta_N = 83.9 - 12.1 = 71.7$ 。功率为额定 3 400 kW 时的温升曲线如下,如图 4。

表 4 功率为额定 3 400 kW 时的温升试验数据

时间(min)	电压(V)	电流(A)	功率(kW)	环境温度(℃)	绕组温度 1(℃)	绕组温度 2(℃)	绕组温度 3(℃)
190	692.9	2 849.2	3 406.0	11.7	58.3	57.3	57.4
210	690.2	2 858.5	3 404.2	11.7	71.5	70.3	70.5
230	692.1	2 848.9	3 401.6	11.8	80.1	79.0	79.3
240	691.4	2 850.4	3 400.5	11.9	82.6	81.5	81.8
250	690.3	2 864.4	3 411.5	11.9	83.3	82.2	82.3
260	692.0	2 854.4	3 408.0	12.0	83.7	82.5	82.8
270	690.9	2 856.9	3 405.4	12.1	83.9	82.6	83.0

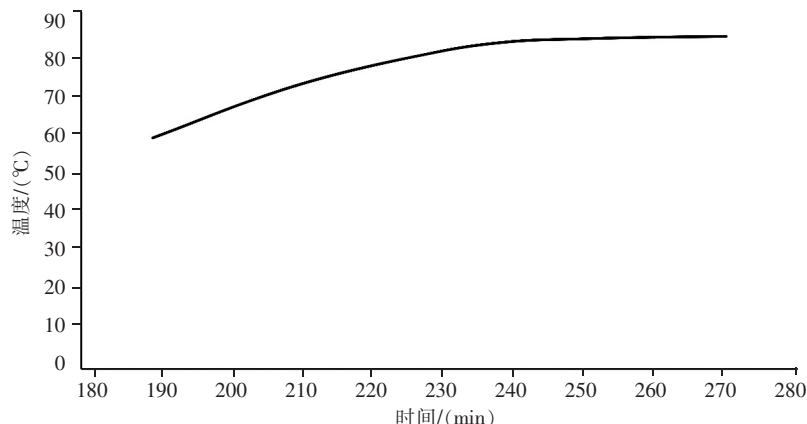


图 4 功率为 3 400 kW 时的温升试验曲线

4 结语

通过试验发现,采用降低电流负载法得到的电机温升是 70.7 K,采用全功试验时的电机温升是 71.7 K,两者误差仅为 1 K,吻合度较高,说明采用降低负载法估算电机的温升具有实际意义。必须注意:在确定 B 点的试验数据时,负载越大估算的额定功率下温升越准确;在确定 A 点的试验数据时,其负载较小即可,甚至可以求空载温升。该方法可在容量较小的试验站试验较大功率电机的情况下使用,对电机试验设备能力不足或不具备全功率试验条件的情况下有重要实践指导意义。

参考文献:

- [1] 贺胜强,任红伟,李跃珂.中小型三相异步电动机型式试验数据一致性核验[J].电机技术,2011(3):43-45
- [2] 陈世坤.电机设计[M].机械工业出版社:2017
- [3] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.三相异步电机试验方法:GB/T 1032—2023[S].北京:中国标准出版社,2023
- [4] 贾丽.风力发电机测试系统设计及数据处理研究[D].黑龙江:哈尔滨理工大学,2010
- [5] 章熙民,朱彤.传热学[M].中国建筑工业出版社:2014
- [6] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.风力发电机组双馈异步发电机:GB/T 23479—2023[S].北京:中国标准出版社,2023
- [7] 才家刚.电机试验技术及设备手册[M].机械工业出版社:2021

退役风电叶片回收再利用体系分析

鲁涛^{1,2*} 薛麟嘉^{1,2} 胡世磊^{1,2} 庄原发^{1,2} 邓毅^{1,2}

1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643000; 2. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 成都 611731

摘要:退役风电叶片回收再利用是风电全生命周期绿色可持续发展的关键。本文综述了目前退役风电叶片回收再利用领域的相关研究成果,并对各技术路径的成熟度、优缺点、生态及经济效益等进行了系统全面的分析,为退役风电叶片循环回收利用统筹推进、因地制宜布局产业提供支撑,助力风电行业废弃物循环利用体系构建。

关键词:退役风电叶片;物理回收;化学回收;热解回收;水泥窑协同处置;流化床;焚烧

中图分类号:F713.2;F426.61

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)01-0036-07

Analysis of Decommissioned Wind Power Blade Recycling System

LU Tao^{1,2*}, XUE Linjia^{1,2}, HU Shilei^{1,2}, ZHUANG Yuanfa^{1,2}, DENG Yi^{1,2}

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643000, Zigong, Sichuan, China;

2. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

Abstract: The recycling of decommissioned wind power blades is the key to the green and sustainable development of wind power throughout its life cycle. This paper summarizes the relevant research results in the field of decommissioned wind power blade recycling. The maturity, advantages and disadvantages, ecological and economic benefits of each technology path are analyzed systematically and comprehensively. It provides support for the overall promotion of the recycling and utilization of decommissioned wind power blades, the layout of the industry according to local conditions, and helps the construction of the wind power industry waste recycling system.

Key words: decommissioned wind turbine blades; physical recycling; chemical recycling; pyrolysis recycling; collaborative disposal of cement kilns; fluidized bed; incineration

我国风电产业于2005年进入规模化发展阶段,截止到2023年底,我国风电累计并网装机容量已达44万MW。^[1]目前,我国风电累计装机容量已经占全球累计装机容量的40%左右,并正持续加大建设投资,预计我国风电年新增装机容量有望于2030年突破20万MW。^[2]风电行业的高速发展有力地推动着我国能源转型进程,但随着风电机组20年的设计使用寿命逐步到期以及“以大代小”倡议的提出,将加快风电升级和设备更新换代,随之而来的便是退役风电机组处理回收难题。

风电机组主要由塔筒、机舱及叶片等组成,其

中塔筒和机舱主要由铁、铜、铝等材料组成,具有良好的经济效益及成熟的回收体系。而由玻纤及热固性树脂为主要原材料制成的风电叶片化学性质稳定、交联结构、废弃后不熔融不溶解,缺乏有效回收技术。同时,叶片的形状结构复杂,形态不规则、尺寸大,导致运输、切割及破碎困难。按照2023年累计并网装机规模以及风电叶片平均13.4 kg/kW的叶片材料用量来计算,我国已并网风电机组的叶片材料用量高达589.6万吨。若这部分固体废物得不到及时、恰当的处理回收,显然不利于风电产业的长远健康发展。

收稿日期:2024-10-15

基金项目:四川省科技计划资助项目:高值高效回收利用退役风电叶片关键技术开发及应用;项目编号:2022ZHCG0127

作者简介:鲁涛(1993—),男,2019年毕业于四川大学环境工程专业,硕士研究生,工程师。现任职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司,主要从事固废处理工作。邮箱:lut@dbc.com.cn

由于早期风电项目并未对机组退役所造成的成本摊销问题进行全面考虑,导致退役风电叶片处理的经济压力大。相对综合回收利用所需的高昂前处理成本,承担方为减少经济成本,往往选择简单的堆放、填埋等处理方式,受此经济性因素的影响,退役风电叶片资源化利用在源头上遭到了扼杀。从环境保护和风电可持续发展的角度来看,需要对退役风电叶片进行再利用或资源化回收,使风能成为全生命周期的绿色能源。

为解决退役风电叶片处理回收难题,补齐风电

产业链绿色低碳循环发展最后一块拼图,各高校、科研院及企业的专家学者针对退役风电叶片回收已开展了一些研究工作,本文对相关研究成果进行了总结分析。

1 退役风电叶片处置回收技术

目前理论可行的退役风电叶片处理回收技术路径主要包括物理回收、热法处理回收及化学回收等。如表 1 所示,笔者结合现场调研及文献研究分析^[3-7],对各技术路径进行了对比分析。

表 1 技术路径对比分析

序号	技术路径	技术原理	优点	缺点	技术成熟度
1	物理回收	一是降级使用,将退役风电叶片精细切割成特定形状的材料,然后充分利用材料本身的残留性能;	技术成熟、工艺简单、应用面广	处置不彻底,回收得到的产品经济价值较低,部分产品化利用标准欠缺,难以形成标准化产品	9
		二是将退役风电叶片经过适当的切割、撕碎、粉碎或分选等处理后作为增强料或填料使用			
2	热法处理回收	充分利用退役风电叶片的热值进行燃烧发电等,或在在能量利用的基础上,对玻纤等无机材料进行分离回收利用	处置彻底、技术相对成熟	焚烧资源化利用率低;热解回收物利用途径不清晰,现阶段投入与产出不成正比;水泥窑协同处置潜在利用价值偏低	8
3	化学回收法	通过化学降解手段,使叶片材料中的树脂基体与玻纤分离,进而回收树脂和纤维	处置彻底、资源化率高	技术不成熟、回收效率及经济性有待提升、存在二次污染风险	4

1.1 物理回收

1.1.1 降级使用

降级使用探索研究方面,国内丰诺(江苏)环保科技有限公司将退役风电叶片制成循环托盘及围板箱等循环包装材料(图 1)。[8] 国外将退役风电叶片制成自行车棚、游乐场及公园长凳等降级使用(图 2)。[9]



图 1 国内风电叶片主梁梯级利用产物
(左循环托盘、右围板箱)

降级使用产线建设方面,经调研,秦皇岛晟风环保科技有限公司等企业正开展退役风电叶片降级使用生产线建设工作,计划生产活动板房、长条椅和围栏等产品。但综合评判此类应用方式成为未来退役风电叶片大规模解决方案的可能性较低。



图 2 国外风电叶片梯级利用产物
(从上至下依次为自行车棚、游乐场及公园长凳)

1.1.2 粉碎再利用

物料形态方面,退役风电叶片粉碎后不同形态物料适用的应用场景存在一定差异。刘美霞^[10]等分别研究了不同形态的风电叶片粉碎料(图3)作为增强料/填料制备木塑复合材料的性能表现,研究结果表明玻璃纤维束表现出的是增强改性料特性、絮状物料则同时表现了增强改性料和填料特性、粉状物料则仅表现出填料特性。此外,杨立琳^[11]将玻璃纤维束应用到磷建筑石膏基复合材料制备中,同样表现出了作为增强料的可行性。而 Lan 等^[12]则验证了风电叶片粉碎料具备分别替代沥青混合料骨料级配中对应尺寸矿物料掺入到沥青混合料的可行性。



图3 风电叶片粉碎处理产物

物料粒径方面,一般粉碎设备出料筛网孔径越小,出料粒径越细,但单位能耗也更高。刘媛等^[13]对不同粒径的玻璃钢破碎物料(图4)的形貌、组分、元素及疏水性等特征进行了研究分析,并探究了玻璃钢粉碎物料作为填料时不同粒径、添加量及化学改性方式对PP基复合材料性能的影响,对风电叶片粉碎料回收利用过程中如何平衡粒径、成本及产品性能之间的关系具有一定的指导意义。

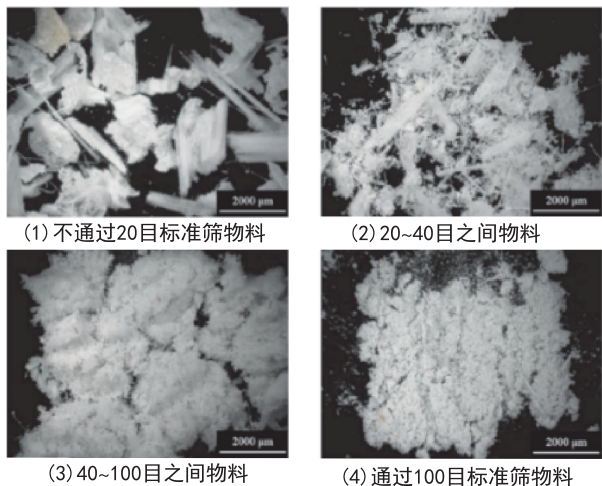


图4 不同尺寸玻璃钢物料形貌特征

杂质(芯材)方面,芯材的存在对不同应用产品的性能影响存在差异。芯材对人造板等本身采用大量植物纤维的产品性能无影响,Seyed 等^[14]以风电叶片破碎处理产物作为主要原料(图5)制备的人造板性能满足高密度纤维板(GB/T31765—2015)的相关要求,具有广泛应用于建筑领域的潜力。但当风电叶片破碎物料应用到混凝土行业时芯材的存在对产品力学性能提升产生了负面影响。^[15]退役风电叶片中芯材体积占比较高,因此在作为填料/增强料应用时,需要重点关注芯材对产品性能的影响,并根据影响情况决定是否对芯材进行分选处理,对退役风电叶片各物料进行分质利用。



图5 人造板制造流程示意图

(从左至右依次为废弃风电叶片、废弃风电叶片切割料、切割料粉碎出料、及人造板)

物理回收作为增强料或填料等回收利用产线建设方面,经笔者调研,目前东方电气集团东方锅炉股份有限公司及锡林浩特晨飞风电设备有限公司等企业已建成或者在建退役风电叶片物理回收产线(图6),此类回收方法相较梯级利用更易形成标准化产品、获得市场的接纳,预计将是未来几年内风电叶片规模化处置的可行方案之一。



图6 万吨/年风电叶片处置回收产线

1.2 热法处理回收

1.2.1 能量利用

风电叶片主要由玻璃纤维增强复合材料组成具有一定的热值^[16],因此部分企业采用将退役风电叶片与生活垃圾掺烧的方式进行处置,掺烧释放的

热能可用于发电或供热等,并适当处理燃烧后的灰渣。该方法处置成本低,但仅利用了退役风电叶片的热值,以玻纤等为主的无机组分灰渣未得到充分利用,造成了资源浪费。

1.2.2 能量与材料再循环利用

在能量利用的基础上,部分研究者将其与材料再循环相结合,研究了退役风电叶片流化床焚烧、水泥窑协同处置及热解回收的可行性。

(1) 退役风电叶片流化床焚烧回收热能与玻纤

退役风电叶片流化床焚烧方面,Pickering 等^[17]开发了一种流化床燃烧处理玻璃钢工艺及装置,玻璃钢破碎料在流化床中燃烧,并通过旋转筛分器分离出玻纤单丝进一步应用。使用回收的玻纤单丝替代部分(50%)短切纤维制备团状模塑料(用于汽车前照灯外壳和仪表面板等),对产品性能影响较小,且不影响原生产工艺。该研究为退役风电叶片能量及玻纤的回收与利用提供了参考。

(2) 退役风电叶片水泥窑协同处置回收热能与无机材料

退役风电叶片水泥窑协同处置方面,据威立雅中国官方消息^[18],威立雅将退役风电叶片切割破碎处理后作为原材料送入水泥回转窑,有效的减少了水泥生产过程中煤、硅石、石灰石及其他矿物原料的使用量,并已完成 100 多支叶片的处置工作。北京水泥厂有限责任公司^[19]将风电叶片生产边角料破碎后送入水泥回转窑焚烧系统进行焚烧,1 吨风电叶片边角料可减少约 0.84 吨煤用料。邯郸金隅太行水泥有限责任公司^[20]以退役风电叶片破碎料作为替代燃料开展了生产试验,研究表明,退役风电叶片破碎料作为替代燃料对系统稳定无影响、对熟料质量的影响可控,1 吨风电叶片破碎料可以减少煤炭(22.15 MJ/kg)使用量约 0.32 t。从现有研究结果来看,水泥窑协同处置具备工业化、规模化处置回收退役风电叶片的潜力。

(3) 退役风电叶片热解回收热能与玻纤

在厌氧条件下,退役风电叶片中的环氧树脂等有机物在一定温度下可被分解为热解油和/或气体,从而提取叶片中的玻纤。此外,热解回收玻纤表面可能存在部分残碳,一般退役风电叶片热解回收玻纤需要两步,第一步是热解提取玻纤,第二步

是高温氧化去除玻纤残碳。^[21]

早在 2005 年丹麦 ReFiber APS^[22]便开展了风电叶片热解研究,其将风电叶片切割成 25 cm×25 cm 尺寸大小,并在 500 °C 条件下热解,最终分离得到玻纤、金属和填充材料,但回收玻纤强度损失高达 50 %,回收玻纤潜在利用价值大大降低。该公司曾计划建设 5 000 t/年复合材料热解产线,并同步用于风电叶片热解处置回收,但是由于当时大部分复合材料废料采用了填埋(现在已禁止填埋)等较为经济的处理方式,热解回收竞争力不强,项目最终搁置。

近年来,研究者们持续开展风电叶片热解研究工作,该技术得到了进一步优化提升。韩昊亮等^[23]系统全面的研究了风电叶片破碎料的热解工艺参数。刘旭等^[24]从能量角度对退役风电叶片降级使用过程中产生的边角料的热解特性进行了研究,研究结果表明边角料热解无法实现自供热平衡,且所需额外补充的热能随着热解温度的升高而增加。Ma 等^[25]进一步提升了回收玻纤的纯净度,在 500 °C 高温水蒸气气氛下热解风电叶片,并在 450 °C 条件下氧化去除玻纤残炭,得到了拉伸强度为 828 MPa 的白色回收玻纤。Xu^[26]及李良钰^[27]等则对热解气氛进行了深入研究,研究结果表明在不同热解气氛下,环氧树脂分解、回收玻纤的力学性能及热转化产物纯在较大差异。Cheng 等^[28]研究了退役风电叶片在燃煤烟气中的热解过程,通过降低热解温度(450 °C)增加热解时间(5 h)提升了回收玻纤的力学性能保持率,获得了拉升强度~2 000 MPa 的白色回收玻纤,并制定了火电厂热解工艺的工业实施方案。

如前所述,风电叶片除了玻璃钢结构外还存在体积占比较大的夹芯结构(图 7),为探究夹芯结构的热解特性,Xu 等^[21]对比研究了风电叶片玻璃钢复合材料(风电叶片主梁)及风电叶片夹芯结构(风电叶片夹芯壳体及风电叶片腹板)的热解特性。研究表明,风电叶片夹芯结构中的芯材对风电叶片的热解特性和产物组成有显著影响,同时夹芯料热解时会产生大量苯甲酸(5 wt%),可能会引起热解设备及管道的腐蚀和堵塞。

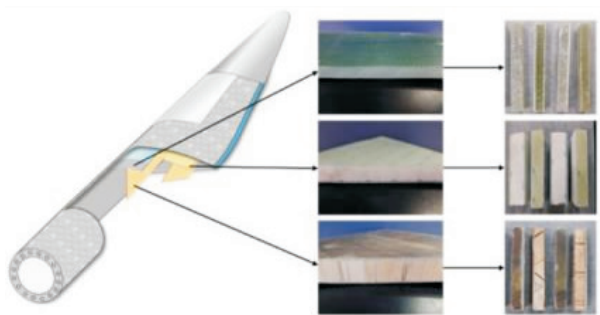


图7 风电叶片主梁帽及夹芯结构示意图

(从上至下依次为主梁、夹芯壳体及夹芯腹板)

整体来看,目前大部分风电叶片热解回收玻纤拉伸强度保持在 800 MPa 左右,相较于风电行业使用的 E-玻璃纤维 ~2 000 MPa 的拉伸强度指标,回收玻纤的拉伸强度下降依旧明显,仅能考虑降级使用。虽然部分研究表明通过降低热解温度可以获得与原始玻纤力学性能相近的回收玻纤,但热解反应时间需提升约 5 倍,在提升回收价值的同时,处置成本也大大的增加,技术经济性还有待进一步优化提升。但需要注意的是,热解技术是有机固废处置的共性关键技术,相较于其它技术,有利于实现多种固废协同处置,更易实现退役风电叶片处置规模化及产业化。

1.3 化学回收

风电叶片主要为玻璃纤维增强环氧树脂复合材料,Ahrens 等^[29]研究发现在催化剂作用下,环氧树脂中常见的 C-O 可发生断裂,进而回收得到双酚 A 及玻纤。但是如图 8 所示,一块长宽约 2.5 cm、重 5.13 g 的风电叶片块状物料在催化条件下,需要在 300 mL 的高压釜中反应 6 天,才能实现风电叶片基体树脂的完全分解。同时,解聚过程可能对回收玻纤的力学性能产生不利影响,影响回收玻纤的二次利用。

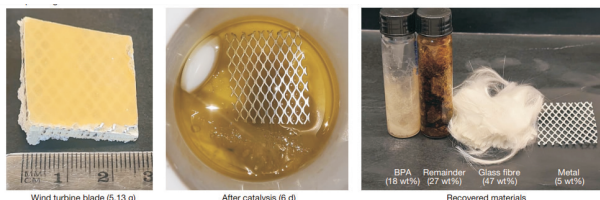


图8 风电叶片化学回收示意图

从目前的研究结果来看,退役风电叶片化学回收技术成熟度相对较低,目前主要还处于实验室研究阶段,反应条件苛刻,大部分化学回收催化体系

的效率无法满足工业化大批量处理的要求,更多的是进行可行性研究。虽然化学回收法工艺相对复杂,处理成本较高,但有望高价值的循环利用基体树脂材料和玻纤,回收利用的价值相对较高,该技术极有可能代表着退役风电叶片资源化利用的未来。

2 各处置回收技术生态环境及经济效益

2.1 各处置回收技术生态环境效益

如前所述,短期内具备退役风电叶片规模化处置回收能力的技术主要为物理回收法和热处理回收法,退役风电叶片规模化处置回收技术生态环境效益方面,Wei 等^[30]基于全球增温潜势参数,对不同复合材料废弃物处置方式的生态环境效益进行了评估,评估结果显示物理回收法产生的二氧化碳最少,而焚烧、流化床等技术不利于双碳目标的实现。张建川等^[16]在考虑替代利用的基础上,对物理回收法、热解法、水泥窑协同处置法及焚烧热能法进行了环境影响研究,研究结果表明:①处置过程中的 CO₂ 排放:水泥窑协同处置法>热解法>焚烧法>物理回收法;②考虑替代利用带来的碳减排效益后 CO₂ 净排放量:焚烧法>物理回收法>水泥窑协同处置法>热解法,其中物理回收法 CO₂ 净排放量趋近于 0,水泥窑协同处置法与热解法 CO₂ 净排放量为负值,具有一定的碳减排效益。

2.2 退役风电叶片处置回收技术经济效益

退役风电叶片回收技术经济效益方面,张建川等^[16]基于国内情况在假定运输距离为 400 km 的条件下,测算出物理回收法处置成本为 2 300 元/吨、替代碳酸钙填料的收益为 400 元/吨、净收益为 -1 900 元/吨;热解法处置成本为 5 700 元/吨、替代碳酸钙填料和短切玻纤的收益为 1 720 元/吨、净收益为 -3 980 元/吨;水泥窑协同处置法处置成本为 1 870 元/吨、替代煤等的收益为 404 元/吨、净收益为 -1 466 元/吨;焚烧热能法处置成本为 1 720 元/吨、替代建筑废弃物的热能收益为 150 元/吨、净收益为 -1 570 元/吨。可以发现,短期内具备退役风电叶片规模化处置回收能力的技术均无法依靠产品收益实现盈利,现有的退役风电叶片处置回收商业模式依旧需要收取一定的处置费。

进一步的,Liu 等^[31] 分析比较了不同增强材料(玻璃纤维或碳纤维增强热固性复合材料)制备的风电叶片的处置回收经济性。研究表明:①由于玻纤本身售价不高,以玻纤为增强材料的退役风电叶片处置回收时,处置成本对经济性影响较大,在众多具有工业化可行性的处置回收技术路线中,仅物理回收实现了盈利;②而由于碳纤维的高价值,处置成本对其影响较小,经济性主要体现在实现碳纤维高价值回收再利用,在众多具有工业化可行性的处置回收技术路线中,物理回收的净利润最低,比热解回收等技术低约 50 %。而作为处于实验室规模的技术——化学回收法的净收益最高(图 9)。

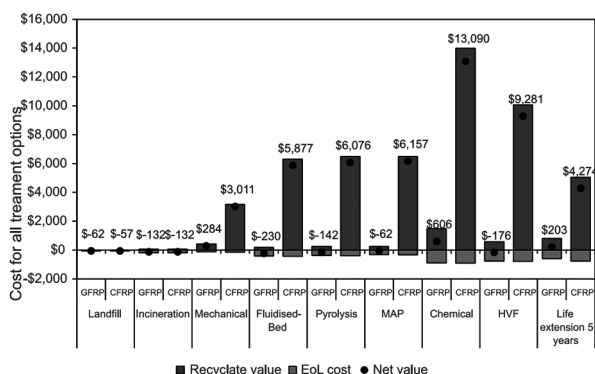


图 9 退役风电叶片不同材料各处置回收技术路线的经济性^[31]

3 结语

3.1 总结

随着早期风电机组使用寿命的到期,退役风电叶片将成为我国急需解决的新型固废,实现退役风电叶片规模化与效益化的处置回收,是各国关注和研究的重点。风电行业相关企业及相关科研单位一直在积极探索解决方案,但目前退役风电叶片处置回收行业仍处于起步阶段,尚未形成可规模化回收的理想技术方案。

现阶段物理回收法——粉碎再利用及热法处理回收——水泥窑协同处置技术成熟度高、生态环境效益相对较好,是现阶段具备工业化可行性的处置回收技术中的较佳选择;热法处理回收——热解技术相对成熟,是有机固废处置的共性关键技术,更易实现退役风电叶片处置规模化及产业化,但还需要进一步降低处置成本、提升整体经济性,或应

