

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM



2025

第39卷 总第157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

第三十九卷第三期

二〇二五年五月

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



公开 ISSN 1001-9006
发行 CN 51-1333/TM

第39卷第3期 (总第157期)
出版日期: 2025年5月25日

国内邮发代号: 62-187
国内定价: 8.00 元



2025

第 39 卷第 3 期 总第 157 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

投稿网址: <http://dfdqpl.xml-journal.net/>

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

- 双 LC 谐振单元的动态可重构型均衡技术研究 刘姝仪 王晶 吴文彭等(1)
- 超纯碲锌镉高压合成过程探究及工艺优化 钟连兵 张程 李在为等(10)
- 运用相图理论从复分解法产生碳酸氢钠的母液中回收氯化铵 王煥 李娜 郑明媚等(15)
- 水泥窑炉富氧掺氢燃烧试验研究 韦耿 毛宇 张敏(18)

核能发电

- 核电装备全要素协同制造数字化场景研究及其实际应用 赵丽 苟婕 舒寒芮等(25)
- 反应堆压力容器顶盖切割虚拟仿真验证研究 张中亮 张永领 陈戏三等(32)

工程技术

- 核电设备运输风险评价指标体系的实际应用 谢天(36)
- 浅谈某火力发电厂煤仓间钢结构改造 王雪 徐健 黄子轩等(41)
- 高海拔对燃料电池系统运行的影响及应对措施 曹蕾 唐刚 赵政顺等(45)
- 智能电网中的安全风险和管控措施研究 张达(50)

火力发电

- 基于 CFPD 的半干脱硫塔结构优化 李鹏 刘四威 杜文韬等(54)
- 空冷 1 030 mm 末级叶片开发与验证 李音 陈涛 周显丁等(58)
- 火电厂变频循环水泵智能优化控制研究 徐卫华 刘畅(62)

风力发电

- 沿海某风力发电机组防盐雾冷却系统的研究与应用 王玉 邓智春 杨希等(67)
- 浅谈变桨电机转矩与转速对热平衡的影响 王淋(73)
- 面向风电场站的故障预警平台设计与应用 王清照 杨鹤立 张辉(76)
- 基于数据分析的风机叶片异常状态监测 肖文静 刘征宇 王多平等(84)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*q*A4*88*zh*p¥8.00*750*17*2025-03

DONGFANG ELECTRIC REVIEW

3

2025

2025-5-25 Vol. 39 No. 3
(Bimonthly, since 1987)

CONTENTS

BASIC RESEARCH

- Research on Dynamic Reconfigurable Equalization Technique Based on Double LC Resonant Units *LIU Shuyi, WANG Jing, WU Wenpeng, et al*(1)
- Research on High Pressure Synthesis Technology and Process Optimization of Ultrapure CdZnTe *ZHONG Lianbing, ZHANG Cheng, LI Zaiwei, et al*(10)
- Ammonium Chloride Recovery from Sodium Bicarbonate Mother Liquor Produced by Double Decomposition Method with Phase Diagram Theory *WANG Huan, LI Na, ZHENG Mingmei, et al*(15)
- Experimental Study on Oxy-hydrogen Combustion in Cement Kiln *WEI Geng, MAO Yu, ZHANG Min*(18)

NUCLEAR POWER

- Research and Practical Application of Digital Scenarios for Collaborative Manufacturing of All Elements in Nuclear Power Equipment *ZHAO Li, GOU Jie, SHU Hanrui, et al*(25)
- Virtual Simulation Verification Study on Reactor Pressure Vessel Head Cutting *ZHANG Zhongliang, ZHANG Yongling, CHEN Xisan, et al*(32)

ENGINEERING

- The Risk Indicator System of Nuclear Power Equipment Carriage *XIE Tian*(36)
- Discussion on the Steel Structure Renovation of the Coal Bunker Building in A Thermal Power Plant *WANG Xue, XU Jian, HUANG Zixuan, et al*(41)
- Analysis and Countermeasures of High-altitude Effects on PEM Fuel Cell System *CAO Lei, TANG Gang, ZHAO Zhengshun, et al*(45)
- Research on Cyber Security Risks, Management and Control in Smart Grid *ZHANG Da*(50)

THERMAL POWER

- Research on Structure Optimization of Semi-dry Desulfurization Based on CPFD Method *LI Peng, LIU Siwei, DU Wentao, et al* (54)
- Development and Verification of 1 030 mm Last Stage Blade of Air Cooling Turbine *LI Yin, CHEN Tao, ZHOU Xianding, et al*(58)
- The Research of Intelligent Optimization Control Technology Based on Frequency Circulating Water Pump *XU Weihua, LIU Chang*(62)

WIND POWER

- Research and Application of The Anti-salt Mist Cooling System for Coastal Wind Turbines *WANG Yu, DENG Zhichun, YANG Xi, et al*(67)
- The Influence of Torque and Rotational Speed on the Thermal Equilibrium of Pitch Motors *WANG Lin*(73)
- Fault Warning Platform for Wind Farm Design and Application *WANG Qingzhao, YANG Heli, ZHANG Hui*(76)
- Monitoring of Abnormal States of Wind Turbine Blades Based on Data Analysis *XIAO Wenjing, Liu Zhengyu, Wang Duoping, et al*(84)



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

Submission Website: <http://dfdqpl.xml-journal.net/>

Overseas Distribution by:

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

双 LC 谐振单元的动态可重构型均衡研究

刘姝仪¹ 王晶² 吴文彭¹ 赖力¹

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 东方电气自动控制工程有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 串联电池组的单体不一致性会增加电池运行风险, 并降低电池组的可用容量和使用寿命, 其结构的单一性也限制着电池组的安全可靠高效运行。针对串联电池组提出一种动态可重构型均衡电路及其控制方法, 在提升均衡速度的同时, 提高了串联电池组运行的安全性。每个 LC 谐振单元由电容串联电感组成, 所有的开关器件都工作在零电流开关模式下, 有效降低了开关损耗。每个电池都与一个旁路开关并联, 并与一个断路开关串联, 在电池不需要充放电或者不需要均衡的时候, 可以用这两组开关实现串联电池组的重构, 保障电池组的安全可靠运行。旁路开关和断路开关能有效提升串联电池组的结构灵活性、使用安全性和均衡路径准确性。通过重构电池组的连接方式, 可以实现任意不相邻多个电池与任意不相邻多个电池之间的均衡, 在保证均衡精度的同时, 有效提升均衡的速度和效率。详细地阐述了电路的两种工作模式, 并分析了每种工作模式下均衡的原理、功率和效率, 通过仿真电路验证了理论分析的正确性。

关键词: 可重构均衡; 谐振开关; 均衡速度; 安全性

中图分类号: TM 91

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)03-0001-09

Research on Dynamic Reconfigurable Equalization Technique Based on Double LC Resonant Units

LIU Shuyi¹, WANG Jing², WU Wenpeng¹, LAI Li¹

(1. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

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

Abstract: The inconsistency of the single unit of the series battery pack will increase the risk of battery operation and likewise reduce the available capacity and service life of the battery pack, while the single structure of the battery pack also limits the safe, reliable and efficient operation of the battery pack. A dynamic reconfigurable equalizer with its control method is proposed for the series lithium battery pack, the safety and reliability of the series battery pack are improved at the same time as the balancing speed is improved. Every LC resonant unit is composed of a capacitor in series with an inductor, all the switches work in zero-current switching, which effectively reduces the switching loss. Every battery is connected in parallel to a bypass switch and connected in series to a cut-out switch, when the battery does not need to be charged or discharged or does not need to be equalized, the two sets of switches can be used to realize the reconfiguration of the series battery pack as well as ensure the safe and reliable operation of the battery pack. The bypass switches and cut-out switches can effectively improve the structural flexibility, safety and balance path accuracy of the series battery pack. By reconfiguring the structure of the battery pack, equalization between any non-adjacent multiple cells and any non-adjacent multiple cells can be realized, and while ensuring equalization accuracy, the equalization speed and efficiency are improved. Two operating modes of the circuit are described in detail, the equalization principle, power and efficiency of each operation mode are analyzed as well, and finally the correctness of the theoretical analysis is verified by the simulation circuit.

Key words: reconfigurable equalization; resonant switches; equalization speed; safety and reliability

收稿日期: 2024-11-18

作者简介: 刘姝仪 (1995—), 女, 2023 年毕业于西南交通大学电气工程专业, 硕士研究生, 助理工程师。现于东方电气集团科学技术研究院有限公司从事储能系统设计与技术研发工作。

随着电网、工业和交通朝着脱碳化的方向日益发展,锂离子电池组逐渐广泛应用于各种储能场景。^[1]为了满足输出电压和输出功率的需求,锂离子电池通常串联成组使用,串联成组的锂电池存在单体间的参数差异,随着使用次数的增加这些差异将不断扩大,限制了锂电池组的可用容量和使用寿命。^[2-3]基于此,锂电池组的均衡技术被广泛研究。

按照是否采用电阻耗散的方式可以将均衡电路分为被动均衡电路和主动均衡电路^[4]。被动均衡电路采用并联电阻耗散热能的形式对电池的能量进行均衡,具有控制简单、体积小和成本低的优点,缺点是均衡效率低和增加电池组热管理负担。^[5-7]主动均衡电路通过电容和电感等储能元件将能量从电量较高的电池转移到较低的电池^[8],相比于被动均衡而言提升了效率和速度,降低了电池组热管理负担。在均衡的基础上,通过对电池连接形式的重构,可以提升电池组结构的灵活性,退出过度充电、过度放电以及故障的电池,进一步提升了电池组的安全可靠性和均衡灵活性。^[9-10]

按照均衡时能量的流通过程可以将主动均衡电路分为相邻单体之间的均衡(adjacent cell to cell, AC2C)^[11-12]、任意单体对任意单体的均衡(any cell to any cell, AC2AC)^[13-14]、整串电池对单体的均衡(string to cell, S2C)^[15]以及单体对整串电池的均衡(cell to string, C2S)^[16]、直接单体对单体的均衡(direct cell to cell, DC2C)^[17-19]、直接多个连续单体对多个连续单体的均衡(multi-cell to multi-cell, MC2MC)^[20]。

文献[11]提出了一种基于谐振 LC 单元的相邻单体均衡电路,降低了电路的整体损耗。文献[12]中提出了一种基于三谐振态谐振 LC 单元的相邻单体均衡电路,在电压差较大时能保持较高的均衡效率。但文献[11]和文献[12]中的相邻单体均衡方式均衡路径较长,总体的效率和速度较低,并且还会随着串联电池数量的增加而降低。文献[13]提出了任意单体对任意单体的均衡,能够同时对所有单体进行均衡,均衡路径最优,但均衡速度会随着电压差的降低而下降。文献[15]提出了一种整串电池对单体的均衡电路,将整串电池的能量传递给电压最低的单体。文献[16]提出了一种单体对整串电池的均衡电路,将电量从最高的单体传递到整

串电池。文献[15]和文献[16]的这两种均衡方式可以在一定程度上提升均衡速度,但是也提升了开关器件所承受的电压应力,同时均衡存在能量因反复流动而浪费的问题。文献[17]提出了一种基于直接单体对单体的三谐振态均衡电路,为电感续流提供了单独的流通过程,降低了电路损耗。文献[18]提出了一种基于 Cuk 电路和模糊逻辑控制的直接单体对单体均衡方式。文献[19]在三谐振态均衡电路的基础上,通过两个 LC 谐振单元交替工作在均衡状态以及自谐振状态,提升了均衡的速度。文献[17-19]采用的 DC2C 均衡方式均衡速度不随电压差的减小而降低,但由于同时参与均衡的电池只有两个,均衡速度会随着电池数量的增加而降低。文献[20]提出了一种直接多个连续单体对多个连续单体的均衡电路,同时参与均衡的电池数比直接单体对单体型均衡方式的更多,但多个单体只能是相邻连接的,极大地限制了均衡的灵活性。

文献[21]提出了一种矩阵式重构电路,可以灵活改变电池组的结构,来应对电池组的差异化运行。文献[22]在现有可重构均衡电路的基础上进行改进,在维持电池组输出电压的前提下提升了均衡效率。

本文提出了一种基于双 LC 谐振单元的动态可重构型均衡电路,可以实现直接不相邻多个单体对不相邻多个单体的均衡(any multi-cell to any multi-cell, AM2AM)。与 MC2MC 型均衡电路相比,极大地提升了均衡的灵活性和实用性;与 DC2C 型均衡电路相比,同时参与均衡的电池数量更多,均衡的速度有所提升;通过旁路开关和断路开关可以将充满、满放和故障的电池从电池组中切出,提升了电池组工作的安全性。

1 均衡电路结构与特点

1.1 电路结构

本文所提出的基于双 LC 谐振单元的动态可重构型均衡电路的结构如图 1 所示,包括: n 个电池串联组成的电池组、2 个 LC 谐振单元以及 $4n$ 个均衡开关器件和 $2n$ 个均衡/重构复用开关器件。每个 LC 谐振单元由一个谐振电容和一个谐振电感串联组成。在均衡开关器件中, S_{i1} 、 S_{i2} ($i=2,3,\dots,n-1$) 和开关 S_3 均为双向开关,通过两个金属氧化物半导体场效应管(metal-oxide-semiconductor field-effect

transistor, MOSFET) 反向串联组成, 其余开关均为单个 MOSFET。

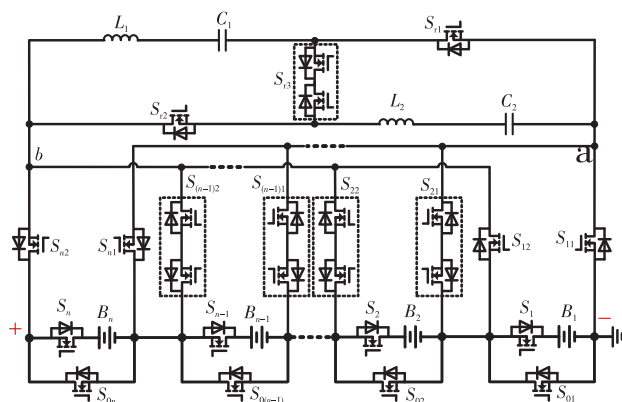


图1 均衡电路结构

1.2 电路工作特点

该电路的特点如下。

(1) 两个 LC 谐振单元各由一个谐振电容和一个谐振电感串联组成, 通过开关器件 S_{r1} 、 S_{r2} 和 S_{r3} 连接。根据单体的电量情况, 通过控制不同开关的通断能够以特定的方式均衡。

(2) 与现有的 DC2C 均衡方式相比, 通过加入重构开关器件, 在增加电池组结构灵活性的同时, 也能增加安全可靠, 使电池组在充放电以及均衡的过程中可以根据具体电量分布, 选择性地退出不需要充放电或者参与均衡的电池, 提高了电池组的可用容量和使用效率。

(3) 重构开关可以实现串联电池组中不相邻单体之间的直接串联, 在此基础上采用电池组与单体的均衡方式, 在保证均衡效率的基础上极大地提升了均衡速度, 提升了均衡的实际应用性。

2 工作原理分析

均衡电路的工作模式有两种, 分别是组对单体均衡模式和单体对组均衡模式。每个 LC 谐振回路的等效串联电阻 R , 包含一个电容和一个电感的等效串联电阻之和。为了便于分析, 这里以四个电池串联组成的电池组为例来说明均衡电路的工作原理, 并假设如下:

(1) 所有开关器件均为理想器件, 当其导通时可认为短路, 当其断开时可认为开路。

(2) 两个谐振电容具有相同的电容值 C , 两个谐振电感具有相同的电感值 L , 两个谐振 LC 单元的

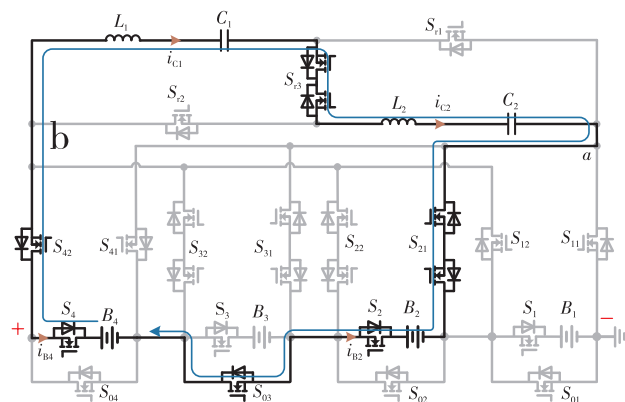
等效串联电阻 R 也相等。

(3) 电流流入 LC 谐振单元或电池为正向。

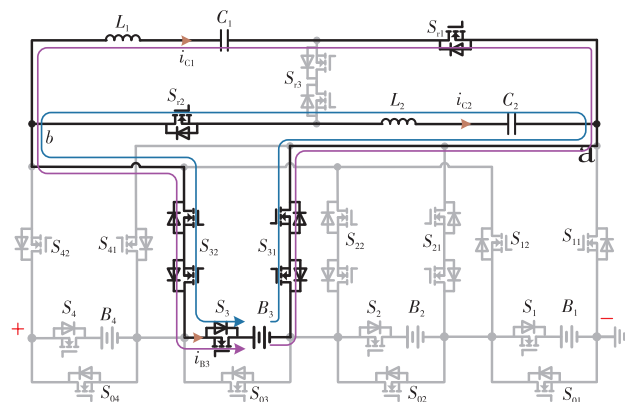
(4) 为了便于分析不相邻电池之间组成电池组进行的均衡, 设电池组的初始电压分布为 $V_{B4} > V_{B2} > V_{B1} > V_{B3}$ 。

2.1 组对单体均衡模式

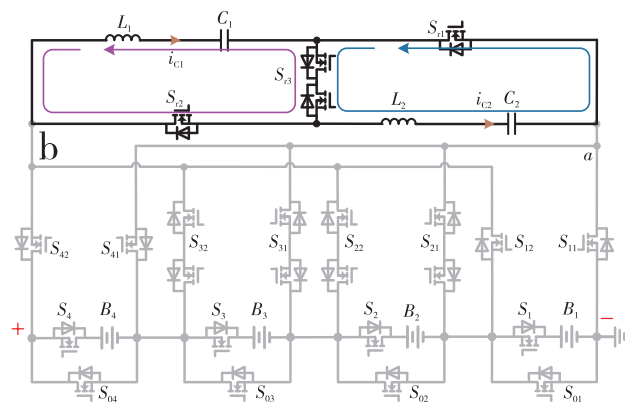
组对单体的均衡模式有三个工作模式, 以两个不相邻电池串联组成的电池组对单体均衡为例, 其工作原理图如图2所示。



(a) 模式 I



(b) 模式 II



(c) 模式 III

图2 组对单体均衡工作模式

图2(a)所示为组对单体模式的工作模式 I, 开关 S_2 、 S_{03} 、 S_4 、 S_{21} 、 S_{42} 和 S_{r3} 导通, 其余开关关断; 电压最高的不相邻单体 B_1 和 B_3 组成的电池组对串联的两个 LC 谐振单元充电; 储能单体 B_1 和 B_3 处于闲置状态, 不参与均衡的充放电过程。此时的两个 LC 谐振单元串联, 可以等效为一个 LC 谐振单元, 等效后的电容值和电感值可以表示为式(1-2):

$$C_{\text{equ}} = \frac{C^2}{2C} = \frac{C}{2} \quad (1)$$

$$L_{\text{equ}} = 2L \quad (2)$$

电容 C_1 和 C_2 上流过的电流相等, 电压则分别为等效电容上电压值的一半, 将等效电容上的电压表示为 v_{equ} ; 电池 B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 的电压分别表示为 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 ; 将串联电池组 B_2 和 B_4 的整体电压表示为 V_{2+4} , 则模式 I 期间等效电容上的电压和电流可以表示如式(3-4):

$$v_{\text{equ}}(t) = V_{2+4} - [V_{2+4} - v_{\text{equ}}(t_0)] e^{\alpha \Delta t_0} (\cos \beta \Delta t_0 - \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta \Delta t_0) \quad (3)$$

$$i_{\text{equ}}(t) = [V_{2+4} - v_{\text{equ}}(t_0)] \frac{1}{L\beta} e^{\alpha \Delta t_0} \sin \beta \Delta t_0 = -i_{B2}(t) \quad (4)$$

其中

$$v_{\text{equ}}(t_0) = 2v_{C1}(t_0) = 2v_{C2}(t_0) \quad (5)$$

$$v_{\text{equ}}(t_1) = 2v_{C1}(t_1) = 2v_{C2}(t_1) \quad (6)$$

$$\alpha = -\frac{R_1}{2L_1} = -\frac{R_2}{2L_2} = -\frac{R}{2L} \quad (7)$$

$$\Delta t_0 = t - t_0 \quad (8)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} - \frac{R_1^2}{4L_1^2}} = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2} - \frac{R_2^2}{4L_2^2}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (9)$$

为了使开关器件工作在零电流开关 (zero current switch, ZCS), 开关频率与谐振频率应如式(10):

$$f_s = f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (10)$$

推导得出电路在组对单体均衡模式下的均衡效率表达式为:

$$\eta_{p2c} = \frac{P_3}{P_{2+4}} = \frac{V_3}{V_{2+4}} \times \left[\frac{-4(1-\gamma)V_3 + 2V_{2+4}}{2\gamma V_3 + (1-\gamma)V_{2+4}} \right] \quad (11)$$

组对单体均衡模式下的均衡功率表达式为:

$$P_{p2c} = \frac{C\beta}{\pi} \left[\frac{2(1+\gamma)^2 V_3 V_{2+4} + (1-\gamma^2)(V_{2+4}^2 - 4V_3^2)}{2(1-\gamma+\gamma^2)} \right] \quad (12)$$

2.2 单体对组均衡模式

单体对组的均衡模式有三个工作模式, 以单体对两个不相邻电池串联组成的电池组均衡为例, 其工作原理图如图3所示。

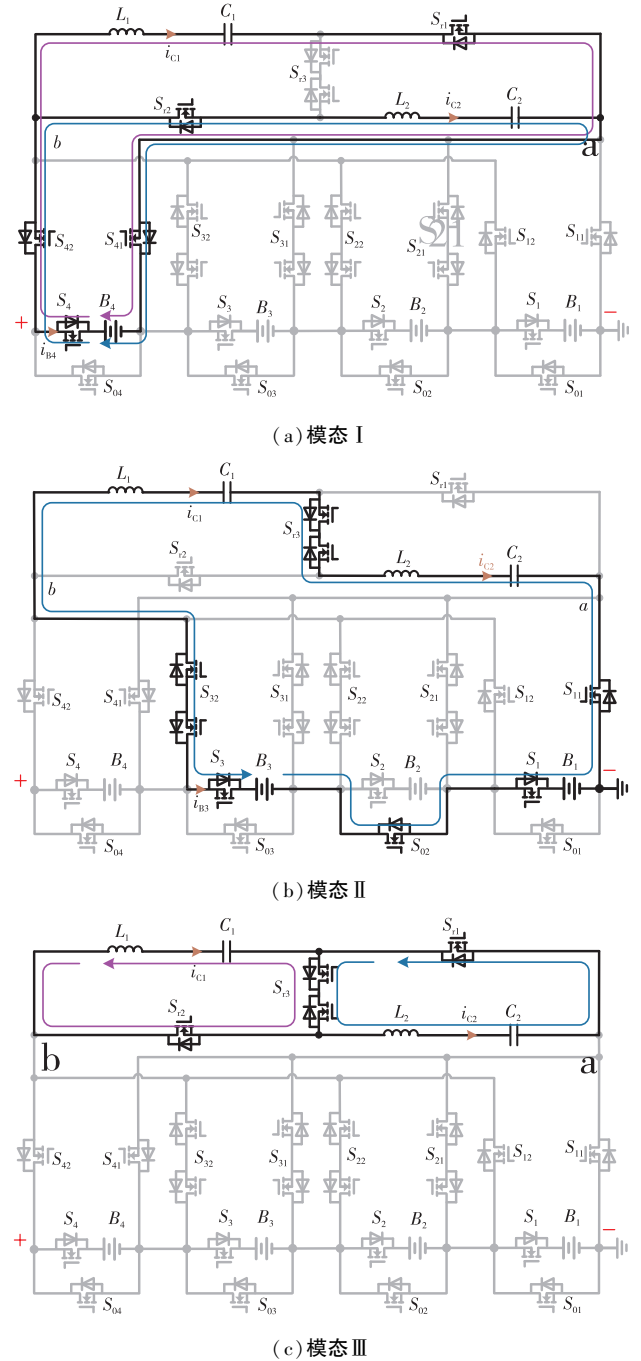


图3 单体对组均衡工作模式

图3(a)所示为单体对组模式的工作模式 I, 开关 S_4 、 S_{41} 、 S_{42} 、 S_{r1} 、 S_{r2} 导通, 其余开关关断; 两个 LC

谐振单元并联,电压最高的单体 B_4 对其进行充电; 电池 B_1 、 B_2 和 B_3 处于闲置状态,不参与均衡的充放电过程。此时的电容 C_1 上的电压和电流可以表示为式(32-33):

$$v_{c_1}(t) = V_4 - [V_4 - v_{c_1}(t_0)] e^{\alpha \Delta t_0} (\cos \beta \Delta t_0 - \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta \Delta t_0) \quad (13)$$

$$i_{c_1}(t) = [V_4 - v_{c_1}(t_0)] \frac{1}{L\beta} e^{\alpha \Delta t_0} \sin \beta \Delta t_0 = -\frac{i_{B_4}(t)}{2} \quad (14)$$

图 3(b) 所示为单体对组均衡模式的工作模式 II, 开关 S_1 、 S_{02} 、 S_3 、 S_{11} 、 S_{32} 和 S_{13} 导通, 其余开关关断; 两个 LC 谐振单元串联, 对电压最低的不相邻单体 B_1 和 B_3 串联组成的电池组进行放电; 电池 B_2 和 B_4 处于闲置状态, 不参与均衡的充放电过程。

图 3(c) 所示为单体对组模式的工作模式 III, 开关 S_{r1} 、 S_{r2} 和 S_{r3} 导通, 其余开关关断; 两个 LC 谐振单元进入自谐振状态, 电池组不参与能量传递。此时电容 C_1 上的电压和电流可表示为式(15-16):

$$v_{c_1}(t) = v_{c_1}(t_2) e^{\alpha_1 \Delta t_2} (\cos \beta_1 \Delta t_2 - \frac{\alpha_1}{\beta_1} \sin \beta_1 \Delta t_2) \quad (15)$$

$$i_{c_1}(t) = -v_{c_1}(t_2) \frac{1}{L_1 \beta_1} e^{\alpha_1 \Delta t_2} \sin \beta_1 \Delta t_2 \quad (16)$$

推导出整个模式 I 期间电池 B_4 释放的功率为:

$$P_4 = V_4 \times I_{B_4} = \frac{V_4 C \beta}{\pi} \left[\frac{2(1-\gamma^2) V_4 + \gamma(1+\gamma) V_{1+3}}{1-\gamma+\gamma^2} \right] \quad (17)$$

同理可以计算出整个模式 II 期间电池 B_1 和 B_3 吸收的功率为

$$P_{1+3} = V_{1+3} \times I_{B_{1+3}} = \frac{V_{1+3} C \beta}{\pi} \left[\frac{2(1+\gamma) V_4 - (1-\gamma^2) V_{1+3}}{2(1-\gamma+\gamma^2)} \right] \quad (18)$$

由此得出单体对组均衡模式的均衡效率表达式为:

$$\eta_{c2p} = \frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{V_{1+3}}{V_4} \times \left[\frac{2V_4 - (1-\gamma) V_{1+3}}{4(1-\gamma) V_4 + 2\gamma V_{1+3}} \right] \quad (19)$$

单体对组均衡模式的均衡功率可以表示为:

$$P_{c2p} = \frac{C\beta}{\pi} \left[\frac{2(1+\gamma)^2 V_4 V_{1+3} + (1-\gamma^2)(4V_4^2 - V_{1+3}^2)}{2(1-\gamma+\gamma^2)} \right] \quad (20)$$

3 均衡性能分析

3.1 组对单体均衡模式

组对单体的均衡模式下, 可画出均衡电路的工作原理波形图如图 4 所示。在电池 B_2 和 B_4 串联后与两个串联 LC 单元并联时, 所流过的电流是电池 B_3 与两个并联 LC 单元并联后所流过电流的一半, 且方向相反。谐振 LC 单元实现了电路的 ZCS。

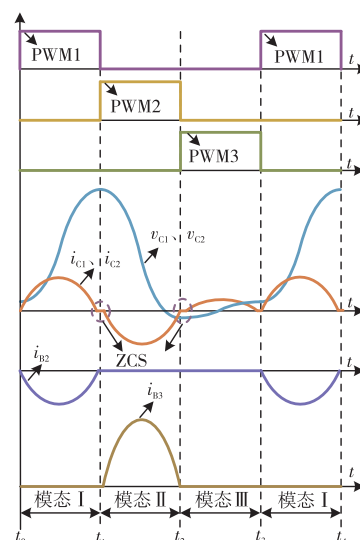


图 4 组对单体均衡工作原理波形图

将均衡模式 II 中被充电电池的电压和模式 I 中放电电池的电压的比值记为 U ; 在组对单体的均衡模式下, 根据式(11)可得出均衡效率与电压比 U 的关系式如式(21):

$$\eta_{p2c} = U \times \frac{-4(1-\gamma)U+2}{2\gamma U+1-\gamma} \quad (21)$$

假设均衡电容值 C 为 $4.7 \mu\text{F}$, 电感值 L 为 $22 \mu\text{H}$, 谐振单元等效串联电阻值 R 为 0.1Ω , 根据推导可计算出 γ 的值, 约为 0.9298 , 带入式(21)中可得出均衡效率与电压比 U 的关系式为:

$$\eta_{p2c} = U \times \frac{2-0.2808U}{1.8596U+0.0702} \quad (22)$$

根据式(22)画出均衡效率随电压比变化的曲线如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 在电压比小于 0.2 时, 均衡效率受电压比值的影响较大, 而当电压比大于 0.2 时, 均衡效率的值基本稳定在 $[0.85, 0.9]$ 的区间内。选择电压比值为 0.5 , 带入式(21)中, 可以得到均衡效率的值等于 γ , 画出均衡效率与电感 L 和电

容 C 的比值 L/C 以及谐振单元等效串联电阻值 R 的关系如图 6 所示。

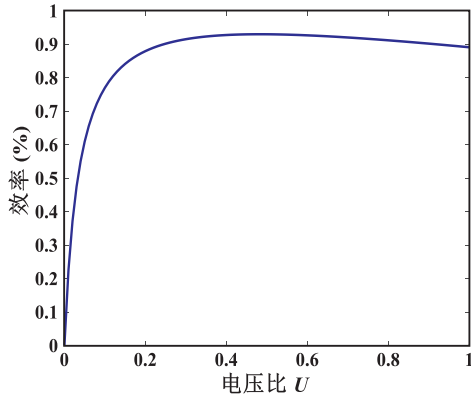


图 5 组对单体均衡效率与电压比关系图

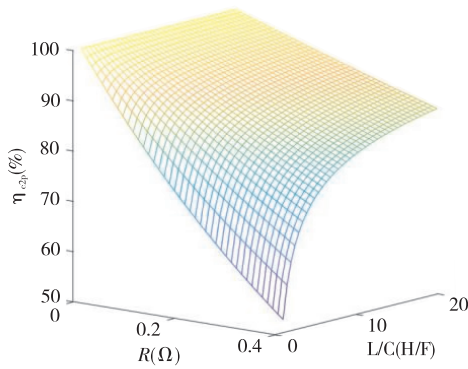


图 6 组对单体均衡效率随 L/C 及 R 变化的曲线

从图 6 中可以看出,均衡效率会随着等效串联电阻 R 的增大而降低,随着电感和电容的比值 L/C 的增大而升高,因此选择器件时需要将等效串联电阻的值控制得越小越好,并适当提升电感与电容的比值。

3.2 单体对组均衡模式

组对单体的均衡模式下,假设电池 B_4 的电压是所有单体中最高的,电池 B_1 和 B_3 的电压均远低于电池组的平均电压,可得出均衡电路的工作原理波形图如图 7 所示。

电池 B_4 与两个并联 LC 谐振单元并联时所流过的电流,是电池 B_1 和 B_3 串联后与两个串联 LC 单元并联所流过电流的两倍,且方向相反。同样的,谐振 LC 单元实现了电路的 ZCS。

同样将均衡模态 II 中被充电的电池电压和模态 I 中的放电电池电压的比值记为 U ;单体对组的均衡模式下,根据式 (19) 可得出均衡效率与电压比 U 的关系式为:

$$\eta_{e2p} = U \times \frac{2 - (1 - \gamma)U}{2\gamma U + 4(1 - \gamma)} \quad (23)$$

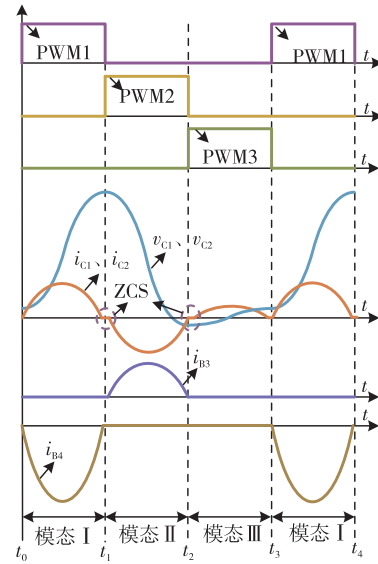


图 7 单体对组均衡工作原理波形图

假设均衡电容值为 $4.7 \mu\text{F}$,电感值为 $22 \mu\text{H}$,均衡单元等效串联电阻值为 0.1Ω ,计算出 γ 的值约为 0.9298 ,带入式 (23) 中可得出均衡效率与电压比 U 的关系式为:

$$\eta_{e2p} = U \times \frac{2 - 0.0702U}{1.8596U + 0.2808} \quad (24)$$

根据式 (24) 画出均衡效率随电压比变化的曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出,在电压比小于 0.5 左右的值时,均衡效率受电压比值的影响较大,而当电压比大于 0.5 时,均衡效率的值基本稳定在 $[0.8, 0.9]$ 的区间内。选择电压比值为 0.8 ,带入式 (23) 中,可以得到均衡效率的表达式为:

$$\eta_{e2p} = \frac{6 + 4\gamma}{25 - 15\gamma} \quad (25)$$

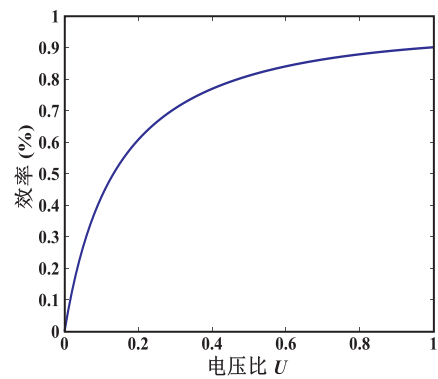


图 8 单体对组均衡效率与电压比关系图

画出均衡效率与电感和电容的比值 L/C 以及等效串联电阻 R 的关系如图 9 所示。

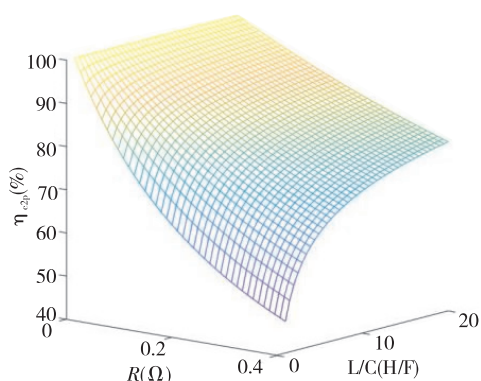


图9 单体对组均衡效率随 L/C 及 R 变化的曲线

从图9中可以看出,与组对单体均衡模式相同,均衡效率会随着等效串联电阻 R 的增大而降低,随着电感和电容的比值 L/C 的增大而升高,因此选择器件时需要将等效串联电阻的值控制得越小越好,并适当提升电感与电容的比值。

4 仿真实验

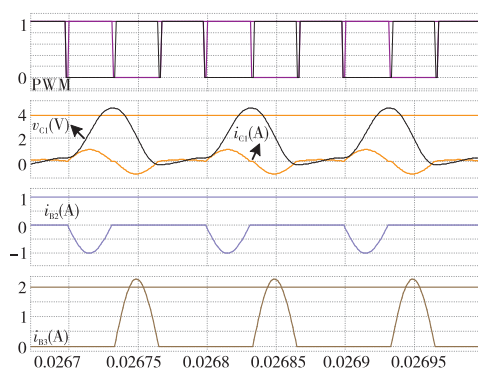
在 Psim 软件中搭建了对四个串联储能单体进行均衡的仿真模型,对上述理论分析进行验证,同时与文献[17]和[19]的仿真结果进行对比分析。仿真电路参数如表1所示。

为了便于对比,每组均衡的 V_{B1} 、 V_{B2} 、 V_{B3} 和 V_{B4} 的值均设为恒定值,分别为:2.1 V、2.5 V、2.0 V 和 2.6 V。

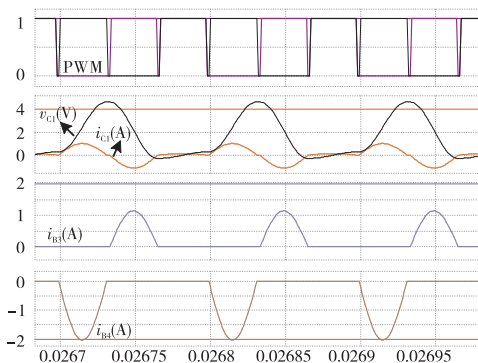
表1 仿真参数

参数	数值
仿真步长	1E-6
谐振频率 f_r /kHz	15.65
开关频率 f_s /kHz	15.15
谐振电容 $C/\mu\text{F}$	4.7
谐振电感 $L/\mu\text{H}$	22
占空比	0.5
谐振单元等效串联电阻 $R/\text{m}\Omega$	100

图10所示为仿真的电容电压、电容电流和电池电流波形图。图10(a)为组对单体均衡模式的波形图,图10(b)为单体对组均衡模式的波形图。从图10可以看出,波形图与理论分析一致,并且都能实现开关的 ZCS。



(a) 组对单体均衡模式



(b) 单体对组均衡模式

图10 电容电压、电容电流和电池电流仿真波形图

图11(a)所示为文献[17]的仿真结果,均衡到最大压差为3 mV 所需的时间为0.457 s。图11(b)所示为文献[19]的仿真结果,均衡到最大压差为3 mV 所需的时间为0.305 s。

图11(c)所示为上述组对单体均衡模式的仿真结果,均衡到最大压差值为3 mV 所需的时间为0.275 s。图11(d)所示为上述单体对组均衡模式的仿真结果,均衡到最大压差值为3 mV 所需的时间为0.274 s。

对比图11(c)和图11(d)的仿真结果可以看出,在相同的初始电压分布下,组对单体均衡模式和单体对组均衡模式的均衡时间几乎相等,并且由于增加了同时参与均衡的电池数量,均衡速度与文献[17]和文献[19]的均衡结果相比均有不同程度的提升,均衡所用时间分别缩短了约40%和10%。

为了使仿真结果更贴合实际,对文献[17]和文献[19]进行仿真时所用的仿真参数与本文所提出的电路相同,且开关频率均设定为15.15 kHz。为了节省均衡时间,采用电容值为0.2 F 的电容作为储能单体进行仿真分析。所用谐振电容均设定为4.7 μF ,谐振电感均设定为22 μH ,LC 谐振单元的等效串联电阻均设定为100 $\text{m}\Omega$ 。

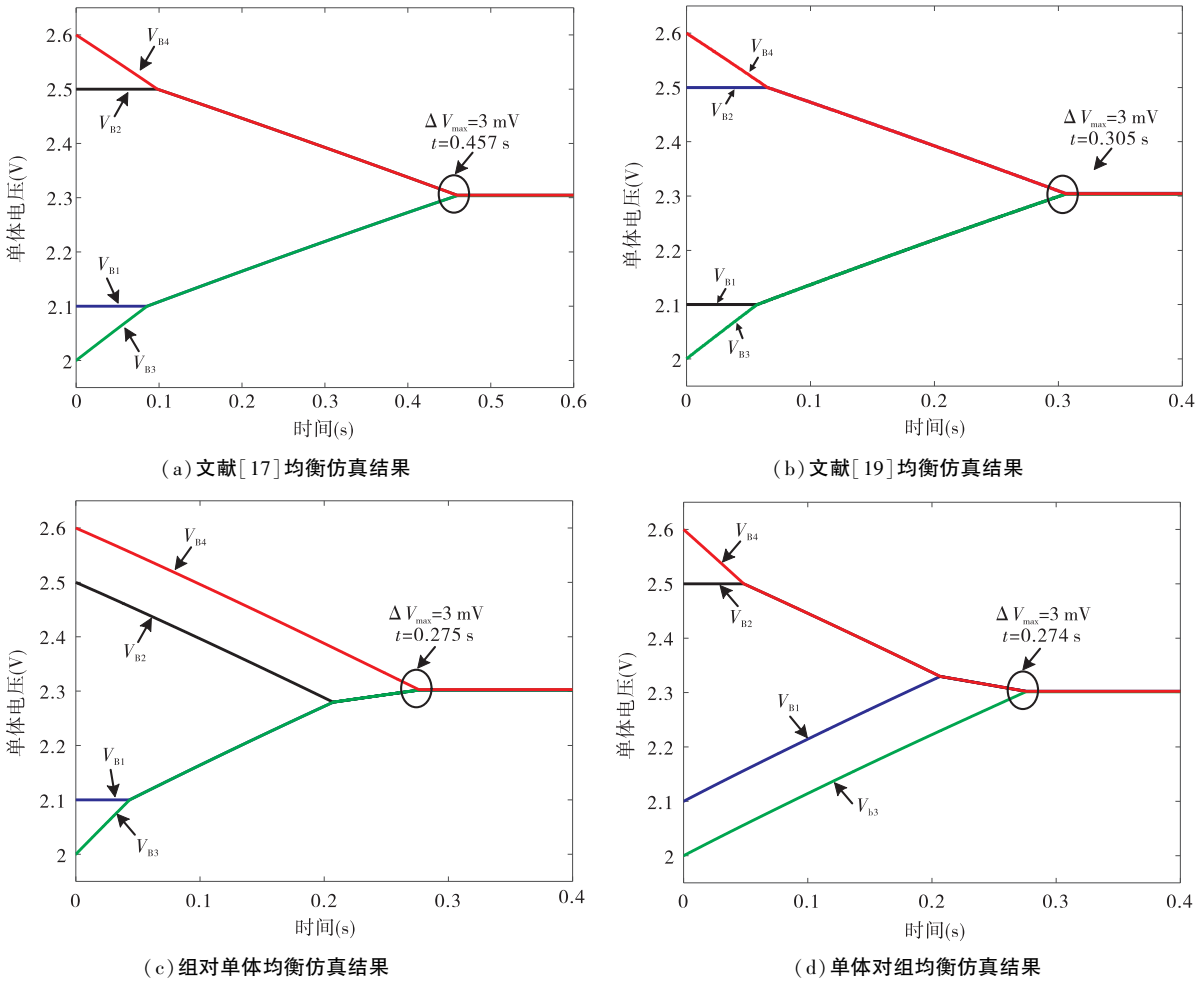


图 11 仿真结果

5 与现有均衡方式相比

表 2 所示为所提出的电路与现有均衡电路性能指标的对比。主要均衡性能指标包括均衡速度、均衡效率、均衡精度和电路复杂程度,“*”的个数越多则代表程度越高。

文献	均衡性能				
	路径	速度	效率	精度	复杂度
[11]	AC2C	**	**	***	*
[13]	AC2AC	***	***	**	*
[15]	S2C	*	*	*	***
[16]	C2S	*	*	*	**
[17]	DC2C	****	****	****	****
[20]	MC2MC	***	**	**	**
提出电路	AM2AM	*****	***	****	**

本文所提出的电路及其均衡方式与现有的其他均衡电路相比,具有均衡速度快、均衡精度高和

安全可靠性好优势,由于采用了串联开关和旁路开关,开关器件的数量上则没有优势。

6 结语

本文提出了一种基于双 LC 谐振单元的动态可重构型均衡电路,在谐振型开关电容均衡方式的基础上,通过重构开关增加串联电池组结构的灵活性,提升了均衡电路的实际应用性,同时提高了电池组的安全可靠性。详细分析了所提出电路在两种工作模式下的不同工作模态,通过搭建四个串联储能元件的仿真电路,验证了理论分析的正确性,与现有同类型电路对比,该电路对均衡速度具有明显的提升作用。

参考文献:

[1] Guo Xiangwei, Wu Qi, Xing Cheng, et al. An active equalization method based on an inductor and a capacitor for series battery pack [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38 (3) :

- 4040-4052
- [2] 蔡敏怡,张娥,林靖,等. 串联锂离子电池组均衡拓扑综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(15):5294-5310
- [3] 戴海峰,王楠,魏学哲,等. 车用动力锂离子电池单体不一致性问题研究综述[J]. 汽车工程,2014,36(2):181-188
- [4] Ci Song,Lin Ni,Wu Dalei. Reconfigurable battery techniques and systems: A survey[J]. IEEE Access,2016(4):1175-1189
- [5] 李小龙,徐顺刚,许建平,等. 一种单电感双向电池均衡电路[J]. 电机与控制学报,2019,23(4):90-97
- [6] Hannan M A,Hoque M M,Peng S E,et al. Lithium-ion battery charge equalization algorithm for electric vehicle applications [C]//2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Portland,OR,USA:IEEE,2016:1-8
- [7] Koseoglou M,Tsioumas E,Jabbour N,et al. Highly effective cell equalization in a lithium-ion battery management system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(2):2088-2099
- [8] Kim C H,Kim M Y,Moon G W. A modularized charge equalizer using a battery monitoring IC for series-connected li-ion battery strings in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(8):3779-3787
- [9] 黄薛,王友仁,徐智童. 可重构电池技术研究综述[J]. 机械制造与自动化,2019,48(1):219-221
- [10] 慈松,张从佳,刘宝昌,等. 动态可重构电池储能技术:原理与应用[J]. 储能科学与技术,2023,12(11):3445-3455
- [11] Ye Yuanmao,Cheng K W E,Yeung Y P B. Zero-current switching switched-capacitor zero-voltage-gap automatic equalization system for series battery string [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(7):3234-3242
- [12] Shang Yunlong,Zhang Qi,Cui Naxin,et al. A cell-to-cell equalizer based on three-resonant-state switched-capacitor converters for series-connected battery strings [J]. Energies, 2017, 10(2): 206-220
- [13] Ye Yuanmao,Cheng K W E,Fong Y C,et al. Topology,modeling, and design of switched-capacitor-based cell balancing systems and their balancing exploration [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(6):4444-4454
- [14] Shang Yunlong,Zhang Chenghui,Cui Naxin,et al. A delta-structured switched-capacitor equalizer for series-connected battery strings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1):452-461
- [15] Lyu Chengzhang,Huang Zhiwu,Li Heng,et al. Distributed control for state-of-energy balancing of supercapacitor modules in light rail vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5):4447-4457
- [16] Samanta A,Chowdhuri S. Active cell balancing of lithium-ion battery pack using dual DC-DC converter and auxiliary lead-acid battery[J]. Journal of Energy Storage,2021(33):1-16
- [17] Yu Yanqi,Saasaa R,Khan A A,et al. A series resonant energy storage cell voltage balancing circuit [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020,8(3): 3151-3161
- [18] Wu Tiezhou,Qi Yibo,Liao Li,et al. Research on equalization strategy of lithium-ion batteries based on fuzzy logic control[J]. Journal of Energy Storage,2021(40):1-10
- [19] Zhang Xiaobing,Zhou Guohua,Liu Shuyi,et al. A voltage balancing circuit based on LC unit with dual LC resonant tanks[C]//2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Chengdu,China:IEEE,2021:927-932
- [20] Shang Yunlong,Zhang Qi,Cui Naxin,et al. Multi-cell-to-multi-cell equalizers based on matrix and half-bridge LC converters for series-connected battery strings [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2020,8(2):1755-1766
- [21] Kim T,Qiao W,Qu L Y,et al. Power electronics-enabled self-X multicell batteries: A design toward smart batteries [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(11):4723-4733
- [22] 魏业文,解园琳,李梅,等. 改进的可重构均衡电路及控制策略研究[J]. 电源技术,2022,46(4):420-424

欢迎投稿,欢迎订阅!