用到未来海上退役风电叶片等使用了碳纤维等更高价值增强材料的处置回收场景;热法处理回收——焚烧技术成熟,处置成本相对适宜,但造成了部分资源浪费,生态效益较差,建议仅作为风电叶片小批量处置手段;热法处理回收——流化床焚烧相较于与生活垃圾掺烧的方式虽然实现了玻纤的回收利用,但需投资建设特殊的流化床焚烧装置,导致投入成本较高;物理回收法——梯级利用技术难度低,但难以实现规模化,项目复制推广受限;化学回收技术成熟度较低,目前还主要处于实验室研究阶段,短期内化学回收难以成为退役风电叶片工业化回收的主流途径,但需要注意化学回收仍是最具高值化利用潜力的技术之一。

3.2 建议

环保、高附加值的资源化处理方式,能够为退役风电赋予新的价值,助力风电行业可持续地高速发展。因此,应对风电机组“退役潮”需要未雨绸缪,针对现有问题,建议政府及业界接下来从以下两个方面着手推进相关工作:

(1) 加强跨领域多方协作助力技术攻关。针对退役风电叶片回收行业的痛点、难点,加强跨行业合作,开展相关高校、科研机构、整机制造企业、风电开发企业及环保资源化利用企业联合攻关工作。加强与市政、建材、水泥协会等支撑部门的合作交流,增加利用途径,降低处理和回收成本,提高循环利用价值和经济效益。

(2) 国家有关部门及行业推进生态风电体系的建立。倡导风电机组制造企业在风电机组的设计、制造环节将全生命周期纳入考量,降低风电退役机组及其部件处理难度,推动实现风电全生命周期的绿色可持续发展目标,助力“碳达峰、碳中和”。

参考文献:

- [1] 夏云峰. 全球部分国家和地区 2023 年风电开发利用情况概览[J]. 风能, 2024(2): 60-62
- [2] 赵靛. 竞争加剧, 但中国风电未来可期[J]. 风能, 2024, (3): 42-44
- [3] 陈吉朋, 王计安, 张雨秋, 等. 废弃风电叶片材料回收与再制造技术的研究进展[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 328-335
- [4] 张效林, 杨梦豪, 曹靖, 等. 退役风电叶片资源化利用技术研究

- 进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1192-1203
- [5] 温亚菲. 废弃风电叶片资源化处置与利用工艺对比分析[J]. 再生资源与循环经济, 2023, 16(3): 41-43
- [6] 陈天啸. 风力发电叶片回收技术及发展展望[J]. 玻璃纤维, 2022, (6): 30-36
- [7] 王国威, 王清飞, 张越, 等. 老旧风电机组叶片回收调研分析报告[C]//中国农业机械工业协会风力机械分会. 第十届中国风电后市场交流合作大会论文集. 重庆海装风电工程技术有限公司, 2023: 8
- [8] 北京瑞和伟创控股有限公司. 复材包装[EB/OL]. (2024. 07. 02)[2024. 07. 02]. <https://www.mchn.com/>
- [9] WindEurope. Accelerating Wind Turbine Blade Circularity [EB/OL]. (2020. 05. 25)[2024. 07. 02]. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/accelerating-wind-turbine-blade-circularity/>
- [10] 刘美霞. FRP 废渣在木塑复合材料中应用的研究[D]. 济南大学, 2022
- [11] 杨立琳, 王冬至, 王瑾, 等. 废弃风电叶片纤维对磷建筑石膏材料性能影响[J]. 非金属矿, 2021, 44(6): 30-33
- [12] Lan T, Wang B, Zhang J, et al. Utilization of waste wind turbine blades in performance improvement of asphalt mixture[J]. Frontiers in Materials, 2023
- [13] 刘媛. 废弃玻璃钢破碎—分级资源化利用研究[D]. 陕西科技大学, 2017
- [14] Mamanpush S H, Li H, Englund K R, et al. Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites[J]. Waste management, 2018, 76: 708-714
- [15] Baturkin D, Hisseine O A, Masmoudi R, et al. Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete[J]. Resources Conservation and Recycling, 2021, 174
- [16] 张建川, 张前峰, 蔡红军. 风力发电复合材料叶片废弃物的几种处理方法分析[J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(3): 473-482
- [17] Pickering S J, Kelly R M, Kennerley J, et al. A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60: 509-523
- [18] 威立雅中国. 美国: 威立雅生产水泥, 为通用可再生能源公司的风力涡轮机叶片赋予第二生命[EB/OL]. (2020. 12. 10)[2024. 07. 02]: <https://www.veolia.cn/zh>
- [19] 曾文飞. 北京水泥厂废弃玻璃钢替代燃料项目控制研究[D]. 吉林大学, 2012
- [20] 冯俊玲, 宋国彭, 周立超. 风电叶片作水泥窑替代燃料的应用试验[J]. 水泥, 2023, (10): 17-20
- [21] Xu M, Ji H, Meng X, et al. Effects of core materials on the evolution of products during the pyrolysis of end-of-life wind turbine blades [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023
- [22] Kari L. Recycling wind [J]. Reinforced Plastics, 2009, 53(1): 20-25
- [23] 韩亮亮, 梁志刚. 真空热解在回收风电叶片中的研究[J]. 新技术新工艺, 2023, (9): 57-61
- [24] 刘旭, 吴小飞, 侯傲, 等. 退役风电叶片分级梯次处理技术初步研究[J]. 再生资源与循环经济, 2023, 16(6): 36-40
- [25] Ma Y, Du Z, Fang X, et al. Recycling Glass Fiber from Polyurethane Composite by Pyrolysis Strategy with High Mechanical Properties[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2671
- [26] Xu M, Ji H, Wu Y, et al. The pyrolysis of end-of-life wind turbine blades under different atmospheres and their effects on the recovered glass fibers [J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 251
- [27] 李良钰, 熊小鹤, 冯敬武, 等. 不同气氛下废弃风机叶片热转化产物研究[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 94-101
- [28] Cheng G, Yang S, Wang X, et al. Study on the Recycling of Waste Wind Turbine Blades[J]. Journal of Engineering Research, 2023, 11(3): 13-17
- [29] Ahrens A, Bonde A, Sun H, et al. Catalytic disconnection of C-O bonds in epoxy resins and composites [J]. 2023, Nature 617: 730-737
- [30] Wei Y, Hadigheh S A. Cost benefit and life cycle analysis of CFRP and GFRP waste treatment methods[J]. Construction and Building Materials, 2022, 348
- [31] Liu P, Meng F, Barlow C Y. Wind turbine blade end-of-life options: An economic comparison. Resources[J]. Conservation and Recycling, 2022, 180

欢迎投稿, 欢迎订阅!

面向多级可信协同的发电装备智慧物联体系设计及应用

徐思源¹ 李煜权¹ 郑文涛¹ 毕玲玲¹ 陈明仁^{2*}

1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001; 2. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要:针对发电装备制造企业的工业物联平台建设需求,提出包含平台层、网络层、感知层、设备层的“云-管-边-端”智慧物联体系架构,在保障设备物联接入、设备状态采集、设备行为控制、设备数据共享等基础能力的前提下,实现企业总部、区域中心、生产车间的多级可信协同与业务系统、网络规划、数据管理的边端受控自治。以某发电制造企业为例,验证了本架构的先进性与通用性,可支撑企业整合生产制造、节能减排、安全生产、设备运维等业务域存量与增量物联数据整合,沉淀数据资产,实现跨场景工业设备的互联互通与互操作。

关键词:云边协同; 边缘自治; 工业物联

中图分类号: TP311.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)01-0043-06

Design and Application of Industrial IoT Platform System for Power Generation Equipment Manufacturing Industry, Targeting Multi Level Trusted Collaboration and Edge Controlled Autonomy

XU Siyuan¹, LI Yuquan¹, ZHENG Wentao¹, BI Lingling¹, CHEN Mingren^{2*}

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China;

2. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: Aiming at the construction needs of industrial IoT platforms for power generation equipment manufacturing enterprises, a "cloud management edge end" smart IoT system architecture is proposed, which includes platform layer, network layer, perception layer, and equipment layer. On the premise of ensuring basic capabilities such as equipment IoT access, equipment status collection, equipment behavior control, and equipment data sharing, it realizes multi-level trusted collaboration and edge controlled autonomy of business systems, network planning, and data management for enterprise headquarters, regional centers, and production workshops. Taking a power generation manufacturing enterprise as an example, the progressiveness and versatility of this architecture are verified, which can support enterprises to integrate the inventory and incremental IOT data integration of business domains such as production and manufacturing, energy conservation and emission reduction, safety production, equipment operation and maintenance, precipitate data assets, and realize the interconnection and interoperability of cross scenario industrial equipment.

Key words: cloud edge collaboration; edge autonomy; industrial IoT

收稿日期: 2024-10-18

基金项目:四川省科技厅重点研发项目能源装备工业互联网安全与智能管理平台关键技术研究与应用(项目编号:2023YFG0114);东方电气集团用于工业应用赋能平台的统一物联关键技术研究及软件开发应用(项目编号:SC0023117);东方锅炉科研项目统一工业物联接入体系及应用研究(项目编号:3523067)。

作者简介:徐思源(1997—),男,2023年毕业于常州大学电子科学与技术专业,工学硕士,现任东方电气集团东方锅炉股份有限公司信息技术岗,主要从事网络与运维相关工作。

陈明仁(1996—),男,2022年毕业于电子科技大学计算机科学与技术专业,工学硕士,现任东方电气(成都)创新研究有限公司软件开发岗,主要从事平台软件研发相关工作。邮箱:chenmr0751@dongfang.com

制造业数字化转型是推进新型工业化、建设现代化产业体系的重要举措。^[1]随着发电装备制造企业数字化转型的持续推进,新增或重构单一业务场景应用系统的边际效应日趋凸显,转型的重心逐步向建设、运维、经营通用的平台底座系统转移。^[2]

在众多平台底座系统中,工业物联平台系统提供了一个集中管理和控制所有物联网设备的基础架构,能够实现物联数据的高效收集、处理和重构,是 OT 数据汇聚的基础,也是工业应用开发平台系统、工业知识平台系统、工业数据平台的基石。^[3]

一般地,制造业企业在扩大产能、提高企业产值时会优先选择实现产线自动化^[1-2,4],因此企业往往会自发产生物联接入需求,并建设若干点状、场景化的物联系统。在市场需求驱动下,阿里云、腾讯云、华为云等头部公有云服务商将物联系统的业务和接入、采集等公共能力解耦,相继研发了各自的物联平台,并依托其公有云业务对外租售 SAAS 化物联平台能力。^[5]得益于此,大量中小型制造业企业主动将数据接入公有云的物联平台,纳管了企业物联数据,降低了企业运维成本。^[6-8]

IT/ICT 企业在物联网平台建设层面的成功也促进了传统制造业物联平台的自主研发,航天云网 IoT 平台、树根互联 IoT 平台、海尔卡奥斯 IoT 平台相继应运而生并为企业数字化转型提供了重要支撑。上述平台的系统架构均按照“云-边”多层级设计,数据处理效率和边缘计算能力均可通过提升资源配置而相应提高,且均满足“信创”操作系统要求,主要区别体现在平台业务定位层面。其中,航天云网依托在航空航天设计、制造、运维过程中积累的经验与优势,更专注于提供以 MES 为核心,集产品协同设计、工艺规划、产品全生命周期管理、企业应用集成为一体的企业信息化解决方案,其 IoT 平台更关注产品的全生命周期;树根互联由于其三一重工的背景,在应用场景上会更加侧重在工业设备互联与互操作,其 IoT 平台更关注设备的互联互通与互操作,实现设备间的高效协同。海尔卡奥斯则依托海尔集团在白色家电行业的影响力,专注于提高流程性制造行业的产能,其 IoT 平台也更加偏向质量管理、计划排产等领域。

对于发电装备制造行业而言,设备物联接入、设备状态采集、设备行为控制、设备数据共享等功能仅仅也是物联平台的基础,发电装备制造业自身

存在的若干特征对物联平台提出了更高、更行业化的要求:一是,发电装备制造业大多属于离散制造,产品需在多个生产车间流转,存在顶层规划、统一管理的需求^[9-10];二是,发电装备制造业领域知识复杂,产品多为非标定制品,相应业务系统、网络服务、数据管理规范需具备扩展和自治能力。^[9-10]三是,发电装备制造业关系国家安全和国民经济命脉,物联平台系统将承载海量生产数据、运维数据、经营数据,平台系统应高可信、高安全且完全自主可控。^[11]

针对上述需求,本文设计并研发了一套面向多级可信协同与边端受控自治的发电装备制造业工业物联平台系统,能在保障设备物联接入、设备状态采集、设备行为控制、设备数据共享等基础能力的前提下,实现企业总部、区域中心、生产车间的多级可信协同与业务系统、网络规划、数据管理的边端受控自治。

2 多级可信协同与边端受控自治的智慧物联体系设计

2.1 总体架构

充分调研工业物联网^[12]、云边协同^[13-14]等领域的相关文献和公有云行业通用物联平台系统,结合发电装备制造企业客观物联需求和信息化现状,设计了可支撑多级可信协同与边端受控自治需求的“云-管-边-端”智慧物联体系架构,如图 1 所示。

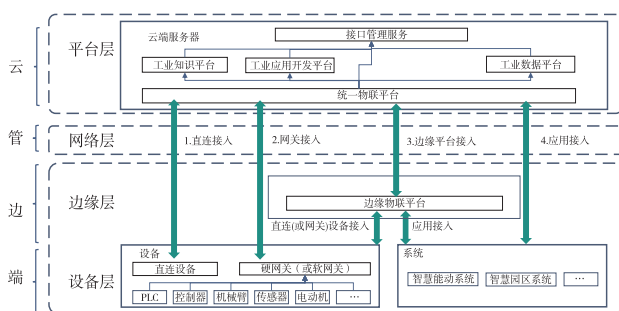


图 1 “云-管-边-端”智慧物联体系架构

(1)“云”

“云”即平台层,具体指部署在私有云或可信公有云环境中的统一物联平台及其支撑的上层应用。其通过云侧统一物联平台管理和运维各类感知层设备,实现物联终端的统一接入,并向工业数据中台、工业知识平台以及业务系统提供标准化数据服务。

(2)“管”

“管”即网络层,具体指电力光纤、无线专网、无线公网和因特网等远程通信网络及负责云边通信、源数据协同、物模型协同的云边管道服务。

(3)“边”

“边”即边缘层,具体指是指部署在工厂/车间侧具备边缘计算能力的边缘物联平台。其就近汇聚一定范围区域内各类工业设备状态数据,并基于物模型实现采集数据的标准化处理及上传,支持业务就地处理和区域自治。

(4)“端”

“端”即设备层,具体指各物联场景的底层硬件终端,包括传感器、执行器、控制器等设备。设备层作为物联的主体,可根据接入状态初步划分为新增设备和存量设备。其中,新增设备又可进一步划分为具备通信能力、可直接与边缘平台通信的直连设备和不具备通信能力、通过网关代理与边缘平台通信网关子设备;存量设备又可进一步划分为已被存量物联系统采集的系统设备和已被下级边缘平台采集的平台设备。

为统一描述并减少歧义,下文将“云-管-边-端”智慧物联体系中“云”侧统一物联平台系统和“边”侧边缘物联平台合称为发电装备制造业工业物联平台系统,简称为工业物联平台系统。

2.2 多级可信协同设计

在“云-管-边-端”多层级智慧物联体系架构的指导下,设计工业物联平台系统多级可信协同方案,如图2所示。

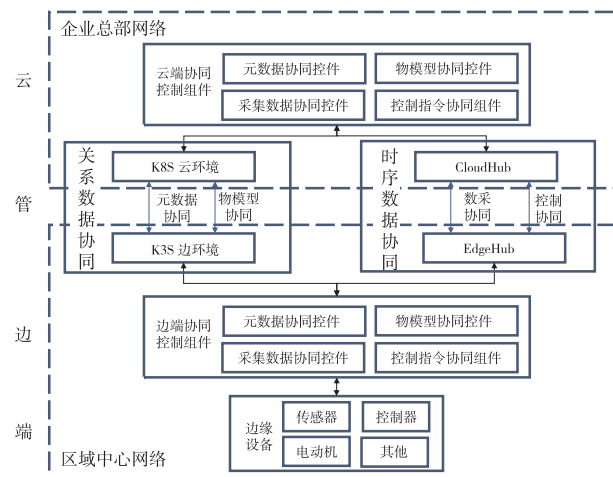


图2 工业物联平台系统多级可信协同

2016年10月,工业和信息化部印发《工业控制系统信息安全防护指南》^[15],指导工业企业开展工

控安全防护工作,并要求制造企业结合工业数据的分级情况,实施相应的防护措施。在发电装备制造企业网络规划中,通常按工业网与办公网划分企业网络,以确保生产控制系统的安全和稳定运行,防止潜在的安全风险扩散到整个生产环节。

为保证工业物联平台物联数据的连通性,通常需要在“云”侧的办公网中部署统一物联平台,汇集并聚合原始数据,形成可指导经营决策的数据资产;在“边”侧的工业网中部署边缘物联平台并直接采集/控制“端”侧终端设备;此外,基于P2P的路由或交换链路,将两平台通过虚拟专用加密信道连通,实现平台间的可信协同。

工业物联平台系统多级可信协同的关键是实现平台系统关系数据和时序数据的协同。在关系数据协同过程中,主要通过元数据协同和物模型协同的方式保障设备描述方式、控制方法、消息格式标准统一;在时序数据协同过程中,主要通过数采协同和控制协同保障设备的方式保障数据状态信息和控制指令的精准触达。待统一物联平台系统与边缘物联平台系统建立通信信道后,可分别通过云端协同控制组件和边缘协同控制组件控制协同服务的运行状态。

2.3 边端受控自治设计

在“云-管-边-端”智慧物联体系中,“边”“端”两侧直接与生产相关。发电装备制造企业产品的非标定制生产过程,也对边/端业务系统、网络规划、数据管理的自治能力提出了需求。

(1)业务系统边/端自治

边/端两侧存在众多与设备物联密切相关的系统,如:生产执行系统(Manufacturing Execution System, MES)、数据采集与监视控制系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)、仓储管理系统(Warehouse Management System, WMS)、能源管理系统(Energy Management System, EMS)等。其中, MES和SCADA系统受产品、工艺等影响较大,适宜在工艺专家的指导下,各边/端自行建设; WMS和EMS系统则相对通用,不同场景的关注点类似,适宜由企业统一建设。

(2)网络规划边/端自治

网络规划边端自治意味着在网络规划层面,边/端两侧需充分考虑业务系统的稳定性需求,灵活规划系统的交换链路。以SCADA系统为例,其

正常运行是产线生产加工的基础。为此类物联网系统规划网络时不得强依赖于“边”侧与“云”侧之间单一网络通道的连通性,适宜将网络的数据链路闭包在边缘二层交换网络中,通过设置冗余交换机并开启 STP 协议的方式,使核心通信链路完全位于数据链路层,以降低对网络层设备和服务的依赖。网络层通信则以带缓存重传机制的数据上报服务为主。

(3) 数据管理边/端自治

数据管理的边/端自治主要物联数据的按时、按量、按需协同。受“云-管-边-端”智慧物联体系的约束,“云”侧统一物联平台更多关注业务聚合信息,“边”/“端”侧则注重对设备的实时监控,因此并非所有的数据都应向上级物联平台上传、同步。以“边”侧边缘物联平台采集的设备原始遥测、遥信、遥视数据为例,“云”侧物联平台对上述数据的实时性一般不存在明确需求,因此该部分数据适宜在充分考虑网络带宽后,将关键数据压缩打包,错峰上传至“云”侧统一物联平台。

3 工业物联平台系统设计与实现

3.1 平台系统功能架构设计与实现

工业物联平台系统由“云”侧统一物联平台系统和“边”侧边缘物联平台系统两部分构成。功能上,统一物联平台系统与边缘物联平台系统功能类似,只存在少量功能差异;定位上,统一物联平台系统更注重提供集中式的数据存储、处理和分析能力,边缘物联平台系统更注重提供实时的数据处理和决策能力。设计平台系统功能架构,如图 3 所示。

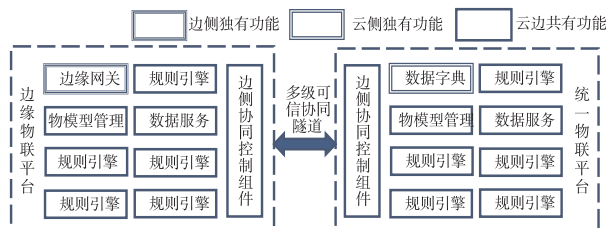


图 3 工业物联平台系统功能架构

工业物联网平台系统的功能组件包括云边共有功能组件、云侧独有功能组件以及边侧独有功能组件,共 3 类。云边共有功能组件主要包括,物模型管理、设备管理、协议转换、规则引擎、数据服务、数据概览、云边协同以及平台管理。上述组件主要提供物模型构建、设备接入、设备控制、非标报文转

化、数据预处理、数据储存以及统一数据服务等功能;云端独有功能组件主要指数据字典,其作为定义和控制数据一致性和准确性的组件,规定了对象的名称、数值类型、单位等信息,通过提供标准的行业数据字典接口,保证云/边物模型、设备管理、规则引擎等模块语义描述的标准统一;边缘端独有功能组件主要指边缘网关,其支持轻量化部署,并内置丰富工业协议,可以满足不同场景、不同类型设备终端数据采集需求,能高效、安全地将边缘侧设备信息转发至工业物联网平台。

3.2 平台系统技术架构设计与实现

工业物联平台在技术选型时应注重视图展示层、服务接口层、云原生层、存储层以及操作系统层的高可用。设计平台系统技术架构,如图 4 所示。

视图展示层	VUE.js、Element-Ui、CSS
服务与接口层	SpringBoot、SpringCloud、SpringSecurity、Flink、Paho、Milo、Swagger (Swagger可适配东方通TongESB等国产中间件)
云原生层	K3s、Docker、Harbor
存储层	分布式消息:Kafka(可替换为TongLINK/Q、金蝶天燕ADMQ等国产消息中间件) 缓存:Redis(可替换为TongRDS等国产缓存中间件) 关系库数据:MariaDB(可替换为达梦、人大金仓等国产数据库) 时序数据库:InfluxDB(可替换为TDengine等国产时序库)
操作系统层	Ubuntu 22.04、CentOS 7.6 (可替换为KylinV10、UOS 20等主流国产操作系统,且支持arm和x86等主流指令集架构)

图 4 工业物联平台系统技术架构

(1) 操作系统层

操作系统层为平台软件提供基础操作系统环境。平台采用当前主流操作系统 Ubuntu 和 CentOS。同时,为满足“信创”要求,操作系统可替换为 Kylin、UOS 等主流国产操作系统,支持 Arm 和 X86 等主流指令集架构。

(2) 存储层

存储层支撑物联网平台各个子系统的数据存储及数据交换。平台采用 Kafka 作为数据总线,解耦各个子系统之间的数据依赖,同时提供高可靠的数据交换能力;采用 Redis 作为实时数据缓存系统,提高数据读写时效性,降低各个子系统依赖;采用 PostgreSQL 存储平台业务数据;采用基于 Hadoop 和 HBase 的 OpenTSDB 作为时序数据库。同时,为满足“信创”需求,Kafka 可以替换为 TongLink/Q、金蝶天燕 ADMQ;Redis 可以替换为 TongRDS;PostgreSQL 可以替换为达梦、人大金仓等国产数据库;时序数据库可替换为 TDengine、InfluxDB 等。

(3) 云原生层

云原生层是平台服务微服务化、容器化的运行

时环境,为平台提供服务运行管理及运维基础保障。该层采用 K8s 作为容器管理平台;采用 Docker 承载容器服务实例;采用 Harbor 管理容器镜像;采用 Prometheus 监控服务状态。

(4) 服务与接口层

在服务接口层,平台采用主流的 Spring 技术栈,包括 SpringBoot、SpringCloud 和 SpringSecurity 等框架进行平台微服务组件及应用开发;采用 Flink 技术实现工业数据分析和指标计算;采用 Paho、Milo、Netty 实现设备数据接入及 OPC 数据采集;采用 Swagger 简化 API 设计和文档、测试的使用过程,提高了开发效率和团队协作能力。

(5) 视图展示层

视图展示层与平台前端系统、UI 风格、交互体验等密切相关。平台采用主流的 Vue 和 Element-Ui 前端技术框架开发;采用 Qiankun.js 微前端框架,将复杂的前端应用拆分为独立的功能模块,实现团队协同开发和部署,提高应用的可维护性和扩展性。