超纯碲锌镉高压合成过程探究及工艺优化

钟连兵 张程 李在为 杨武勇

四川东树新材料有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:碲锌镉($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, CZT)晶体因其宽禁带、高光电吸收效率及优异的能量分辨率,在红外探测与核辐射检测等领域具有重要应用价值。本研究通过高压合成技术探究了合成温度、保温时间及气氛压强对 CZT 多晶材料纯度与均匀性的影响规律。实验表明,最佳工艺参数为:合成温度 $1\ 130\ ^\circ\text{C}$ 、保温时间 $6\ \text{h}$ 、压强 $4.0\ \text{MPa}$,在此条件下可获得纯度达 7N 级的超纯 CZT 多晶材料。优化工艺可有效抑制 Te 挥发,降低 Fe、Ni、B 等杂质的质量分数含量至 $0.5\times 10^{-6}\%$ 以下,同时改善 Zn 元素分布均匀性。

关键词:碲锌镉多晶;高压合成;工艺优化;超纯材料;杂质控制

中图分类号:O782

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0010-05

Research on High Pressure Synthesis Technology and Process Optimization of Ultrapure CdZnTe

ZHONG Lianbing, ZHANG Cheng, LI Zaiwei, YANG Wuyong

(Sichuan Dongshu New Materials Co., Ltd., 61800, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: Cadmium zinc telluride ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, CZT) crystals are of significant value in infrared detection and nuclear radiation detection due to their wide band gap, high photoelectric absorption efficiency, and excellent energy resolution. This study investigates the effects of synthesis temperature, holding time, and pressure on the purity and homogeneity of CZT polycrystalline materials using high-pressure synthesis technology. The experimental results demonstrate that the optimal process parameters are a synthesis temperature of $1\ 130\ ^\circ\text{C}$, holding time of $6\ \text{h}$, and pressure of $4.0\ \text{MPa}$, under which ultrapure CZT polycrystalline material with a purity of up to 7N can be obtained. The optimized process effectively suppresses Te volatilization, reduces the quality fraction content of impurities such as Fe, Ni, and B to below $0.5\times 10^{-6}\%$, and improves the homogeneity of Zn element distribution.

Key words: CdZnTe polycrystalline; high-pressure synthesis; process optimization; ultra-pure materials; impurity control

碲锌镉($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, CZT)是由碲化镉(CdTe)与碲化锌(ZnTe)形成的 II-VI 族宽禁带固溶体半导体材料,其禁带宽度($E_g \approx 1.57\ \text{eV}$)可通过调节 Zn 含量(x 值)实现连续调控。^[1] CZT 晶体具有高平均原子序数(~ 50)、共价键主导的原子结合特性及优异的室温电阻率($10^{10}\sim 10^{11}\ \Omega\cdot\text{cm}$),可高效通过光电效应将辐射能量转化为电信号,是红外探测与核辐射检测领域的核心材料。^[2] 例如,碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)作为当前性能最优的红外探测器材料,需以 CZT 晶体为外延生长衬底,主要原因包括:① CZT

晶格常数($\sim 6.48\ \text{\AA}$)随 Zn 含量变化与 HgCdTe 高度匹配,可实现共格外延;^[3] ② CZT 的低介电常数($\epsilon \approx 9.5$)与宽禁带特性可满足 HgCdTe 生长的红外透过率需求。^[4] 此外, CZT 因其高原子序数与均匀电学特性,在室温核辐射探测器领域展现出重要应用潜力,已逐步应用于医疗成像、核安全监测及空间探测等领域。

然而, CZT 多晶材料的合成面临显著挑战:① 高温下 Te 单质易挥发(沸点 $\sim 990\ ^\circ\text{C}$),导致化学计量比偏离目标值(如 $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$);② Zn 组分分布

收稿日期:2025-03-28

作者简介:钟连兵(1981—),男,2006年毕业于哈尔滨工业大学材料学专业,博士,高级工程师。现担任四川东树新材料有限公司副总经理,从事新能源复合材料及高纯材料工艺技术研发工作。

不均引发晶格畸变与电学性能波动;③Fe、Na等杂质元素(源自原料或设备)难以完全去除,降低材料纯度。传统常压合成法因单质挥发损失严重,难以制备高纯度 CZT 多晶材料。

针对上述问题,本研究提出采用高压合成技术优化 CZT 多晶制备工艺。该技术通过提升反应气氛压强(3.0~4.0 MPa)抑制 Te 挥发,同时利用高温液相(>1 100 ℃)促进 Cd、Zn、Te 元素的扩散与均匀分布,从而提升多晶反应充分性。实验设计基于单一变量法,系统探究以下关键参数的影响规律:①合成温度:设定 1 120 ℃、1 130 ℃、1 150 ℃,研究温度对组分均匀性与杂质含量的影响;②保温时间:选取 4 h、6 h、8 h,优化反应动力学过程;③气氛压强:调整 3.0 MPa、3.5 MPa、4.0 MPa,分析压力对挥发抑制与熔体对流的调控作用。通过 X 射线衍射(XRD)与辉光放电质谱(GDMS)对产物进行相组成、Zn 分布及杂质含量表征,结合工艺参数建立优化模型,最终实现超纯 CZT 多晶的可控制备。

1 实验

1.1 实验设备及原料

碲锌镉多晶制备实验所需要原材料信息如表 1。

表 1 原料信息表

原料名称	纯度	状态
Te	7N	块状
Zn	7N	粒状
Cd	7N	棒状

实验所用设备信息如表 2。

表 2 设备信息表

设备名称	型号	用途
高压加热炉	HPC47	材料合成
氮化硼坩埚	-	反应容器
GDMS	Nu, Astrum	分析材料杂质含量
X 射线衍射仪	DX-2000	分析材料物相组成

1.2 实验过程

采用 7N 超纯碲(Te)、锌(Zn)、镉(Cd)单质作为原材料,按照 $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ 的化学计量比称量 Te、Zn、Cd 单质原材料,将称量好的单质原材料平均份,具体的铺料顺序按照 Te-Cd-Te-Zn 进行,计 Te-Cd-Te-Zn 循环次数为 n,本文实验中 $n=3$ 。将坩埚放入高压合成炉中,按照设定好的升降压和升降温

程序进行合成提纯。制备完成的碲锌镉多晶材料分别在上中下部位采集样品。

本实验通过辉光放电质谱仪(GDMS)检测样品中的杂质含量。X 射线衍射仪(XRD)分析表征样品的晶体结构和相组成,测量时具体参数如下:Cu 靶 K_{α} 射线、管电压 40 kV、管电流 30 mA、起始角度 20°、终止角度 80°、步进角度 0.06°。

2 结果与讨论

2.1 高温合成温度对碲锌镉多晶材料质量的影响

为探究合成温度对碲锌镉多晶材料质量的影响,实验在固定工艺参数下进行:保温时间 4 h、投料摩尔比 $Cd:Zn:Te=0.9:0.1:1$ 、投料总量 1 kg、合成压强 4.0 MPa。选取 1 120 ℃、1 130 ℃及 1 150 ℃三个温度梯度,系统研究温度对材料组分均匀性、纯度及杂质含量的调控规律。

2.1.1 不同合成温度对炉体不同位置碲锌镉多晶材料的影响

图 1 为不同合成温度下产物中部样品 XRD 对比图。根据 X 射线衍射(XRD)图谱分析结果显示在 1 130 ℃和 1 150 ℃条件下合成的产物中,除主要物相 $CdZnTe$ 的衍射峰外,还检测到微量单质 Te 的特征衍射峰。通过右侧衍射角范围为 46°~48°的 XRD 局部放大图进一步分析发现,与 1 120 ℃下产物的主相衍射峰相比,1 130 ℃和 1 150 ℃下产物主相衍射峰向低角度方向发生偏移。值得注意的是,1 130 ℃下产物的主相衍射峰表现出更高的对称性,而 1 150 ℃下则出现明显的双峰现象。上述结果表明,随着合成温度的升高,产物主相中 Zn 的含量显著降低,且在 1 150 ℃下产物主相中 Zn 的分布呈现出均匀性。

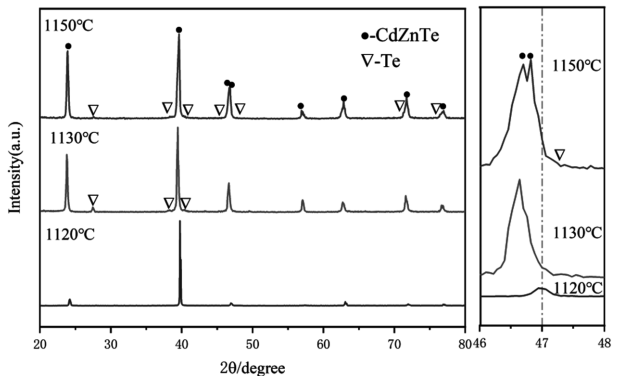


图 1 不同合成温度下制备的产物中部样品 XRD 对比图

图2为不同合成温度下制备的产物上部样品XRD对比图。根据X射线衍射(XRD)分析结果可以观察到,1130℃与1150℃条件下合成的碲锌镉(CdZnTe)多晶材料上部样品中均存在微弱的单质Te特征衍射峰。这一现象可能是由于Te单质在高温条件下升华后于炉顶区域凝华所致。进一步通过右侧局部放大图分析发现,1150℃下产物的主相衍射峰呈现出较差对称性及明显的双峰分裂现象,表明该温度下上部样品中Zn含量分布存在显著的不均匀性。此外,1130℃与1150℃下产物主相衍射峰相对于1120℃均向低角度方向偏移,表明这两种温度条件下合成产物的主相中Zn含量相对较低。

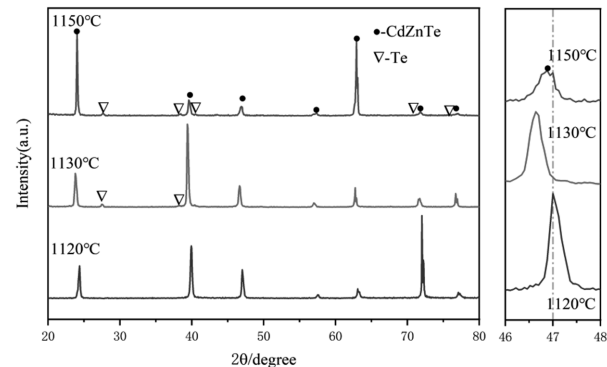


图2 不同合成温度下制备的产物上部样品XRD对比图

图3为不同合成温度下制备的产物下部样品XRD对比图。通过X射线衍射(XRD)分析发现,1150℃下合成的产物中检测到较多的单质Te特征衍射峰,这一现象可能与炉体下部区域温度场分布不均匀有关。结合右侧局部放大图可以进一步观察到,1150℃下产物下部衍射峰出现明显的分峰现象,表明该区域Zn元素分布仍然存在不均匀性。此外,1130℃下产物主相衍射峰相对于1120℃向低角度方向偏移,证实其主相中Zn含量相对较低;

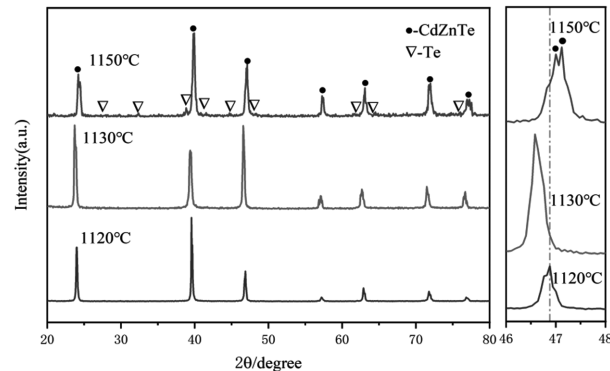


图3 不同合成温度下制备的产物下部样品XRD对比图

而1150℃下产物主相衍射峰相对于1120℃向高角度方向偏移,表明其主相中Zn含量显著升高。

2.1.2 不同合成温度下制备的碲锌镉多晶材料中部纯度

超纯碲锌镉(CdZnTe)多晶材料的杂质含量是评价其合成质量的关键指标。表3列出了三种不同合成温度下制备的CdZnTe多晶材料中部区域的多种杂质元素含量。根据表中数据,随着合成温度的升高,Fe、Ni、S、B元素的质量分数含量呈现显著下降趋势,其中Fe、Ni、B元素的含量均低于 $0.5 \times 10^{-6}\%$ 。然而,Na元素的含量随温度升高有所增加,而Ti元素的含量则表现出先升高后降低的变化规律。基于这些结果,在后续的工艺参数优化中,Na元素与Ti元素的含量将成为重点关注对象。

表3 不同合成温度下合成的碲锌镉多晶材料中部部分杂质元素质量分数含量表

(单位 $\times 10^{-6}\%$)			
杂质元素	1120℃	1130℃	1150℃
钠(Na)	0.9	0.8	1.6
钛(Ti)	0.16	1.1	0.13
铁(Fe)	1.7	<0.5	<0.5
镍(Ni)	2.1	<0.5	<0.5
硫(S)	3.5	1.0	1.1
硼(B)	1.92	<0.5	<0.5
硅(Si)	0.6	<0.5	0.9

2.2 保温时间对碲锌镉多晶材料质量的影响

本节在固定合成条件(温度1130℃、投料比Cd:Zn:Te=0.9:0.1:1、投料量1kg、合成压强4.0MPa)下,研究了不同保温时间(4h、6h、8h)对碲锌镉(CdZnTe)多晶材料纯度的影响。

2.2.1 不同保温时间对炉体不同位置碲锌镉多晶材料的影响

图4是不同保温时间下产物中部样品的XRD对比图谱。观察发现,保温时间为4h时,产物中部存在Te单质衍射峰,但随着保温时间延长,该衍射峰逐渐消失,表明延长保温时间可有效降低Te单质含量。局部放大图谱显示,保温时间为8h时,主相衍射峰出现双峰分裂现象,表明主相中Zn分布不均匀。此外,6h产物的主相衍射峰相对于4h产物向高角度偏移,说明6h产物主相中Zn含量较高;而8h产物的主相衍射峰仅略微向高角度偏移,表明8h与4h产物主相中Zn含量相近。

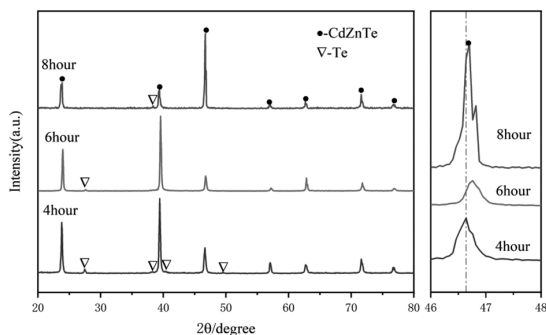


图4 不同保温时间下合成的产物中部样品 XRD 对比图

图5是不同保温时间下产物上部样品的XRD对比图谱。结果显示,所有产物的上部均存在Te单质衍射峰。保温时间为8h时,主相部分衍射峰出现双峰现象,表明Zn在主相中分布不均匀。局部放大图谱进一步显示,6h和8h产物的主相衍射峰均相对于4h产物向高角度偏移,说明其主相中Zn元素含量有所增加。综合分析表明,随保温时间延长,上部碲锌镉多晶中Zn元素比例逐渐增大,且在6h后趋于稳定,但Zn元素的分布均匀性逐渐降低。

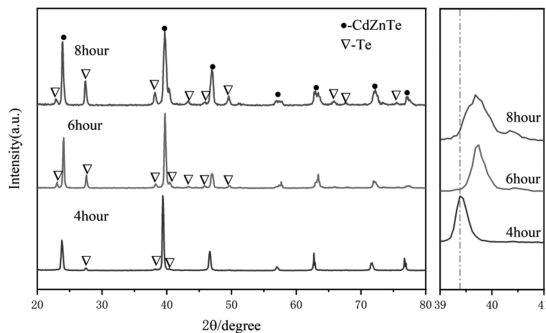


图5 不同保温时间下合成的产物上部样品 XRD 对比图

图6展示了不同保温时间下产物下部样品的XRD对比图谱。观察发现,下部样品中均未出现Te单质衍射峰。保温时间为6h时,主相衍射峰峰形对称,表明Zn元素分布较为均匀。6h产物的主相衍射峰相对于4h产物略微向低角度偏移,说明两

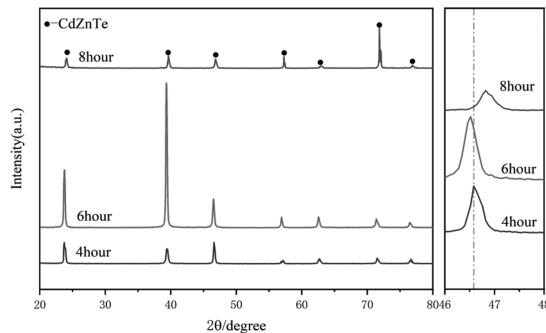


图6 不同保温时间下合成的产物下部样品 XRD 对比图

者主相中Zn含量相近。而8h产物的主相衍射峰相对于4h产物向高角度偏移,表明其主相中Zn含量相对较高。

2.2.2 不同保温时间下合成的碲锌镉多晶材料中部纯度

表4列出了不同保温时间下合成的碲锌镉(CdZnTe)多晶材料中部区域的多种杂质元素的质量分数含量。从表中可以看出,随着保温时间的延长,Fe、Ni、B元素含量均低于 $0.5\times10^{-6}\%$,Na元素含量略有增加,而Ti元素质量分数含量呈现先降低后略微回升的趋势。同时,S元素含量小幅上升,Si元素含量则显著增加,这一现象将成为后续工艺优化中的重点关注对象。

表4 不同保温时间下合成的碲锌镉多晶材料中部部分杂质元素质量分数含量表

杂质元素	(单位 $\times10^{-6}\%$)		
	4 h	6 h	8 h
钠(Na)	0.8	1.0	0.9
钛(Ti)	1.1	0.16	0.17
铁(Fe)	<0.5	<0.5	<0.5
镍(Ni)	<0.5	<0.5	<0.5
硫(S)	1.0	1.0	1.1
硼(B)	<0.5	<0.5	<0.5
硅(Si)	<0.5	0.9	2.0

2.3 不同合成压强对碲锌镉多晶材料质量的影响

本章节在固定合成条件(温度1130℃、保温时间6h、投料量1kg)下,研究了不同合成压强(3.0MPa、3.5MPa、4.0MPa)对碲锌镉(CdZnTe)多晶材料质量的影响。

2.3.1 不同合成压强对炉体不同位置碲锌镉多晶材料的影响

图7展示了不同合成压强下产物中部样品的XRD对比图谱。观察发现,合成压强为3.0MPa

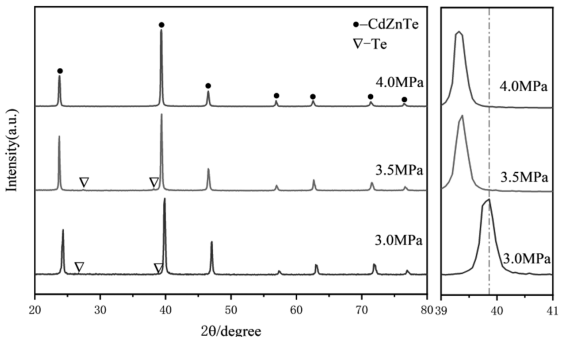


图7 不同合成压强下合成的产物中部样品 XRD 对比图

和 3.5 MPa 时,产物中部存在少量 Te 单质衍射峰。局部放大图谱显示,所有产物的衍射峰均表现出良好的对称性,未出现双峰现象,表明产物中部主相中 Zn 元素分布较为均匀。此外,3.5 MPa 和 4.0 MPa 对应的主相衍射峰相对于 3.0 MPa 向低角度偏移,说明在较高合成压强下,产物主相中 Zn 含量相对较低。

图 8 展示了不同合成压强下产物上部样品的 XRD 对比图谱。结果显示,合成压强为 3.0 MPa 与 3.5 MPa 时,产物上部存在少量 Te 单质衍射峰,而 4.0 MPa 下产物上部出现大量 Te 单质衍射峰。此外,局部放大图谱显示,3.0 MPa 对应的衍射峰峰形对称,表明 Zn 元素分布较为均匀;而 3.5 MPa 与 4.0 MPa 对应的主相衍射峰相对于 3.0 MPa 向低角度偏移,说明其产物主相中 Zn 含量相对较低。

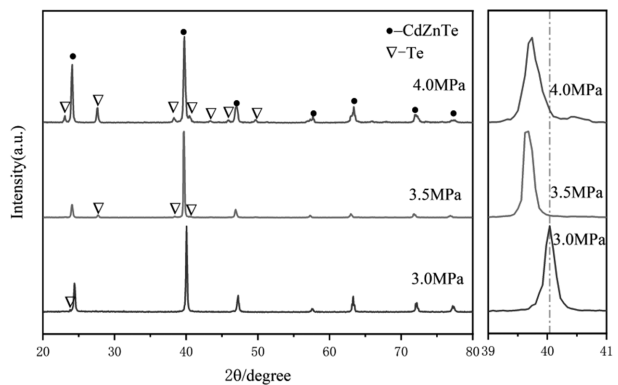


图 8 不同合成压强下合成的产物上部样品 XRD 对比图

图 9 展示了不同合成压强下产物下部样品的 XRD 对比图谱。观察发现,所有合成压强下产物下部均存在少量 Te 单质衍射峰,其中 3.0 MPa 下产物主相衍射峰出现双峰现象,表明 Zn 元素分布不均匀。此外,3.5 MPa 与 4.0 MPa 对应的主相衍射峰相对于 3.0 MPa 向低角度偏移,说明其主相中 Zn 含量相对较低。

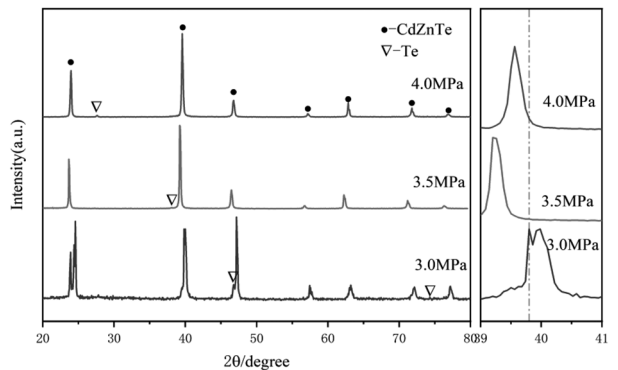


图 9 不同合成压强下合成的产物下部样品 XRD 对比图

2.3.2 不同合成压强下合成的碲锌镉多晶材料中部纯度

表 5 列出了不同合成压强下合成的碲锌镉 (CdZnTe) 多晶材料中部区域的多种杂质元素的质量分数含量。从表中可以看出,随着合成压强的增大,Na 与 Si 元素含量先减少后稳定在 $1.0\times10^{-6}\%$ 左右;Fe、Ni、B、Al 元素含量均低于 $0.5\times10^{-6}\%$;S 元素含量呈现先上升后降低的趋势,但整体仍有所增加;Ti 元素含量则显著降低。

表 5 不同合成压强下合成的碲锌镉多晶材料中部部分杂质元素质量分数含量表

杂质元素	(单位 $\times10^{-6}\%$)		
	3.0 MPa	3.5 MPa	4.0 MPa
钠(Na)	1.3	0.9	1.0
钛(Ti)	0.23	0.16	<0.1
铁(Fe)	<0.5	<0.5	<0.5
镍(Ni)	<0.5	<0.5	<0.5
硫(S)	2.0	3.2	2.5
硼(B)	<0.5	<0.5	<0.5
硅(Si)	1.6	1.0	1.1
铝(Al)	<0.5	<0.5	<0.5

3 结语

本文针对超纯多晶碲锌镉 (CdZnTe) 材料的制备展开研究,其纯度及杂质元素含量是评价材料质量的关键指标。文章通过对合成温度、保温时间以及合成压强等工艺参数的优化,得出以下结论。

(1)从整体纯度结果来看,部分杂质元素(如 Na、S、Si)在 CdZnTe 多晶材料制备过程中难以完全去除,这些元素将成为后续超纯材料工艺优化中的重点研究对象。

(2)最终优化工艺条件确定为合成温度 1 130 ℃、保温时间 6 h、合成压强 4.0 MPa,在此条件下制备的 CdZnTe 多晶材料纯度达到 99.999 99+%。

参考文献:

[1] 王朋飞. CdZnTe 晶体的缺陷调控及电输运过程研究[D]. 西安工业大学,2018

[2] 杨帆,王涛,周伯儒,等. 室温核辐射探测器用碲锌镉晶体生长研究进展[J]. 人工晶体学报,2020,49(4):561-569

[3] 折伟林,李乾,刘江高,等. 碲锌镉晶体定向研究[J]. 红外,2022,43(1):1-5

[4] 罗亚南,陈亦忻,郭关柱,等. 碲锌镉晶体生长炉自主设计与控温性能实验[J]. 红外技术,2022,44(1):73-78

运用相图理论从复分解法产生碳酸氢钠的母液中回收氯化铵

王焕 李娜 郑明媚 杨露 梁全勋 邓毅

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

摘要: 文章介绍了一种运用相图理论回收氯化钠和碳酸氢铵复分解母液中的氯化铵的方法。根据 25 ℃、60 ℃ 时 $\text{NaCl-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 三元水盐体系相图, 采用蒸发结晶和冷却结晶组合工艺从复分解母液废水中回收 NH_4Cl , 并对回收过程原理、回收工艺参数等进行分析讨论。结果显示, 在氯化铵和氯化钠的共饱和点附近回收的 NH_4Cl 纯度约为 95 %, 25 ℃ 冷却结晶得到氯化铵的纯度大于 95 %。

关键词: 氯化钠; 氯化铵; 相图理论

中图分类号: O658.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)03-0015-03

Ammonium Chloride Recovery from Sodium Bicarbonate Mother Liquor Produced by Double Decomposition Method with Phase Diagram Theory

WANG Huan, LI Na, ZHENG Mingmei, YANG Lu, LIANG Quanxun, DENG Yi

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

Abstract: This paper introduces a method of recovering ammonium chloride from sodium chloride and ammonium bicarbonate double decomposition mother liquor by phase diagram theory. According to the phase diagram of the $\text{NaCl-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ ternary water-salt system at 25 ℃ and 60 ℃, evaporation crystallization and cooling crystallization processes were combined to recover NH_4Cl from the double decomposition mother liquor wastewater, with the recovery process principle and operation parameters being discussed. The purity of NH_4Cl recovered near the co-saturation point of ammonium chloride and sodium chloride is about 95 %, while the purity is more than 95 % when ammonium chloride obtained by cooling crystallization at 25 ℃.

Key words: sodium chloride; ammonium chloride; phase diagram theory

碳酸氢钠, 又称小苏打, 是一种常见的化学品, 在化工、农业、食品助剂领域有着应用的广泛。用氯化钠饱和溶液与碳酸氢铵复分解反应生产碳酸氢钠是一种较为成熟的工艺, 具有原料来源广泛, 生产成本低, 工艺流程简单等优点。^[1] 联碱法制纯碱工业一般采用冷析法回收母液中的氯化铵, 但是该方法不仅氯化铵的回收率不高, 且纯度偏低。^[2] 本文根据相图理论采用蒸发结晶和冷却结晶法分

离复分解制碱母液中的氯化铵和氯化钠, 以达到回收氯化铵的目的。^[3]

1 实验部分

1.1 主要仪器与试剂

仪器: 全自动旋转蒸馏仪 RV-10、抽滤装置、低温循环装置 DLSB-5/-80、离子色谱仪岛津 COD-10A、电感耦合等离子发射光谱仪 OPTINA

收稿日期: 2024-12-16

基金项目: “四川省科技计划资助”; 项目编号: 2022JDTD0009。

作者简介: 王焕 (1986—), 女, 2012 年毕业于天津大学生物工程专业, 硕士研究生学历, 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技术创新中心, 从事水污染处理技术研发工作。

8300、电子分析天平、精密温度计。

试剂:氯化钠(分析纯)、氯化铵(分析纯)、氯离子标准溶液(色谱纯)、钠离子标准溶液(色谱纯)。

1.2 实验流程

(1) 溶液配置

分别称取 98.050 g 氯化铵和 20.250 g 氯化钠置于 250 mL 盛有适量去离子水的烧杯中,不断搅拌使之充分溶解,溶解后的混合溶液缓慢转移到 500 mL 容量瓶中,用去离子水定容至 500 mL。配得溶液中各组分质量分数分别为:氯化铵 19.61 %,氯化钠 4.05 %^[4]

(2) 蒸发结晶、冷却结晶实验



图 1 真空蒸发装置

蒸发结晶装置如图 1 所示。取 200 mL 上述配置好的溶液置于 1 L 圆底烧瓶中,将水浴锅预热至 60 ℃,然后将圆底烧瓶置于水浴锅中,连接好冷凝管和真空泵,打开真空泵,真空度设置为 85 mbar,同时打开冷凝水,开始减压蒸发。

达到预定蒸发水量时结束蒸发,取出烧瓶,用布氏漏斗趁热过滤,收集滤饼和滤液。收集的滤饼标记后置于提前预热好的鼓风干燥箱内干燥,干燥

箱温度设置为 45 ℃。收集的滤液置于提前设置好温度(温度设置为 25 ℃)的低温循环油浴锅中,冷却 30 min 后过滤,收集滤饼并标记编号。

本实验模拟氯化钠和碳酸氢铵复分解反应母液在同一温度、真空度下进行蒸发浓缩,结合 $\text{NaCl}-\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$ 三元水盐体系相图设置四个蒸发水量梯度,考察蒸发过程控制对结晶产物氯化铵纯度的影响。蒸发结晶和冷却结晶得到的氯化铵,溶解后测定溶液中氯离子和钠离子的浓度,进而计算氯化铵的纯度。

(3) 氯化铵晶体纯度分析检测

取蒸发后的滤饼 1.55 g 置于 100 mL 烧杯中, 加入适量的去离子水使之充分溶解后, 转移至 1 L 容量瓶中, 用去离子水定容至 1 L, 得到的盐溶液稀释后, 分别用 ICP 和离子色谱分析仪测定溶液中 Na^+ 、 Cl^- 和 NH_4^+ 浓度。

取冷析后滤饼 0.78 g 置于 100 mL 烧瓶中,加入适量的去离子水溶解后转移至 500 mL 容量瓶中,用去离子水定容至 500 mL,得到的盐溶液稀释后,分别用 ICP 和离子色谱测分析仪测定溶液中 Na^+ 、 Cl^- 和 NH_4^+ 浓度。

2 实验结果及分析

2.1 实验结果

本实验主要考察在不同的蒸发水量下,分离得到氯化铵的纯度,同时分析蒸发结晶后母液在 25 ℃ 下冷却结晶得到氯化铵的纯度。实验设计条件及结果如表 1 所示。

表 1 实验条件及实验结果

编号	母液 体积 (mL)	蒸发 温度 (℃)	真空度 (mbar)	蒸发 水量 (mL)	冷却 温度 (℃)	蒸发结晶 后滤饼质量 (g)	冷冻结晶 后滤饼质量 (g)	蒸发结晶得 到的氯化铵的 纯度(%)	冷却结晶得 到氯化铵的 纯度(%)
1	200	60	85	96	20	18.08	5.80	99.59	96.53
2	200	60	85	106	20	22.36	4.85	99.44	96.48
3	200	60	85	112	20	25.98	4.35	94.98	96.83
4	200	60	85	120	20	30.89	3.34	83.52	95.14

2.2 实验结果分析

分析图2氯化铵-氯化钠-水在60℃下的三元相图可知,混盐溶液中氯化铵和氯化钠的初始浓度分别为:19.61%,4.05%,用A表示初始进料点浓度,蒸发结晶过程中,系统中盐组分的变化沿着蒸

发射线 ABD 进行,当蒸发至 B 点时,溶液中氯化铵浓度达到饱和,继续蒸发溶液中开始有氯化铵晶体析出,随着蒸发的进行,系统组分从 B 点往 D 点移动,同时饱和溶液中各组分浓度由 B 点向 C 点移动,当溶液中各盐的浓度达到 C 点时,氯化铵和氯

化钠达到共饱和,此时系统组分点到达D点。到达C点后,如果继续蒸发,溶液中会同时析出氯化铵和氯化钠晶体,因此为了得到较纯净的氯化铵晶体,在蒸发结晶过程中当溶液浓度接近共饱和点C时应结束蒸发。根据相图可以计算出,当蒸发水量为117 mL时,溶液可达到共饱和,此时析出氯化铵26.05 g。若蒸发水量大于117 mL时,溶液中会同时析出氯化钠晶体,导致氯化铵纯度降低。由于本实验系统是真空环境,真空泵在运行中会带走少量水分,测量的蒸发水量会比实际偏低。由实验结果可以看出,当蒸发水量分别为96 mL和106 mL时,由于溶液中仅氯化铵达到了饱和浓度,因此,此时析出的氯化铵晶体纯度大于99%;当蒸发水量为112 mL时,溶液接近共饱和浓度点,会有少量氯化钠析出,导致结晶出的氯化铵的纯度会降低;当蒸发水量为120 mL时,溶液中氯化铵和氯化钠达到共饱和,此时析出的晶体中含有较多氯化钠,因此氯化铵纯度较低。实验结果和根据相图分析的结果基本吻合。

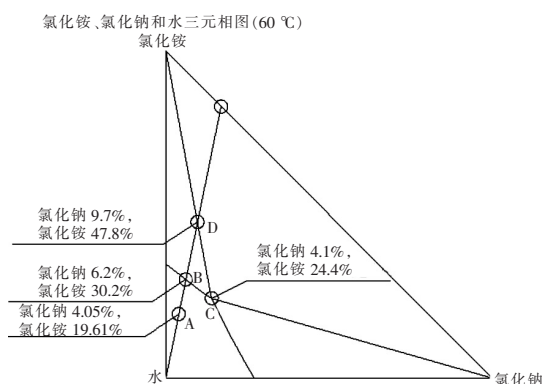


图2 氯化铵-氯化钠-水在60℃下的三元相图^[5]

蒸发过程中,需确定蒸发水量来保证氯化铵尽可能多的析出,但如果蒸发水量过多,溶液组成到达氯化钠和氯化铵的共饱和点附近,虽然保证了氯化铵最大程度析出,但是氯化钠也会一起析出,导致氯化铵纯度较低,不符合产品要求。而蒸发水量太少,氯化铵纯度能够得到较好保障,但是氯化铵的产量也会随之下降,造成资源浪费,最终难达到工厂对收益的要求。因此确定最佳蒸发水量,对于保证副产物氯化铵的产量和纯度非常重要。

蒸发结晶后,过滤所得的滤液降温至25℃进行冷却结晶。由图3相图可以看出,进料时,溶液中氯化铵和氯化钠的组成为A'点:氯化钠14.1%,氯化铵24.4%,此时溶液组成在氯化铵的结晶区,在此温

度下结晶可以得到纯度较高的氯化铵。随着氯化铵不断结晶析出,系统组分由A'点往B'点移动,当系统组分到达B'点时,溶液中氯化铵由过饱和状态逐渐变成饱和状态,此后氯化铵不再继续结晶析出。由实验结果可以看出,蒸发结晶后滤液在25℃下结晶出的氯化铵纯度大于96%,与相图数据吻合。

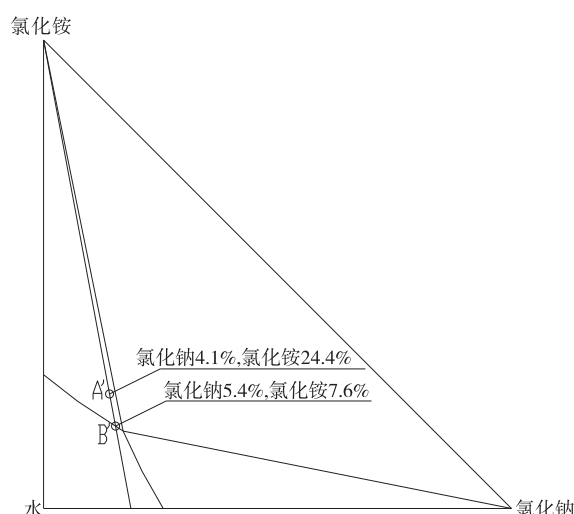


图3 氯化铵-氯化钠-水在25℃下的三元相图^[6-7]

3 结语

采用蒸发结晶和冷却结晶相结合的工艺分离提纯复分解法制碳酸氢钠的母液,氯化铵回收率可达77.3%,纯度大于95%,氮含量约26%,符合GB/T2946-2018《氯化铵》中优等品的要求。^[6]另外,回收得到的氯化钠母液可回用于碳酸氢钠的制备工艺中,从而进一步提高氯化钠的利用率。

参考文献:

- [1] 王迪,刘仲明,沈振雄,等.从复分解法生产碳酸氢钠的母液中回收氯化铵的新工艺[J].化工管理,2020(25):171-173
- [2] 史晓平,胡建勋,刘常松,等.复分解法生产小苏打母液的综合处理[J].无机盐工业,2010,42(8):57-59
- [3] 牛自得,程芳琴.水盐体系相图及其应用[M].天津:天津大学出版社,2002
- [4] 李朝阳.工业废盐制备纯碱工艺的开发[D].北京:化工大学,2016
- [5] 齐蒙蒙,刘沅玲,苏萌,等.运用相图理论回收缩合废水中氯化钠和氯化铵[J].工业安全与环保,2014,40(12):92-94
- [6] 崔益顺. NaCl—NH₄Cl—H₂O 三元盐体系相平衡研究[J].盐业与化工,2009,38(1):11-14
- [7] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T2946—2018 氯化铵[S]

水泥窑炉富氧掺氢燃烧试验研究

韦耿^{1,2} 毛宇^{1,2} 张敏^{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. 能源清洁低碳热转化利用技术与装备四川省重点实验室, 成都 611731

摘要:针对水泥行业高能耗、高排放的问题,开展了以煤为燃料的水泥窑富氧掺氢燃烧试验研究。通过搭建试验平台,系统探究了富氧掺氢燃烧对水泥窑燃烧特性、热工参数及污染物排放的影响。结果表明,富氧掺氢燃烧可显著提高燃烧效率,降低燃料消耗和 CO₂ 排放。窑头富氧掺氢燃烧烟气中飞灰含碳量较空气掺氢燃烧低,随着氧浓度的升高,掺氢燃烧效率更理想;分解炉掺氢燃烧,分解炉出口 NO_x 浓度比常规空气燃烧低。本研究为水泥行业清洁高效生产提供了新的技术路径,对推动行业绿色低碳转型具有重要意义。

关键词:水泥窑;富氧掺氢燃烧;节能降碳;试验研究;污染物减排

中图分类号:TK227;TQ172

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0018-07

Experimental Study on Oxy-hydrogen Combustion in Cement Kiln

WEI Geng^{1,2}, MAO Yu^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China; 2. Energy Cleaning and Low-Carbon Thermal Conversion Utilization Technology and Equipment Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

Abstract: Aiming at the problems of high energy consumption and high emission in the cement industry, this study carried out an experimental study on oxy-hydrogen combustion in cement kiln with coal as fuel. By building a test platform, the effects of oxy-hydrogen combustion on the combustion characteristics, thermal parameters and pollutant emissions of cement kilns were systematically explored. The results show that oxy-hydrogen combustion can significantly improve combustion efficiency and reduce fuel consumption and CO₂ emissions. The carbon content of fly ash in the flue gas of kiln head oxy-hydrogen combustion is lower than that of air-hydrogen combustion. With the increase in oxygen concentration, the combustion efficiency of hydrogen-blended combustion is more ideal. The NO_x concentration at the outlet of the precalciner is lower than that of conventional air combustion. This study provides a new technical path for clean and efficient production in the cement industry, which is of great significance to promote the green and low-carbon transformation of the industry.

Key words: cement kiln; oxy-hydrogen combustion; energy saving and carbon reduction; pollutant emission reduction; experimental study

水泥等建材行业是我国经济发展的重要基础原材料产业,其生产过程中需要消耗大量电、煤炭等能源,是能源消耗和碳排放的大户。2024 年我国水泥产量 18.25 亿吨^[1],占全国碳排放总量的 9% 左右,仅次于电力和钢铁行业^[2-3]。在“双碳”目标背景下,水泥行业面临着巨大的节能减排压力。

传统的水泥窑燃烧技术存在燃烧效率低、污染物排放高等问题,难以满足日益严格的节能环保要求。因此,开发新型清洁高效燃烧技术成为水泥行业亟待解决的关键问题。根据《水泥行业节能降碳改造升级实施指南》(2022 年版),要求水泥等建材行业开展节能低碳技术路线研究,充分鼓励和支持水泥

收稿日期:2025-03-31

作者简介:韦耿(1983—),男,2010年毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业,博士在读,高级工程师。现任东方电气集团东方锅炉技术创新中心基础研发部部长,主要从事产品研发工作。

行业开展可再生能源耦合、绿色氢能燃料替代等技术攻关和工程示范应用^[4-5]。水泥等建材行业的节能降碳改造重点是可再生能源和绿色氢能与水泥生产的深度耦合,实现水泥生产过程高效、低碳升级转型。

在碳达峰、碳中和愿景下,水泥行业如何进一步减污降碳、提质增效已成为社会各界关注的焦点。富氧燃烧技术被称为“资源创造性技术”^[6],被越来越广泛的应用在各个行业,富氧燃烧技术在国内外水泥行业生产中已有一定的应用^[7-14]。对于高海拔地区,空气中的氧气含量低于标准状况下的空气中的氧气含量,更需要推广富氧燃烧技术^[15]。东方锅炉富氧燃烧技术在水泥窑炉上的试验研究成果已在另外的论文中叙述,本文重点介绍水泥窑富氧掺氢燃烧技术的试验研究情况。

采用绿氢代替部分燃煤进行水泥生料煅烧、熟料烧成,可以适应我国清洁能源发展,即使得既有水泥生产技术装备基本保持不变,又可以实现水泥生产的碳减排,为水泥行业“双碳目标”的实现及企业的可持续发展做出较大的贡献^[16-17]。通过水泥窑炉富氧掺氢燃烧技术研发,结合公司丰富的富氧燃烧相关技术基础,形成水泥行业提效减碳解决方案,助力水泥行业节能降碳清洁高效发展。

富氧掺氢燃烧技术作为一种新型燃烧方式,通过提高助燃气体中的氧气浓度并掺入氢气,可显著改善燃烧特性,提高热效率,同时降低污染物排放。该技术在电力、冶金等领域已得到初步应用,但在水泥行业的应用研究仍处于起步阶段。

将氢气应用于水泥窑炉生产工艺,可有效减少燃煤产生的碳排放,对实现碳达峰、碳中和具有重要意义。掺氢燃烧在国内水泥行业应用较少,水泥窑炉采用掺氢燃烧将在水泥行业起到很好的引领和示范作用。通过在试验台上,开展新型掺氢试验研究,探索掺氢后的火焰形状、火焰长度和 NO_x 排放特性,掌握掺氢燃烧烟温分布及对烟温的影响,为实际水泥分解炉掺氢燃烧改造工程提供技术支撑。本文旨在通过系统的试验研究,探究富氧掺氢燃烧技术在水泥窑中的应用效果,为水泥行业节能减排提供新的技术路径。

1 试验装置及条件

1.1 水泥窑富氧掺氢燃烧试验装置

水泥窑富氧掺氢燃烧试验装置工艺流程如图1

所示。试验台热功率1.5 MW,由窑头、回转窑、分解炉、煤粉燃烧器、流化床冷渣器等组成。回转窑直径863 mm,长度12 m;窑头、窑尾直径1.5 m,长度均为1.2 m;分解炉高度8.2 m。窑头布置有煤粉燃烧器、天然气燃烧器、火焰电视、火检、点火枪等,煤粉燃烧器与天然气燃烧器分开布置,天然气燃烧器用于点火升温及稳燃。煤粉燃烧器可兼容空气燃烧、富氧燃烧、空气掺氢燃烧、富氧掺氢燃烧。回转窑筒体压力、温度测点信号采用无线传输方式与PLC及DCS控制系统相联。

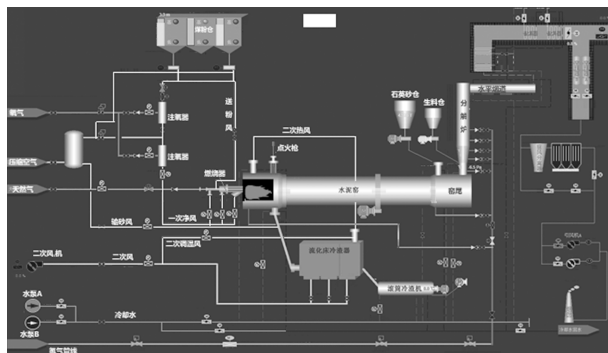


图1 水泥窑燃烧试验台工艺流程图

图2为水泥窑富氧掺氢燃烧试验台实物照片。



图2 水泥窑富氧掺氢燃烧试验台

试验装置风系统包括一次风和二次风,其中,一次风由压缩空气提供,二次风由二次风机提供。压缩空气经减压后作为一次风,一次风分为一次送粉风和一次净风。一次净风引至本试验台窑头燃烧器位置,送粉风引至风粉混合器位置。一次净风在燃烧器前分成四路,分别为中心风、内旋流风、外旋流风、轴流风。一次送粉风与一次净风通过各自的注氧器分开注氧,氧浓度可独立调节控制。经风机出来的二次风引至回转窑窑头附近分两路,一路