3.3 平台系统安全架构设计与实现

为保证平台系统运行的安全性、稳定性、可靠性,从身份鉴别、数据隔离、网络安全、安全接入四个层面规划平台安全架构(图 5)。

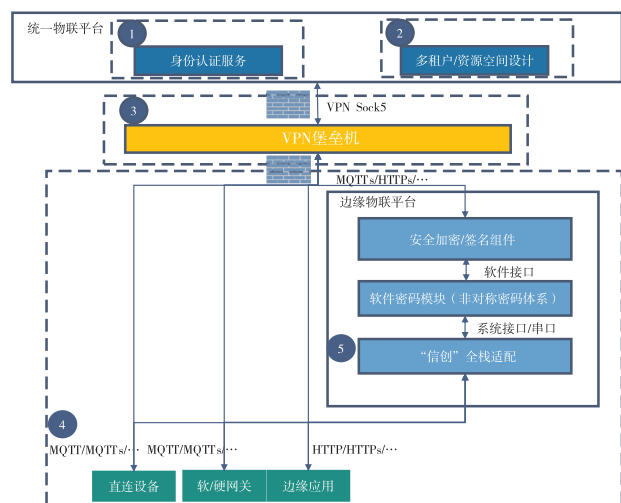


图 5 工业物联平台系统安全架构

(1) 访问安全

访问安全是指验证用户或实体的身份是否合法和可信的过程,通过身份鉴别可以确认用户的真实身份,并根据其权限级别授予适当的访问权限,可防止未经授权的用户访问系统,保护系统内部数据和功能的安全性。物联平台系统与统一身份认证系统(Identity and Access Management, IAM)集成,

对登录平台的用户进行身份鉴别,实现用户身份的真实性、合法性和唯一性校验。

(2) 数据安全

数据安全是指在系统中将不同级别、类型或权限的数据进行物理或逻辑上的分割,以防止未经授权的访问、修改或泄露。物联平台系统采用多租户、多资源空间设计,可实现租户、资源空间两级数据的安全隔离,提高数据安全程度。

(3) 网络及传输安全

在一个复杂的计算环境中,网络及传输安全是系统安全的基础和前提。计算机系统通常通过网络连接到其他设备和网络,这使得系统面临更多的风险和威胁。物联平台系统采用虚拟专有网络(VPN)接入云端物联平台服务器集群的堡垒机,并设置堡垒机的防火墙策略可实现网络层访问控制。

(4) 设备接入安全

物联设备通常包含一个或多个传感器、处理器和网络接口,可以收集和共享各种数据和信息。为保障物联设备的安全可通过加密通信的方式。平台采用密钥对以及 CA 证书,通过 TSL/SSL 协议对报文内容进行加密,保证接入设备的合法性和可信性,防止中间人从中间截断、获取报文,保护生产数据安全。

4 应用实践

4.1 场景介绍

选择某发电装备企业智慧物联体系建设专项作为本文面向多级可信协同与边端受控自治的发电装备制造企业统一物联平台系统的应用场景。该企业属于典型的离散制造企业,在成都、自贡、德阳多地设有办公地点和生产车间。该企业已建设的存量物联系统包括 EMS、DNC、EAM、智慧园区系统等;增量在建(或待建)的物联系统有 SCADA、MES、车间数字孪生系统。该企业希望在保证数据安全、系统稳定的条件下,实现物联存量数据的统一纳管并支撑增量物联系统的建设。

4.2 “1 总部-N 中心-M 分厂”智慧物联体系示范建设实践

依托于该发电装备制造企业的信息化建设规划与现状,按照“1 总部-N 中心-M 分厂”三层应用的架构搭建企业级工业物联平台。将成都总部标记为“云”侧,并部署统一物联平台,用以汇集各中

心的 OT 时序数据与业务数据;将自贡、德阳等中心标记为“边”侧,并部署边缘物联平台,提供采集终端工业设备状态数据以及下发工作指令的能力,支撑 SCADA、MES、车间数字孪生系统的研发;将各分厂及潜在客户服务场景标记为“端”侧,接入新增的直连设备或网关设备(含网关子设备),集成 EMS、DNC、EAM、智慧园区系统存量的系统设备。“1 总部-N 中心-M 分厂”智慧物联体系架构如图 6。

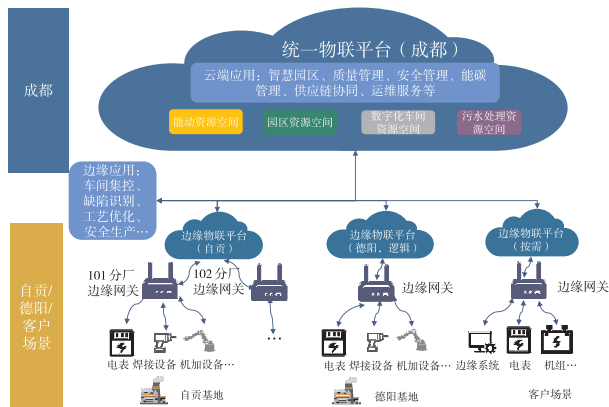


图 6 “1 总部-N 中心-M 分厂”智慧物联体系

通过推进“1 总部-N 中心-M 分厂”智慧物联体系示范建设,该发电装备制造企业共接入工业设备 1 443 台,接入测点 14 819 个,已正常解析 300 万条数据报文,接入设备类型涵盖生产制造、节能减排、安全生产、设备运维等多类工业设备。

“1 总部-N 中心-M 分厂”智慧物联体系建成后,不仅提供了一套多级可信协同的物联系统,也将边/端受控自治的理念通过企业标准传输给新建的物联系统(图 7)。规范了工业设备描述方式、控制方法、消息格式,使大量散布、无规则的物联接入有据可依,减少物联系统的研发与实施的成本,助力行业数据算法/机理模型的一站式开发与持续沉淀。

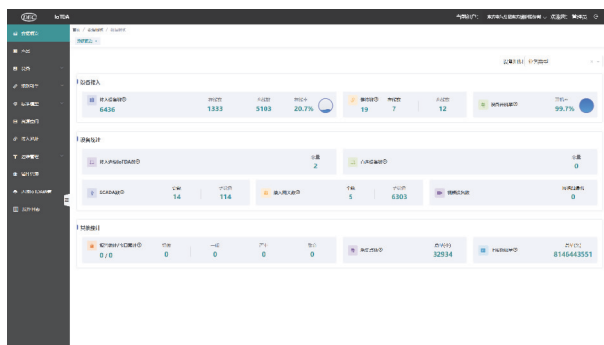


图 7 “云”侧工业物联平台接入情况数据概览

5 结语

针对发电装备制造企业的工业物联平台建设需求设计的“云-管-边-端”智慧物联体系架构,不仅可提供设备物联接入、设备状态采集、设备行为控制、设备数据共享等基础能力,还能可实现企业总部、区域中心、生产车间的多级可信协同与业务系统、网络规划、数据管理的边端受控自治。通过某发电装备制造企业慧物联体系建设专项,验证了本架构的先进性与通用性,可支撑企业整合生产制造、节能减排、安全生产、设备运维等业务域存量与增量物联数据整合,沉淀数据资产,实现跨场景工业设备的互联互通与互操作,助力企业高质量发展。

参考文献:

- [1] 《制造业数字化转型行动方案》审议通过[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(5): 40
- [2] 王柯懿, 王佳音, 盛坤. 工业互联网平台赋能制造业数字化转型能力评价体系研究[J]. 制造业自动化, 2021, 48(3): 259-268
- [3] 张建雄, 吴晓丽, 杨震, 等. 基于工业物联网的工业数据采集技术与应用[J]. 电信科学, 2018, 34(10): 124-129
- [4] 封伟毅. 数字经济背景下制造业数字化转型路径与对策[J]. 当代经济研究, 2022, 308(4): 105-112
- [5] 杨东升, 王道浩, 周博文, 等. 泛在电力物联网的关键技术与应用前景[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 107-114
- [6] 万众郝, 洋洋吴, 晓范陈. 基于物联网的智慧温室系统研究[J]. 智能城市应用, 2022, 5(4): 156-159
- [7] 王海柱, 赵瑞峰, 郭文鑫, 等. 基于物联网平台的低压配电台区数据采集方案[J]. 电气技术, 2021, 22(3): 80-83
- [8] 江达飞, 徐中贵. 基于腾讯物联网平台的教室节能控制器的设计[J]. 科技视界, 2019(9): 241-242
- [9] 张宇, 毛勇. 能源大数据的数字化能源系统在企业的应用[J]. 东方电气评论, 2024, 38(1): 74-80.
- [10] 张琳, 刘伯兴. 大型清洁高效发电设备智能车间系统设计[J]. 东方电气评论, 2022, 36(2): 50-56
- [11] 袁晓舒, 吴桐, 刘杨, 等. 能源装备的网络安全要素分析[J]. 东方电气评论, 2021, 35(4): 6-11
- [12] 陈武, 陈建安, 李燕萍. 工业互联网平台: 内涵、演化与赋能[J]. 经济管理, 2022, 44(5): 189-208
- [13] 田鹏新, 司冠南, 安兆亮, 等. 基于数据驱动的云边智能协同综述[J]. 计算机应用, 2023, 43(10): 3162-3169
- [14] 李波, 侯鹏, 牛力, 等. 基于软件定义网络的云边协同架构研究综述[J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(2): 242-257
- [15] 工业控制系统信息安全产业联盟灯塔实验室. 产业发展新势能: 读《工业控制系统信息安全防护指南》的管窥之见[J]. 自动化博览, 2016(12): 64-67

核电装备制造行业数字化工厂的 IPv6 网络设计

曹泽奇

东方电气(武汉)核设备有限公司, 武汉 430200

摘要:随着我国核电装备制造行业的快速发展,数字化工厂的建设成为提升产业竞争力的关键。本文针对核电装备制造行业数字化工厂的 IPv6 网络设计进行了深入研究。概述了核电装备制造行业数字化工厂的发展背景、现状及趋势,并对 IPv6 技术进行了详细介绍。接着,从网络架构、安全设计、管理设计等方面阐述了核电装备制造行业数字化工厂 IPv6 网络的设计方案。随后,通过实际案例展示了 IPv6 网络在核电装备制造行业数字化工厂中的应用效果。对 IPv6 技术在核电装备制造行业的未来发展进行了展望。本研究为我国核电装备制造行业数字化工厂的 IPv6 网络建设提供了有益的参考和借鉴。

关键词:核电装备; 数字化工厂; IPv6 网络; 设计; 应用

中图分类号:F416.6

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)01-0049-06

IPv6 Network Design for Digital Factory in the Nuclear Power Equipment Industry

CAO Zeqi

(Dongfang Electric(Wuhan) Nuclear Equipment Co., Ltd., 430200, Wuhan, China)

Abstract: In the burgeoning field of nuclear power equipment manufacturing, the advent of digital factories heralds a transformative era, leveraging the prowess of IPv6 technology to revolutionize network infrastructure. This study delves into the intricacies of designing an IPv6 network tailored for the digitalization of nuclear power equipment factories, encapsulating a blend of technological innovation and strategic foresight. The research commences with an exploration of the historical trajectory and current landscape of digital factories within the nuclear sector, underscoring the imperative for a robust, scalable, and secure network framework. IPv6, with its expansive address space and enhanced security features, emerges as a cornerstone in this architectural endeavor. The methodology encompasses a meticulous analysis of network architecture, security protocols, and management strategies, enriched with detailed case studies from leading nuclear equipment manufacturers. These case studies illuminate the practical implementation and operational nuances of IPv6 networks, offering a nuanced perspective on their efficacy and challenges. The findings reveal a promising trajectory for IPv6 integration, promising not only enhanced connectivity and security but also paving the way for future innovations in smart manufacturing. As the nuclear industry strides towards a more interconnected and intelligent future, the role of IPv6 in shaping this evolution is both profound and indispensable.

Key words: nuclear power equipment; digital factory; IPv6 network design; smart manufacturing; network security

收稿日期:2024-08-15

作者简介:曹泽奇(1989—),男,2011年毕业于华中科技大学电气与电子工程系电气工程及其自动化专业,本科,工程师。现任东方电气(武汉)核设备有限公司技术部网信管理岗,主要从事网信管理、网信技术工作。

核电装备制造行业,作为我国高端制造业的璀璨明珠,承载着国家能源安全和工业现代化的双重使命。在这一宏伟蓝图中,数字化工厂的建设犹如一艘破浪前行的巨轮,不仅能够有效提高生产效率,降低生产成本,更是推动行业向智能化、网络化、绿色化转型的关键引擎。

近年来,随着“中国制造 2025”战略的深入实施,核电装备制造行业迎来了前所未有的发展机遇。数字化技术的广泛应用,使得传统制造模式得以革新,生产流程更加高效、精准。

数字化工厂的建设,不仅仅是技术的升级,更是管理理念和生产模式的深刻变革。在这一过程中,数据成为了新的生产要素,智能化的生产设备和系统成为了新的生产力。

数字化工厂的建设还涉及到网络基础设施的升级。IPv6 技术的引入,为数字化工厂提供了更为广阔的网络空间和更高的网络速度,确保了数据传输的安全性和稳定性。

展望未来,核电装备制造行业数字化工厂的建设将更加注重智能化和绿色化的发展。5G 技术的融合应用,将为数字化工厂带来更快的数据传输速度和更低的延迟,推动智能制造向更高层次迈进。^[1]同时,随着工业互联网技术的不断成熟,数字化工厂将实现更高效的生产调度和更智能的资源配置,为行业的可持续发展注入新的动力。

1 IPv6 技术概述

IPv6 技术,作为互联网协议的第六版,标志着网络技术的一次重大飞跃。相较于其前身 IPv4,IPv6 不仅在地址空间上实现了质的飞跃,从 32 位

扩展到了 128 位,理论上可提供的地址数量达到了 3.4×10^{38} 个,这一数字足以满足未来数十年的地址需求。^[2]这种巨大的地址空间扩展,为物联网、5G 等新兴技术的广泛应用提供了坚实的基础,使得每一个设备都能拥有独立的 IP 地址,从而实现更加精细和高效的数据交互。^[1]

在网络速度方面,IPv6 通过简化数据包头结构,减少了路由器处理数据包的时间,从而提高了数据传输的效率。IPv6 支持更大的数据包,这不仅减少了数据包的数量,还降低了网络拥塞的可能性,进一步提升了网络的整体性能。^[3]

安全性是 IPv6 的另一大亮点。IPv6 内置了对 IPsec 协议的支持,这一特性为数据传输提供了端到端的安全保障。通过加密和认证机制,IPv6 能够有效防止数据在传输过程中的窃听、篡改和伪造,这对于核电装备制造行业数字化工厂而言,是确保生产数据安全和系统稳定运行的关键。^[4]

IPv6 的部署和应用,也受到了国家政策的大力支持。随着“中国制造 2025”战略的深入实施,IPv6 作为推动智能制造和工业互联网发展的重要技术,其推广和应用被视为提升我国制造业核心竞争力的关键举措。^[5]在这一背景下,核电装备制造行业数字化工厂的 IPv6 网络设计,不仅是对技术升级的响应,更是对国家战略的积极践行。^[6]

IPv6 技术以其巨大的地址空间、高效的网络速度和强大的安全特性,为核电装备制造行业数字化工厂的发展提供了强有力的技术支撑。随着 IPv6 技术的不断成熟和广泛应用,我们有理由相信,它将在推动核电装备制造行业数字化转型中发挥越来越重要的作用。^[7]

表 1 IPv4 与 IPv6 对比

特性	IPv4 情况	IPv6 改进情况	对核电装备制造行业数字化工厂的影响
地址空间	32 位,约 43 亿个地址	128 位, 3.4×10^{38} 个地址	实现每个设备独立 IP,支持物联网和 5G 技术广泛应用,提高数据交互精细度和效率
网络速度	数据包头复杂,路由器处理时间较长	数据包头简化,减少处理时间	提高数据处理能力,增加生产效率,提升市场竞争力
安全性	无内置安全特性,需额外配置 IPsec 等安全协议	内置 IPsec 支持,提供端到端安全保障	确保生产数据安全和系统稳定运行,防止数据窃听和篡改

2 核电装备制造行业数字化工厂 IPv6 网络设计

2.1 网络架构设计

在核电装备制造行业数字化工厂的网络架构设计中,IPv6 技术的引入不仅是对传统 IPv4 网络的升级,更是对整个工厂智能化、网络化转型的重要支撑。网络拓扑的设计,首先考虑的是如何实现高

效的数据传输和设备互联。在这一过程中,星型拓扑因其易于管理、扩展性强等特点被广泛采用。^[4] 具体而言,核心交换机作为网络的中心节点,连接着各个分布式的工控机和服务器,形成了一个以核心交换机为中心的星型结构。这种结构不仅保证了数据传输的稳定性,也为未来的网络扩展预留了空间。

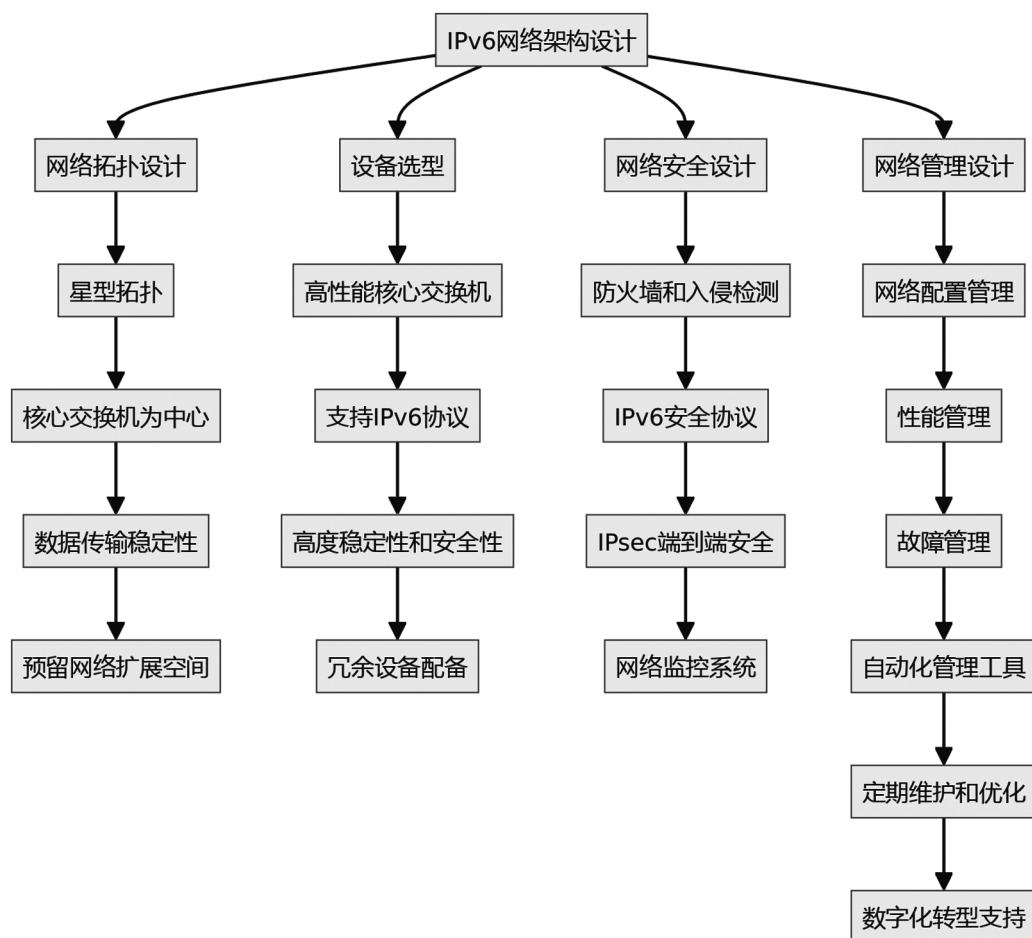


图1 IPv6 网络设计框架

设备选型方面,考虑到核电装备制造行业对网络设备的可靠性、安全性要求极高,因此在选择网络设备时,必须确保设备具备高度的稳定性和安全性。核心交换机应选择支持 IPv6 协议的高性能设备,这些设备不仅能够提供足够的带宽,还应具备强大的数据处理能力和完善的安全防护机制。^[3] 为了确保网络的稳定运行,还应配备冗余设备,以应对可能的设备故障。

在网络安全设计方面,除了传统的工控防火

墙、入侵检测系统等安全设备外,还应考虑采用基于 IPv6 的安全协议,如 IPsec,以提供端到端的安全通信。同时,网络监控系统的建立也是不可或缺的,它能够实时监控网络状态,及时发现并处理异常情况,确保网络的稳定运行。^[4]

网络管理设计方面,应建立一套完善的网络管理体系,包括网络配置管理、性能管理、故障管理等。通过自动化工具,可以实现对网络设备的远程配置和监控,大大提高了网络管理的效率和准

确性。还应定期对网络进行维护和优化,以适应不断变化的网络需求。^[8]

2.2 网络安全设计

在核电装备制造行业数字化工厂的 IPv6 网络设计中,网络安全设计占据至关重要的地位。这一设计不仅需要确保网络的稳定运行,还需防范潜在的安全威胁,以保障核电装备生产的安全性和可靠性。网络安全设计的核心组成部分包括工控防火墙、入侵检测系统(IDS)等关键技术。

工控防火墙作为网络安全的第一道防线,其设计需充分考虑核电装备制造行业的特殊性。工控防火墙的配置应基于深度包检测(DPI)技术,实现对网络流量的精细化管理。通过设置特定的访问控制列表(ACL),工控防火墙能够精确控制哪些 IP 地址和端口可以访问网络资源,从而有效隔离潜在的恶意流量。^[9]工控防火墙还应支持 IPv6 地址的过滤,确保只有合法的 IPv6 流量能够进入网络,这一功能对于防范基于 IPv6 的新型网络攻击尤为关键。^[2]

入侵检测系统(IDS)的设计也是网络安全设计的重要环节。IDS 能够实时监控网络流量,识别并响应潜在的网络攻击。在核电装备制造行业数字化工厂中,IDS 的设计应采用基于行为分析的检测技术,通过建立正常网络行为的基准模型,IDS 能够识别出偏离正常模式的异常行为,及时发出警报并采取相应的防御措施。^[10]IDS 可以通过分析网络流量中的数据包特征,识别出常见的攻击模式,如端口扫描、SYN Flood 攻击等,并自动触发防御机制,如流量清洗、IP 封锁等。^[3]

网络安全设计还应包括安全审计和日志管理系统的部署。这些系统能够记录网络设备的操作日志,为安全事件的调查和分析提供重要依据。通过定期审计网络日志,管理员可以及时发现并修复安全漏洞,防止潜在的安全威胁演变为实际的网络攻击。^[5]安全审计系统可以监控网络设备的操作行为,如配置更改、用户登录等,一旦检测到异常操作,系统将自动记录并通知管理员进行处理。^[4]

在实施网络安全设计时,还需考虑网络的冗余和容错能力。通过部署冗余的网络设备和链路,可

以确保在单点故障发生时,网络仍能保持正常运行。通过配置双机热备的网络设备,当主设备发生故障时,备份设备能够立即接管网络服务,保证网络的连续性和稳定性。^[8]网络设计还应考虑灾难恢复计划,确保在极端情况下,如自然灾害或人为破坏,网络能够迅速恢复运行。^[11]

2.3 网络管理设计

在核电装备制造行业数字化工厂的 IPv6 网络管理设计中,网络监控与故障处理是确保系统稳定运行的关键环节。网络监控系统的设计应充分考虑核电行业的特殊性,采用先进的监控技术,如基于 IPv6 的网络流量分析、实时性能监控等,以实现对网络状态的全面、实时监控。通过部署高性能的网络监控设备,结合智能分析算法,可以实时捕捉网络中的异常流量,及时发现潜在的安全威胁。^[2]

故障处理机制的设计则需具备快速响应和自动恢复的能力。在核电装备制造行业,任何网络故障都可能导致严重的生产中断,因此,故障处理系统应具备高效的故障定位和恢复策略。通过建立详细的故障数据库,结合机器学习技术,可以实现故障的快速识别和分类,进而触发预设的故障处理流程,如自动切换备份链路、重启故障设备等,以最小化故障对生产的影响。^[3]

网络管理设计还应考虑到未来的扩展性和灵活性。随着核电装备制造行业的不断发展,网络需求也将不断变化。因此,网络管理系统应具备良好的模块化设计,支持动态添加新的管理功能,如基于 5G 的工业互联网应用、智能制造技术的集成等。^[1]这种前瞻性的设计不仅能够满足当前的需求,还能为未来的技术升级和应用拓展提供坚实的基础。

3 核电装备制造行业数字化工厂 IPv6 网络实施

3.1 网络设备部署

在网络设备的部署过程中,采用了模块化的设计思路,将网络设备按照功能和性能进行分类,并根据实际需求进行组合和配置。在核心层,配置了多台高性能路由器,并通过负载均衡技术实现流量的均匀分配,以提高网络的整体性能。在汇聚层,

配置了多台智能交换机,并通过虚拟局域网(VLAN)技术实现网络的逻辑隔离,以提高网络的安全性和管理效率。

还采用了自动化部署工具,如 Ansible 和 Puppet,这些工具能够实现网络设备的快速配置和自动化管理,大大提高了部署效率和准确性。在实际部署过程中,首先在实验室环境中进行了模拟测试,确保网络设备的配置和性能达到预期要求,然后才在生产环境中进行实际部署。

在整个部署过程中,始终坚持以需求为导向,不断优化网络设计方案,确保网络的高效运行和用户的良好体验。通过一系列的精心设计和严格实施,成功地完成了 IPv6 网络设备部署任务,为工厂的数字化转型奠定了坚实的基础。

3.2 网络配置与调试

在网络设备的配置上,使用了无状态地址自动配置(SLAAC)和动态主机配置协议版本6(DHCPv6)相结合的方式,既保证了地址的自动分配,又实现了地址的动态管理。还对网络设备进行了详细的配置,包括路由协议的优化、访问控制列表(ACL)的设置以及网络监控工具的部署,确保了网络的高效运行和安全防护。