作为主二次风经二次风集箱分3路送入石英砂流化床冷渣器下部风室,再经风室送入石英砂流化床冷渣器用于冷却石英砂,经加热后的主二次风从流化床冷渣器出来后再送入窑头;另一路作为辅助二次风调温风,在流化床冷渣器加热出来的风温偏高的情况下使用。热二次风为单点送入窑头,为确保热二次风在窑头均匀分布,在窑头布置有一多孔布风板。

煤粉由一次送粉风经送风管道、燃烧器后送入回转窑着火燃烧,燃烧产生的烟气经回转窑、窑尾、

分解炉、水平烟道,接入标高12 m处的原3 MW煤粉炉试验台的炉膛,高温烟气冷却利用石英砂(或陶粒砂)和借用原3 MW试验台炉膛的冷却系统。

回转窑高温石英砂经窑头排渣口排入输砂管中,在输砂管水平段用小量压缩空气引射式输渣。

1.2 试验煤种煤质

本课题试验煤种选用优质烟煤,挥发分较高,Var为27.01%,具有易着火、易燃尽、中等结渣、中等磨损的特性,灰熔点≥1 300℃(表1)。试验煤质与水泥厂通常采用优质烟煤的习惯相吻合。

表1 煤质成分和灰熔点

煤种	$Q_{ar,net}/$ (MJ·kg ⁻¹)	成分分析 $w_{ar}/\%$								灰熔点/℃		
		M_t	V_{ar}	A_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	DT	ST	FT
烟煤	25.74	7.00	27.01	10.73	68.18	3.90	9.08	0.66	0.43	1 300	1 320	1 360

1.3 试验工况

掺氢燃烧在国内水泥行业应用较少,回转窑、分解炉采用掺氢燃烧将在水泥行业起到很好的引领和示范作用。在德阳试验基地新建的水泥窑煤粉燃烧试验台上,开展新型掺氢试验研究,探索回转窑、分解炉掺氢后的着火、燃烧、烟温分布、烟气成分和NO_x排放特性,掌握掺氢燃烧烟温分布及对烟温、NO_x排放的影响,为实际水泥回转窑、分解炉掺氢燃烧改造工程提供技术支撑。

试验采用专门开发的富氧掺氢燃烧器,该燃烧器可兼容空气燃烧、富氧燃烧、富氧掺氢燃烧。燃烧器外风决定火焰长度,内风决定火焰形状。本试验分别开展了空气掺氢燃烧、富氧掺氢燃烧试验。

掺氢位置主要在窑头通过燃烧器掺氢和分解炉掺氢,窑尾掺氢纳入分解炉掺氢进行分析对比。富氧掺氢燃烧主要针对窑头燃烧器按一次净风和送粉风均分别按25%、30%氧浓度掺氢燃烧,富氧掺氢燃烧各工况一次净风、送粉风总流量保持基本不变,维持各路风速相对稳定,出口烟气中O₂浓度通过二次风进行调节。分解炉掺氢燃烧是在窑头燃烧器采用空气燃烧条件下进行。

氢气来源采用氢气瓶减压后,通过氢气管线注入相应掺氢位置。氢气瓶容积为50 L,压力20 MPa。

表2为窑头富氧掺氢燃烧、分解炉掺氢燃烧各试验工况风量及掺氢量参数表。本文中NO_x浓度均为折算到烟气中O₂浓度为6%条件下。

表2 掺氢燃烧各试验工况风量及掺氢量参数表

工况	中心风 Nm ³ /h	轴流风 Nm ³ /h	送粉风 Nm ³ /h	掺氢量 Nm ³ /h	掺氢比例 /%
掺氢工况1窑头	15	100	135	29.98	12.5
掺氢工况2窑头	15	104	135	29.98	12.5
掺氢工况3窑头25%富氧	15	100	135	29.98	13.2
掺氢工况4窑头30%富氧	15	100	135	29.98	13.2
掺氢工况5分解炉入口直段	15	100	135	9.50	4.2
掺氢工况6分解炉入口直段	15	100	135	13.80	6.1
掺氢工况7分解炉锥段下	15	100	135	13.80	6.1
掺氢工况8分解炉锥段上下	15	100	135	19.87	8.8
掺氢工况9窑尾	15	100	135	13.80	6.1

注:掺氢比例指掺氢热值占总燃料热值的百分比,即折算代煤量。

2 试验及结果分析

2.1 窑头燃烧器掺氢燃烧

窑头掺氢选用专门开发的富氧掺氢燃烧器,氢气管线从燃烧器的中心通道接入。氢气瓶出来的高压头氢气通过减压阀减压后维持稳定的压力和流量。掺氢试验工况有掺氢空气燃烧工况、25 %富氧掺氢燃烧工况、30 %富氧掺氢燃烧工况。

窑头掺氢量均为 $29.98 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 氢气纯度 99.9 %, 煤粉耗量 $90 \sim 100 \text{ kg/h}$, 掺氢比例占窑头燃料总输入热量的 12.5 %~13.2 %。

图 3 为窑头掺氢燃烧各工况火焰对比图,图 3(a) 为未掺氢空气燃烧火焰形状,图 3(b) 为掺氢空气燃烧火焰形状(伴有天然气燃烧),图 3(c)、(d)

分别为 25 %富氧掺氢燃烧、30 %富氧掺氢燃烧火焰形状。从图 3(a) 未掺氢空气燃烧可看出,煤粉燃烧存在明显的黑火头现象;图 3(b)、(c)、(d) 为非预混掺氢燃烧,掺氢燃烧没有发现明显的黑火头现象,主要缘于氢气着火快,燃烧速率快,火焰速度高,氢气燃烧火焰速度大概是汽油燃烧速度的 6 倍以上,与汽油、煤、天然气相比氢气在一定范围内燃烧会产生高射流,加速火焰传播速率,氢气燃烧热效率高,在氢气燃烧过程中因为燃烧迅速可缩短火焰长度减少低温区域,氢气的加入不仅会提高火焰燃烧的峰值而且随着氢气含量的增加,其快速反应扩散的能力开始影响燃烧进程,加速了燃料的传递速度以及火焰的燃烧速度,加速燃料与氧化物反应效率。^[18]

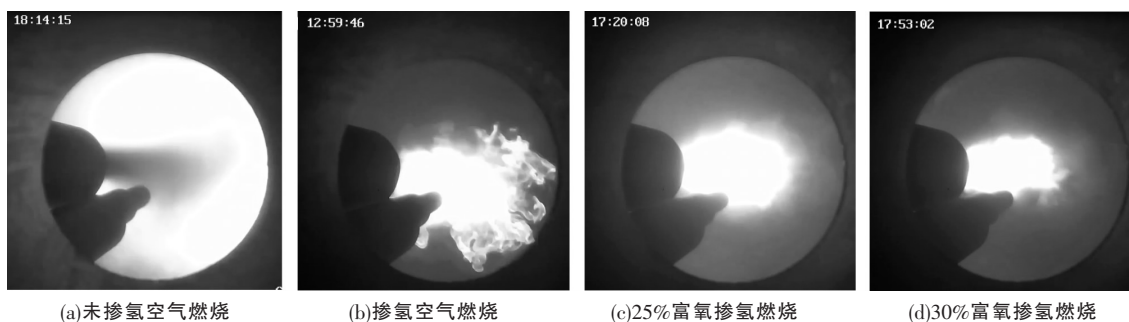


图 3 掺氢燃烧各工况火焰对比图

氢气燃烧的点火能小,极易着火,燃烧速度快,燃烧区域集中,火焰短小。氢气燃烧速度是天然气燃烧速度的约 5 倍^[19],点火能却仅为甲烷的 6 %^[20]。试验发现,从窑头燃烧器中心掺氢,氢气在煤粉内侧燃烧,氢气燃烧在煤粉中心快速形成高温区域,缩短煤粉预热、着火时间,煤粉着火位置提前,煤粉快速着火燃烧,无论是掺氢空气燃烧,还是掺氢富氧燃烧,基本上看不见从燃烧器喷出的煤粉的黑火头,从图 3 中可以看出。

试验观察到 30 %富氧掺氢燃烧的中心火焰较 25 %富氧掺氢、掺氢空气燃烧的要明亮,燃烧更强烈,氢燃烧火焰中心温度更高,火炬更短,如图 3(b)、(c)、(d)。这是通过肉眼观察到的氢气燃烧火炬的长短,并不代表煤粉燃烧的火焰长度,实际上掺氢煤粉燃烧火焰长度与实际空气燃烧的火焰长度差别不大,煤粉燃烧火焰长度与轴流风的速度有关,轴流风速度越高,推力越大,保持轴流风速度在一定范围,可保持火焰的长度。

窑头掺氢燃烧,氢气的加入促进热力型 NO_x 与

快速型 NO_x 的生成。快速型 NO_x 与 CH 相关联,随着氢气浓度的升高回转窑内 CH 浓度提升促进了快速型 NO_x 反应的正向进行,但 CH 在回转窑内的整体含量低。因此对于燃烧中 NO_x 的生成起决定性影响的还是热力型 NO_x ,随着氢气的加入,火焰中心温度升高,热力型 NO_x 的产生效率逐渐增快,因此 NO_x 的产生量与氢气含量呈正相关。而温度的升高又会促进 NO_2 分解成 NO ,因此氢气比例的增加会促进 NO 的生成抑制 NO_2 的产生。

窑头掺氢燃烧共开展了掺氢空气燃烧、25 %富氧掺氢燃烧、30 %富氧掺氢燃烧工况试验,图 4 为窑头掺氢燃烧各工况烟气中 NO_x 浓度曲线。从图 4 可以看出,煤粉掺氢空气燃烧条件下 2 个工况排放烟气中 NO_x 浓度在 $600 \sim 850 \text{ mg/Nm}^3$ 范围;煤粉掺氢在 25 %富氧燃烧条件下排放烟气中 NO_x 浓度在 $870 \sim 1\,070 \text{ mg/Nm}^3$ 范围;煤粉掺氢在 30 %富氧燃烧条件下排放烟气中 NO_x 浓度在 $1\,420 \sim 1\,640 \text{ mg/Nm}^3$ 范围。煤粉掺氢燃烧,掺氢富氧燃烧排放烟气中 NO_x 浓度比掺氢空气燃烧排放烟气中的 NO_x 高,这

主要原因在于富氧燃烧工况一次风中 O_2 浓度高, 燃烧强烈, 火焰中心理论燃烧温度高, 导致快速型 NO_x 和热力型 NO_x 大量产生所致。试验表明, 燃烧过剩 O_2 越大, 炉内燃烧处于氧化气氛, 有利于 NO_x 的生成, 故排放烟气中 NO_x 浓度越大。

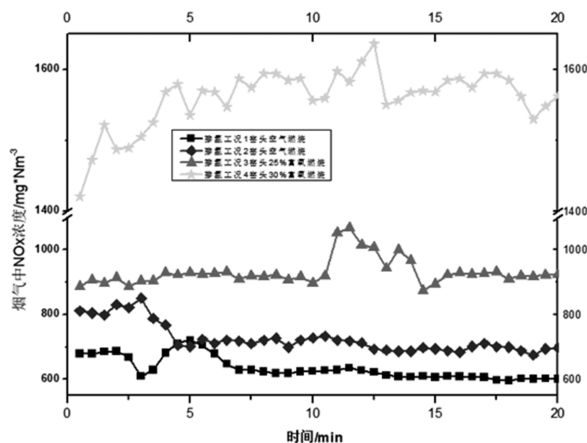


图4 窑头掺氢燃烧烟气中 NO_x 浓度

本项目煤粉掺氢燃烧, 氢气燃烧为扩散燃烧和非预混燃烧, 氢气在扩散燃烧中也是造成氮氧化物生成量增加的关键, 氢气不仅会提高燃烧温度还会缩短火焰长度, 温度的提升造成了热力型 NO_x 反应增强, NNH 自由基的增加也是氮氧化物排放量增加的原因。

窑头各掺氢工况飞灰中可燃物含量如图5所示。掺氢工况1与掺氢工况2均为掺氢空气燃烧工况, 掺氢工况3与掺氢工况4分别为掺氢25%富氧燃烧、掺氢30%富氧燃烧工况。

从图5可知, 窑头空气掺氢燃烧飞灰可燃物含量在4.6~5.5%, 25%富氧掺氢燃烧飞灰可燃物含量3.60%, 30%富氧掺氢燃烧飞灰可燃物含量3.56%。空气掺氢燃烧各工况飞灰中可燃物含量较富氧掺氢燃烧工况的略高, 主要是因为富氧燃烧 O_2 浓度高, 理论燃烧温度更高, 燃烧更强烈, 燃尽率更高。

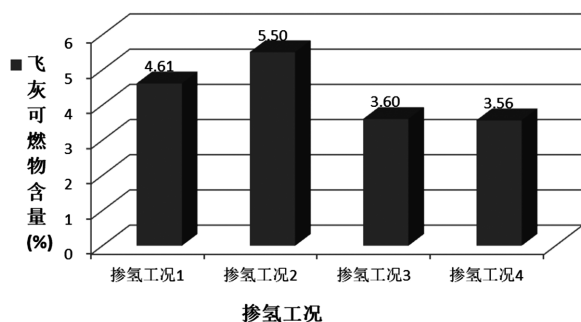


图5 窑头各掺氢工况飞灰中含碳量

2.2 分解炉掺氢燃烧

图6示出了分解炉掺氢口的具体位置。分解炉掺氢共设置有5个位置, 分别为分解炉入口直段、分解炉下部锥段上下各1层、分解炉锥段上部直段2层, 每层2个掺氢口对称布置。另外在窑尾1个断面上设置有2个掺氢口。本次试验, 主要选取分解炉下部直段、下部锥段上下层和窑尾共4个位置作为掺氢位置。

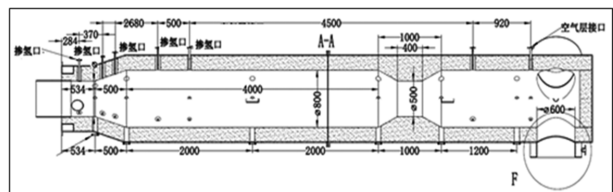


图6 分解炉掺氢位置

氢气瓶出来的高压头氢气通过减压阀减压后维持稳定的压力和流量。窑尾、分解炉掺氢试验均是在空气燃烧条件下进行。

图7为分解炉掺氢各工况烟气中 NO_x 浓度曲线。

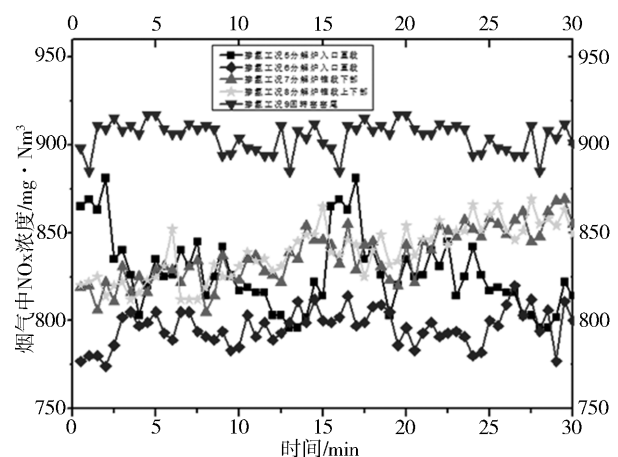


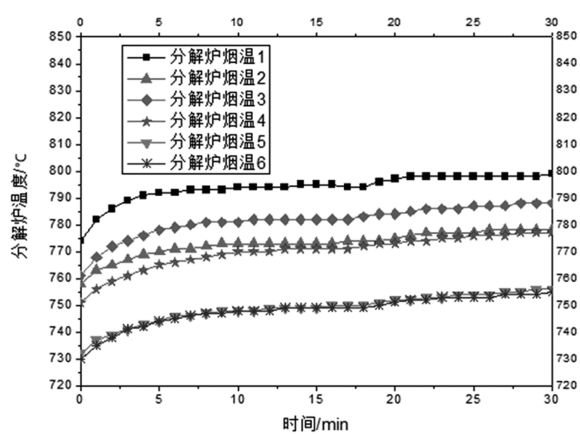
图7 分解炉掺氢燃烧烟气中 NO_x 浓度

从图7可以看出, 在分解炉入口直段掺氢2个工况排放烟气中 NO_x 浓度相对较小, 窑尾掺氢排放烟气中 NO_x 浓度相对较高。

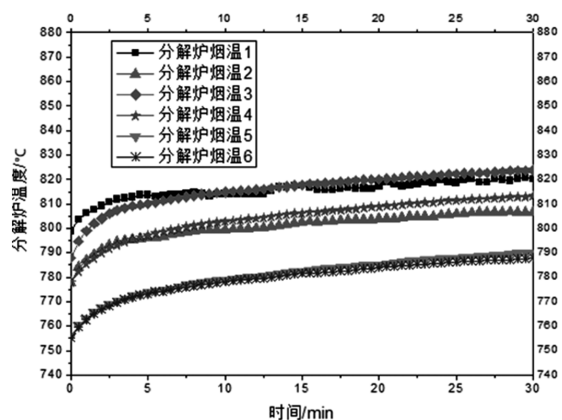
本次分解炉掺氢燃烧试验主要研究掺氢燃烧对分解炉温度分布的影响, 分解炉沿高度方向共布置有6个温度测点。图8为分解炉及窑尾各掺氢工况的分解炉烟温曲线。

从图8可以看出, 分解炉掺氢燃烧, 沿高度方向分解炉各温度测点的温度随时间总体呈上升趋势。图8(a)、(b)为在入口直段同一层两个掺氢口掺氢, 仅掺氢量不同, 掺氢工况5掺氢量为 $9.50 \text{ Nm}^3/$

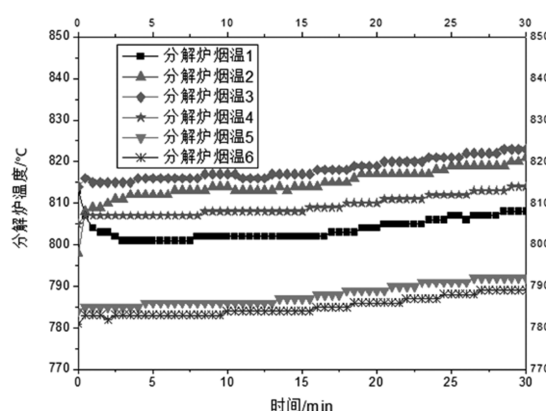
h,代煤比例 4.2 %;掺氢工况 6 掺氢量为 13.80 Nm^3/h ,代煤比例 6.1 %,掺氢工况 6 掺氢初始温升更快。掺氢工况 5 在 30 分钟掺氢燃烧过程中分解炉温升在 20~27 $^{\circ}\text{C}$,工况 6 在 30 分钟掺氢燃烧过程中分解炉温升在 21~35 $^{\circ}\text{C}$ 。图 8(c)、(d)分别为在分解炉下部锥段上部、上下部掺氢,掺氢工况 7、掺氢工况 8 掺氢量分别为 13.80 Nm^3/h 、19.87 Nm^3/h ,代煤比例分别为 6.1 %、8.8 %,掺氢工况 8 掺氢初始温升更快。掺氢工况 7 在 30 分钟掺氢燃烧过程中分解炉最大温升在 22 $^{\circ}\text{C}$,平均温升约 0.7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$;掺氢工况 8 在 30 分钟掺氢燃烧过程中分解炉最大温升在 130 $^{\circ}\text{C}$,平均温升 4.3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。掺氢工况 8 掺氢初期 5 分钟,平均温升约 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,因此,在分解炉大比例掺氢时,宜采用逐步加大掺氢量,控制初始掺氢速率,防止分解炉温升过快,影响分解炉的正常生产工艺。图 8(e)为掺氢工况 9,即窑尾掺氢燃烧,该工况是在掺氢工况 8 之后进行的,其掺氢量比掺氢工况 8 小得多,并且窑头煤粉量没有在掺氢工况 8 基础上增加,因此,掺氢工况 9 分解炉烟温没有出现明显上升趋势,反而略有下降。



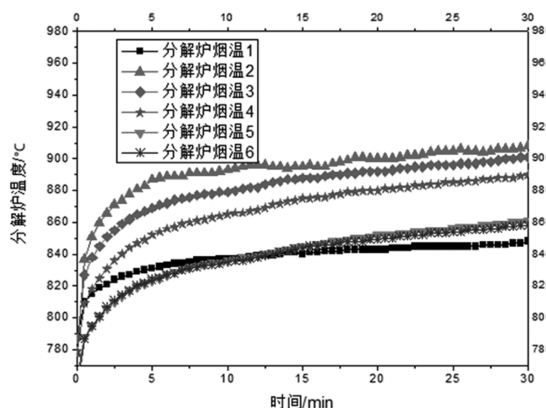
(a) 掺氢工况 5(入口直段)



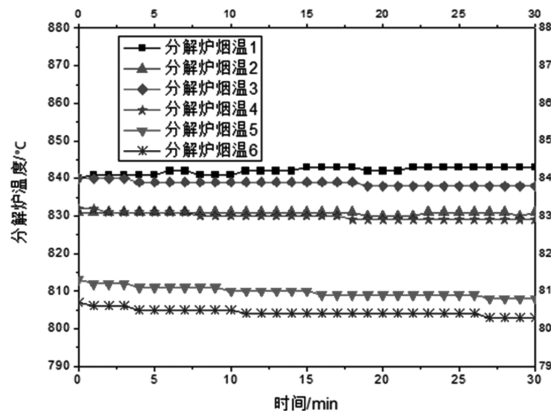
(b) 掺氢工况 6(入口直段)



(c) 掺氢工况 7(下部锥段上)



(d) 掺氢工况 8(下部锥段上下)



(e) 掺氢工况 9(窑尾)

图 8 分解炉及窑尾各掺氢工况分解炉烟温曲线

本次分解炉掺氢燃烧试验整体过剩空气量比较偏大,如果回转窑窑尾出口烟气中 O_2 控制在 2~3 % 范围内, O_2 浓度低,分解炉掺氢可实现分级燃烧,有效控制氢燃烧分解炉的温升幅度及温升速率。实际工程上,分解炉掺氢位置尽量控制在三次风口以下, O_2 浓度低,有利于控制氢气分级燃烧,分解炉下部区域容易形成还原性气氛,有利于 NO_x 的还原,抑制 NO_x 的生成,减少 NO_x 的排放,抑制分解炉局部超温和温升速率。

分解炉及窑尾各掺氢工况飞灰中可燃物含量如图9所示。掺氢工况5~8为分解炉掺氢燃烧,掺氢工况9为窑尾掺氢燃烧,窑尾和分解炉掺氢,相当于回转窑尾部之后掺氢燃烧,相当于尾部氢气补燃,有利于飞灰中煤粉残炭的燃尽。从图9可知,分解炉掺氢燃烧飞灰中可燃物含量相对较低,在2.6%~4.0%范围。工况9窑尾掺氢燃烧飞灰中可燃物含量与窑头掺氢空气燃烧工况的相近。

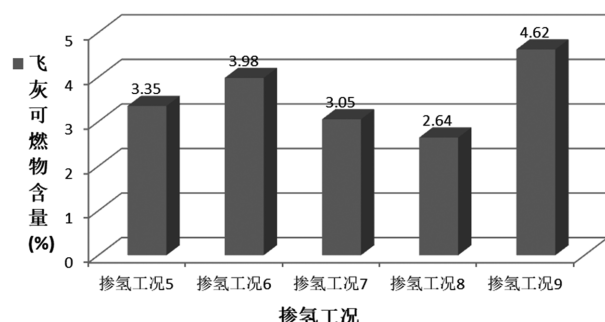


图9 分解炉及窑尾各掺氢工况飞灰中可燃物含量

分解炉掺氢燃烧条件下产生的CO浓度主要取决于烟气中过剩空气系数和掺氢量,在不改变窑头煤粉燃烧各风量的情况下,分解炉掺氢燃烧CO浓度则主要取决于掺氢量。分解炉各掺氢工况烟气中CO浓度变化如图10所示。

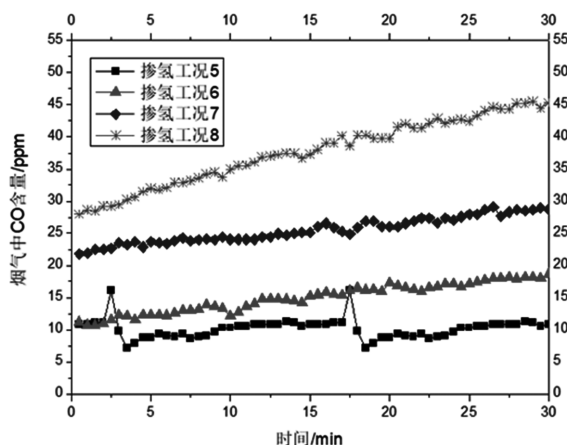


图10 分解炉各掺氢工况烟气中CO浓度曲线

如图10中掺氢各工况CO浓度的变化曲线,掺氢工况5的掺氢量为 $9.50 \text{ Nm}^3/\text{h}$,掺氢工况6、工况7的掺氢量均为 $13.80 \text{ Nm}^3/\text{h}$,工况8的掺氢量为 $19.87 \text{ Nm}^3/\text{h}$,各工况排放烟气中CO的浓度变化趋势正好与前述一致。从图10可以发现,掺氢工况5掺氢量最小,排放烟气中CO的浓度比较低,工况8的掺氢量高,排放烟气中CO的浓度比掺氢工况5~7更高。

本次分解炉掺氢试验,是在烟气中 O_2 浓度比较高的条件下开展的,分解炉掺氢燃烧整个分解炉没有形成真正的还原气氛,基本上处于氧化环境,与实际工程存在差异。实际工程上,分解炉掺氢位置在三次风口以下, O_2 浓度低,掺氢燃烧,回转窑出来的烟气中剩余的 O_2 被 H_2 燃烧抢先利用,分解炉下部区域容易形成还原性气氛,烟气中CO浓度会比本次试验高。

3 结语

水泥窑炉富氧燃烧、掺氢燃烧及富氧掺氢燃烧均是可行的,试验结果表明,富氧掺氢燃烧有利于水泥行业节能降碳。为了不改变火焰形状及火焰长度,富氧掺氢燃烧时,维持一次风各路风量与常规空气工况时的一样,仅氧浓度变化和掺氢,增加的氧量在二次风(或三次风)中扣除;回转窑富氧掺氢燃烧出口烟气中 NO_x 浓度高于空气燃烧的,30%富氧燃烧出口烟气中 NO_x 浓度高于25%富氧燃烧的,即回转窑出口烟气中 NO_x 会随一次风中 O_2 浓度的增加而增加,主要缘于一次风中 O_2 浓度增加,火焰中心温度上升,促进热力型 NO_x 的生成。水泥回转窑富氧掺氢燃烧,实现用绿色清洁能源部分替代燃煤,达到节能降碳目的。回转窑可从窑头煤粉燃烧器掺氢燃烧,试验回转窑掺氢比例可达代煤10%(回转窑煤耗),不影响熟料烧成工艺。分解炉掺氢位置可根据掺氢量选取分解炉具体的掺氢位置,分解炉掺氢比例可达代煤10%以上(分解炉煤耗),不影响生料煅烧分解工艺。分解炉合适位置掺氢燃烧,可形成局部还原区域,对从窑尾来的烟气中的 NO_x 有一定的还原效果,有利于抑制 NO_x 的生成,减少污染物的排放。

参考文献:

- [1] 陈柏林. 2024年中国水泥经济运行及2025年展望[J]. 中国水泥, 2025(2): 4-10
- [2] 张欣超, 杜鑫, 刘明昊, 等. 水泥行业混料机技术专利现状[J]. 中国科技信息, 2024(14): 22-26
- [3] 鹿晓泉, 田野, 闫力, 等. 国内外低碳水泥体系浅析[J]. 中国水泥, 2024(5): 54-55
- [4] 蔡正. 水泥窑协同处置废纺作替代燃料的试验研究[J]. 水泥工程, 2022(5): 17-18
- [5] 国家发改委. 关于发布《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》的通知: 发改产业[2022]200号[A/OL]. [2022-02-11]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202202/t20220211_1315447.html

(下转第72页)

核电装备全要素协同制造数字化 场景研究及其实际应用

赵丽 苟婕 舒寒芮 吴绍澎 林成武 窦文浩

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455

摘要:结合核电装备研制过程中生产管理质量及效率提升需要,在总结核电装备制造单件小批量、周期长、监管严、协同要素多、质量要求严的特点基础上,分析了核电装备制造全流程、全组织、全要素协同的制造数字化协同模式,提出了基于产品数字化模型的核电装备制造全流程的协同方式,通过数字化场景构建促进各环节之间的无缝对接和高效协同,打通了制造工艺设计、计划一体化、生产准备与执行、质量管理等关键业务节点的内外信息壁垒,构建了一体化平台,并成功应用于实际生产管理中,实现了数据、流程、管理的统一和协同。

关键词:核电装备制造;数字化场景;流程协同;全过程质量过程精准化控制与自动化追溯;自动齐套检查;可视化管理

中图分类号:TM623

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0025-07

Research and Practical Application of Digital Scenarios for Collaborative Manufacturing of All Elements in Nuclear Power Equipment

ZHAO Li, GOU Jie, SHU Hanrui, WU Shaopeng, LIN Chengwu, DOU Wenhao

(Dongfang (Guangzhou) Heavy Machinery Co., Ltd., 511455, Guangzhou, China)

Abstract: Based on the needs of improving production management quality and efficiency in the development process of nuclear power equipment, and summarizing the characteristics of small batch production, long cycle, strict supervision, multiple collaborative elements, and strict quality requirements in nuclear power equipment manufacturing, this paper analyzes the manufacturing digital collaboration mode of the entire process, organization, and element collaboration of nuclear power equipment manufacturing. A collaborative mode for the entire process of nuclear power equipment manufacturing based on product digital models is proposed. Through the construction of digital scenarios, seamless integration and efficient collaboration between various links are promoted, and the internal and external information barriers of key business nodes such as manufacturing process design, planning integration, production preparation and execution, and quality management are broken down. An integrated platform is constructed and successfully applied in actual production management, achieving the unity and collaboration of data, process, and management.

Key words: manufacturing of nuclear power equipment; digital scenarios; process collaboration; precise control and automated traceability of the entire quality process; automatic comprehensive inspection; visual management

随着社会经济的快速发展和全球能源需求的不断增长,低碳清洁能源的发展变得尤为重要。核电作为一种清洁、高效的能源形式,备受全球关注。

在国家努力实现“碳达峰、碳中和”的目标背景下,核电产业迎来了重要发展机遇。随着工业互联网、大数据、云计算、人工智能等信息技术的发展,全球

收稿日期:2024-11-19

科研项目:广东省深圳市科研项目;重 2022N086 华龙一号蒸汽发生器智能制造关键技术研发;项目编号:JSGG20220831110806013。

作者简介:赵丽(1986—),女,2011年毕业于东北大学计算机科学与技术专业,大学本科,工程师。现任东方电气(广州)重型机器有限公司,主要从事智能制造研究方向网信项目建设工作。

范围内迎来了以数字化、网络化、智能化为主要特征的新一轮科技革命和产业革命,^[1]网络化协同作为一种制造业的新模式新业态,目前已被广泛应用于设计制造等领域,形成了诸如网络化协同设计、网络化制造、社群化制造等新的模式应用,这些模式的应用有效促进了企业内部协同、产业链协同以及社会化资源协同。^[2]

然而,核电装备制造是典型的离散制造,具有周期长、单件小批量、标准化程度低、经验依赖性强、质量控制过程复杂以及监管严格等特点,当前核电装备制造和质量过程管理,仅局部环节实现信息化,存在大量纸质文件流转,人工干预多,信息传递不畅,协同效率低,变更闭环管理和质量管理难度大等问题,数字化支撑协同生产管控能力、全过程质量管控能力不足。如何利用新技术实现核电装备制造的提质、增效、降本,是当前核电装备行业共同面临共同难题。

胡炳涛等人从正逆协同、时空协同和虚实协同三个方面研究了面向核电装备的全生命周期价值链协同模式,构建了满足核电装备横向贯通和纵向联动要求的价值链协同模式。^[3]本文旨在该基础上进一步研究核电装备制造阶段的数字化协同场景定义,通过场景构建促进各环节之间的无缝对接和高效协同,解决核电装备制造业务、数据、平台的协同问题,通过信息化、数字化手段实现核电装备制造全流程、全要素的技术和管理层面的无缝对接和高效协同,打造数字化支撑协同生产管控能力、全过程质量管控能力。

1 核电装备协同制造现状、特点与不足

核电全生命周期分为设计、制造、施工、运维和退役五个大阶段,制造厂核心业务都是在制造阶段,从设计院接收设计数据,转化为厂内装备制造数据,制造流程包括技术转化、计划排程、生产准备、生产执行、检查控制、质量监督和完工交付阶段,核电装备制造以质量驱动各个阶段活动,如何充分、真实反映设计方的意图,并全量记录制造过程与全流程质量过程控制,实现质量信息追溯是制造厂信息化、数字化的主要任务。

当前,核电装备制造厂信息化建设基本采用“烟囱式”建设方法,分别建设 PLM 系统、ERP 系统、MES 系统和质量管理系统,每个系统都是独立

设计和建设的,系统之间缺乏共享核协同,存在异构系统集成壁垒,集成效果不佳,变更响应及时性难以达到等问题。车间制造过程大量纸质文件流转,靠人组织业务活动及分解业务数据,文件有效性管理难度大,上下游数据不互通,变更闭环管理难度大,同时质量过程跟踪及控制难度大,人因失误等低级错误多,传统的装备制造方式制约了生产组织效率和质量管控水平。某核电装备制造协同现状及原因分析见表 1。

表 1 某核电装备制造现状及原因分析

序号	存在的业务问题	原因分析
1	非结构化工艺文件和质量文件一致性管控难度大,重复录入多,沟通效率低、文档版本有效性无法充分保证	1. 缺乏统一的产品设计制造的数据和信息模型 2. 缺乏基于数据与信息模型的设计制造协同 3. 缺乏在线协同管理数字化场景 4. 缺乏全要素在线协同的一体化平台
2	技术转化、计划、制造、质量控制、数据采集、完工归集,存在大量人工分解和重复性校验工作	
3	各环节人工参与多,效率低,人因失误多	
4	生产进度不透明、变更管控不到位、生产调度效率不高	

周新杰等人分析了设计与制造协同需要研究统一设计制造数据源、数据反馈协同改善、系统集成、设计与制造知识交互级知识匹配等方面的需求,研究了基于模型的设计制造协同、设计制造数据与信息协同和设计制造知识协同,核电装备数字化协同制造具有一定理论基础。^[2]

基于上述分析,本文聚焦基于数据与信息模型的核电装备设计制造协同,统一产品设计和制造的数据与信息模型,明确业务活动过程、输入规则、系统功能、输出,基于业务活动在线协同的控制逻辑,构建产品设计数据、业务管理要求和流程管理融合的一体化平台,打造核电装备数字化协同制造场景,以统一的数字与信息模型驱动产品信息贯通、任务信息下达、生产执行监控、质量信息追溯。

2 基于结构化工艺的协同制造基础模型

2.1 基于核电装备制造全要素结构化工艺的模型

结构化工艺模型是一种先进的工艺设计理念和方法,它通过对工艺设计、工艺规划、工艺路线、工艺参数和工艺管理等方面内容进行系统化、规范

化、标准化的处理。本文采用的是基于结构化工艺的数据与信息模型,用于后续业务活动场景构建和业务协同。

本文结构化工艺数据模型主要在产品设计BOM的基础上,增加见证件、评定件、工具、工装、包

装、返修等对象,以零件对象为单位建立零件加工需要使用的物料库、焊材库、适用文件库、焊缝库、检验库,通过工艺卡片来组织零件制造加工工艺过程,通过零件加工顺序、工步建模,构建产品结构化工艺BOM,见图1所示。

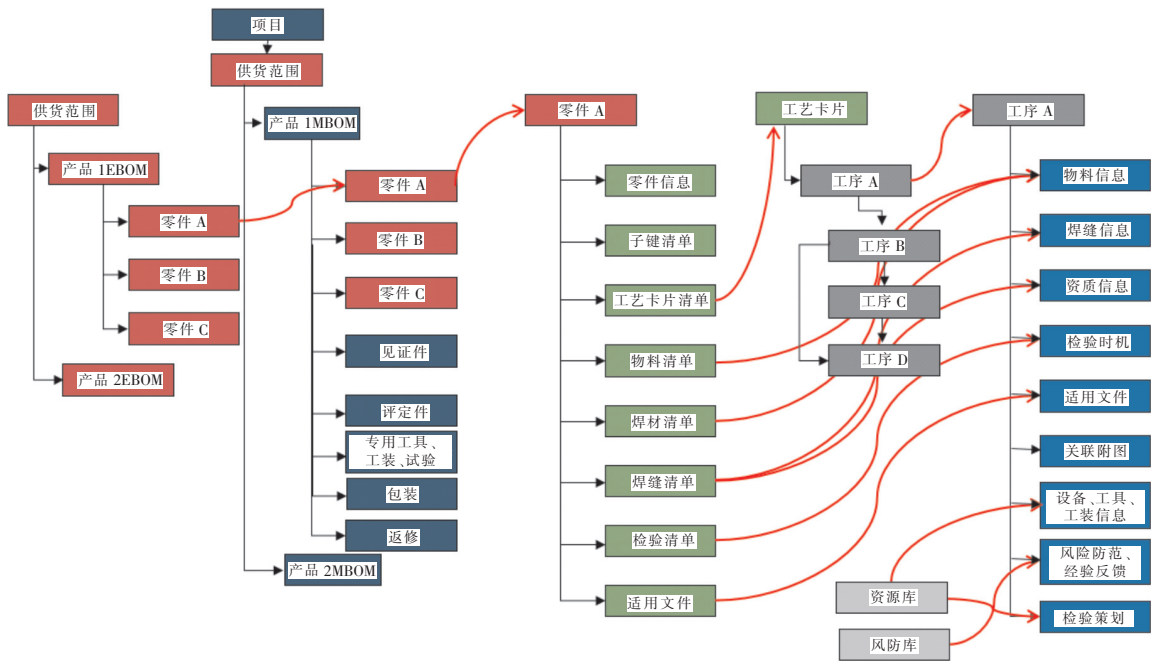


图1 产品结构化工艺BOM

工艺卡片包括工艺信息、质量信息和制造资源信息,完整地表达产品信息,工艺卡片工序信息是用于生产制造的核心要素,要素见表2。

表2 核电装备制造要素

维度	要素
工序	工序号、前序工序、工作中心、工序内容、工序备注、标准工序号
物料	原材料编码、物料描述、下料尺寸、下料数量、排版图、定额、单位、采购图号、采购规范、质保等级、技术等级、安全等级、烘焙要求、材料代用单、库存物料编码、备注
焊缝	零件编码、零件名称、焊缝代号、部件名称、母材材质、母材厚度、热处理次数、焊缝街头类型、焊接方法、焊材汇总图号、焊材物料编码、焊材名称、焊材单位、焊材烘焙要求、焊材规格、焊材型号、焊材技术条件、焊材定额、焊接规程编号、焊接位置、焊工资质编号、资质备注
资质信息	资质类型、资质类别、资质名称、级别、焊接方法、资质备注、资质状态
检验时机	焊缝编码、检验时机、检验项次、检验类型、适用文件
适用文件	文件编码、文件名称、状态
关联附图	文件名、图号、备注
工装、工具等资源	编号、名称、工具有效期
经验反馈、风控	编号、名称、类型、经验反馈内容
授权零件	图号、名称、代号、数量
检验策划	记录编号、名称、类型、检验库、记录人、记录时间

各技术数据结构化后,零件制造工艺不存在因为纸质工艺文件太多而进行工艺卡片的拆分问题,同时不以工艺卡片的形式下发生产车间,较以前生

产模式,工序内容碎片化,为降低一线工人掌握难度,零件制造工艺卡片拆分的颗粒度保持不变,实现结构化工艺同时实现以工艺卡片为单位工艺文

件查看,利用了结构化工艺要素驱动业务活动的在线协同,同时也便于生产现场推广。

2.2 基于核电装备制造全要素结构化工艺模型的应用设计

研究产品设计-工艺-质量-制造方向的数据流模型,根据核电业务活动特点,梳理各阶段业务活动人机料法环测各个数据要素,制定工序结构化元

素的组成、依赖、互斥的生成关系,通过节点间逻辑判断规则,包括业务字典、业务输入规则、输出规则、文件体系控制逻辑、质量管理要求、任务管理要求等逻辑规则,动态感知上游产生数据,实现上下游数据全面贯通。本文研究了4个阶段6个协同模式,协同模式见表3。

表 3 核电装备制造协同模式

阶段	模型名称	设计逻辑
设计阶段	工艺、质量协同模式	将原来分散在多个非结构化文档的设计、工艺、质量信息统一到一个模型,根据技术准备活动逻辑,将检验清单与焊缝清单、操作清单、流转卡、质量计划建立一一对应关系,下游活动根据一定规则自动同步或者选择上游数据,通过结构化模型将各数据要素之间的关系进行控制,避免多次输入的人因失误,解决了两份文件一致性问题
	计划排程协同模式	按项目供货范围快速克隆生成实例化产品制造 BOM,基于工时、工期、资源期量和项目交付时间自动倒排项目计划,支持顺排生成计划
生产执行阶段	工序级执行协同模式	将工艺、质量管理、任务管理的管控要求融合为逻辑算法嵌入到技术平台,并实现开工前准备条件确认信息自动归集及异常提示、开工后数据自动采集、完工结束自动驱动下序条件检查和过程异常管理
	制造过程变更协同模式	自动判断工序开工状态,必须经评估后暂停工序任务,方可对工序变更,工序变更时必须明确上序工序,确保工序顺序逻辑控制
	质量计划跟踪协同模式	基于顾客视角自动归集实例化产品制造 BOM 工序级执行情况,包括不限于状态、执行签字和检查报告等
完工阶段	完工资料归集协同模式	产品制造完成根据产品实例化工艺 BOM 自动归集制造过程使用的原材料完工报告、适用文件和形成的工序执行记录、检查报告、移用记录、NCR 记录、人员资质等信息

3 核电装备全要素协同制造数字化场景构建

核电装备制造流程技术准备、计划排程、生产准备、生产执行、检查控制、质量监督和完工交付以流程驱动模式为主,以核电装备制造 BOM 数据与信息为基础,围绕各制造活动人机料法环测数据与信息产生、传递、使用、采集、共享,构建多个以质量驱动的全业务活动场景,通过产品信息流、任务信息流、产品物料流、工具资源流贯通和综合集成,实现在生产作业过程中准确的产品信息、准确的任务信息、准确的物料供应、准确的资源保障,在准确的时间汇集到准确的地点,以数据驱动产品信息贯通、任务信息下达、生产执行监控、质量信息追溯。数字化场景清单见表4。

功能包括基础管理、工艺管理、生产管理、质量管理、系统集成、应用场景6大模块,模块清单见图2。

表 4 核电装备制造协同场景

阶段	场景名称
设计阶段	技术文件在线协同场景
计划排程阶段	计划管理协同场景
生产准备阶段	生产准备在线协同场景
生产执行阶段	资质有效性管理在线协同场景
	在线监督场景
	工序级执行协同场景
	焊接数据自动采集场景
	NC 程序自动下发场景
	检查全流程协同场景
完工阶段	完工资料归集协同场景

3.2 技术文件在线协同场景

核电装备制造从合同签订后,项目管理部开展项目策划,技术部门开展制造工艺、检查策划,形成策划方案,根据策划方案输出零件清单、材料清单、适用文件清单、焊缝清单、检验清单、操作清单、流转卡清单,项目管理部根据项目进度下达技术准备和材料准备计划。

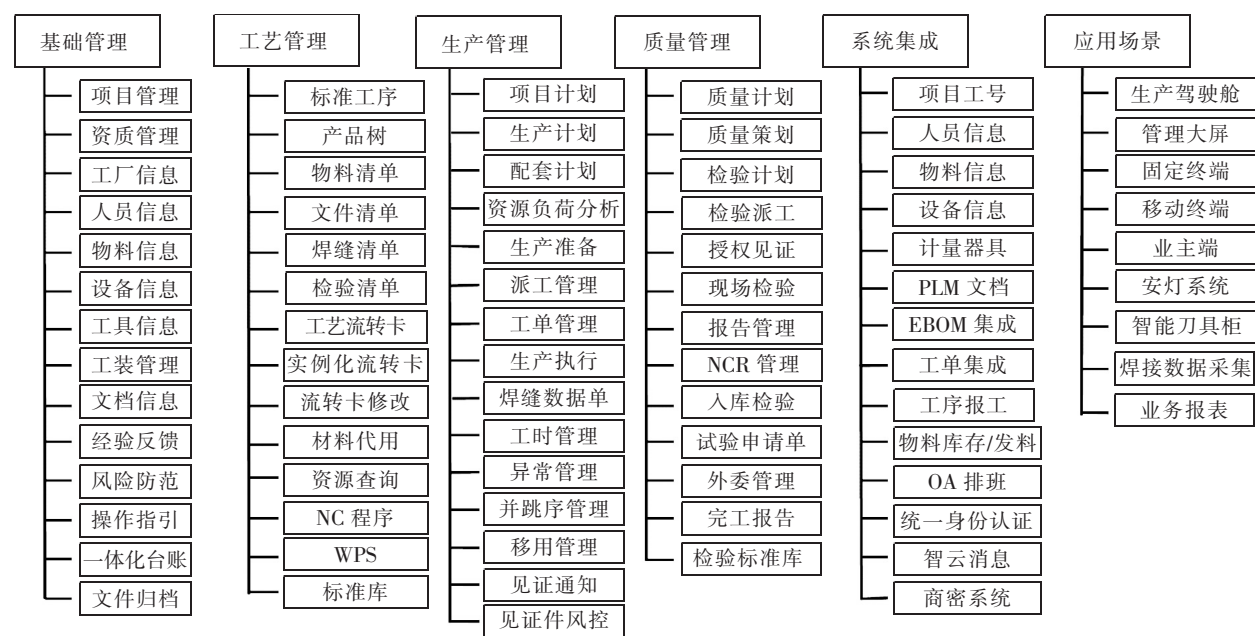


图2 功能清单

技术人员按计划开展各项技术准备活动,先搭建设计BOM,按前文所述搭建结构化化工艺BOM,以工艺卡片将原来分散在多个非结构化文档的设计、工艺、质量信息统一到结构化工艺BOM。根据技术准备活动逻辑,将检验清单与焊缝清单、操作清单、流转卡、质量计划建立一一对应关系,通过流程驱动,下游活动根据一定规则自动同步或者选择

上游数据,通过数据校核、异常提醒机制,确保上游信息完整贯通,实现技术和质量信息各数据信息之间的关联和控制。固化了技术文件体系上下游因果强逻辑控制,上游输入不正确,下游不能开展工作,同时可以自动检查上游要求是否落实到下游文件,从而提高下游文件质量。技术文件在线协同场景见表5。