在调试阶段,采用逐步验证的方法,从接入层开始,逐层向上推进,确保每一层网络的连通性和性能。使用网络性能分析工具,如 Wireshark 和 iperf,对网络的吞吐量、延迟和丢包率进行详细的测试。通过这些测试,发现并解决了多个潜在的网络瓶颈问题,如链路拥塞和设备性能不足等。

表2 网络测试结果

测试项目	预期结果	实际结果
吞吐量/Gbps	>10	12
延迟/ms	<10	8
丢包率/%	<0.1	0.05

通过上述的配置与调试,成功地构建了一个高效、稳定且安全的 IPv6 网络环境,为核电装备制造行业数字化工厂智能化发展奠定了坚实的基础。这一过程中,不仅积累了宝贵的实践经验,还对未来的网络技术发展充满了期待。相信随着技术的不断进步,核电装备制造行业的数字化工厂将迎来

更加广阔的发展空间。

4 结语

审视当前全球互联网技术的演进脉络。随着物联网(IoT)设备的激增,IPv4 地址的枯竭已成为不争的事实,而 IPv6 以其近乎无限的地址空间,正逐渐成为新一代网络技术的基石。在这一背景下,核电装备制造行业,作为国家战略性新兴产业的重要组成部分,其数字化转型不仅关乎生产效率的提升,更涉及到国家能源安全与工业自主可控的深层次考量。

具体而言,IPv6 网络在核电装备制造行业的应用,体现在其对大规模设备互联的支持能力上,每一环节都依赖于稳定、高效的网络通信。IPv6 的引入,不仅能够满足这些设备对 IP 地址的巨大需求,更通过其内置的安全机制,如 IPsec 协议的支持,为数据传输提供了更为坚实的安全保障。

进一步地,随着 5G 技术的商用化步伐加快,IPv6 与 5G 的结合将为核电装备制造行业带来前所未有的变革。5G 的高速度、低延迟特性,与 IPv6 的大规模地址分配能力相结合,将使得远程监控、实时数据分析成为可能,极大地提升了数字化工厂的运营灵活性和响应速度。通过部署基于 IPv6 的 5G 网络,数字化工厂可以实现对关键设备的实时监控,一旦检测到异常,系统可以立即启动应急预案,有效避免了潜在的安全风险。

不能忽视的是,随着人工智能(AI)技术在工业领域的深入应用,IPv6 网络将成为连接 AI 系统与物理世界的重要桥梁。在核电装备制造行业,AI 可以用于预测性维护、优化能源使用效率等多个方面。而这一切,都建立在稳定、高效的网络基础设施之上。IPv6 网络,以其卓越的扩展性和安全性,为 AI 技术的广泛应用提供了坚实的基础。

核电装备制造行业数字化工厂 IPv6 网络的发展趋势,不仅体现在技术层面的升级换代,更涉及到整个行业生态的重塑。从提升生产效率到保障能源安全,从实现远程监控到推动 AI 技术的深度融合,IPv6 网络的应用前景广阔,潜力巨大。对于我国核电装备制造行业而言,积极拥抱 IPv6,不仅是

顺应技术发展的必然选择,更是实现产业升级、提升国际竞争力的关键一步。

参考文献:

- [1] 童辉,赵阳,庄莉. 核电数字孪生系统 DCS 初始化技术研究[J]. Instrumentation and Equipments,2023,11:248
- [2] 万晓霞,焦智伟,刘名轩,等. 工业互联网应用综述[J]. 数字印刷,2021,2:1-26
- [3] 肖中杰. IPv6 网络过渡虚拟仿真实验设计与实现[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(6):43-48
- [4] 张斌,张体谅,刘新茂,等. 基于校园网 IPv6 全光网络研究与分析——以伊犁师范大学为例[J]. Computer Science and Application,2023,13:2408
- [5] 常元. 虚拟防火墙研究设计实现 IPv6-to-IPv4[D]. 兰州交通大学, 2021
- [6] Su F, Yuan J. Emerging and disruptive technologies, nuclear risk, and strategic stability [J]. European Leadership Network. Testo disponibile al sito: <https://www.europeanleadershipnetwork.org/report/emerging-and-disruptivetechologies-nuclear-risk-and-strategic-stability-chinese-literature-review/> (ultimo accesso 31/03/2023), 2022:1-16
- [7] 宋新远. 智能制造与工业互联网技术架构解析[J]. 科学技术创新, 2021, 25:179-181
- [8] 梁勇,刘承启. IPv6 远程监控网络无状态双向通信方法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(2):119-123
- [9] 李玲. 基于 ATN/IPS 的通信网络设计与优化[J]. 长江信息通信, 2021, 34(6):186-190
- [10] 潘树龙. 基于轻量级操作系统和 IPv6 的物联网智能通信单元设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2021, 12:76-80
- [11] 杨创. 工业现场网络与 IPv6 骨干网协议转换装置的研究与实现[D]. 重庆邮电大学, 2021

集团要闻

东方电气木垒 100 万千瓦风电项目成功并网

2024 年 12 月 31 日,国内单体容量最大的山地风场——东方电气木垒 100 万千瓦风电项目成功并网,该项目不仅是国内单体容量最大百万千瓦级山地风电项目,更是响应国家“双碳”目标、推动能源结构优化的重要实践。项目建成后,年发电量可达 7 亿度,可以满足 7 个木垒县的用电需求,可节约标准煤约 91 万吨,减少二氧化碳排放约 263 万吨,有效减少大气污染,促进能源结构调整,为构建清洁低碳安全高效的能源体系注入了新的活力。

东方电气木垒 100 万千瓦风电项目采用 3 款东方电气自主研发的陆上风电机组,其中 10 兆瓦机型更是“沙戈荒”大基地“爆款”,高效率高可靠,强抗污强防沙,已获超 500 万千瓦订单。

东方电气系列技术为风场后续高效稳健运行提供了坚强支撑。采用先进的构网型风机和构网型储能技术,可实现独立组网,具备孤岛运行能力,并能在并网和离网两种运行方式中灵活切换。采用先进的分瓣式塔筒工艺技术,可实现堆叠或单片运输,增强运输的灵活性和适用性。采用混塔技术,在海拔较低的位置增加风机高度从而捕获更好的风,助力新疆打造国家能源资源战略保障基地和大型清洁能源基地。

来源:东方电气网

列管式换热器薄壁管板孔加工方法的探索研究

蒋志海 崔琳雨 杨军 钟正彬

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

摘要:随着全球碳达峰、碳中和进程的推进,国家生态环境治理力度不断加大,工业废液、废气排放标准要求越来越高。焚烧是处理石化行业废液、废气的有效方式之一,气气换热器是顺酐焚烧炉中锅炉烟气与顺酐废气之间进行热交换的重要元件,具有压力低、体积大、壁厚薄、密封性高的特点。薄壁管板上管孔加工质量是影响换热器管板与钢管之间封口焊质量的重要因素之一,是亟待解决的技术难题。本文通过工艺试验,探索研究列管式换热器薄壁管板管孔加工的最优方案,保证气气换热器封口焊质量。

关键词:薄壁管板; 管孔加工; 工艺试验

中图分类号: TG457.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)01-0055-04

Study on Machining of the Tube Holes on the Thin-wall Tubesheet in Tubular Heat Exchanger

JIANG Zhihai, CUI Linyu, YANG Jun, ZHONG Zhengbin

(Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: Along with the advancement of the global carbon peak and carbon neutral, the national ecological environment management strength unceasingly enhances, the industrial waste liquid and the waste gas discharge standard request is getting higher and higher. Incineration is one of the effective ways to treat waste liquid and waste gas in petrochemical industry. Gas - gas heat exchanger is an important component, which exchanges heat between boiler flue gas and waste gas in maleic anhydride incinerator. It has the characteristics of low pressure, large volume, thin wall thickness and high sealing property. The machining quality of the tube holes on the thin - wall tubesheet is one of the important elements that affect the quality of the seal welding between the tubesheet and the tube. In this thesis, the optimum scheme of machining the tube holes on the thin-wall tubesheet is studied to ensure the seal welding quality between the tubesheet and the tube.

Key words: thin-walled tubesheet; the machining of the tube holes; process test

随着全球碳达峰、碳中和进程的推进及国家生态环境治理力度不断加大,工业废液、废气排放标准要求越来越高。焚烧是处理石化行业废液、废气的有效方式之一,气气换热器是顺酐焚烧炉中锅炉烟气与顺酐废气之间进行热交换的重要元件。气气换热器布置在烟风道内,管板与烟道、换热管与顺酐尾气烟道分别形成不同的通道,利用烟气的热

量对顺酐尾气进行预热,具有压力低、体积大、壁厚薄、密封要求高的特点。气气换热器由管板、隔板和换热管组成,管板与换热管之间封口焊保证密封。由于管板壁厚薄、管孔数量多,管孔的加工方法会影响管孔加工质量,从而影响换热管穿设,甚至影响管板与钢管之间封口焊的质量,故探索研究一种合适的管孔加工法是亟待解决的技术难题。

收稿日期: 2024-10-22

作者简介:蒋志海(1986—),男,2010年毕业于湖南大学材料成型及控制工程专业,本科,高级工程师。现任职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司工艺研发部。

1 项目背景

以东方锅炉某项目为例(见图1),该列管式气换热器由管板、隔板和换热管组成,总尺寸为7 500 mm×4 980 mm×3 740 mm,采用模块化制造,管板规格为 δ 20/2 490 mm×2 580 mm/SA-387GR91Type1、隔板规格为 δ 6/2 490 mm×2 508 mm/12Cr13、换热管为 ϕ 60×2.5/SA-213T91Type1。为使换热效率最大化,管孔呈顺列或错列分布,管

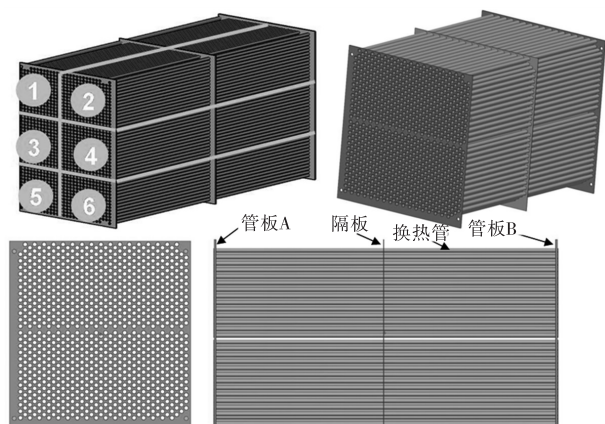


图1 管箱结构示意图

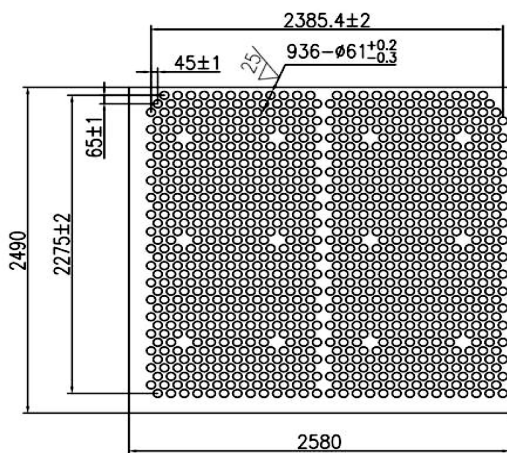


图2 管板结构示意图

本工艺试验针对管孔加工,从精度、效率及设备配置等关键维度开展对比分析,以确定最优管孔加工方案。如图3所示,实验选用尺寸为500 mm×350 mm的管板试件,其开孔参数(节距90/65 mm,孔径 $\phi 61^{+0.2}_{-0.3}$)与产品一致。涉及的加工方法涵盖钻孔、钻孔+镗孔、激光切割、水切割及气割,配套设备包括摇臂钻床、数控龙门镗铣床、数控高速平面钻床、数控激光切割机与水切割机、以及半自动等离

板与换热管之间封口焊保证密封。单台炉管板孔21 444个,隔板孔15 822个,共8台炉。项目面临管板壁厚薄、管孔数量多、管板加工精度要求高及交货期紧等多重挑战。

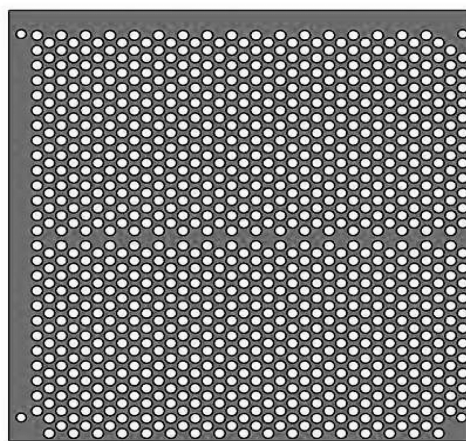
2 工艺试验

单个管箱中管板结构如图2所示,规格为 δ 20/2 490 mm×2 580 mm、材质为SA-387GR91Type1,管孔呈错列分布,横向、纵向节距分别为90 mm和65 mm,管孔为 $\phi 61^{+0.2}_{-0.3}$ mm,单台炉管板加工管孔21 444个。项目实施的难点包括:

(1)管板加工变形控制:本项目80%以上的机加工作量聚焦于管板管孔加工,由于管板尺寸大且壁厚薄,有效控制管孔的加工变形成为一个难题。

(2)管孔加工精度要求高:管孔加工精度要求严苛,传统加工设备难以满足此高标准。

(3)生产周期紧张:鉴于管孔数量庞大,加之制造周期紧迫,对生产效率和组织管理能力提出了更高要求。



子气割机。

鉴于摇臂钻床钻孔依赖人工划线与找正,精度与效率受限,设备稳定性差,且须额外铰孔以提升光洁度;半自动等离子气割虽可行,但加工面粗糙,精度不足。因此,本研究聚焦于数控高速平面钻床钻孔、数控龙门镗铣床钻孔、数控激光与水切割机割孔的性能,通过系统地比较加工精度、管孔加工效率及成本效益,旨在选出最优加工方法。

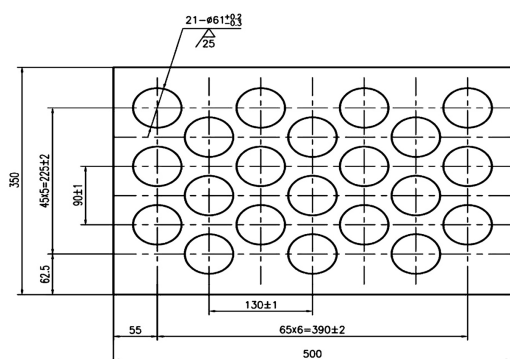
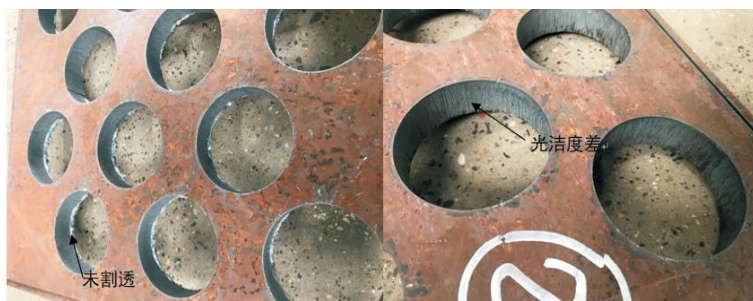


图3 管板试件示意图

2.1 数控激光切割机割孔

在数控激光切割机割孔试验中(图4a、b),观察到不同功率设置下的加工效果差异明显。当功率设定为12 000 kW·h,首次加工虽管孔光洁度高但未能完全穿透材料,调整激光聚焦点后虽能穿透,但光洁度显著下降。功率提高至20 000 kW·h,管孔光洁度沿厚度方向不均,切入面优于切出面,并伴有熔渣需打磨处理。单个孔加工时间约为1分钟。



(a) 12 000 kW 激光切割机割孔实物图



(b) 20 000 kW 激光切割机割孔实物图

图4 激光切割实物图

2.2 数控高速平面钻床钻孔

采用数控高速平面钻床配合定制U形钻头进行 $\phi 61$ 管孔加工,如图5所示,管孔光洁度和精度满足图纸要求,需打磨清理毛刺。单个孔钻孔时间约为2分钟。



图5 数控高速平面一次钻孔成实物图

2.3 龙门镗铣床钻孔

龙门镗铣床钻孔试验采取了两种策略:直接钻孔与钻孔+镗孔。直接钻孔采用U形钻头,效率与质量接近数控高速平面钻床;如图6所示,钻孔+镗孔则进一步提升了管孔的光洁度和精度,无需额外打磨。单个孔加工时间约3分钟。



图6 龙门镗铣床先钻再镗孔实物图

2.4 数控水切割割孔

数控水切割机在管孔加工中表现出良好的光洁度,但存在孔径尺寸偏差(约0.3 mm)及设备稳定性问题,偶有误加工现象。单个孔加工时间约为4分钟。

3 数据分析

本研究针对管孔加工进行了多种数控加工方法的试验分析。结果表明,数控激光切割机加工的管孔质量未能达标,存在管孔尺寸未测量的缺陷。数控水切割机虽被尝试,但其加工稳定性不足,同

样未进行管孔尺寸检测。相比之下,数控镗铣床与数控高速平面钻在管孔加工中表现优异,无论是采用一次钻孔成型还是先钻孔后镗孔的加工方法,管孔质量均能满足图纸要求。一次钻孔成型管孔尺寸数据详见表 1,先钻孔再镗孔的管孔尺寸数据详见表 2,各加工方法下管孔加工时间数据则汇总于表 3。

表 1 一次钻成的管控尺寸

编号	实测孔径	实测横向节距	实测纵向节距	实测总节距
1	φ60.74	130.4	90.3	391(横向)
2	φ60.94	130.2	89.8	180.8(纵向)
3	φ60.92	130.3	90.2	/
4	φ61.08	130.1	89.9	/
5	φ60.78	130.3	90.2	390.5(横向)
6	φ60.96	130.1	90.1	180.2(纵向)
7	φ60.88	129.8	89.4	/
8	φ61.02	130.2	89.92	/
9	φ60.92	129.92	89.92	/

表 2 先钻后镗的管孔尺寸

编号	实测孔径	实测横向节距	实测纵向节距	实测总节距
1	φ61.1	129.9	90	389.96(横向)
2	φ61.09	129.97	90.02	179.9(纵向)
3	φ61.1	130.02	89.99	/
4	φ61.09	130	89.99	/
5	φ61.09	129.93	89.98	389.93(横向)
6	φ61.18	129.94	89.91	179.85(纵向)
7	φ61.19	129.88	89.91	/
8	φ61.18	130.01	89.92	/
9	φ61.19	129.92	89.92	/

表 3 管孔加工时间表

编号	加工方法	加工设备	单个孔加工时间(min)	管孔质量
1	激光切割孔	数控激光切割机	1	不合格
2	水切割孔	数控水切割孔	4	合格
3	一次钻孔成	数控高速平面钻	2	合格
4	一次钻孔成	数控龙门镗铣床	2	合格
5	先钻再镗孔	数控龙门镗铣床	3	合格

3.1 管孔尺寸精度比较

依据图纸与标准,管孔直径需达到 φ61^{+0.2}_{-0.3} mm,相邻管孔横向节距及纵向节距分别控制在 130±1 mm 与 90±1 mm 范围内,横向及纵向累计节距分别为 390±2 mm 与 90±2 mm,且管孔粗糙度不得超

过 25 μm。对比分析表 1 与表 2 数据,数控高速平面钻及数控龙门镗铣床(无论是一次钻孔成还是先钻再镗孔)均能满足上述精度要求。进一步观察,先钻孔再镗孔的加工方法展现出更高的尺寸精度。

3.2 管孔加工效率比较

根据表 3 的数据可知,一次钻孔成的工艺在加工效率上显著优于先钻再镗孔工艺,表明其在生产节拍上具有明显优势。

3.3 刀具成本比较

从刀具成本角度考量,相较于先钻孔再镗孔所使用的常规钻头和铣刀,一次钻孔成采用定制 U 形钻头,单价更高,且其寿命稳定性较差,导致刀具总成本显著增加。因此,先钻孔再镗孔的加工方法更具经济性。

4 实验结论

综上所述,数控设备(含数控高速平面钻与数控龙门镗铣床等)在管孔加工中,无论采用一次钻孔成型还是先钻孔再镗孔的加工方法,均能保证尺寸精度达标。然而,两者在效率与成本上各有优劣:一次钻孔成型效率更高,但刀具成本显著增加;先钻孔再镗孔则提供了更高的精度与较低的刀具成本,但牺牲了部分加工效率。因此,在实际应用中,需综合考虑现有设备条件、技术工人的专业能力以及项目实施的具体需求,灵活选择最优工艺方案。

5 结语

(1)后续通过模拟试验,确认 φ61^{+0.2}_{-0.3} mm 管孔直径既满足穿管要求又能顺利实施封口焊,并且间隙越小封口焊焊穿的概率越小。

(2)后续通过产品正式加工验证,针对管板特性(壁厚小、尺寸大),传统四边夹持导致加工变形大,影响管板平面度。优化策略为分区域加工,辅以可移动等高块,有效控制变形。

(3)强化加工过程中自检,及时发现刀具磨损与尺寸偏差等问题,确保管孔加工质量达标。

叶片类零件多轴联动加工轮廓误差 分析与控制技术研究

吴家奎 陈道全 何伟 袁绍斌 吕剑昊

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文主要围绕大型水轮机转轮叶盘数控加工误差控制技术展开论述, 重点研究数控机床几何误差、非线性误差等因素引起的零件加工轮廓误差模型, 并提出相应的精度控制方法和补偿措施。该技术已成功用于叶盘类零件的生产制造, 零件的加工精度明显提高。

关键词: 转轮叶盘; 误差建模; 误差补偿; 误差控制

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)01-0059-06

Research on Analysis and Control Technology of Contour Error in Multi Axis Machining of Blade Parts

WU Jiakui, CHEN Daoquan, HE Wei, YUAN Shaobin, LV Jianhao

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: This article mainly discusses the error control technology for CNC machining of large hydraulic turbine blades and discs, focusing on studying the model of part machining contour error caused by geometric errors, nonlinear errors, and other factors of CNC machine tools, and proposing corresponding accuracy control methods and compensation measures. This technology has been successfully used in the production and manufacturing of bladed disc parts, and the machining accuracy of the parts has been significantly improved.