表5 核电装备制造技术文件在线协同场景

名称	描述
清单自动同步或导入	1. 通过集成接口同步 PLM 系统设计 BOM 2. 根据项目零件整理物料清单、焊缝清单、适用文件清单、检验清单
操作清单	工艺人员按部件编制操作清单,根据焊缝清单及检验清单编制工艺及质量要求,检查工序直接使用检验清单检验要求、资质、规程、时机
质量计划	检查技术人员根据操作清单自动同步纳入质量计划工序,根据上游要求增加见证点
工艺卡片	1. 选择标准工序,自动带出工作中心、工作资源页签 2. 编辑工艺内容及生产资源,按零件自动过滤该零件工艺所适用的物料、文件、焊缝及资质、检验时机等信息 3. 综合工艺、焊接、工时、质检通过流程驱动在线协同

3.3 计划管理协同场景

按项目供货范围快速克隆生成实例化产品制造BOM,明确的工艺上下接关系,基于工时、工期、资源期量和项目交付时间自动倒排项目计划,支持顺排生成计划。各计划管理岗位基于同一套工艺BOM排季度、月度、周、班计划,班组根据班计划分派任务,按照工作中心、班组、资质等自动开展关键

资源负荷分析。项目级、产品级、零部件级、工艺卡片级、工序级最新制造进度可视化,生产计划与进度一体化可视。计划管理页面见图3。

3.4 生产准备在线协同场景

系统根据季度、月度、周、班计划自动检查物料、工装、工具、刀具、文件、质量计划等资源的齐套性,大量减少人工核对的重复性工作,生产准备人

员只需要关注异常,处理异常后,创建生产订单准备,工人领料后开始制造。生产准备齐套检查页面

见图4。

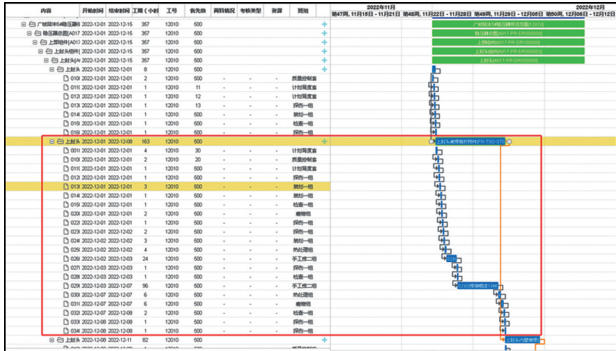


图3 计划管理页面



图4 生产准备齐套检查页面

3.5 资质有效性管理在线协同场景

实现在系统中维护生产工人、检查工人、检查技术人员的资质信息,包括人员、资质、有效期、证书、资质替代关系、替代条件等。技术人员在技术准备阶段指定工序资质要求,生产派工时自动把排班且资质在有效期的人员显示出来,避免资质用错。替代资质采用分级管理,条件替代资质设置审批流程,经技术人员确认后方可派工,完全替代资质,班组可直接派工。同时自动采集资质使用记录,便于追溯资质使用情况。工序开工、检查报告编制和审批自动校验,无资质不允许开展工作。

3.6 在线监督场景

基于生产计划、派工自动生成通知点计划,系统自动将见证资料(上本流转卡、物料信息、原材料完工报告、适用文件、连续操作记录、人员资质)自动推送给监造。监造在线执行授权见证,在线填写见证记录,通过人脸识别实现电子签名。监造可随时在线查看生产进度。

3.7 基于工序执行的质量控制场景

开工时自动检查开工条件,不具备条件不允许开工。给工序任务定义多个状态,加强工序的状态

及异常闭环管理。现场配备了大屏终端和小的移动终端,便于工人开展工作。基于工序执行的质量控制逻辑见表6。

表6 核电装备制造基于工序执行的质量控制表

场景	描述
开工条件检查	自动检查以下条件具备后允许开工 1. 当班任务 2. 适用文件最新有效并在线阅读 3. 风防、经验反馈文件阅读 4. 前道工序完工 5. 无现场异常(文件、物料、设备、质量等),或存在异常技术处置允许开始 6. 现场工位准备完成 7. 见证授权通过 8. 具有要求资质的人员
任务状态管理	未派工、已派工、待执行、执行中、已暂停、已报废、已完工、已报工
多终端场景	使用大终端查看 A0 大图,使用移动终端便于工位现场随时查阅技术要求,采集执行记录

3.8 焊接数据自动采集场景

工人开工时自动将焊接要求值同步到数采平台,工人焊接过程中,采集网关通过协议、电表、传

反应堆压力容器顶盖切割虚拟仿真验证研究

张中亮^{1,2} 张永领^{1,2} 陈戏三¹ 熊贤科¹

1. 中国核动力研究设计院, 成都 610065; 2. 四川省核设施退役及放射性废物治理工程实验室, 成都 610065

摘要:针对秦山核电厂1号机组反应堆压力容器顶盖解体需求,基于自主设计的激光切割装置和大构件自动切割装置,设计了顶盖切割工艺,提出三维虚拟切割仿真方法,结合自研“龙拟”三维仿真引擎,对秦山核电厂1号机组压力容器顶盖进行了三维仿真环境下的虚拟切割模拟验证。

关键词:压力容器顶盖切割; 三维仿真引擎; 虚拟切割模拟

中图分类号: TL943

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)03-0032-04

Virtual Simulation Verification Study on Reactor Pressure Vessel Head Cutting

ZHANG Zhongliang^{1,2}, ZHANG Yongling^{1,2}, CHEN Xisan¹, XIONG Xianke¹

(1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan, China; 2. Sichuan Nuclear Facility Decommissioning and Radioactive Waste Treatment Engineering Laboratory, Chengdu, China)

Abstract: In response to the dismantling requirements of the reactor pressure vessel head of Unit 1 of Qinshan Nuclear Power Plant, a head cutting process was designed based on a self-designed laser cutting device and a large component automatic cutting device. A three-dimensional virtual cutting simulation method was proposed and combined with the self-developed “Dragon Simulation” three-dimensional simulation engine; virtual cutting simulation verification was carried out on the head of the pressure vessel of Unit 1 of Qinshan Nuclear Power Plant in a three-dimensional simulation environment.

Key words: cutting of pressure vessel head; 3D simulation engine; virtual cutting simulation

核电厂顶盖是核电厂退役工程中非常具有代表性的物项,具有尺寸大、重量大、材料难切割、存在一定放射性水平等特点。顶盖等反应堆主要部件切割解体也是核电厂退役过程中最困难的工作之一。我国尚未开展核电站顶盖处理工程实践,顶盖壁厚较大,切割解体能力尚未验证。针对此类高辐射、大型和复杂的反应堆结构的切割整备,必须通过不断的模拟验证,获取合理的切割工艺和切割设备,计算机三维虚拟仿真模拟是各种模拟验证中成本最低和操作最便捷的方式。因此,有必要在设

计阶段,通过三维虚拟切割模拟对顶盖的解体工艺和解体设备进行可视化验证,保证退役安全、降低退役成本、缩短退役工期。

国外核电站大型构件的切割模拟工作开始较早,2004年,日本核燃料循环开发署、日本原子能研究机构携手 Halden 反应堆工程中心共同合作,成功开发了一套用于反应堆退役的虚拟仿真显示系统(DEXUS),可以实现对退役项目的管理、辐射可视化、人员行走路径规划,并通过合适的切割工具对管道进行虚拟切割。^[1-2] 2016年韩国原子能研究所

收稿日期: 2025-04-23

基金项目:核反应堆技术全国重点实验室基金项目;项目名称:γ辐射对无源无线温度传感性能影响研究;项目编号:SRJJ-0224-0401-04。

作者简介:张中亮(1990—),男,2017年毕业于北京化工大学机械工程专业,硕士,助理研究员。现就职于中国核动力研究设计院,主要从事核设施退役及反应堆系统检修新工艺新技术研究工作。

提出一种数字制造平台的模拟拆除方法,应用于韩国核电厂退役的切割拆除过程,有效的减少拆解模拟的复杂性和工作量。^[3-4]国内,中国核动力研究设计院(以下简称核动力院)较早开展了反应堆退役的虚拟仿真工作,通过三维仿真引擎,完成了主管道的切割模拟。^[5]

本文以2007年秦山核电厂1号机组压力容器更换的顶盖为研究对象,通过自研的自动切割装置,通过设计的切割工艺,在自研“龙拟”三维仿真引擎上对切割工艺进行仿真模拟。

1 顶盖切割装置及工艺设计

1.1 秦山1#机组压力容器顶盖

秦山核电厂1号机组反应堆压力容器顶盖由上法兰和球冠焊接而成,见图1所示,重量为43.313 t。上法兰外径4 500 mm,内径3 490 mm,厚度达505 mm。上法兰上有48个均布的 $\Phi 165$ mm的螺栓孔。顶盖上有37个外径 $\Phi 105$ mm的驱动机构管座和两个外径 $\Phi 135$ mm的温度测量管座,与顶盖采用冷装过盈配合工艺,在内壁焊接密封。在顶盖的球冠外表面有三个吊耳,用于顶盖吊具的安装和顶盖吊用,驱动机构通风罩支座固定在三个吊耳上。球冠平均厚度177 mm,最薄处的厚度约为160 mm。

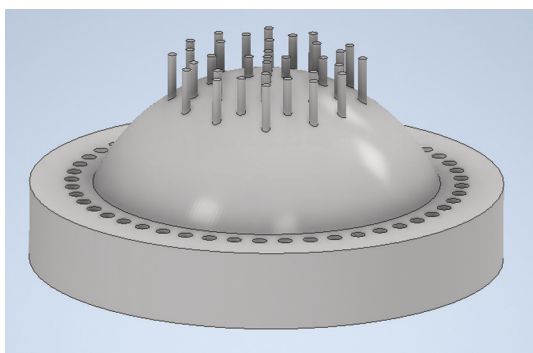


图1 顶盖示意图

1.2 切割装置

(1) 激光切割装置

激光切割装置由大功率激光切割机及六轴机器人组成,六轴机器人作为执行机构,机器人在移动小车的承载下可实现六轴机器人本体位置的移动,如图2所示,通过移动小车与机器人的协调配合可使激光切割头达到最佳切割位置,该激光切割头激光功率为20 kW,且可在功率10%~100%之间

调节。激光切割装置主要用来切割顶盖管座。

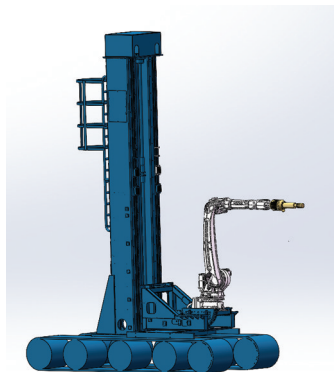


图2 激光切割装置

(2) 大构件自动切割装置

大构件自动切割装置主要包括:龙门架、移动平车组件、回转分度卡盘组件、被切割件装夹系统、绳锯系统、冷却系统、防护系统、视频系统、控制系统及吊具等组成,如图3所示。切割对象为大型金属厚壁容器及构件(圆柱型筒体、半圆球形筒体、管束状筒体以及圆饼状四种类型),切割厚度大于3 400 mm。自动切割装置主要用来进行顶盖球冠及上法兰的切割。

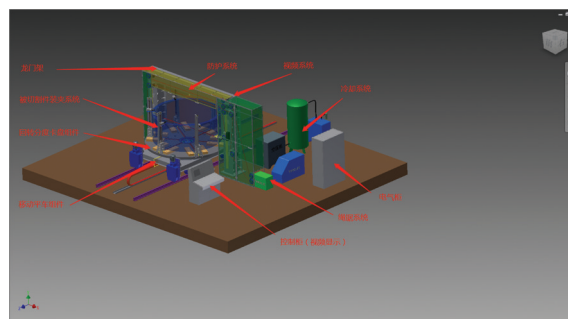


图3 自动切割装置组成示意图

1.3 秦山1#机组压力容器顶盖

在顶盖处放置龙门吊(承载5 t),搭建切割空气隔离棚,将自动切割装置放置于隔离棚内,切割过程中采用切割点局部加强抽吸与隔离棚整体负压的方式处理切割产生的气溶胶。自动切割装置按照规划的路径将顶盖切成满足装箱要求的尺寸,在每一块切割分离后,使用吊车将切割分解的顶盖部件吊至钢箱包装。顶盖重量约为43 t,基于压力容器顶盖形状特点、顶盖尺寸及自动切割装置的特点,在切割时采用自上而下切割,顶盖切割工艺分为三个部分,首先是顶盖驱动机构管座的切割,其

次进行顶盖球冠部分的切割解体,最后进行上法兰部分的切割解体。具体切割工艺为:

(1) 顶盖驱动机构管座切割

1) 沿管座与球冠的切面进行切割,管座上端部存在直径变大的过渡处,可用龙门吊与钢丝绳进行捆绑预紧保护,在激光即将完全将管座切下时,逐渐降低激光输出功率,适当加大龙门吊力,使管座被切下瞬间不会因重力掉落。

2) 单个管座重量约为 50 kg,若其污染水平不高的情况下,可在激光切割完成且通风时间足够后,人工将其转运至 FA-IV 型废物箱内,若污染水平较高,则移动龙门吊至废物箱处,将管座放置于废物箱内,管座全部切割完后预计将产生 2 t 废物,切割机装箱路线图 4 所示。

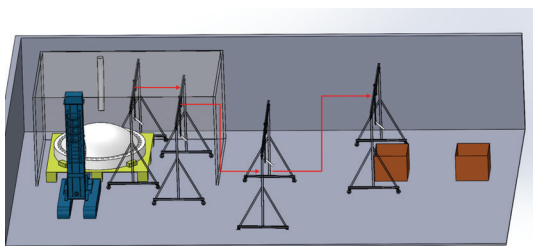


图 4 顶盖管座切割机装箱示意图

(2) 盖球冠部分切割

1) 在驱动机构管座切割完成后根据装箱尺寸要求,进行顶盖切割区域划分和切割步骤规划,如图 5 所示。首先进行横向步骤 1 的切割,然后自动切割装置的切割件装夹系统旋转 90°,使切割锯条也旋转 90°,并通过自动切割装置移动平车组件调整切割锯条与顶盖组件纵向的位置,继续完成步骤 2、3、4 的切割路径,切割完成后其效果如图 6 所示,其中数字 1、3、7、8 标记区域预计重量约为 1 t,数字 3、4、5、6 标记区域重量约为 2.5 t。

2) 完成上述切割步骤后,通过激光切割装置依次进行球冠与上法兰的分离:先在竖直切割完成的部分用激光切割出一个大小适中的圆孔,待其冷却后用足够承载能力钢丝绳穿过激光孔与龙门吊相连,然后用激光切割装置沿球冠与上法兰连接面进行切割,在切割过程中龙门吊适当预紧,保证在完成最后一步切割时分离的球冠部分不会掉落。解体完成后移动龙门吊将其装入废物箱内。

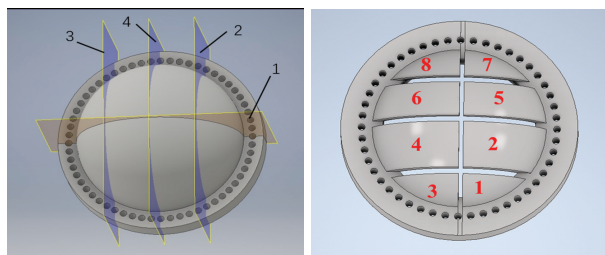


图 5 切割区域划分和步骤 图 6 切割顶盖球冠部分

(3) 顶盖上法兰部分切割

首先通过自动切割装置对顶盖上法兰切割穿透,然后通过自动切割装置切割件装夹系统旋转 45°、90°、135°,并依次切割。使顶盖上法兰部分平分成 8 份,上法兰总重约 27 t,则切割后每块重约 3.4 t。将解体完成后的上法兰切割件通过移动龙门吊将其装入废物箱内。

2 顶盖切割仿真模拟技术研究

2.1 切割计算

核动力院开发的用于核设施退役及反应堆换料维修仿真模拟的“龙拟”三维仿真引擎,包括菜单栏、资源管理器、场景树、属性编辑器等部分组成。可实现对设备的切割、拆装的模拟、三维辐射场的计算及可视化、施工流程的推演等功能。

在对压力容器顶盖的切割模拟过程中,切割功能的实现主要基于三维几何的布尔运算基础算法,涉及得到模型交点、交线等集合信息的几何相交计算,同时基于原始三维模型的拓扑结构,对新产生的面进行裁剪,最后需要对新裁剪面的边线及顶点间的位置关系进行拓扑重建。

整个计算流程如下:

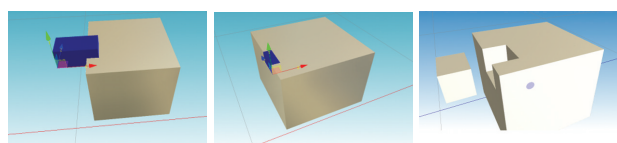
(1) 首先通过计算机判断两个模型在三维空间内是否重合,为提高计算机计算效率,可使用包围盒等加速算法初步判断,若包围盒不重合,那两个模型就一定不会重合;若模型中的一个点在另外一个模型里,那这两个模型一定重合;

(2) 确定两个模型在三维空间内重合后,计算一个模型的所有面和另外一个模型面的相交情况,得到两个模型的相交线。

(3) 依据压力容器顶盖切割模拟过程中模型间的情况(并集、交集和差集运算),对每两个模型实施裁剪处理,并对裁剪后的边线及顶点间的位置关

系进行拓扑重建。交集对计算出的两个模型的公共部分进行拓扑重建;并集是将两个模型的公共部分所涉及的拓扑与几何信息予以去除,保留两个模型。而对于减集而言,则应当将其对应的两个原始模型中属于公共部分的内容去除之后,再继续完成拓扑结构的重建工作。

以两个长方体模型布尔并运算为例说明:布尔运算一般是两个模型,按照顺序习惯将两个原始模型被称作操作对象,一个叫操作对象 A,另一个叫操作对象 B,交集、并集及减集过程见图 7 所示。



(a) 交集运算 (b) 并集运算 (c) 差集运算

图 7 切割布尔运算过程示意图

2.2 顶盖切割模拟仿真

在三模仿真模拟场景中,首先根据前期制定完善的切割工艺脚本,将顶盖调运至自动切割解体装置中。选中需要进行切割模拟的顶盖,点击“龙拟”切割模型功能按钮,出现顶盖虚拟切割面,调整虚拟切割面旋转量(切割角度) x 、 y 、 z 值,以及虚拟切割面平移量(切割位置) x 、 y 、 z 值,确保切割结果预期条件达到要求,见图 8 所示。完成虚拟切割操作后,压力容器顶盖将基于工器具(面工具)设置条件,形成独立的两个单独个体,见图 9 所示。

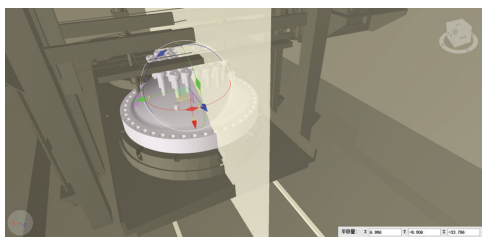


图 8 切割面调整过程

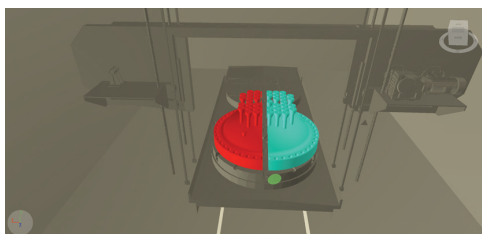


图 9 单次切割

按照切割工艺脚本,以及切割区域划分和切割步骤规划,进行重复切割操作,切割效果见图 10 所示。



图 10 最终顶盖切割模拟结果

3 结语

通过仿真模拟对顶盖的切割过程进行全面直观的感受和了解,可以用于人员操作培训,同时切割模拟的过程,可以对切割设备的可达性、工艺的可行性进行三维验证。对秦山核电厂 1 号机组反应堆压力容器顶盖的切割工艺设计、切割模拟方法研究,为后续核电站顶盖的切割实施、压力容器筒体、稳压器、蒸汽发生器等退役实施提供重要借鉴。

参考文献:

- [1] Iguchi Y, Kanehira Y, TACHIBANA M, et al. Development of Decommissioning Engineering Support System (DEXUS) of the Fugen Nuclear Power Station[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2004, 41(3): 367-375
- [2] Rodenas J, Zarza I, Burgos M C, et al. Developing a virtual reality application for training nuclear power plant operators: setting up a database containing dose rates in the refuelling plant[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2004, 111(2): 173-180
- [3] Kim I, Choi B, Hyun D, et al. A framework for a flexible cutting-process simulation of a nuclear facility decommissions[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, 97: 204-207
- [4] Hyun D, Kim I, Lee J, et al. A methodology to simulate the cutting process for a nuclear dismantling simulation based on a digital manufacturing platform[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 103: 369-383
- [5] 张中亮,张永领,赵菀,等. 反应堆退役虚拟仿真技术研究现状[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告, 2019: 11

核电设备运输风险评价指标体系的 实际应用

谢天

中国核动力研究设计院,成都 610213

摘要:核电设备的安全交付是核电项目建设的先决条件,也是核电设备采购管理的主要目标。因此,核电设备运输风险管理工作意义重大,而核电设备运输风险评价指标体系,是核电设备运输风险管理工作的的重要组成部分,也是行之有效的管理工具。本文结合核电设备运输工作实际情况和以往成功经验,分析了核电设备运输风险评价指标体系的建立,并通过案例分析,阐述了该体系在核电设备运输工作中的实际应用和效果。

关键词:核电设备;运输;风险源;风险分析;风险评价

中图分类号:TM623

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0036-05

The Risk Indicator System of Nuclear Power Equipment Carriage

XIE Tian

(Nuclear Power Institute of China, 610213, Chengdu, China)

Abstract: A secure delivery is the necessary prerequisite to the construction of nuclear power plants, which is also the main target of nuclear equipment purchasing management. The carriage risk management and its evaluation system, which is very important as a management tool. This article analyzed the construction of a risk evaluation system, then discussed the application and effect of this system by case study.