Key words: runner blades; error modeling; error compensation; error control

影响大型水轮机转轮叶盘数控加工误差的因素涉及机床结构、加工工艺、刀具、编程、伺服控制系统、工艺系统等方面。在大型水轮机转轮叶盘的传统制造中, 假设机床产生误差为零, 然后根据实际加工误差修改叶盘理论模型, 再生成加工刀位, 或者更为机械地变更刀具补偿值来消除误差, 生成的叶盘加工刀位需要进行多次调试才能满足生产要求。实践表明, 采用合理的刀具轨迹算法、变形控制、振动控制、先进刀具等传统技术已很难实现大型叶盘类零部件的加工精度再提升, 大型机床误差分析与补偿技术是改变这一困境的有效方法。

多项研究表明, 加工叶盘的数控机床的几何误差在数控加工误差中占较大比例, 是数控机床本身固有的误差, 具有可重复性的特点, 减少机床固有误差可以很大程度上提高大型叶盘加工精度。文献^[1-6]对数控机床几何误差的建模进行了研究, 文献^[7-10]对数控机床几何误差补偿进行了研究, 但都未探讨机床几何误差与零件精度的关系。

本文以大型水轮机转轮叶盘数控加工为研究对象, 针对大型机床结构、误差类别进行详细的分析, 综合应用数学、几何学、检测技术、软件开发技术和数控加工的基础知识和专业知识, 通过分析叶盘加工误差产生的原因, 针对不同数控机床加

收稿日期: 2024-01-26

作者简介: 吴家奎 (1979—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为数控加工工艺技术和智能制造技术。邮箱: wujk_dec@163.com。

工转轮叶盘产生的几何误差进行识别,并采用适当的方法进行误差补偿来实现叶盘的加工误差控制,开发了一套完整的几何误差检测和补偿控制系统。

1 叶盘类零件多轴加工几何误差检测及建模

1.1 几何误差检测技术

机床加工精度降低的主要原因之一是其自身精度的丧失,而几何误差又是机床精度丧失的重要因素,几何误差是一种定位误差,主要是由部件制造误差、装配误差和部件之间的长期磨损等原因造成的。在大型叶盘的加工过程中,几何误差一般比较稳定,重复性好,易于补偿,特别是在外部环境变化不大的情况下,对几何误差的有效补偿将使机床加工精度得到较大提升,是提高大型水轮机转轮叶盘加工精度的主要手段之一。

要控制机床几何误差,首先需要分析几何误差项,然后采用合理方法对误差项进行检测和辨识。机床几何误差参数包括:对于三轴联动机床,X、Y、Z三个轴运动时,产生21项误差,对于多轴联动数控机床,每个回转轴产生6项误差参数,因此,五轴联动机床有33项几何误差参数。

平动轴的几何误差检测采用“10线法”原理^[11-13],是利用机床平动轴在运动过程中所产生的10条轨迹线进行检测,共计21项误差,误差检测采用雷尼绍双频激光干涉仪,要求线性检测距离小于30米,分辨率1纳米。

旋转轴的几何误差检测采用雷尼绍球杆仪,传感器精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,分辨率 $0.1 \mu\text{m}$ 。当每个旋转轴运动时,产生沿三个平动轴方向的跳动误差和转角误差共计6项。^[14-15]

1.2 基于多体系统理论的几何误差建模方法

通过多体系统和方法理论^[16-17]进行几何空间误差建模,已成功应用于多种自动化、智能化设备的运动分析与控制,具有系统性和通用性。

(1) 多体系统描述方法

为了便于研究,任设一个多体系统的拓扑结构可通过低序阵列描述,如图1所示,任选体 B_j 为多体系统中的典型体,体 B_j 的 n 阶低序体的序号可定义为:

$$L^n(j)=i \quad (1)$$

式中, L 为低序体算子,定义体 B_j 为体 B_i 的 n 阶高序体。它满足:

$$L^n(j)=L(L^{n-1}(j)) \quad (2)$$

且补充定义:

$$L^0(j)=j, L^n(0)=0 \quad (3)$$

那么体 B_i 视为 B_j 的相邻低序体,得出:

$$L(j)=i \quad (4)$$

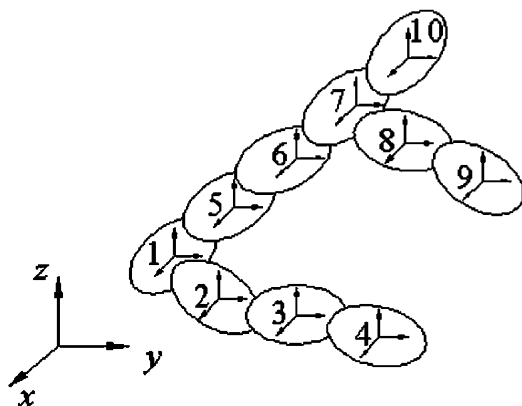


图1 多体系统拓扑结构

根据以上定义,可以计算整个多体系统的各阶低序体阵列,如表1所示。

表1 多体系统拓扑结构的低序体阵列

典型体(j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L^0(j)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L^1(j)$	0	1	2	3	1	5	6	7	8	7
$L^2(j)$	0	0	1	2	0	1	5	6	7	6
$L^3(j)$	0	0	0	1	0	0	1	5	6	5
$L^4(j)$	0	0	0	0	0	0	0	1	5	1
$L^5(j)$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$L^6(j)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(2) 多体系统空间点和矢量表示方法

对于空间点用 p 表示,在坐标系基础上加上1,可得到 P 点的齐次坐标:

$$p=(p_x, p_y, p_z, 1)^T \quad (5)$$

其中, p_x 、 p_y 和 p_z 确定了点 p 的坐标。

对于空间矢量 $\vec{u}$ 可表示为:

$$\vec{u}=(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z, 0)^T \quad (6)$$

其中, $\vec{u}_x$ 、 $\vec{u}_y$ 和 $\vec{u}_z$ 确定了矢量 $\vec{u}$ 的方位。

这样可将各坐标系之间的变换关系转化为一

般的矩阵运算,方便计算建模。

(3) 运动变换矩阵

在两个相邻体中,可由低序体的位姿逐步得到高序体的位姿。图2为有误差条件下典型相邻体 B_j 和 B_i 的几何特征。

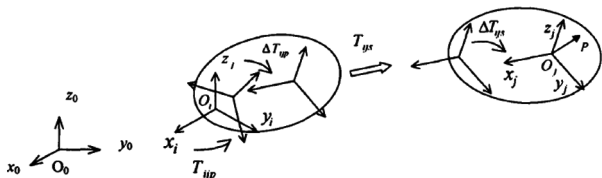


图2 有误差条件下典型相邻体 B_j 和 B_i 的几何特征

设固定位置变换矩阵为 T_p , 固定位置误差变换矩阵为 ΔT_p , 因此多体系统中的体间实际变换矩阵为:

$$T_{ij} = T_{ijp}(\ast) \cdot \Delta T_{ijp}(\ast) \cdot T_{ijs}(\ast) \cdot \Delta T_{ijs}(\ast) \quad (7)$$

$$T_{ij}(R) = T_{ijp}(R) \cdot \Delta T_{ijp}(R) \cdot T_{ijs}(R) \cdot \Delta T_{ijs}(R) \quad (8)$$

式中, $\ast$ 代表相邻体所进行运动类型, T_{ij} 为体间实际位置变换矩阵, $T_{ij}(R)$ 为体间实际姿态变换矩阵。

1.3 叶盘加工几何误差建模

要进行几何误差建模,就要将 NC 程序中的 X、Y、Z 值转换为机床平动轴在 WCS 中的位置坐标,首先基于多体系统运动学理论建立机床结构运动学模型,然后推导理想运动变换关系,进而得到机床平动轴在 WCS 中的位置坐标。由此可以推导实际运动变换关系,得到机床空间误差模型。

2 叶盘多轴联动非线性加工误差控制

非线性误差是刀具在空间摆动与数控系统直线插补之间的不匹配导致的误差,一般在后置处理中对该误差进行控制,目前较好的方法是自适应线性化法,其技术路线如下:

(1) 理论分析非线性误差产生的原因及控制算法;

(2) 编写非线性误差控制软件;

(3) 试验验证。

如图3,设刀长为 L , 加工工艺允许误差为 δ , 刀心点由 $P_0(x_0, y_0, z_0, A_0, B_0)$ 直线运动到 $P_1(x_1, y_1, z_1, A_1, B_1)$, 目标刀心点坐标 P_1 保存在变量 P' 中。

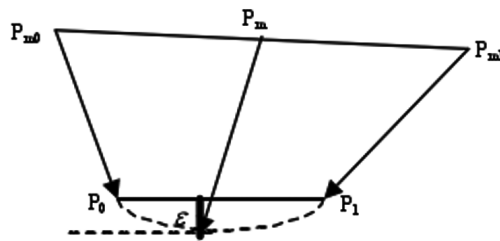


图3 非线性误差的自适应线性化补偿

算法步骤:

STEP1: 由下式分别计算出两个刀心点 P_0, P_1 对应的摆心点坐标 $P_{m0}(x_{m0}, y_{m0}, z_{m0}, A_0, B_0)$ 、 $P_{m1}(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}, A_1, B_1)$ 。

$$\begin{cases} x = x_0 + L * \cos\theta_A * \sin\theta_B \\ y = y_0 - L * \sin\theta_A \\ z = z_0 + L * \cos\theta_A * \cos\theta_B \end{cases} \quad (9)$$

STEP2: 计算两摆心点 P_{m0}, P_{m1} 的中点 $P_m(x_m, y_m, z_m, A, B)$ 坐标。

$$\begin{cases} x_m = (x_{m0} + x_{m1}) / 2 \\ y_m = (y_{m0} + y_{m1}) / 2 \\ z_m = (z_{m0} + z_{m1}) / 2 \\ A = (A_0 + A_1) / 2 \\ B = (B_0 + B_1) / 2 \end{cases} \quad (10)$$

STEP3: 反算摆心点 P_m 对应的实际刀心点 $P(x, y, z)$ 的坐标。

$$\begin{cases} x = x_m - L * \sin B * \cos A \\ y = y_m + L \sin A \\ z = z_m - L * \cos B * \cos A \end{cases} \quad (11)$$

STEP4: 计算实际刀具中心点 P 到编程刀具轨迹的距离 P_0P_1 , 可得到刀具运动的最大误差值 $\varepsilon_{\max}$ 。

$$\varepsilon_{\max} = |P - \{P_0 + [(P - P_0) * a] * a\}| \quad (12)$$

其中 $a = (P_1 - P_0) / |P_1 - P_0|$

STEP5: 将 $\varepsilon_{\max}$ 与加工工艺允许误差 δ 进行比较。如果 $\varepsilon_{\max} < \delta$, 则在 P_0P_1 中点处加入一刀位点, 加密程序段。

3 水轮机叶盘加工万能角度头角度精确控制

对于旋转轴不是联动, 而是通过人工分度实施的情况, 需要操作人员复核分度引起的刀具轴向和径向综合误差, 机床沿特定轴线往复运动, 满足百

分表跳动要求,精确控制机械式万能角度头的角度。操作人员只需输入分度、刀具参数,自动运行宏程序,刀具自动靠近标准球,采用标准球确定某一固定点,刀轴任意分度后均可靠近此标准球,就能实施旋转轴角度的控制,如图4所示,满足此条件下,再实施代码的线性误差补偿,可达到提高叶盘加工精度的目标。

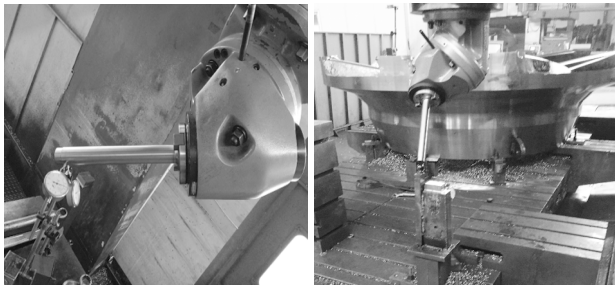


图4 万能铣头角度误差补偿及控制方法

4 几何误差补偿软件开发

编写软件,对加工产生的几何误差进行补偿。软件需要实现的功能主要有:

- (1) 辨识五轴数控机床几何误差参数,载入已知几何误差参数;
- (2) 计算空间几何误差,并通过修改数控代码实现几何误差补偿;
- (3) 校核非线性误差,并通过刀位点加密控制非线性误差;

应用软件工程理论,根据功能划分模块,使各模块间具有较强的独立性,又具有较好的系统性,各模块的相互关系及处理如图5所示。

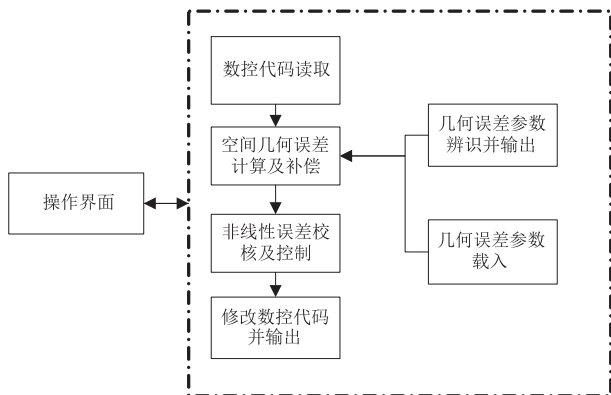


图5 程序系统结构图

- (1) 读取规范性的数控加工程序;
- (2) 几何误差参数辨识及输出程序:根据输入

的误差测量文件计算各测量点处的所有几何误差参数值并输出至文本文件;

(3) 几何误差参数载入程序:将已经获得的机床几何误差参数文件载入系统中;

(4) 空间几何误差计算及补偿程序:根据提取到的数控代码坐标值插值获得当前刀位点的几何误差参数值,计算刀位点/刀轴矢量空间误差,并根据空间误差修改数控代码坐标值以实现误差补偿,如图6所示;

(5) 非线性误差校核及控制程序:计算两刀位点间的最大非线性误差,并在超差段线性插入一刀位点;

(6) 数控代码修改及输出程序:逐行读取数控代码,提取代码信息,判断是否需要补偿;将通过几何误差补偿及非线性误差控制修改后的坐标值还原为代码形式并输出至文本文件。

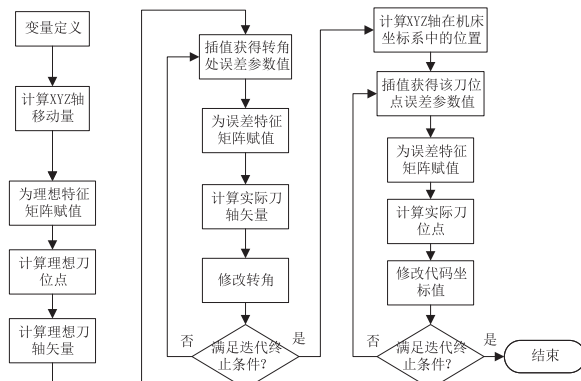


图6 误差计算及补偿处理流程

5 应用案例

5.1 水轮机叶片加工精度提升

对加工水轮机叶片的五轴数控机床几何误差进行建模,通过误差补偿软件对模型叶片的NC程序进行补偿,并对效果进行加工验证,分别进行同一类型零件的未补偿加工和已补偿加工,然后测量2件试件的法向轮廓误差,以对项目的研究成果进行评价。

针对补偿前后加工的叶片零件,在叶片零件正、反面上随机选定一定数目的测量点,使用三坐标测量机检测这些测量点的法向轮廓误差。测量点在叶片上的分布如图7所示。

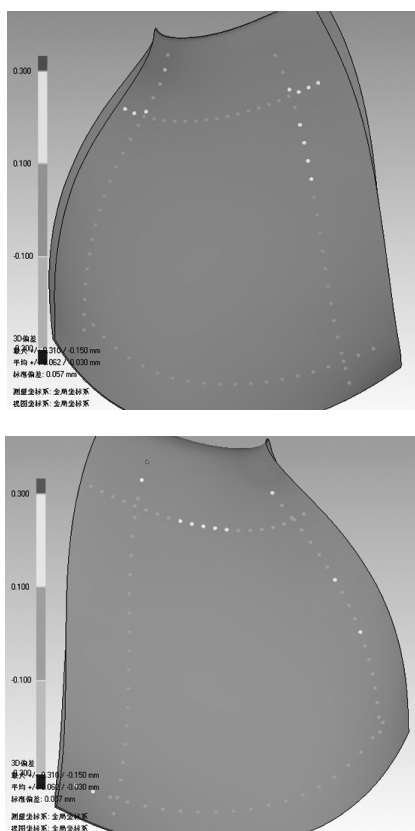


图7 叶片零件法向轮廓误差测量点分布示意图

对补偿前后加工的叶片类零件法向轮廓误差的分布范围进行统计,见图8。

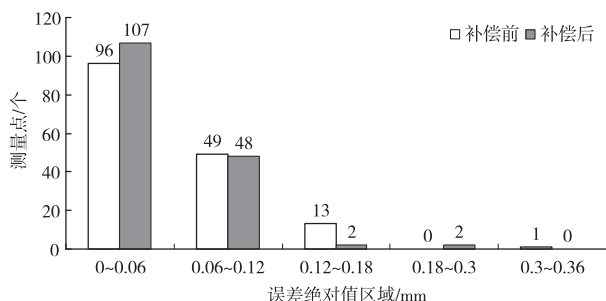


图8 补偿前后叶片法向轮廓误差统计图

补偿前,绝大部分检测点的法向误差绝对值分布在0~0.12 mm内,另外少部分在0.12~0.18 mm内,还有一个点的误差超过了0.3 mm。补偿后,法向误差绝对值分布在0~0.06 mm范围内的测量点数有所增加,分布在0.12~0.18 mm范围内的测量点数有所减少,另外,极大值的分布区域从0.3~0.36 mm变为了0.18~0.3 mm。可见,补偿后的法向误差分布范围得到一定改善。

补偿前后加工的叶片零件在所有检测点的最大轮廓误差及平均误差统计见表2。

表2 检测点最大及平均加工误差统计

		平均值		最大值	
正向误差	补偿前	0.062 1	精度提高	0.310	精度提高
	补偿后	0.053 5	13.85%	0.280	9.68%
负向误差	补偿前	-0.030 3	精度提高	-0.150	精度提高
	补偿后	-0.028 8	4.95%	-0.082	45.33%
误差绝对值	补偿前	0.055 5	精度提高	0.310	精度提高
	补偿后	0.049 6	10.63%	0.280	9.68%

结合上图8及表2,对比分析补偿前后随机指定的检测点的轮廓(法向)误差可知:

(1)补偿后误差的分布范围得到改善,反映了补偿方法的有效性;

(2)补偿后加工的叶片类零件,最大误差及平均误差均比补偿前有所降低,平均精度得以提高。

5.2 抽水蓄能转轮叶盘加工精度提升

大型抽蓄转轮叶盘属狭长流道、深腔的盘类零件,60%以上的区域需要多轴联动分区域加工。最大叶盘外径达5 m以上,重量达30 t,其叶片扭曲大,叶片之间间距小,叶片互相遮挡,很难加工,为转轮分叶盘结构之最,某抽蓄转轮叶盘(图9)。



图9 某大型抽蓄转轮叶盘加工中

通过10台转轮叶盘的加工验证了本文所述方法的有效性,零件的加工精度得到提高,远高于误差补偿前的加工精度,加工精度由 ± 1.5 mm提高到 ± 1 mm,见图10。



图10 某抽蓄叶盘加工型线分析图

6 结语

该技术准确描述大型叶盘数控加工几何误差的数学模型,将数学模型用刀具点位和刀轴矢量来描述,刀具点位的实际运动空间误差值是刀具点位在工件坐标系中的理论运动位置与实际运动位置之差,刀轴矢量的实际空间姿态误差值是刀轴矢量在工件坐标系中的理论姿态与实际姿态之差,通过迭代求解法计算数控程序坐标补偿量,误差补偿准确可靠。该技术已成功运用于多轴数控机床加工水轮机叶片和抽水蓄能转轮叶盘的数控制造中,通过开发的集成软件进行误差补偿和控制,在不同精度的数控机床上进行了试验,结果表明叶片和叶盘的型线精度显著提高,为水轮机转轮的制造质量提升开辟了一条新路。

参考文献:

- [1] Tian W, Gao W, Zhang D, et al. A general approach for error modeling of machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 79(4): 17-23
- [2] Zhu S W, Ding G F, Qin S F, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 52(1): 24-29
- [3] Fan J W, Guan J L, Wang W C, et al. A universal modeling method for enhancement the volumetric accuracy of CNC machine tools [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1/2/3): 624-628
- [4] Lin Y, Shen Y. Modelling of five-axis machine tool metrology models using the matrix summation approach [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(4): 243-248
- [5] Huang Y B, Fan K C, Lou Z F, et al. A novel modeling of volumetric error of three-axis machine tools based on Abbe and Bryan principles [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 151: 1027-1035
- [6] Ramesh R, Mannan M A, Poo A N. Error compensation in machine tools: a review: part I Geometric, cutting force induced and fixture-dependent errors [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(9): 1235-1256
- [7] Hsu Y Y, Wang S S. A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2): 352-360
- [8] Huang Nuodi, J in Yongqiao, Bi Qingzhen, et al. Integrated post-processor for 5-axis machine tools with geometric errors compensation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 94: 65-73
- [9] Rahman M, Heikkala J, Lappalainen K. Modeling measurement and error compensation of multi-axis machine tools: part I Theory [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(10): 1535-1546
- [10] Liu Y, Wan M, Xiao Q B, et al. Identification and compensation of geometric errors of rotary axes in five axis machine tools through constructing equivalent rotary axis (ERA) [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 152: 211-227
- [11] 江磊. 复杂零件五轴加工轮廓误差控制技术研究 [D]. 西南交通大学, 2013
- [12] 栗世豪, 张俊, 唐宇阳, 等. 零件加工误差与机床几何误差映射关系建模 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 55(10): 50-58
- [13] 杨洪涛, 马群, 李莉, 等. 数控机床几何误差预测的 GA-SVR 模型 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41(9): 1428-1435
- [14] 季泽平, 田春苗, 郭世杰. 数控机床几何误差研究现状与展望 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(22): 65-77
- [15] 陈思敏. 基于十二线法的数控机床几何误差测量方法与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 27-34
- [16] 刘又午. 多体动力学的休斯敦方法及其发展 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(6): 601-607
- [17] 范晋伟, 王培桐. 五轴数控机床几何误差建模与分析 [J]. 制造业自动化, 2020, 42(4): 43-50.

欢迎投稿, 欢迎订阅!

PLC 中电梯群控策略及算法实现

何惠冬 王治华

四川宏华电气有限责任公司, 成都 610036

摘要:本文分析了电梯群控开发的难点,采用西门子 S7-1200 PLC 和 TIA Portal 进行模块化编程。针对三部十层电梯的控制特点,建立了上行高峰、下行高峰、午餐高峰、层间通勤和空闲模式的判断程序,并通过最短距离、最短时间和综合评价算法实现综合控制。利用 WinCC 设计人机界面,实现系统的控制与监控。通过西门子 S7-1200 PLC 和 EET 仿真平台验证算法,结果显示在高峰模式下,乘梯时间平均缩短了约 14.38%,候梯时间缩短了约 29.85%,证明群控算法比传统方法更高效节能。

关键词:PLC; 综合评价函数; 电梯群控

中图分类号:TV857

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)01-0065-07

Design and Implementation of Group Control Elevator Operation Strategy and Algorithm

HE Huidong, WANG Zhihua

(Sichuan Honghua Electric Co., Ltd., 610036, Chengdu, China)

Abstract: This paper analyzes the challenges in developing elevator group control systems and employs Siemens S7-1200 PLC and TIA Portal for modular programming. For the control characteristics of three ten-story elevators, judgment programs for upward peak, downward peak, lunch peak, inter-floor commuting, and idle modes are established. Comprehensive control is achieved through the shortest distance, shortest time, and comprehensive evaluation algorithms. Utilizing WinCC, a human-machine interface is designed to implement system control and monitoring. The algorithm is validated using Siemens S7-1200 PLC and the EET simulation platform. Results show that in peak modes, the average elevator travel time is reduced by approximately 14.38%, and the average waiting time is reduced by approximately 29.85%, demonstrating that the group control algorithm is more efficient and energy-saving compared to traditional methods.

Key words: PLC; comprehensive evaluation function; group control elevator

在科技不断发展的当下,垂直升降电梯作为常用的运输工具,大量出现在高层建筑物中,对电梯的要求也不仅仅局限于能够满足用户的基本通勤需求,而是往效率更高、能耗更少的方向进行发展。对于高层建筑而言,客流量往往较大,为了能够减少乘客的平均候梯时间、乘客的平均乘梯时间、降低电梯在运行时的能耗,则需要多个电梯统一管理和分配呼梯信号,使得多部电梯能够进行合理的调配,才能使电梯的运行效率提高且运行时的能耗减少。

可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 是一种专用于工业自动化的计算机设备,以其高可靠性和灵活的编程能力著称。PLC 能够在恶劣的工业环境中稳定运行,抗干扰能力强,确保系统的持续高效运作。其编程灵活,支持梯形图和结构化文本等多种语言,易于根据不同需求进行配置和修改,使其成为制造、交通、楼宇自动化和能源管理等领域的核心控制组件。

电梯群控系统 (Elevator Group Control System,

收稿日期:2024-11-12

作者简介:何惠冬 (1998—),男,2022年毕业于成都理工大学电气工程及其自动化专业,本科,助理工程师。现就职于四川宏华电气有限责任公司,主要从事自动化研究方向软件研发工作。

EGCS),是对建筑物内的当前客流模型进行分析,从而判别此时的交通模式,根据所判别出的交通模式,再由控制系统统一管理和分配梯群的呼梯信号。电梯群控系统可根据所判别出的当前交通模式,自动调整当前的群控算法,从而选出优先级最高的电梯来响应乘客的呼叫请求。

由于电梯群控系统可以改善电梯服务效率、降低能量损耗,所以诞生之初就受到国内外电梯行业的高度重视,如今电梯群控系统已经成为主流,本文以三部十层电梯为例,通过判定客流模型以及三种不同算法间的协调配合,使三部电梯能够以较为高效且较低能耗的方式运行。

1 单部电梯的设计

电梯是一个在启动控制、方向控制、制动控制、开关门控制之间循环往复的一个系统,各个控制间需要依据严谨的逻辑判断,本文以单部十层为例,额定载重 1 000 kg 进行设计,依据单部电梯的控制逻辑,其控制程序的流程图如图 1 所示,单部电梯功能图如图 2 所示。

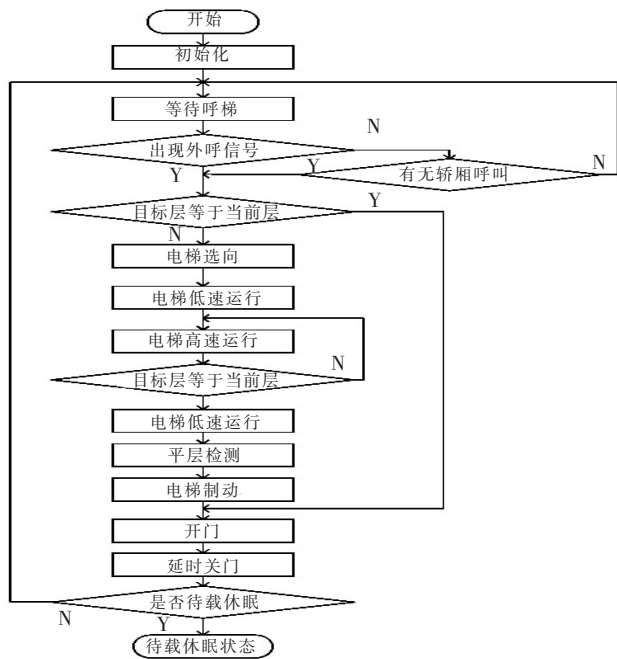


图 1 单部电梯整体逻辑流程图

单部电梯控制程序主要包含电梯初始化程序、楼层计数程序、方向选择程序、自动开关门程序、启停程序等,依据模块化编程原则,对各模块进行程序设计。

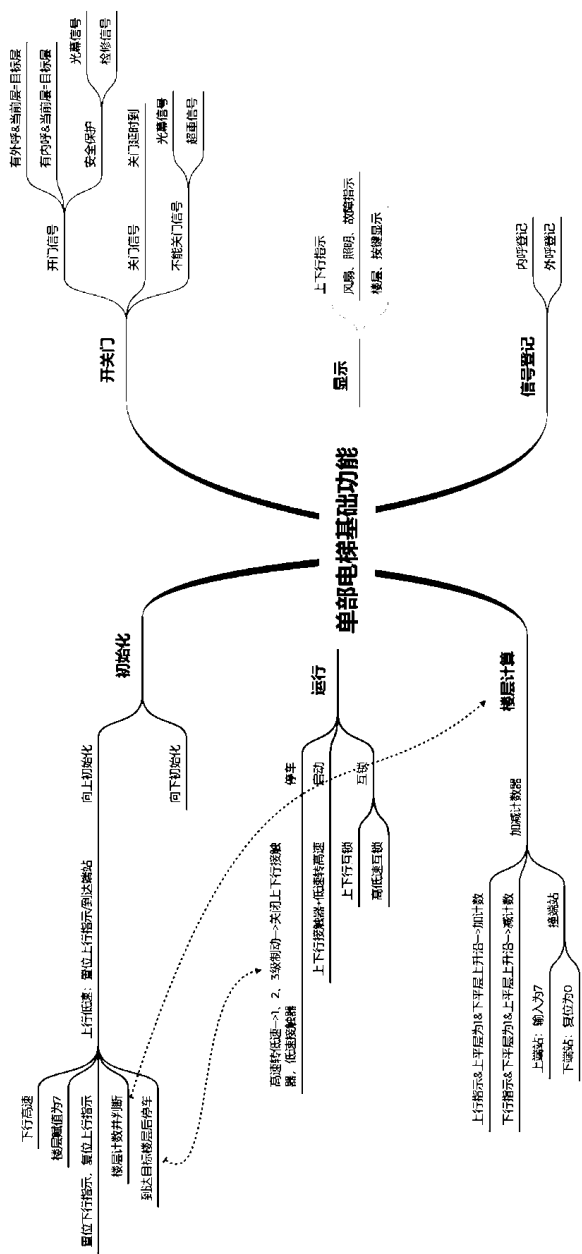


图 2 单部电梯整体逻辑流程图

2 三部十层电梯算法设计

2.1 交通模式判定

由于不同交通模式的存在,同一种算法在不同交通模式中的性能可能完全不同,所以交通模式的识别就尤为重要。交通模式的识别,是系统根据当前客流模型,通过电梯载重的反馈,使群控算法能够自动进行判别。多数研究表明,电梯乘客的客流模型近似遵循 Poisson 分布,本设计在此基础上,将客流模型大致分为以下五种:

(1)上行高峰模式:多数乘客由一楼进入电梯,

再到各自楼层;

(2)下行高峰模式:多数乘客由各自楼层进入电梯,目的地均为一楼;

(3)午餐高峰模式:乘客先由各自楼层到达一楼用餐,用餐后再返回各自楼层;

(4)层间通勤模式:非高峰模式期间,出现的随机通勤;

(5)空闲模式:极少客流时的层间通勤,不足以使用全部电梯。

2.2 最短距离调度算法

最短距离调度即就近调度,当外呼信号出现后,系统自动计算外呼层与三部电梯间的距离,计算时须考虑电梯运行方向,通过比较出最小距离,派出距离最近的电梯响应,如下公式(1)、公式(2)、公式(3)为最短距离调度算法计算公式:

$$S_{\text{now}} = \begin{cases} F_{\text{now}} : \text{电梯上行} \\ -F_{\text{now}} : \text{电梯下行} \end{cases} \quad (1)$$

$$S_{\text{tar}} = \begin{cases} F_{\text{tar}} : \text{电梯上行} \\ F_{\text{H}} + (F_{\text{H}} - F_{\text{tar}}) : \text{电梯下行} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_{\text{F}} = \begin{cases} S_{\text{tar}} - S_{\text{now}} (S_{\text{tar}} \geq S_{\text{now}}) \\ S_{\text{tar}} - S_{\text{now}} + 2F_{\text{H}} (S_{\text{tar}} < S_{\text{now}}) \end{cases} \quad (3)$$

其中 F_{now} 表示当前楼层, F_{H} 表示电梯最高楼层, F_{tar} 表示目标楼层, S_{tar} 表示目标楼层评分, S_{F} 表示电梯距离评分。

构建三部十层电梯的调度模型,设1号梯、2号梯、3号梯在运行时的运行分值分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 , 电梯共有 N 层楼。当1号梯在基站上行时 $X_1 = 1$, 在2楼上行时 $X_1 = 2$, 在 $N-1$ 层时(最高层下方的那层,最高层 N 层不能上行),此时 $X_1 = N-1$; 对于电梯下行时,当电梯在 N 层(最高层)下行时 $X_1 = -N$, 当在电梯在 $N-1$ 层下行时 $X_1 = -(N-1)$, 当电梯在2楼下行时 $X_1 = -2$ (最低层1层不能下行)。同理2号梯、3号梯分值与1号梯一致,在此不再赘述, X_i 和的在不同楼层的对应的分值如表1所示。

表1 楼层分值对应表

分值	楼层									
	1L	2L	3L	4L	5L	6L	7L	8L	9L	10L
上行分值	1	2	3	4	5	6	7	8	9	/
下行分值	/	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10

设 Y 为某一层外呼信号对应的分值。从基站

到 $N-1$ 层上行时(最高层下方的那层,最高层 N 层不能上行), Y 对应的分值为 $1, 2, 3, \dots, N-2, N-1$; 从最高层 N 层往2层下行时(最低层1层不能下行), Y 对应的分值为 $N, N+1, N+2, N+3, \dots, N+(N-3), N+(N-2)$ 。

设1号梯、2号梯、3号梯在运行时的计算分值分别为 Z_1, Z_2, Z_3 , $Z_i = Y - X_i$, 计算分值 Z_i 表示呼梯信号与三部电梯的距离值,该值越小说明当前楼层距离目标楼层越近。计算出 Z_i 后还需进一步处理,若 Z_i 大于20时,则 $Z_i = Z_i - 20$; 若 Z_i 小于0时,则 $Z_i = Z_i + 20$; 此操作的目的是为了使 Z_i 在20以内,便于选出最优值。示例如图3、表2所示。

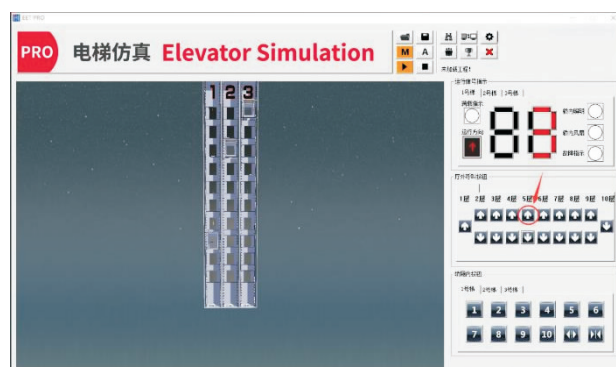


图3 EET 仿真界面

表2 模拟电梯群控系统评分

1号梯	运行权重X1	2号梯	运行权重X2	3号梯	运行权重X3	外呼权重Y
10L		10L		10L ↓	-10	10
9L		9L		9L		9
8L		8L ↑	8	8L		8
7L		7L		7L		7
6L		6L		6L		6
5L		5L		5L		5 ↑
4L		4L		4L		4
3L ↑	3	3L		3L		3
2L		2L		2L		2
1L		1L		1L		1
1号梯到外呼距离 $Z_1 = Y - X_1$	$5 - 0 = 5$	2号梯到外呼距离 $Z_2 = Y - X_2$	$5 - 8 = -3 + 20 = 17$	3号梯到外呼距离 $Z_3 = Y - X_3$	$5 - (-10) = 15$	

在图3、表2中,假设1号梯为3L上行,2号梯为8L上行,3号梯为10L下行,当前有5L上行呼叫,则 $Z_1 = Y - X_1 = 2$, $Z_2 = Y - X_2 = -3$, $Z_3 = Y - X_3 = 15$, 但由于 Z_2 小于0,为方便比较需加上20,则最后 $Z_1 = 2$, $Z_2 = 17$, $Z_3 = 15$, 故最优梯为1号梯。

上述通过比较距离值 Z , 可选出当前最优梯,但由于电梯存在反向运行、乘客目标层不确定等原因,距离值 Z 仅作为三部电梯在比较最短距离时使用,距离值 Z 并不表示当前层与目标层的实际

距离。

2.3 最短时间调度算法

最短时间调度是在最短距离调度的基础上,加入预测性调度的算法,适应于早、晚高峰。在系统中加入记录程序,此程序可以记录一定时间内所有按钮被正常按下的次数,再交由判定程序比较出该时间段中大致客流模型。记录程序如图4所示。

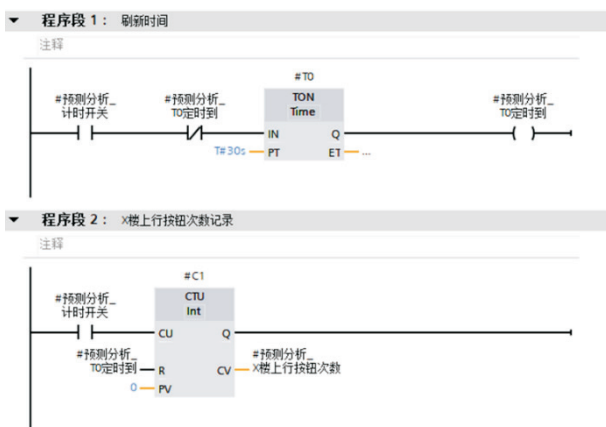


图4 客流模型记录程序

在梯形图程序中,当计时开关启动后,该程序将以30秒一次的刷新频率,对当前客流进行记录,计数器 C_1 将记录某一层上行按钮在该时间段被按下的次数,该程序在FB中编写,可调用多次,能够将该时间段内所有按钮被按下的次数记录至数据块中,再交由判定程序进行判断。

判断程序对于上行高峰和下行高峰的判断标准并不一致。上行高峰期(早高峰)的特点为大多数乘客在1层按下上行按钮,进入轿厢后再按下各个目标层内呼按钮。下行高峰期(晚高峰)的特点为大多数乘客在各自楼层按下下行按钮,进入轿厢后若1层内呼按钮未被按下则将其按下,若1层内呼按钮已经点亮则不作任何动作。所以在判断上行高峰期和下行高峰期时,须按照不同特点,置顶对应的规则,以便系统能够正确判断当前交通模式。如下公式(4)为最短距离算法的判定:

$$T = C_{\text{stop}} \times T_1 + |F_{\text{tar}} - F_{\text{now}}| \times T_2 + (C_{\text{stop}} - 1) \times T_3 \quad (4)$$

其中 T_1 表示电梯制动时间, T_2 表示层间运行时间, T_3 表示开关门时间, C_{stop} 表示启停次数, F_{tar} 表示目标楼层, F_{now} 表示当前楼层。

设非1层外呼按钮按下次数为 $O_{\text{not}1}$,非1层外上呼数为 $O_{\text{unot}1}$,非1层外下呼数为 $O_{\text{Dnot}1}$,非1层内

呼按钮按下次数为 $I_{\text{not}1}$,1层外上呼按钮按下次数为 O_{U1} ,1层内呼按钮按下次数为 I_1 , $O_{\text{not}1} = O_{\text{unot}1} + O_{\text{Dnot}1}$ 。经过多次仿真验证,当电梯内呼按下次数为最大值时, $O_{U1} \geq 2O_{\text{not}1} \cup I_{\text{not}1} \geq 7O_{U1}$,可以将其判断为上行高峰期,当电梯外下呼数为最大时, $O_{\text{Dnot}1} \geq 7O_{\text{unot}1} \cup I_1 \geq 2I_{\text{not}1}$,可以将其判断为下行高峰期。上行、下行高峰期判断逻辑图如图5、图6所示。

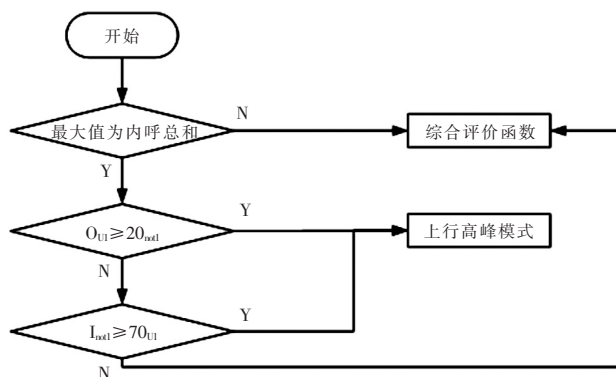


图5 上行高峰期判别逻辑图

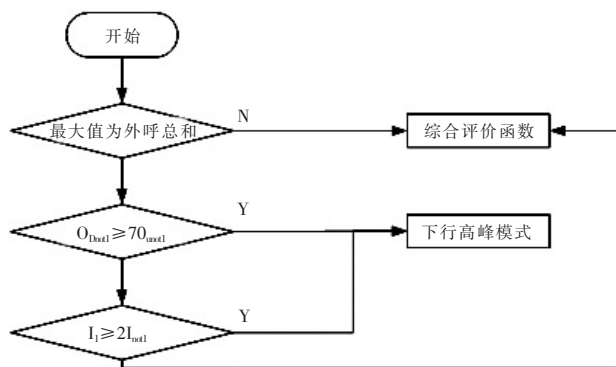


图6 下行高峰期判别逻辑图

当系统判定出当前交通模式为上行高峰模式后,会在最短距离调度算法的基础上,将1号梯和2号梯调往1层响应上行高峰期的乘客,3号梯则作为自由梯响应包括1层在内的随机出现的乘客。若系统判定出当前交通模式为下行高峰期,则会在最短距离调度算法的基础上,将1号梯和2号梯分别调往7层响应下行高峰期的乘客,3号梯则作为自由梯响应所有楼层随机出现的乘客。

2.4 综合评价函数

对于上述两种算法,它们的优点是能够解决当某层出现大量乘客时避免因人员过多而造成的长候梯,特点是调用足够多的电梯响应乘客的召唤,但伴随的缺点是因为大量调用电梯时所出现的能

耗过大问题。对此可以设计一套综合评价函数,通过仿真系统的验证,得出在选择派梯时的各项指标的权重,使系统能够做出最佳派梯的选择,减少乘客的乘梯时间和长候梯时间,并且能够大幅降低能耗。

性能指标权重,是用来衡量综合评价函数算法的好坏,所以建立一套客观合理的性能指标权重评价规则,对算法而言及其重要。本设计采用乘客从呼梯到到达目的地后用时最短的前提下,尽量减少能耗的方式进行设计,所以综合评价函数的主要性能指标有:运行距离、启停次数和当前载重,所以综合评价函数和写为公式(5):

$$P_i = S_i + F_i + G_i \quad (5)$$

其中 P_i 表示第 i 部电梯的综合评价得分,分数越高则优先级越高;

变量 S_i 表示电梯运行距离,运行距离越小得分越高;

变量 F_i 表示电梯启停次数,启停次数越少得分越高;

变量 G_i 表示电梯当前载重,当前载重越小得分越高;

在验证性能指标权重时,采用控制变量法进行验证。当控制 F_i 和 G_i 而将 S_i 作为变量时,此时的算法与最短距离调度算法一致,在此不做赘述;当控制 S_i 和 G_i 而将 F_i 作为变量时,需考虑当启停次数到达多少次及其以上时 F_i 的得分应直接降为 0 分,每启停一次所降低的分数数值,并且整个评分是否为线性;当控制 S_i 和 F_i 而将 G_i 作为变量时,与 F_i 类似, G_i 在电梯当前载重达到多少时评分降至 0 分,从而使电梯拒绝载客,在未达到拒绝载客的阈值前,每增加一人 G_i 评分降低的数值。在查阅大量文献和多次实验后,从实验数据中可分析出三者的具体评分细则如表 3 所示。

表 3 运行距离评分表

运行距离(层)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
距离评分	100	95	90	80	72	65	58	50	37	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0

从表 3 中,若运行距离为 0 层,则代表目标层与当前层一致,若在电梯当前载重未超阈值的情况下,该部电梯为最优梯。当电梯到达目标楼层需要运行 7 层以上时,距离评分会大幅下降。当电梯到

达目标楼层需要运行 10 层及其以上时,距离评分为 0 分,此时当前电梯对于目标楼层的距离优先级最低,这样设定可以排除电梯长距离载客接梯,电梯启停次数评分表如表 4 所示。

表 4 启停次数评分表

启停次数(次)	0	1	2	3	4	5	6
启停评分	100	90	81	62	47	25	0

在表 4 中,若启停次数为 0 次,则代表当前电梯内无任何乘客,此时将外呼信号分配至这部电梯,该电梯可直接响应所分配的外呼信号,快速到达指定楼层,从而降低乘客的候梯时间。当启停次数大于等于 6 次以后,代表电梯中存在大量乘客,电梯持续在走走停停的状态,此时将外呼信号分配至这部电梯,将会大幅增长乘客的候梯时间;若此时依次判断电梯所需停止的楼层是否在群控系统中外呼信号所在楼层之上,将会大量增加程序的时间复杂度,而电梯群控系统是一个实时判断、实时发出指令的系统,所以依次判别会大幅降低群控系统的性能。所以在启停评分中,需要根据实验数据进行一定的模糊化,电梯当前载重评分表如表 5 所示。

表 5 电梯当前载重评分表

电梯当前载重(千克)	0	75	150	225	300	375	450	525	600	675	750	825	900	975
载重评分	100	98	95	88	79	67	50	40	34	26	19	10	5	0

在表 5 中,当电梯当前载重为 0 时,此时判断逻辑与 0 次启停次数一致,不做赘述。若电梯当前载重小于 375 kg 时,此时电梯中拥挤程度较低,乘客有良好的乘梯舒适度;若电梯当前载重在 375 kg 至 900 kg 之间时,电梯处于高负荷运行中,电梯当前载重越大一定程度上代表电梯服务的乘客数越多,电梯所需的启停次数也越多,此时将外呼信号分配至这部电梯,则该会大幅增长乘客的乘梯时间和候梯时间;若电梯当前载重大于等于 975 kg 时,则代表当前电梯所剩余的裕量不足以再支撑下一个乘客进入电梯中。此时将外呼信号分配至这部电梯,该电梯在响应且到达乘客所在楼层后,也无法继续容纳该乘客,导致该乘客会继续按下外呼按钮,直到下一部非满载电梯的到来,这将使该乘客的候梯时间大幅增加,所以在电梯当前载重大于 975 kg 时,

电梯的载重评分为 0 分,从而避免上述情况的发生。

3 仿真与验证

3.1 环境配置

电梯是一个极为复杂的系统,具有 260 个输入、输出地址,需要控制器拥有足够的算力,能保持程序的稳定运行。西门子 S7-1200 PLC 恰好满足这一要求,它是可编程控制器系列中新型的模块化微型化 PLC,它便于配置,有强大的功能和指令集,可用于多种设备的控制,可对用户程序执行逻辑判断、时序处理和数学运算等,并且可以与其它设备进行通信。

使用双绞线将西门子 S7-1200 PLC 与电梯仿真软件 Elevator Simulation 进行连接,通过 Ethernet 实现西门子 S7-1200 PLC 与 Elevator Simulation 的通信,在 TIA Portal 中编写控制程序,在 WinCC 上进行监控画面的制作。电梯环境及其网络拓扑结构如图 7 所示。

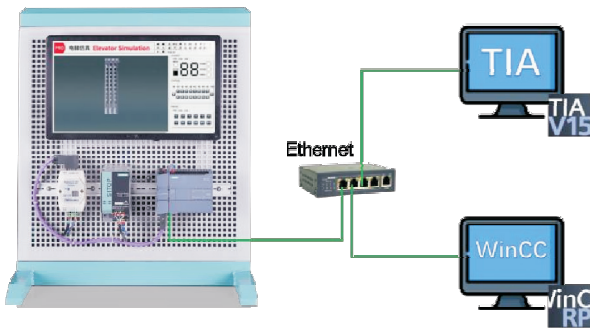


图 7 电梯硬件环境

3.2 参数设置

环境配置完成后,需要在 EET 中进行参数设置,由于上行高峰期和下行高峰期比其他交通模式的控制要求更高,更能测试群控系统自身的性能,所以选择早上的上班高峰期客流模型,对群控算法进行验证。本次验证的客流模型为 100 人,大部分从 1 层到各自的目标层,测试时间为 15 分钟。

3.3 实验数据

在测试过程中,对测试画面进行区域录制,可以看出群控系统不再由单一的最短距离原则进行派梯,而实通过运行距离、启停次数、当前载重进行综合考虑,计算出各部电梯当前最优值,从而进行调度。EET 实验画面如图 8、图 9 所示。



图 8 EET 实验画面 1

在图 8 中,可以看出三部电梯并未出现扎堆的情况,并且人员分配比较平均,未出现某一部电梯完全满载而另外一部电梯几乎空载的情况。

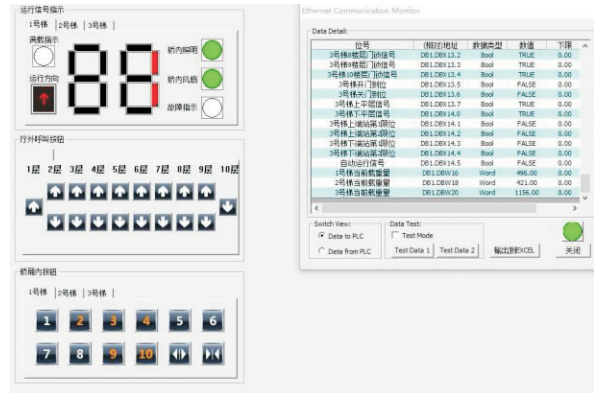


图 9 EET 实验画面 2

在图 9 中,1 号梯、2 号梯为预测性派梯,可以看到在早高峰模式下,预先将 1 号梯调至 1 层后,当 1 层有乘客出现,可以立刻响应,大幅降低了乘客的候梯时间,从而使早高峰的拥挤程度降低。

在仿真完毕后,EET 仿真软件可根据本次运行情况,通过后台自动生成本次仿真运行的结果,可利用此功能对本设计中的电梯群控系统的性能进行分析,EET 仿真软件仿真运行后的结果如表 6 所示。

表 6 仿真运行结果

变量/单位	累积量
运输乘客数量/人	100
乘客平均乘梯时间/s	59.06
乘客平均候梯时间/s	27.36
乘客长时间候梯率/百分比	0.25
系统运行总距离/m	677.19
系统能耗指标/评分	493.56

从表6中可看出在规定时间的15分钟之内,已将全部乘客送至目标楼层,并且在高峰模式下,乘客平均乘梯时间达到59.06 s,相比传统电梯平均乘梯时间69 s提升了约14.38%,使乘客平均候梯时间达到27.36 s,相比传统电梯平均候梯时间39 s提升了约29.85%,由此证明了本设计中的电梯群控算法能够提高电梯的运行效率。

4 结语

本文通过分析电梯群控系统的特性,基于西门子S7-1200 PLC和TIA Portal建立了单部十层电梯和三部十层电梯的控制系统,并对群控系统的多种交通模式的适配性展开分析,分析了在上行高峰期、下行高峰期、午餐高峰期的相同点和差异性,制定了判断是否为高峰期的判定程序,通过判定程序能够较为准确的判定出当下的交通模式,若为高峰期,则通过最短距离算法和最短时间算法进行控制,若为层间通勤模式和空闲模式,则使用综合评价函数从而进行控制,区分模式后使用对应算法进行控制,在高峰模式下,能够使乘客平均乘梯时间达到59.06 s,相比传统电梯平均乘梯时间69 s提升了约14.38%,使乘客平均候梯时间达到27.36 s,相比传统电梯平均候梯时间39 s提升了约29.85%,使电梯在运行过程中更为高效、更加节能。

参考文献:

- [1] 邓子根. 2017 电气自动化设备中 PLC 控制系统的应用[J]. 科技经济导刊, 2017(23): 112
- [2] 胡高山, 纪昕洋, 马晴. 2017. PLC 在电梯控制系统中的应用[J]. 通讯世界, 2017(11): 283-284
- [3] 李晨. 2019. 基于灰色预测理论的电梯交通流组合预测[J]. 江苏科技大学学报, 33(1): 57-65
- [4] 刘林飞. 2020. 基于 PLC 的群控电梯设计[D]. 南昌: 华东交通大学
- [5] 秦宜奋. 电梯常见运行控制方式解析[J]. 现代工业经济和信
息化, 2015(6): 39-40
- [6] 王琳, 肖军. 基于 PLC 的电梯控制系统的应用[J]. 电子
设计工程, 2019, 27(2): 106-109
- [7] Barney G, Imrak E. 2001. The application of neural networks to lift
traffic control[J]. Elevator World, 2001(5): 82-83
- [8] Dash S P, Mallik R K, Mohammed S K. Performance analysis of
non-coherent PLC with multi-level ASK in impulsive noise
environment[J]. IET Communications, 2018, 12(7)
- [9] Jabbour N, Mademlis C. Improved Control Strategy of a
Supercapacitor-Based Energy Recovery System for Elevator
Applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016: 1
- [10] Polytechnic B S P. PLC Controlled Elevator Model[J]. Annals of
Surgery, 2014, 221(6)
- [11] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representation
by BP errors[J]. Nature, 2010, 323(6088): 535-536
- [12] Zong Q, Xue LH, Wang ZS. Virtual Simulation Environments of
Elevator Group Control Systems[J]. Elevator World, 2001, 49
(12): 90-93.

集团要闻

人工智能行业垂直大模型“东方智源”初试成功

2024年12月23日,由东方研究院牵头承担的“发电装备大模型(主机关键部件智能化助手)技术研发及应用”研发课题中人工智能行业垂直大模型——测试版“东方智源”初试成功,以实绩奋进“开门红”。“东方智源”作为东方电气首个发电装备行业垂直大模型,聚焦研发设计、产品服务、知识管理等核心业务的智能化需求,以开发720亿参数数量的大模型为目标,构建超500万词的行业知识库,针对风电、煤电、核电等发电装备,推动以场景为牵引的人工智能技术落地发展新模式。

来源:东方电气公众号

抽水蓄能机组机械制动控制系统设计

闫浩 李静

东方电气自动控制工程有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:抽水蓄能机组机械制动系统采用气动式制动闸的方式,通过控制进出制动闸上下腔的压缩空气,操作制动闸顶起和落下,实现机组机械制动的投入和退出功能。控制气路主要由电磁换向阀和管路组成,控制电路通过控制电磁换向阀的线圈动作切换阀位气路,进而控制制动闸的投退。控制电路还要保证具有信号闭锁的功能,根据机组运行状态反馈信号,实现机组机械制动系统的自动控制。

关键词:抽水蓄能机组;机械制动;控制设计

中图分类号:TV743

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)01-0072-04

Mechanical Braking Control System Design for Pumped Storage Unit

YAN Hao, LI Jing

(Dongfang Electric Autocontrol Engineering Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: The mechanical braking system of pumped storage units adopts a pneumatic brake system, which controls the compressed air entering and exiting the upper and lower chambers of the brake, and operates the brake to lift and lower, achieving the input and output functions of the unit's mechanical braking. The control air circuit mainly consists of an electromagnetic directional valve and pipelines. The control circuit switches the valve position air circuit by controlling the coil action of the electromagnetic directional valve, thereby controlling the on/off of the brake. The control circuit also needs to ensure the function of signal blocking, and based on the feedback signal of the unit's operating status, achieve automatic control of the unit's mechanical braking system.

Key words: pumped storage unit; mechanical braking; control design

抽水蓄能机组机械制动系统采用气动式制动闸的方式,通过控制进出制动闸下腔和上腔的压缩空气,操作制动闸顶起和落下,实现机组机械制动的投入和退出。当制动闸投入时,制动闸与发电机转子制动环靠紧摩擦,消耗转子动能,从而达到使机组降速制动的效果。

机械制动控制系统由控制气路和控制电路组成,控制部分元器件通常都集成在专门用于机械制动系统控制的标准柜内,即机械制动控制柜。柜内上部布置控制电路的电气元件,下部安装控制气路的制动控制单元及管路。

1 控制气路

控制气路由手动阀、电磁换向阀、过滤器、消声器、管路或阀块组成,通过各元件的合理组合,按照气路逻辑构成控制气路。控制气路具有手动和电动两种控制方式。手动控制时,仅能通过手动阀切换气路,完成制动闸上下腔的充气和排气动作,此时控制电路不能实现控制。手动控制方式用于机组调试和设备试验过程中,在紧急情况下也可以通过人为操作做应急处置方案。电动控制时,通过控制电路对电磁换向阀的操作实现,对电磁阀的控制

收稿日期:2024-01-03

作者简介:闫浩(1988—),男,工程师,2011年毕业于北京航空航天大学自动化(自动控制与信息技术)专业,工学学士,工程师。现在东方电气自动控制工程有限公司从事水轮发电机组自动化系统设计工作。

号、机组转速信号(5 %、20 %)、机组转速装置故障信号、电制动故障信号、导叶全关信号、发电机出口断路器分闸信号。正常停机一般在转速下降至50 %额定转速时投入电气制动,转速继续下降至(5 %~10 %)额定转速时,再投入机械制动直至停机。机械制动装置单独用于紧急停机时,应能在发电电动机转速下降至(20 %~30 %)额定转速时投入直至停机。^[2]

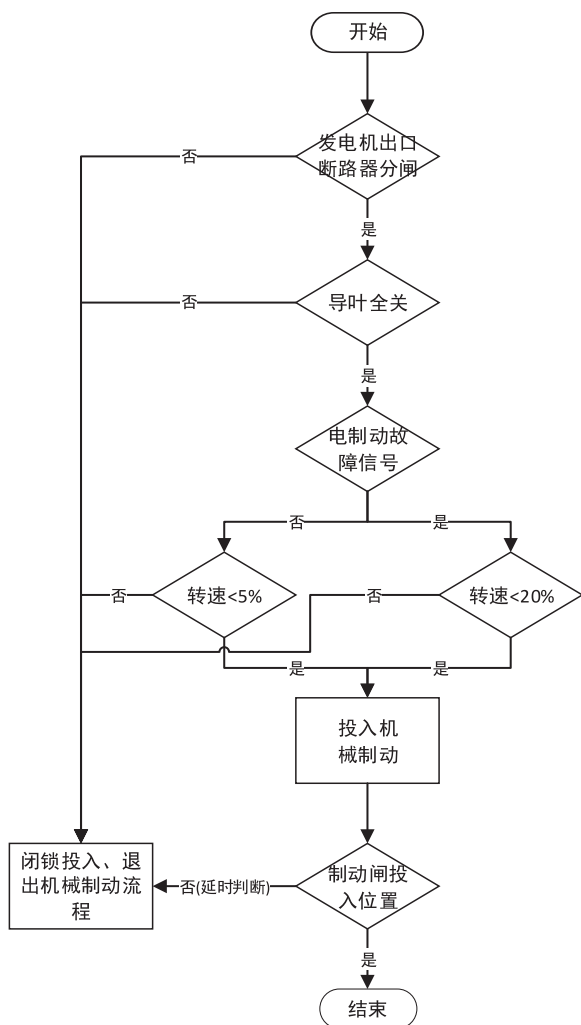


图2 机械制动投入逻辑

根据机械制动投入逻辑,在控制电路上设计“机械制动投入闭锁”信号,信号设计为“发电机出口断路器分闸”“导叶全关”“电制动故障”“转速<5 %”和“转速<20 %”的组合,使用常开接点设计电路。

机组在停机过程中,投入机械制动前应先判断发电机出口断路器已分闸,导叶已全关,电制动无故障,转速降至设定值等闭锁条件是否满足,防止

机组在高转速状态下投入机械制动。在非电气事故停机过程中,机组转速下降至额定转速的5 %时,投入机械制动直至机组转速为零。电气事故停机过程中,闭锁电制动,转速下降至额定转速的20 %时,投入机械制动直至机组转速为零。

3 控制电路

控制电路电压由电磁阀线圈电压DC220 V决定,控制电路操作制动和反充电磁阀完成制动气路的控制功能。电控操作同样分为手动模式和自动模式,手动模式下,由操作员在现地机组机械制动控制柜的面板上通过控制按钮完成;自动模式下,控制由监控系统发出的对应信号完成。“制动动作”还要有信号闭锁功能,保证在满足条件时才能激活并投入制动闸。

3.1 单线圈电磁阀控制电路

当制动电磁阀线圈得电,制动气进入制动闸下腔,同时必须保证反充电磁阀线圈失电并在复位位置,此时下腔压力高于上腔实现制动闸投入动作。反之,当反充电磁阀线圈得电,制动气进入制动闸上腔,同时必须保证制动电磁阀线圈失电并在复位位置,此时上腔压力高于下腔实现制动闸反充动作。逻辑上一个电磁阀线圈得电前,必须将另一个电磁阀线圈断电,使之复位。在完成对应动作后,即可将线圈断电,使制动闸保持在相应的状态。

3.2 双线圈电磁阀控制电路

双线圈电磁阀控制电路较单线圈电磁阀控制电路,主要在制动和反充电磁阀复位的动作上,需要控制对应的线圈得电来实现。逻辑上一个电磁阀投入线圈得电前,必须使另一个电磁阀复位线圈得电,使之复位。

单线圈和双线圈电磁阀的控制要求不同,单线圈需两个控制信号,双线圈需四个控制信号。单线圈控制投入信号需要保持,直到对应的投入动作完成,控制信号消失则进行复归动作;双线圈控制投入信号则可以为短时信号,在电磁阀阀芯移动到位后即可断开,此时电磁阀可以保持对应的投入动作,在投入动作完成后,复归信号出现,再进行复归

动作。控制电路中可以利用无源开接点,通过监控系统对控制电路进行控制,实现远方的自动控制。

同时也可以利用常开按钮,通过现地控制柜人为的操作,实现现地的手动控制。

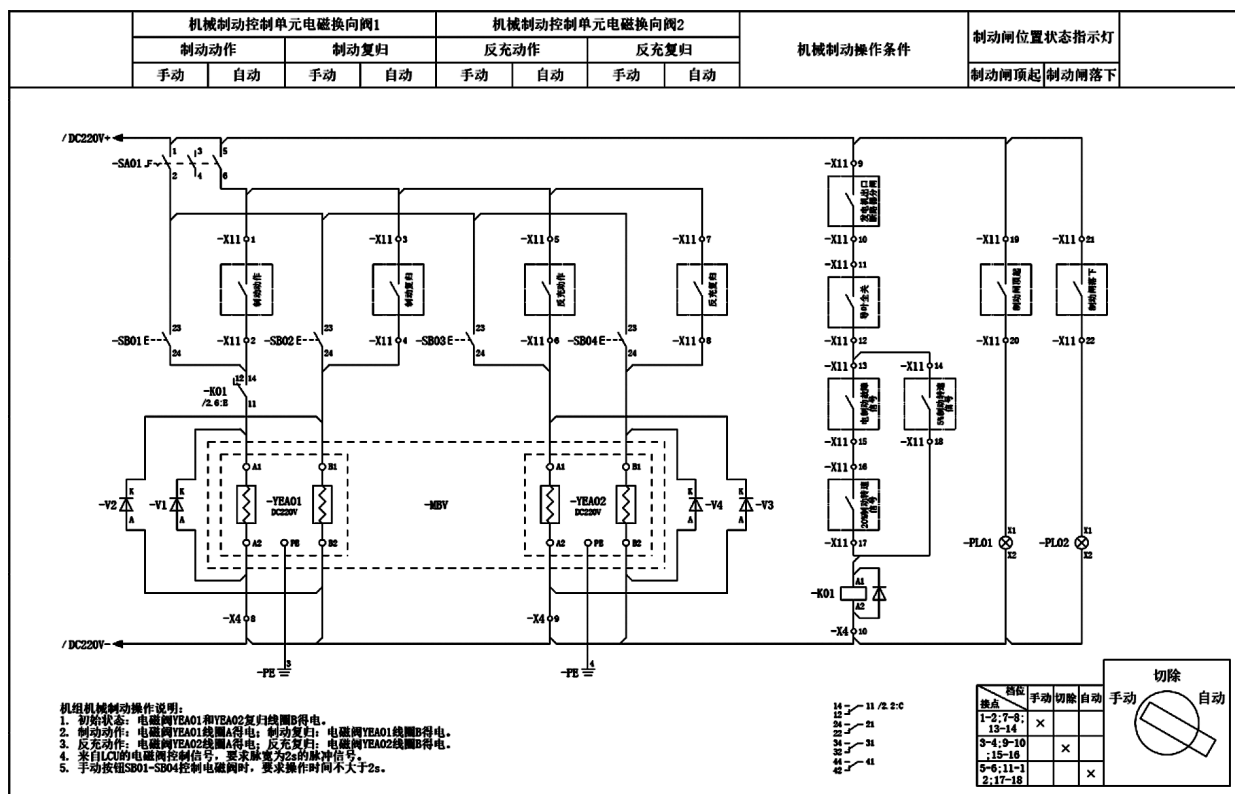


图3 机械制动控制电路原理图

4 设备集成

目前,多数电站都采用了包含控制气路和控制电路的机组机械制动控制柜作为控制制动闸的现地设备,而且其中的大部分又在控制气路上采用元件阀块的方式,使得设备整体简洁,功能区划明晰,不仅提高了设备的易操作性和易维护性,也提高了设备可靠性。利用管路连接和信号连接,实现了对机组机械制动的可靠控制。安装于控制柜面板的压力表可以显示控制系统的压力及动作状态,监控系统反馈的制动闸信号也通过指示灯显示在控制柜面板上,这样就能将机组机械制动系统的完整信息同时展示出来,为电站运维人员的工作提供了便捷。

5 结语

机械制动控制系统是实现机组机械制动功能的重要组成部分,同时由于它的功能性质,必须保证控制系统的可靠性高、稳定性好。该机械制动控制系统,具有多种控制模式和严格的流程执行功能,将气路、电路、信号都集成在机组机械制动控制柜内的机电一体化方式,使得该设备获得了较高的系统集成性和可靠的运行能力。

参考文献:

- [1] 全国大型发电机标准化技术委员会. 水轮发电机基本技术要求:GB/T 7894-2023[S]. 北京:中国标准出版社,2023
- [2] 全国大型发电机标准化技术委员会. 发电电动机基本技术要求:GB/T 20834-2014[S]. 北京:中国标准出版社,2015

电解铝烟温提升改造试验研究

刘庭江¹ 唐豪杰^{1,2} 陈虹^{1,2} 蔡晨曦¹ 韦耿^{1,2}

1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001; 2. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 成都 611731

摘要: 电解铝在生产过程中消耗大量能量, 其中多数热量被电解烟气携带排出。电解烟气排量大, 余热品质低。本文通过数值计算研究电解槽烟气升温对电解工艺的影响, 再对电解铝烟气温度影响因素进行分析, 最终确定对电解槽阳极导杆及侧壁等处进行保温, 将试验电解槽排烟温度提升至约 180 ℃, 提升了余热品质, 为后续余热高效回收利用提供了基础保障。

关键词: 电解铝; 烟气; 余热利用

中图分类号: TF821; TK115

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)01-0076-05

Experimental Study on Improving the Temperature of Aluminum Electrolysis Waste Gas

LIU Tingjiang¹, TANG Haojie^{1,2}, CHEN Hong^{1,2}, CAI Chenxi¹, WEI Geng^{1,2}

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China;

2. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

Abstract: The process of electrolytic production of aluminum consumes a large amount of energy. During the process, most of the heat is carried by waste gas. The gas has a large displacement and low waste heat quality. In this article, the influence of flue gas temperature rise in electrolytic aluminum reduction cells on the electrolysis process was studied through numerical calculations. Then, the factors affecting the temperature of the aluminum electrolysis waste gas were analyzed. As a result, insulation was applied to the anode guide rod and side walls of the electrolytic aluminum reduction cell, and the waste gas temperature of the experimental electrolytic aluminum reduction cell was raised to 180 ℃. Through this approach, the quality of waste heat has been improved, providing a basic guarantee for the efficient recovery and utilization of waste heat in the future.

Key words: aluminum electrolysis; waste gas; waste heat utilization

我国是世界原铝的生产大国, 电解铝产量居于世界首列。^[1] 电解铝生产过程中采用高电流、低电压的电解方式, 消耗大量电能, 据统计, 我国电解铝行业年耗电量约 4 200 亿 kW·h。^[2] 其中真正用于电解反应的热量占总输入能量 50 % 以下, 其余能量以热量形式散失, 其中烟气带走的热量约占总散失热量 25 %。不同电解铝厂排烟温度差别较大, 温度在 100 ℃ ~ 140 ℃ 之间, 且受季节影响明显^[3], 冬夏季可能存在 20 ℃ ~ 50 ℃ 的温差。

目前, 国内外学者针对电解铝烟气余热利用较多, 例如田官官^[4]、陡文化^[5] 等人提出一种余热利用思路, 用余热加热生活用水以供厂区员工使用; 类似的, 国外 FLEER^[6] 也曾提出用电解烟气余热用作附近居民供暖与热水供应。吕开雷^[7] 等人提出利用电解铝烟气余热干化处理污水处理厂污泥。尚亚平^[8] 等人提出将电解铝电解烟气作为电厂锅炉的助燃气, 并对其经济性进行分析。郭勇^[9] 等人对基于有机朗肯循环的电解铝低温烟气余热发电

收稿日期: 2024-07-26

作者简介: 刘庭江 (1995—), 男, 2021 年毕业于大连理工大学化工过程机械专业, 硕士, 助理工程师。现任职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 主要从事基础技术研究及流固力学仿真相关工作。

系统进行热力特性分析,研究了蒸发温度与热源温度对发电系统的影响,得出热源烟气温度越高,系统净功越大的结论。因此提升电解铝烟气温度,对提升电解铝烟气余热利用率具有积极意义。

在目前电解铝生产流程中,为防止电解烟气中的氟、硫外泄,电解槽内保持负压状态。同时考虑后续布袋除尘的使用温度,会采取一定措施降低烟气温度。因此在生产过程中不将电解槽完全密封,吸入一定量空气进入槽内以降低烟气温度,同时降低烟气氟化物浓度,排烟管道也并未进行保温。

本文首先通过数值计算,研究电解槽烟气升温对电解工艺的影响,再对电解铝烟气温度影响因素进行分析,最终确定对电解槽阳极导杆、电解槽上下搭接处及侧壁等处进行保温,将试验电解槽排烟温度提升至约 180 ℃,提升了余热品质,为后续余热回收利用提供了基础保障。

1 电解烟气温度提升对电解槽热平衡影响

为了研究电解槽烟气升温对电解槽热平衡的影响,验证电解槽烟气升温的可行性,以某厂 500 kA 电解槽为例,采用 ANSYS FLUENT 数值计算对不同工况下槽膛及槽上集气烟道内部烟气温度及散热情况进行分析。以设计工况电压 3.90 V、烟气温度 150 ℃为基础工况 1;工况 2 维持原有工作电压不变,降低覆盖料对流换热系数,提升烟气温度至 180 ℃;工况 3 在工况 2 基础上降低工作电压。计算对比工况如表 1 所示。

表 1 数值计算工况

计算工况	电压/V	烟气温度/℃
工况 1	3.90	150
工况 2	3.90	180
工况 3	3.87	180

三种计算工况下,炉膛内温度情况与散热情况如表 2 与表 3 所示。

表 2 不同工况炉膛温度

计算 工况	计算电 压/V	炉帮厚 度/cm	伸腿长 度/cm	侧壁温 度/℃	槽底温 度/℃
工况 1	3.908	19.2	6.3	284	63
工况 2	3.911	17.7	4.5	292	63
工况 3	3.855	19.1	6.0	285	63

表 3 不同工况散热电压

计算工况	散热电压/mV				
	上部	侧部	底部	钢棒	端部
工况 1	0.852	0.481	0.117	0.142	0.073
工况 2	0.842	0.494	0.117	0.142	0.073
工况 3	0.825	0.486	0.115	0.139	0.072

由工况 1 与工况 2 对比可知,在维持原有工作电压不变的情况下,提升电解槽烟气温度,电解槽上部散热减少,侧部散热增加,炉膛稍微减薄,槽侧壁温度稍有升高,对电解槽热平衡几乎没有影响。结合目前电解槽运行偏凉的热平衡状态,该措施是积极的。

在工况 2 基础上将工作电压降低 15~20 mV,其余参数不变,即可将电解槽炉膛情况恢复至工况 1 原有热平衡状态。由上述三种工况对比计算可知,提升电解槽烟气温度不仅不会破坏电解槽原有热平衡,对电解槽运行带来不利影响;而且可以在维持原工况的前提下降低电解槽电压,减少电能损耗。

2 影响电解槽烟气温度因素

目前某厂电解铝 1 系列 4 区车间为改造试验车间,车间电解槽分为保温电解槽与散热性电解槽两种,且部分电解槽已进行初步烟气升温改造,监测某时刻 4 区电解槽温度如表 4 所示。

表 4 不同电解槽烟气温度

电解槽号	烟气温 度/℃	电解槽号	烟气温 度/℃	电解槽号	烟气温 度/℃
1401	- ^①	1414	136.2	1427	146.5
1402	130.6	1415	-	1428	143.7
1403	126.1	1416	-	1429	-
1404	137.1	1417	-	1430	130.5
1405	133.7	1418	159.9	1431	135.4
1406	-	1419	127.7	1432	131.3
1407	146.8	1420	135.4	1433	159.6
1408	160.6	1421	143.3	1434	152.4
1409	127.0	1422	138.0	1435	161.2
1410	124.3	1423	132.9	1436	167.2
1411	137.8	1424	147.9	1437	149.9
1412	131.7	1425	136.9	1438	155.7
1413	-	1426	155.6	-	-

注①:-为远传信号错误,无示数

2.1 电解槽保温对烟气温度影响

传统电解铝工艺流程中,需要降低电解铝烟气

温度以防烧毁除尘袋,因此电解槽侧壁(图1)裸露于大气中以增加烟气散热量。现在为提升烟气温度,应对电解槽侧壁进行保温处理以减小烟气沿程热量损失。



图 1 电解槽侧壁现状

2.2 电解槽型对烟气温度影响

监测 38 台电解槽中, 1402、1408、1410、1412、1414、1416、1420、1421、1425、1427、1430、1431、1437 为散热型电解槽, 其余为保温型电解槽。根据现场已经进行的初步改造情况可知, 对于没有进行改造的电解槽, 保温型的平均温度约在 138°C , 散热型的平均温度约在 136°C ; 对于已经进行初步改造的电解槽, 保温型的平均温度约在 145°C , 散热型的平均温度约在 141°C 。对比可知, 保温型电解槽要稍优于散热型电解槽, 但并非影响电解槽烟气温度的关键因素。

2.3 引风量对烟气温度影响

通过调整电解槽烟风支管开度调整电解槽的引风量,研究引风量对烟气温度的影响,以 1432 槽为例,不同阀门开度下连续监测电解槽排烟温度变化如图 2 所示。

由图可知,开始 1432 电解槽排烟温度计较稳定,约在 140 ℃,约 13:50 调小阀门开度后,烟温逐渐上升至 164 ℃,约 16:40 将阀门调回原开度后,排烟温度逐渐降低至原状态。

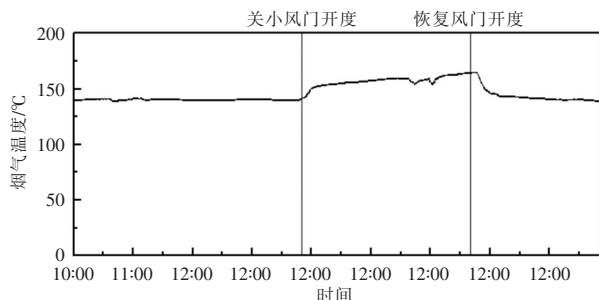


图2 不同阀门开度排烟温度

由试验可知调节引风量对提升烟温的效果比较明显,但大规模减小引风量来提升烟温,会引发与原设计引风机负荷不相匹配、烟气含硫含氟浓度超标、厂区电解烟气扩散导致安全事故发生等诸多问题。因此不能将调节引风量作为提升烟气温度的主要手段。

2.4 电解槽密封对烟气温度影响

电解槽密封主要包括槽盖板密封、电解槽门密封、阳极导杆密封等三个方面。受电解槽加工精度以及现场工人频繁开关操作不能完全复位等因素影响,一般电解槽密封情况较差(图3)。



图3 电解槽现场密封情况

对阳极导杆密封程度与烟气温度进行对比,结果如表 5 所示。

表 5 阳极导杆密封程度与排烟温度

槽编号	排烟温度/℃	阀门开度/%	导杆密封程度/%
1429	154.1	40.0	55
1431	178.7	43.0	75
1438	163.2	43.0	75
1433	158.8	48.0	55
1420	126.8	52.0	60
1435	147.8	52.0	70

由表 5 可知,在阀门开度小于 50 % 的情况下,阳极导杆密封性越好,烟温温度越高,且温差较为明显。

3 电解槽密封效果测试与实践

3.1 保温密封效果测试

对 1420 槽进行不同程度的密封改造,监测其烟气温度及烟气成分各项参数。测试工况如表 6 所示。

3.2 密封改造实践效果

根据测试效果,对出铝门与阳极导杆处进行密封保温,烟气升温效果明显。因电解槽门频繁开关,在实际生产中不便进行保温操作,而阳极导杆的密封件容易做到批量化生产、规模化应用,因此本次改造只对阳极导杆处进行密封保温处理。底板固定于电解槽上,密封件上下弯板之间为 50 mm 厚的保温材料,下弯板采用绝缘材料防止漏电,保温材料与阳极导杆之间的接触面采用玻纤布覆盖,保温材料与玻纤布之间采用无机粘结剂粘合。同时在电解槽侧壁粘贴保温材料,防止热量通过侧壁与空气换热,造成热量损失,还可以起到加强槽盖板与端盖板密封的效果,改造效果如图 10 所示。



图 10 密封装置与改造效果

对 1438 槽按照上述密封保温措施进行改造,监测改造后烟气温度可由原有 162 ℃ 提升至 180 ℃,温度提升明显,说明该密封保温措施行之有效,能大幅度提升电解铝烟气的余热品质,为余热高效利用提供基础保障。

4 结语

通过对电解槽保温改造研究,得出主要结论如下:

(1) 电解槽烟气温度,电解槽上部散热减少,侧部散热增加,对电解槽热平衡几乎没有影响;

(2) 电解槽型、电解槽槽盖板密封对电解烟气温度有一定影响,但不是关键性因素;

(3) 调节引风量可以明显改变电解烟气温度,但受电解工艺制约,不适合进行大规模大幅度调节;

(4) 通过进行阳极导杆与槽盖板上下搭接处密封,以及进行侧壁保温,能大幅度提升烟气温度,提升烟气余热品质。

参考文献:

- [1] 惠憬明,张敬东,张义,等. 电解铝烟气脱硫脱氟除尘超低排放技术应用[J]. 轻金属,2021(1):34-37
- [2] 谢照亮,张海龙. 铝电解烟气余热利用技术的应用[J]. 轻金属,2019(7):70-73
- [3] 张芬萍,张亚楠,汪艳芳,等. 铝电解烟气余热回收利用现状[J]. 轻金属,2017(10):24-28
- [4] 田官官,石良生,薛小军. 铝电解烟气余热利用的实践应用[J]. 山西冶金,2014,37(3):85-87
- [5] 陡文化. 电解铝生产中烟气净化及余热利用研究[J]. 世界有色金属,2021(21):3-4
- [6] Fler M, Lorentsen O A, Harvery W, et al. Heat recovery from the exhaust gas of aluminum reduction cells[C]. Light Metals 2010. Seattle, Washington, USA; Light Metals, 2010;243-248
- [7] 吕开雷,杨淘,陈紫君,等. 电解铝烟气余热低温干化处理市政污泥工程应用[J]. 中国给水排水,2021,37(12):120-123
- [8] 尚亚平,高建强. 基于电解铝废烟气的发电系统改造及经济性评价[J]. 轻金属,2021(9):58-62
- [9] 郭勇,周乃君. 铝电解低温烟气余热发电系统热力特性分析[C]//中国高等教育学会工程热物理专业委员会. 高等学校工程热物理第十九届全国学术会议论文集,2013:9

集团要闻

防腐材料产品市场捷报频传

2025 新年伊始,东福研究院防腐材料产品市场捷报频传,成功与青岛天能重工签订 20MW 风电机组防腐材料销售合同,开展海上超大风电机组防腐材料国产化替代应用;新型脱模带材料新增订单 3 吨,继续为东方电气主业产品核心部件生产工艺持续赋能。

来源:东方电气公众号

风电机架焊接变形研究

刘明超 许健 王效宇

东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 焊接变形不仅会对风电机架结构的尺寸产生影响, 还会降低其机械使用性能。当发生变形超标现象, 就应该有针对性的进行矫正, 矫正的操作过程必须科学规范。生产中最重要的是以预防为主, 事后控制为辅。为了避免或减少焊接变形现象的发生, 需要采取各种方法措施, 进行事前的控制。本文主要从风电机架变形后的矫正措施、变形原因、预防控制等几方面出发, 分析研究机架的变形问题。分析研究也能为其他项目类似结构机架的焊接生产提供宝贵的经验。

关键词: 焊接变形; 矫正; 变形原因; 预防控制

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)01-0081-07

Research on Welding Deformation of Wind Power Racks

LIU Mingchao, XU Jian, WANG Xiaoyu

(Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: Welding deformation not only affects the size of the wind power frame structure, but also reduces its mechanical performance. When deformation exceeds the standard, targeted correction should be carried out, and the correction process must be scientifically standardized. The most important thing in production should be prevention first, with post control as a supplement. In order to avoid or reduce the occurrence of welding deformation, various methods and measures need to be taken for pre control. This article mainly analyzes and studies the deformation problem of wind power racks from several aspects, including corrective measures, causes of deformation, and preventive control after deformation. Analysis and research can also provide valuable experience for the welding production of similar structural frames in other projects.

Key words: welding deformation; rectify; reason for deformation; preventive control

焊接变形在风电焊接机架的生产过程中较为常见, 它不仅对产品尺寸精度有一定影响, 对结构的承载力也会产生副作用, 因此当发现机架的变形超出要求范围值时, 须进行焊后矫形。矫形措施必须操作适当, 才能起到良好的效果。焊后矫形会拖延生产进度, 风电项目生产周期一般要求都较短。因此在制造前就应该全面的分析产品, 研究其结构特点和变形原因, 结合车间实际生产情况, 制定防变形措施, 这样既提高了产品质量, 也保证了机架的生产进度。

1 焊接变形

东方风电公司某系列焊接机架总共需生产 39 台, 前 12 台在焊接生产过程中发现有不同程度的变形, 变形主要在几处尺寸较长工件处: 序号 3、序号 4、序号 28、序号 29 和序号 36, 具体部位和变形情况见图 1 和图 2:

焊接变形主要分以下几种类别:

(1) 收缩变形: 焊接过程中, 金属凝固和冷却会导致体积收缩, 进而影响焊接件的尺寸。

收稿日期: 2024-07-22

作者简介: 刘明超(1985—), 男, 工程师, 主要从事焊接工艺方面的工作, 现任职于东方电气风电股份有限公司研究设计院。

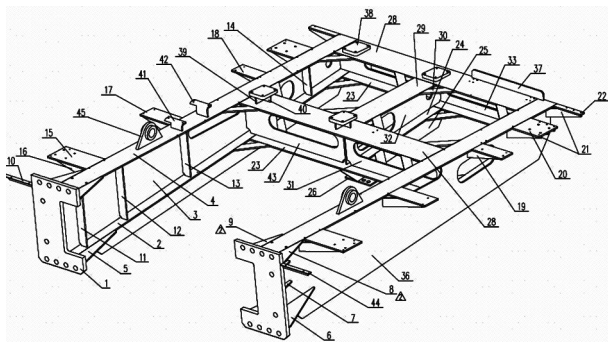


图1 机架结构



(a) 左侧波浪变形



(b) 右侧波浪变形



(c) 右侧角变形



(d) 尾部角变形

图2 变形情况

(2)角变形:焊缝两侧金属的热胀冷缩非均匀性可能导致角变形现象,引起局部区域的上拱或下陷。此类状况常在执行堆焊、对接焊、搭接焊以及T形接头的角焊作业中出现。

(3)波浪变形现象:焊接期间,工件表面可能因非均匀的热量分布及冷却产生波动,可能导致表面平整度受损。

(4)弯曲变形:整体弯曲现象可能源于焊接过程中热量分布的不均匀性,此现象会影响焊接结构的平面度及几何形态。焊接构件,如梁、立柱、管道等,普遍表现出形变现象。

(5)扭曲变形:在梁式结构或长细比大的构件中,焊接顺序、焊接路径或装配工艺等因素可能引起焊后截面沿不同轴线倾斜,产生扭转变形现象。^[1]

机架变形的形式主要为腹板的波浪变形和翼板、面板的角变形。变形处的工件较长边尺寸分别为:序号29长1 240 mm;序号28长2 550 mm;序号3、4、36长4 987 mm。依据测量结果,焊接钢结构引发的变形超出了我司焊接机架的尺寸公差限定,其中直线度、平行度和平面度应满足GB/T19804-E级的规定。具体要求见表1:

表1 直线度、平面度和平行度公差

公称尺寸 l (对应表面的较长边) 的范围										mm
公差等级	>30	>120	>400	>1 000	>2 000	>4 000	>8 000	>12 000	>16 000	>20 000
	~120	~400	~1 000	~2 000	~4 000	~8 000	~12 000	~16 000	~20 000	
	公差 t									
E	±0.5	±1	±1.5	±2	±3	±4	±5	±6	±7	±8

2 矫形

矫正工作不可或缺,以符合设计与规范标准,

针对焊接构件产生的变形,在焊后变形的纠正实践中,常见方法涉及应用力学矫正,热矫正技术,以及这两者的复合应用。

施力矫正法:矫正作业常通过应用液压千斤顶、螺旋式压力装置、滚轮矫正系统或在大型压力机设施中执行。^[2]

热矫正法:通过加热钢结构的特定区域以实现其屈服状态,随后依赖钢材冷却后的收缩特性执行矫正操作。^[2]换个角度看,这种矫正实际上是通过引入新的变形来弥补或抵消已发生的变形。技术执行的复杂性高,若工艺掌握不精确或温度调控不足,可能导致构件产生显著的额外形变。丰富的实践经验是热矫正不可或缺的。不同加热方法包括点状加热、线状加热、三角形加热。

根据机架的构造特点和变形情况,加之车间实际操作条件(如需大量工装辅助施力矫正),决定采取以下两个步骤:首先,选择使用三角形加热来矫正腹板的波浪变形,同时使用线状加热来矫正翼板和面板的角度变形。在同一位置进行热矫的次数不可超过两次,在进行矫正时加热的区域在单个截

面上不应过大,应该在多个截面上进行选择。若第一阶段处理效果不理想,就实施另一方案,即结合热矫和施加力进行矫正。

三角形的加热方式是从最顶部开始,由中心出发并向两侧逐步推进,逐层进行加热,直到底部停止。在加热腹板时,需谨慎控制温度,以免导致凹陷和变形,修复起来也会变得非常困难。

线状加热由中间向两端进行操作。加热宽度范围设定在 20~90 mm,针对薄板情况,建议适度缩减加热带宽,加热程序应从宽度中心向边缘逐渐实施。最好使用自然冷却的方式,当采用水冷时,如控制不好,达到急冷的程度,就会引起加热区晶粒度改变,使该区钢材性质改变,比如变脆,严重的情况下会直接开裂。热矫正加热温度由 Q355 的钢材性能 A_{c1} (725 ℃) 决定,取 600 ℃ 左右,即加热区温度不能超过钢材向奥氏体转变的相变温度。热矫正各具体参数见表 2。

表 2 热矫正参数表

设备	加热温度	加热气体	火焰类型	加热顺序	加热速率	冷却方式
焊炬、激光测温仪、测温仪	600 ℃ 左右	氧、乙炔	$\alpha > 1.2$ 的氧化焰	先加热刚性较大部位,再加热刚性较小部位	7~9 mm/s	自然冷却

依据氧气体积与乙炔体积的比例 α ,可将氧-乙炔焰划分为三类:氧化焰(比例超过 1.2)、中性焰(比例在 1 至 1.2 之间)及碳化焰(比例小于 1)。^[3]

加热时的温度可通过钢材表面的颜色进行估计,见表 3。

表 3 颜色与温度对照表

颜色	黑色	薄褐色	赤褐色	暗赤色
温度/℃	<470	500~550	550~580	650

依据 NB/T47015 的规定,当母材厚度小于或等于 50 mm 时,测温仪应距火焰点边缘 4 倍母材厚度,但不超过 50 mm。背面的钢板表面通常是测温点的选择位置,如果无法实现,应先移除热源,待材质厚度方向的温度达到均衡后方执行温度检测。在每 25 mm 的母材厚度中,均温过程需耗时 2 min。

经过遵循上述矫正步骤,却发现矫正成效未能达到预期:矫正过程涉及的截面过多,矫正操作有时诱发额外的形变,需反复矫正,且所需时间过长。因此,为了提升矫正效率,在加热期间同步施加外

部力进行辅助矫正,运用液压千斤顶、专门的辅助工装等设备进行操作。

热矫正和施力结合矫正的现场情况见图 3。

最后取得的效果较好,能够正常转入下一步的生产工序。产生变形现象后,车间矫正一台机架需 2~3 天,但因风电产品工期短,交货急,机架本身台数多,出现此类情况,严重影响产品的交货周期,打乱了生产安排计划。

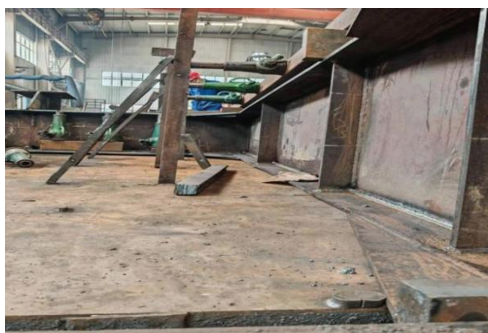
3 变形原因

接下来需要对还未完成装配焊接的 27 台机架进行变形原因的分析,以便采取相应的预防措施,确保机架的焊接生产可以顺利进行。

在焊接操作中,局部且非均匀的热输入导致了焊件内部产生焊接应力与形变现象。在焊接过程中,焊缝及邻近区域的金属因受热膨胀,遭遇周围冷却金属的约束,从而产生压缩应力和塑性应变,进而导致各向异性收缩,使得焊接结构发生多种变形。



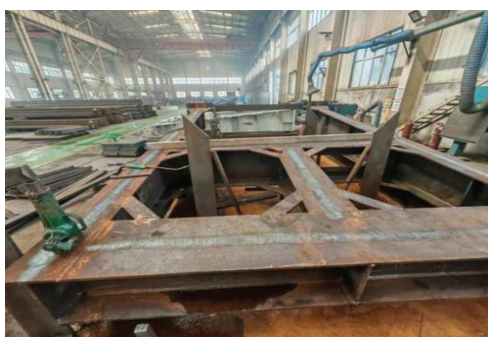
(a) 三角形加热



(b) 施力结合矫形



(c) 翼板矫形



(d) 尾部线状矫形

图3 矫形情况

分析本结构特点,由于钢板较薄(16 mm),机架前端范围(2 550 mm×3 100 mm)内无任何连接件,刚度较小,焊缝长度较长(1 240 mm、2 550 mm、4 987 mm),焊接时容易产生变形。经过对制造现场的检查,发现存在一些会对焊接变形产生不利影

响的问题:

(1)开始生产机架时,由于计划制造周期短,没有仔细研究产品的具体结构特点,未充分考虑到机架焊接过程中所带来的变形问题,因此没有采取相应的预防措施,采用的是从底部依次向上的装焊顺序焊接成整体。开始几台发现了变形现象的出现,但认为是焊接生产过程中的偶然现象,没有对其中的原因进行分析研究,随着制造过程的继续进行,前12台机架都产生了不同程度的变形问题。采用一次性焊接成整体的方式,会使后续的焊缝拘束度增大,焊缝无法自由的进行收缩,同时可能产生各钢板间变形叠加的现象,进而使变形量加大。

(2)现场施焊参数见图4,为了提高生产效率,采用的焊接参数(电流、电压)较大,在焊接速度不变情况下,线能量增大。增大焊接参数能增加焊材的熔敷量,缩短焊接周期,但线能量的增大会加剧焊接变形的产生。



图4 实际焊接参数

(3)在装焊时工件之间的间隙有不一致的现象,间隙大的部位由于填入的熔化金属量多,局部的热量相比其他地方高,同时间隙的不一致还会导致焊接冷却时,由于收缩程度的不一致而使得工件产生额外的形变。车间装配情况见图5。



图5 装配间隙不一致

(4)施焊时焊接层数较少,焊接层数的减少使

得焊缝及相邻位置的热输入较大,结合产生变形的原因,温度梯度就越大,焊接变形现象就更容易产生。

4 控制措施

焊接引起的变形不仅令结构外观受损,还会对其机械性能造成不良影响。为了减轻焊接变形对结构的影响,需要采取一系列的措​​施,提前进行控制。

结合机架的具体结构形式,考虑选择从如下几个方面进行控制:

(1)在保证焊接接头性能的前提下,可通过减小坡口的角度和深度,从而实现焊缝截面积的缩减。

(2)对于此类 Q355 系列钢材,宜加强对预热和层间温度的管控。优先考虑采用热输入较低的焊接方法,例如:CO₂ 气体保护焊。

(3)对长焊缝的焊接需要注意焊接顺序,应该由中间向两端进行焊接,这样钢件在焊接过程中可以自由收缩,减少约束,从而降低残余应力的产生。

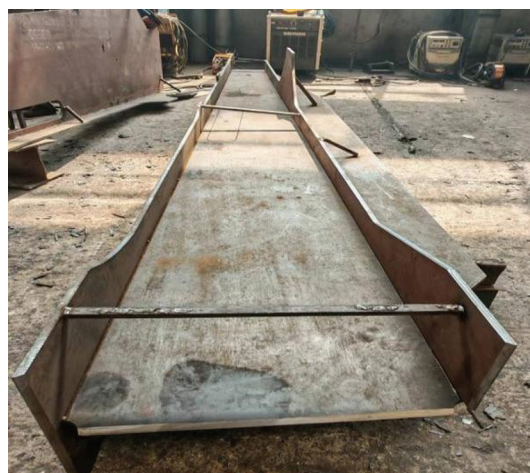
(4)应用强制约束的方法,业内常称之为刚性固定法。在焊接实践中,具备更高刚度的构件通常展现出较小的焊后变形,反之,刚度较低的构件可通过预增其刚性来抑制焊后的变形现象。

(5)可以在焊接区域和其周围的热影响区域还未完全冷却时,随即实施锤击,通过产生塑性变形来释放焊接过程中的残余应力。^[4]

除此之外,结合现场生产发现的问题,增加如下的控制焊接变形的措施:

(6)后面还未生产的机架焊接分几个组件进行:纵向翼板、腹板和纵向加强长筋板为一个组件,共两个组件,中间横向连接部分为一个组件,后部连接部分为一个组件,最后几个组件再焊接在一

起。同时增加临时支撑,增强结构的刚性。采用此方法的目的一是可减少变形,二是即使产生变形的情况,在组件的生产过程中由于零件较少,也能更好的进行矫形操作,见图 6。



(a) 腹板、翼板、纵筋组件装配



(b) 腹板、翼板、纵筋组件焊接完成

图 6 分组件进行焊接

(7)要求在焊接的过程中采用较小的焊接线能量。焊接参数过大,热输入就大,不但影响焊件的力学性能,焊接变形也更容易产生,因此尽量选用较小的焊接参数,见表 4 和图 7。

表 4 焊接参数

焊道/ 焊层	焊接 方法	填充金属		焊接电流		电弧电压 (V)	焊接速度 (cm/min)	线能量 (kJ/mm)
		型号	直径	极性	电流(A)			
1	135	ER50-G	Φ1.2	反接	230~270	24~29	34~40	≤1.38
2	135	ER50-G	Φ1.2	反接	240~310	26~32	30~35	≤1.98
3	135	ER50-G	Φ1.2	反接	240~310	26~32	30~35	≤1.98
4	135	ER50-G	Φ1.2	反接	240~310	26~32	30~35	≤1.98
5	135	ER50-G	Φ1.2	反接	240~310	26~32	30~35	≤1.98



图7 焊接电流电压

(8)要求纵向加强长筋板下料时割缝需保持平直度,同时与腹板装配时两者的装配间隙保持一致,腹板与翼板之间的装配间隙也应一致,见图8。



(a) 腹板与纵筋、翼板间隙一致



(b) 腹板与纵筋间隙一致

图8 保持装焊间隙的一致

(9)在焊接时尽可能采用多层多道焊。如在焊接本机架时采用至少5层进行施焊,增加施焊层数可使焊接时焊缝处的热量降低,结构局部的温度梯度减小,以达到减小变形的目的。

5 控制效果

后面生产的27台机架通过采用以上的方法进行严格控制,机架最后的防变形效果也很明显,经

过现场的检查和测量,直线度、平行度、平面度公差均在我司要求的标准 GB/T19804-E 级公差范围内。相比前12台机架,后续27台机架在生产过程中减少了变形所导致的矫正时间,同时也并未增加额外的焊接工序,为保证机架的质量和达到生产进度的要求奠定了基础,见图9。



(a) 左侧局部效果



(b) 机架整体效果

图9 控制变形后的效果

6 结语

焊接变形是钢结构焊接生产中经常遇到的现象,它不仅影响工件的尺寸精度,还会降低其承载力,因此应该引起足够的重视。此次研究对以后的项目类似结构机架的焊接生产具有很好的指导意义:此类机架焊接生产时容易产生变形,须引起足够的重视;焊接前需要从哪几方面出发,制定哪些防变形措施;车间生产时应该注意什么;当变形现象产生的时候该怎么去进行正确的矫正等。

在焊接施工过程中,首先要掌握产品的结构特点,编制实用的焊接制造工艺,选用合理的焊接方式和有效的控制措施,使得焊后残余应力减少及变形得到控制。只有在生产过程中不断的发现问题、积累相关经验,分析研究各种可能因素,才能使产品质量得到很好的保证。同时,与焊接内应力相同,热矫正引起的应力也属于内部应力。矫正操作若处理不当,其内应力将与焊接内应力及应用负荷应力相叠加,可能导致结构应力超出许可范围,因而减低承载的安全系数。因而,热矫正技术在钢结构制造中的选取必须审慎对待。日常的生产过程中应该以预防为主,事后控制为辅,这样不仅能提

高工件的质量,也能使工件的生产进度得到很好的保证。

参考文献:

- [1] 梁晋平. 对钢结构焊接变形的控制和矫正[J]. 山西冶金, 2012(5): 78-79
- [2] 靳松梅. 探究钢结构焊接变形的成因与控制措施[J]. 科技创新导报, 2012(23): 88
- [3] 岑文杰, 邱烁, 熊建波. 钢板桩火焰矫正施工控制技术[J]. 施工技术, 2013(42): 35-38
- [4] 曾晓虹, 向凯, 宋瑞艳. 焊接应力和焊接变形控制[J]. 石油化工设备, 2009(2): 59-63

集团要闻

东方电机首台中低水头段抽水蓄能机组 ——中核集团河南五岳抽水蓄能电站首台机组投产发电

2024年12月12日,东方电机首台中低水头段抽水蓄能机组——中核集团河南五岳抽水蓄能电站首台机组投产发电,标志着东方电机实现了200~800米水头段抽水蓄能产品全覆盖。这颗位于大别山里的“绿色大心脏”开始跳动,为革命老区经济社会发展注入源源不断的绿色动能。东方电机副总经理范先忠出席投产仪式。

五岳抽水蓄能机组额定水头241米,额定出力250兆瓦,额定转速300转/分钟,球阀直径3.1米,是东方电机迄今为止研制的最大直径球阀。在机组设计制造中,东方电机创新产品制造工艺,大幅提升了产品质量,缩短了生产周期。

五岳抽水蓄能电站位于河南省信阳市光山,是国务院批复的振兴大别山革命老区的重点能源项目,是河南省能源发展规划、电力发展规划重点项目,是中核集团首个开工建设的抽水蓄能电站。该电站设计总装机容量1000兆瓦,安装4台单机容量250兆瓦的抽水蓄能机组,全部机组由东方电机研制供货,计划于2025年全部投产发电。

电站建成后,主要承担河南电网的调峰、填谷、调频、调相及紧急事故备用等任务,预计每年可减少二氧化碳排放量约29.14万吨,相当于植树1600万棵,对加快构建新型能源体系,推动碳达峰、碳中和具有重要意义。

来源:东方电气网

《东方电气评论》征稿须知

《东方电气评论》是由中国东方电气集团有限公司、四川省动力工程学会联合主办的电站装备制造领域科技期刊,国内外公开发行人双月刊,国内统一连续出版物号 CN51-1333/TM,国际标准连续出版物号 ISSN1001-9006。

《东方电气评论》综合介绍我国电站装备制造领域的科技研发成果及先进制造技术,主要栏目有基础研究、火力发电、核能发电、水力发电、风力发电、光伏发电、工程技术、项目管理、电力电子与控制、数字制造等。

《东方电气评论》为技术性刊物,欢迎评论性文章,少量接受综述类文章。来稿必须未公开发表过,且创新性强、观点明确、数据可靠。文稿格式请参照《学术论文编写规则》(GB/T7713.2—2022)和 GB7714《文后参考文献著录规则》的较新版本;量和单位必须符合国家标准和国际标准。

稿件内容请勿涉及国家秘密和单位秘密,保密审查手续按作者所在单位的相关规定办理,必要时提供“不涉及保密,可以公开发表”的单位证明原件。投稿格式要求如下:

1、投稿方式:请使用电子文档投稿。电子文档的格式为 WPS 或 Word 文件。投稿时需提供通信作者或第一作者的电话号码、电子信箱和详细准确的邮送地址。

2、论文内容结构包括:论文题名(20字内),作者姓名,作者单位(单位及部门名称、地址及邮编),摘要(200字内),关键词(3~8个),正文(图、表应在正文中明确引用位置出现),参考文献。

3、英文项目:题名、摘要、关键词、作者姓名及其单位与通信信息几部分,除中文外,须译成英文一并提供。

4、插图与表格都应有图(表)序与图(表)题。刊出后的图片均为灰度图片,请作者确保能准确反映需表达的全部信息,画面清晰,大小适宜。图中字符一般用6号宋体字,表格应做成三线表。

5、文中符号:外文字母、符号必须分清大小写、正斜体,上下角标,数码符号等其位置高低应区别明显,容易混淆的外文字母,请在第一次出现时注明文种或含义。

6、论文作者署名应遵守学术规范。

7、作者简介:包括姓名、出生年、性别、职称和职务、何时何地取得何校何专业学位(最高学历),曾获得过的重大成果或奖励,现在从事的专业工作。

8、参考文献:只列出已公开出版并在文中直接引用的主要文献,且大多应为5年内的文献,序号按文中出现的先后顺序编排。

9、著作权声明:本刊已被《中文科技期刊数据库(全文版)》《中国核心期刊(遴选)数据库》《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库收录,有关作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,如作者不同意被收录,请在来稿时向本刊说明。

10、版面费:本刊未收取发表版面费。论文一经录用,编辑部酌付稿酬并赠送当期杂志每位作者2本。

11、邮箱信箱:dfdqpl@dongfang.com;投稿地址:成都市高新西区西芯大道18号,邮编:611731