Key words: nuclear equipment; land carriage; source of risk; risk analysis; risk evaluation

1 核电设备运输风险管理基本理论

1.1 概念

核电设备运输风险管理,通过对核电设备运输过程中可能遇到的风险进行识别、分析和控制。达到提前规避风险、预防核电设备运输事故、确保核电设备安全运抵的目的。

1.2 目的

降低风险发生概率,减少损失,预防运输事故的发生,关键在于准确、完备地识别潜在风险,科学地实施风险评价并采取有针对性的风险控制措施。

1.3 步骤

核电设备运输风险管理的主要工作步骤包括:

- (1)建立风险评价指标体系,对潜在风险进行识别和分析,尽量掌握运输过程中可能存在的风险;
- (2)对列出的风险进行分析和评价;
- (3)根据风险分析结果,确定处理运输风险的先后顺序,据此采取措施进行预防和规避。

2 核电设备运输风险评价指标体系的建立

通过对风险的识别和对风险发生的可能性、严重性的分析,运用公式计算出每个风险源的风险等级并列出风险清单,提前进行风险排查,有效避免风险发生,提高运输工作的安全性。

收稿日期:2025-01-16

作者简介:谢天(1981—),男,2009年毕业于西南财经大学工商管理专业,研究生,高级工程师。现就职于中国核动力研究设计院集成采购中心,主要从事设备采购管理及运输管理相关工作。

2.1 风险识别

根据实际情况,从运输人员、运输管理、运输工具以及运输环境等方面着手,全面分析和排查运输过程中可能存在的风险因素,形成风险源清单。并根据清单找出运输过程中的风险源,为风险评价指标体系提供依据。

2.1.1 运输人员

根据分工不同,运输人员可大致分为运输现场工作人员、车辆驾驶员、船员等,其生理状况、心理状况、职业道德、经验技术等方面都对运输安全有着重要影响,无论哪一个方面出现问题,都有可能诱发风险,引起事故。

运输人员开展运输工作时面临的潜在风险,既有作为人类的共同风险,也有根据职业不同面临的多样化风险。

(1) 共同风险

- a. 生理状况:疲劳、带病操作等情况。
- b. 心理状况:运输责任过于重大导致的心态失衡、注意力分散等情况。
- c. 职业道德:自诩经验丰富,自行其是等情况。
- d. 经验技术:处理突发状况的经验不足、违规操作等情况。

(2) 多样化潜在风险

- a. 运输现场工作人员:指挥误判发出错误指令,设备操作失误,安全监督不到位等。
- b. 驾驶员:超速危及设备安全甚至影响设备运输周期,驾照过期等。
- c. 船员:海上运输条件艰苦可能影响船员生理和心理的健康状态,溺水风险较高。

2.1.2 运输管理

运输管理工作包括运输前各类方案及程序的制定、运输中的全程监控及沟通、出现事故时的及时妥善处理、运输完成后的总结和反思等方面。

可能存在的风险因素:团队成员玩忽职守、运输前制定操作方案及程序时考虑不周、运输过程中未确保全程监控等。

2.1.3 运输工具

核电设备运输主要依赖车辆和船舶两类运输工具,其中运输工具机械故障对运输安全的影响最为显著。但根据历史统计数据显示,由运输工具机械故障直接引发的事故占比不足 10 %,这一数据表明运输

工具的机械安全性能总体处于可控状态,其风险可通过驾驶及操作人员的规范作业有效防控。值得注意的是,除机械故障风险外,运输工具在运行过程中涉及的其他安全性能风险需引起同等重视。

(1) 安全性能

a. 吊车、叉车的吊臂、叉臂以及吊索等工装强度风险因素:质量问题或者设备重量超过额定强度导致的工装强度不够,造成设备砸落,对人员和设备的安全造成威胁。

b. 车辆的应急制动系统可靠性、动态稳定性等方面风险因素:刹车失灵导致车辆应急制动失效等情况,车辆载重过大、重心过高或者车板不平影响稳定性等情况。

c. 船舶的通讯设备、导航系统等方面风险因素:通信设备故障导致船舶失联、危及船员和设备的安全,导航系统故障导致船舶迷航、运输超时甚至危及船员和设备的安全。

(2) 结构

可能存在的风险因素:可能发生直接碰撞的部位、关键部件连接部位的强度不足,导致设备发生不安全的位移,危及人员和设备的安全。

2.1.4 运输环境

核电设备运输过程中的环境条件一般分为水文条件、道路条件、天气气候条件、以及时间段等。

(1) 水文条件

可能存在的风险因素:风暴造成运输船舶倾覆,对设备和人员造成损害;船舶在海上锚地避风,造成延误;水电站检修或枯水期,影响船舶通行,造成延误。

(2) 道路条件

可能存在的风险因素:恶劣路况造成颠簸损坏设备以及单调笔直的路段造成驾驶员疲劳、分神等情况;道路施工造成运输车辆无法通行,造成延误等。

(3) 天气气候条件

可能存在的风险因素:风暴天气造成船舶倾覆或者迫使船舶避风、高温酷热天气造成发动机爆缸或轮胎爆胎、雨雪天气道路湿滑导致刹车失灵、大雾天气降低能见度等情况。

(4) 时间段

可能存在的风险因素:船舶行驶时遇到封港、

深夜驾驶引发疲劳驾驶等情况。

(5) 风险分析依据

航路水文气候报告、运输全程路况勘察报告、危险路段情况报告、运输期间天气预报等。

2.1.5 风险源清单

根据以上分析,在核电设备运输工作开始前,编制风险源清单如表 1。

表 1 风险源清单

一层指标	二层指标	三层指标
运输人员	生理状况	疲劳操作
		带病操作
		心态失衡
	心理状况	冲动操作
		注意力分散
		经验不足
	经验技术	违规操作
		现场指挥错误
		设备未能牢靠固定
	多样化风险	安全隐患未及时发现
		超速风险
		驾照过期
		海运时间较长危害生理、心理健康
		溺水风险
	运输管理 工作能力和工作态度	玩忽职守、考虑不周
运输工具	安全性能	吊臂、叉臂与吊索等工装强度不足
		通信故障导致船舶失联
		导航故障导致船舶迷航
		刹车失灵
		载重过大、重心过高或车板不平影响稳定
	结构	连接部分强度不足
		风暴导致船舶倾覆
运输环境	水文条件	水电站检修
		锚地避风
		颠簸
	道路条件	路面单调造成分神
		道路施工
		高温爆缸、爆胎
	天气与气候条件	雨雪天气道路湿滑引发刹车失灵
		大雾天气导致能见度下降
	时间段	深夜驾驶引发疲劳驾驶

2.2 风险分析

通过逐一分析核电设备运输风险源清单包含的各风险源,弄清各种风险因素发生损失的可能性和严重性,确定风险等级。通过收集总结得到

的分析结果,对风险进行定性分析和定量计算,建立运输安全风险评价指标体系。该体系建立后,即可据此对任何核电设备运输工作进行风险分析和评价。

2.2.1 风险可能性分析

安全风险发生的可能性可通过以往统计数据或经验得出,在列表检查时选取适当的概率语言表述,列表检查结果可通过汇总得出定性的风险发生可能性。设为字母 P (Possibility),数字区间为 1-5,数值越高,可能性越高(表 2)。

表 2 风险可能性

级别	可能性	说明
5	很可能	几乎经常出现
4	有可能	有一定概率出现
3	有时	出现概率较小
2	极少	不能认为不会出现、有很小可能发生的
1	几乎不可能	出现的概率接近于零、可以假设不发生的

2.2.2 风险严重性分析

根据风险发生后可能造成的损失,区分为人和物(车辆和货物)等。人包括驾驶员、乘员、行人、其他驾车人等,其后果属于人身伤害,分为死亡、重伤、轻伤、无伤害,设为字母 p (personnel),数字区间为 0-3;物包括己方车辆和货物、交通冲突方车辆、其他相关车辆等,其后果属于财产损失,分为报废、重度损坏、轻度损坏、无损坏,设为字母 E (Equipment),数字区间为 0-3。

人身伤害和财产损失都属于事故,其严重性按程度分为灾难性的、危险性的、临界的、安全的。设为字母 D (Damage):

$$D = p + E \tag{1}$$

D 的数值越高,损失越大,定量划分详见表 3。

表 3 风险严重性

严重性	人(人身伤害)	物(财产损失)
灾难性的(5-6)	死亡(3)	报废(3)
危险性的(3-4)	重伤(2)	重度损坏(2)
临界的(1-2)	轻伤(1)	轻度损坏(1)
安全的(0)	无伤害(0)	无损坏(0)

2.2.3 风险等级计算

核电设备具有形状特殊、尺寸超限、重量极大等特点,部分核电设备还会采用较为复杂的运输方式(江、海、陆运输均涉及)或者具备特殊运输要求

(如充氮、设置加速度仪等),而这些特点往往会提高运输难度,使实际风险等级高于公式计算所得。

为了提高风险评价指标体系的可靠性,在实际工作中,应用该体系对核电设备运输进行风险评价时,还需根据核电设备各类特点引入相应难度系数 d (difficulty):

$$d = d_1 \times d_2 \times \cdots \times d_n \quad (2)$$

风险等级设为字母 L (Level):

所以,

$$L = P \times D \times d = P \times (p + E) \times (d_1 \times d_2 \times \cdots \times d_n) \quad (3)$$

L 的区间划分详见表 4。

表 4 风险等级区间表(难度系数为 1 时)

	灾难性的(5-6)	危险性的(3-4)	临界的(1-2)	安全的(0)
很可能(5)	25-30	15-20	5-10	0
有可能(4)	20-24	12-16	4-8	0
有时(3)	15-18	9-12	3-6	0
极少(2)	10-12	6-8	2-4	0
几乎不可能(1)	5-6	3-4	1-2	0

3 核电设备运输风险评价指标体系的实际应用

3.1 运输难度系数的计算

使用经验判断法,得出常见运输难度系数的数

值区间表如表 5。

3.2 案例 某核电项目堆内构件运输

在该设备运输工作开始前,通过道路勘察、各类文件审查等手段,选取表 6 中对应难度系数。

表 5 运输难度系数

设备特点	运输方式			形状特殊,固定 难度大(d_1)	尺寸较大 (d_2)	重量较大 (d_3)	运输特殊要求	
	陆运	海陆联运	江海陆联运				充氮(d_4)	加速度仪(d_5)
难度系数(d)	1.0	1.5	1.8	1.5	1.5	1.6	1.4	1.4

(1) 运输方式

由于该设备于内陆地区起运,运往海边在建核电项目,运输方式为陆运至长江码头后,改由江船运输至出海口码头,再更换为海船运抵核电现场,在计算相应风险等级时,难度系数为 1.8。

(2) 设备特殊要求

该设备形状特殊、尺寸较大、重量较重,在计算相应风险等级时,难度系数为 $1.5 + 1.5 + 1.6 = 4.6$,因此,本次运输的难度系数为 $1.8 + 1.5 + 1.5 + 1.6 = 6.4$ 。

通过以往项目经验,对实际情况进行分析,得出每个三层指标的 P 、 p 、 E 值,引入难度系数并代入公式

$$L = P * D * d = P * (p + E) * 6.4 \quad (4)$$

计算出每个三层指标的风险等级 (L),详见表 6。

通过表 6 可以看出,风险等级超过 50 的风险源共有 6 条,针对这 6 条风险源采取的控制措施如下。

(1) 安全隐患未及时发现:安全检查和安全教育落实到位。

(2) 路面单调造成分神:双人轮流驾驶,副驾驶位人员同样需要观察路面情况,必要时提醒驾驶员,避免分神引发事故。

(3) 道路施工:根据施工提示和交警指挥更换行进路线或在安全区域停车等待。

(4) 雨雪天气道路湿滑引发刹车失灵:对执行设备运输任务时的最高行驶速度和过弯最高速度进行规定,并要求驾驶员严格按照规定执行。

(5) 大雾天气导致能见度下降:将车辆驶入高速休息站或路边停车区等待。

(6) 深夜驾驶引发疲劳驾驶:每日行驶时间不得超过八小时,0-5 点车辆禁止上路。

通过上述 6 条以及针对其他风险源采取的控制措施,该设备在运输途中无任何事故发生,最终安全运抵现场并交付。

表 6 田湾 5 号机组反应堆压力容器支承运输风险源检查清单

一层 指标	二层 指标	三层 指标	风险可 能性(P)	风险严重性(D)		风险等级 (L)
				人(p)	物(E)	
运输人员	生理状况	疲劳驾驶	1	2	2	31.2
		带病驾驶	1	2-3	3	39~46.8
	心理状况	心态失衡	1	1-2	1-2	15.6~31.2
		冲动驾驶	1	1-2	1	15.6~23.4
		注意力分散	1	1-2	1-2	15.6~31.2
	经验技术	经验不足	1	1	1	15.6
		违规操作	1	1-2	1-2	15.6~31.2
	多样化风险	现场指挥错误	1	1-2	1	15.6~23.4
		设备未能牢靠固定	2	1	2	46.8
		安全隐患未及时发现	2	2	2	62.4
		超速风险	2	1	1	31.2
		驾照过期	1	1	1	15.6
		海运时间较长危害生理、心理健康	1	2	1	23.4
		溺水风险	2	1	1	31.2
运输管理	运输管理团队	玩忽职守、考虑不周	1	1	1	15.6
运输工具	安全性能	吊臂、叉臂与吊索等工装强度不足	1	3	3	46.8
		通信故障导致船舶失联	2	1	1	31.2
		导航故障导致船舶迷航	1	2	2	31.2
		刹车失灵	1	2-3	2-3	31.2-46.8
		载重过大、重心过高或车板不平影响稳定	1	2	2	31.2
	结构	连接部分强度不足	1	2	2	31.2
		风暴导致船舶倾覆	1	3	3	46.8
	水文条件	水电站检修	1	1	1	15.6
		锚地避风	1	1	1	15.6
		颠簸	2	1	2	46.8
环境条件	道路条件	路面单调造成分神	2	2	2	62.4
		道路施工	4	1	1	62.4
		高温爆缸、爆胎	1	2	2	31.2
	天气与气候条件	雨雪天气道路湿滑引发刹车失灵	2	2-3	2-3	62.4-93.6
		大雾天气导致能见度下降	2	2-3	2-3	62.4-93.6
		时间段	深夜驾驶引发疲劳驾驶	2	2-3	2-3

3.3 效果评价

通过对以上案例的分析,可以看出,应用风险指标评价体系的优点主要体现在以下三个方面。

(1)检查风险源时,可以十分直观地观察和对比所有风险源及其对应的风险等级区间。

(2)可将风险源按风险等级按由高到低降序排列,根据风险等级的高低采取力度不同风险控制措施。

(3)可将风险源按表中一、二层指标分类,对于同类别且风险等级区间相近的风险源,批量进行风

险控制。例如:人员相关风险共计 14 条,占比约 45 %,可通过提高审核条件、严格规章制度、加强培训、及时治疗 and 疏导等措施进行集中控制。

4 结语

核电设备运输风险评价指标体系有助于更加全面和准确地把握实际运输工作中可能存在的风险因素。通过对风险等级的区分,在采取风险控制措施时能做到对症下药,大大提高风险管理的

(下转第 61 页)

浅谈某火力发电厂煤仓间钢结构改造

王雪¹ 徐健¹ 黄子轩² 张苗² 胡德浩²

1. 东方电气(成都)工程设计咨询有限公司, 成都市 611731; 2. 国能九江发电有限公司, 江西 九江 332000

摘要:为实现某火力发电厂制粉系统升级改造,需对煤仓间钢结构进行加固,以保障新制粉系统运行安全及功能提升。在改造过程中,不仅对整个电厂进行三维建模,而且在不改变结构刚度和传递路径的前提下,结合设备布局实施改造,采用水平支撑传递水平力,并增加竖向支撑的拉结以减少柱计算长度,最终避免了传统改造时需要对框架柱进行加固。整个改造设计安全、经济、合理。本文的改造方法另辟蹊径为工业厂房的升级改造提供了一种新颖的借鉴,助推我国电力工业实现绿色、高效、可持续发展。

关键词:改造; 钢结构; 三维建模; 电厂; 煤炭清洁高效利用; 位移曲线

中图分类号: TU391

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)03-0041-04

Discussion on the Steel Structure Renovation of the Coal Bunker Building in A Thermal Power Plant

WANG Xue¹, XU Jian¹, HUANG Zixuan², ZHANG Miao², HU Dehao²

(1. Dongfang Electric Engineering & Consulting Co., Ltd, 611731, Chengdu, China;

2. Guoneng Jiujiang Power Generation Co., Ltd., 332000, Jiujiang, Jiangxi, China)

Abstract: In order to upgrade the coal-pulverizing system of a certain thermal power plant, it is necessary to reinforce the steel structure of the coal bunker building to ensure the safe operation and functional improvement of the new coal-pulverizing system. During the renovation process, not only a three-dimensional model of the entire power plant was created, but also the renovation was carried out in combination with the equipment layout on the premise of not changing the structural stiffness and force-transfer path. Horizontal supports were used to transfer horizontal forces, and the bracing of vertical supports was increased to reduce the calculated length of columns. Eventually, the need to reinforce the frame columns during traditional renovations was avoided. The entire renovation design is safe, economical, and reasonable. The renovation method in this paper provides a novel reference for the upgrade and renovation of industrial plants by taking an alternative approach, contributing to the green, efficient, and sustainable development of China's power industry.

Key words: renovation; steel structure; 3D modeling; thermal power plant; clean and efficient utilization of coal; displacement curve

在全球能源格局不断调整与优化的大趋势下,电力行业面临着前所未有的机遇与挑战。为契合愈发严苛的环保标准、提升能源利用效率,以及满足日益增长的电力需求,电厂实施系统升级改造已成为保障自身可持续发展的关键路径。而在这一

系列升级举措中,厂房改造作为核心环节,其重要性不言而喻,它不仅关乎电厂改造工程的整体成效,更直接影响到后续电厂的稳定运行与经济效益。

某电厂的煤仓间始建于2000年前后,由STONE & WEBSTER CANADA LIMITED负责设计,

收稿日期: 2025-01-21

作者简介:王雪(1983—),女,2008年毕业于西安理工大学校结构工程专业,硕士研究生,高级工程师。现就职于东方电气(成都)工程咨询有限公司,主要从事土建设计工作。

采用美国标准。长期以来,该煤仓间发挥着重要的储煤制粉作用。但随着电厂系统升级改造,现有制粉系统难以满足高效、稳定的生产要求。2022年,该电厂为提升生产效能、优化制粉工艺,对煤仓间制粉系统进行改造。

此次改造重点针对 12.6 m 运转层以下的钢结构区域。该煤仓间采用钢结构铰接支撑框架,结构需要配合工艺布置是改造的难点,一方面,要全方位满足电厂未来长期稳定运行需求。另一方面,改造过程中要最大程度降低对原有结构的破坏,避免改变其特性,防止引发结构应力变化、稳定性削弱等不可预见问题。同时,需规避不必要的加固工作,在保证改造质量与预期效果的基础上,严格控制成本,实现经济与质量的双赢。

本文将围绕此次煤仓间制粉系统改造项目,详细阐述改造过程中面临的技术难题、解决方案的制定与实施,以及最终取得的成效,以期为同类电厂改造项目提供有价值的参考。

1 工程概况

某电厂煤仓间建于 2000 年左右,原设计单位为 STONE & WEBSTER CANADA LIMITED,设计采用美国标准。2022 年电厂业主委托我司对煤仓间进行制粉系统改造,改造范围主要涉及 12.6 m 运转层以下钢结构。

1.1 结构形式

煤仓间为钢结构铰接支撑框架,横向 2 跨,总长 17 m,纵向 10 跨,总长 90 m。

横向:Ca 轴钢框架支撑结构,C1 轴钢框架无支撑结构,D 轴钢框架支撑结构。纵向:1Y~9 轴钢框架支撑结构,如图 1~3 所示。

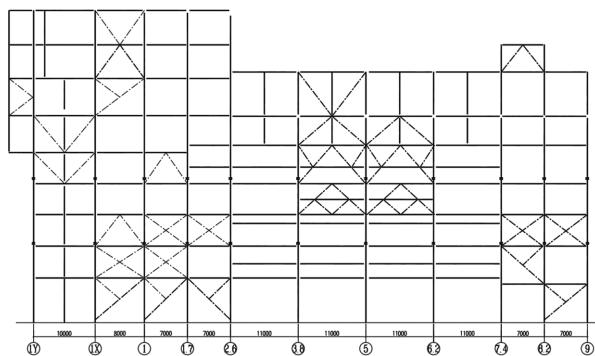


图 1 D 轴立面图

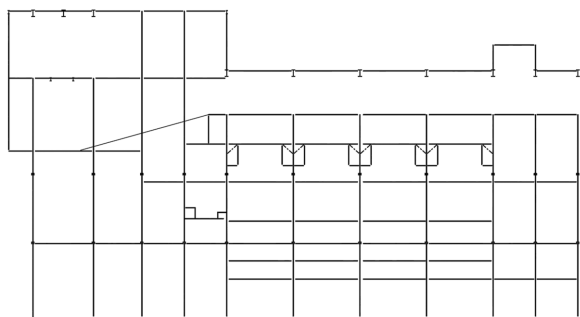


图 2 C1 轴立面图

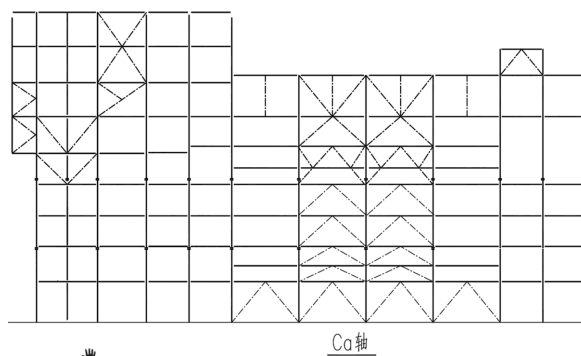


图 3 Ca 轴立面图

楼面为钢格栅板、组合楼板,屋面为组合楼板。该建筑高 50 m,高 6.0 m、7.165 m,九层层高 11.08 m。无地下结构,屋面为不上人屋面。

本次改造对整个电厂进行了三维建模,并输入所有设备及管道荷载进行计算,如图 4 所示。

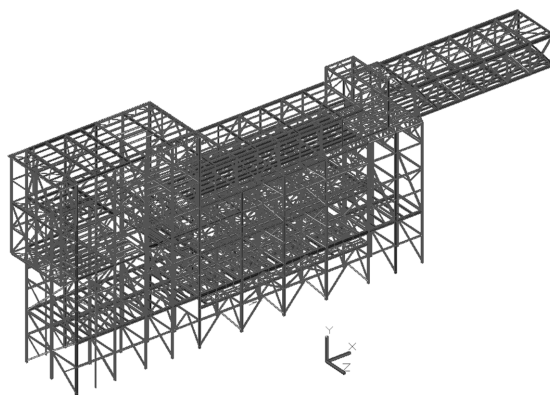


图 4 三维模型图

1.2 地震烈度及风荷载

抗震设防烈度为 6 度(0.05 g),Ⅱ类场地,设计地震分组第一组,基本风压值为 0.35 kN/m²。

1.3 改造原因

本次改造需要将卧式磨煤机更换为立式磨煤机,磨煤机高度变高导致原有的检修吊车高度和吊重均不满足要求,落煤管从磨煤机两头落煤,要改

为磨煤机中间落煤。

2 改造的难点

新的落煤口和磨煤机的布置工程有很大影响。考虑了两种布置方案。

方案一将落煤口放在正中,磨煤机布置在原磨煤机基础的正中,这种布置方式对磨煤机基础的改动小,但落煤口就被 6.662 m 层 C1 轴主梁遮挡了,主梁必须拆除,而且还要进行上部钢结构的复核。

方案二将落煤口偏离正中布置,6.662 m 层 C1 轴主梁不拆除,这种布置方式对上部结构的改动小,但落煤管偏心会影响落煤的顺畅,同时磨煤机也要偏心布置,原基础改造工作量大。

出于经济性和效率性的考虑,项目改造采用方案一,对 6.662 m 层、9.562 m 层次梁及 C1 轴局部主梁进行拆除,每层一共 4 根。

经过初步判断 C1 轴框架主要作用是承受竖向力,C1 轴框架为无支撑钢框架,其承受的水平力不到总水平力的 5%,该榀框架的抗侧刚度比 Ca 轴、D 轴的框架(带支撑框架)弱得多。且改造前后整体荷载变动不大,框架梁柱为铰接,局部拆除对整个结构体系的影响不大,但对底层框架柱的稳定有很大影响。

3 结构鉴定

目前厂房已经使用了 20 多年,为了解该厂房现状及是否满足本次改造要求,依据 GB 50144—2019《工业建筑可靠性鉴定标准》^[2]对该厂房进行相关检测、结构安全性及其抗震性能的鉴定。鉴定结果详见如下。

3.1 材料性能检测

原结构构件主要采用美国标准宽翼缘 H 型钢,国标槽钢和国标角钢。美国标准宽翼缘 H 型钢材质为 ASTM A36/A572 标准的 Grade 50,经翻阅资料其屈服强度为 50 ksi,经换算为 344.7 MPa,设计用强度指标约同 Q345(国标);国标槽钢,国标角钢材质为 Q235A。经过检测该建筑上部主体钢构件的推定强度等级与国标 Q345 钢材相当。

3.2 结构检查

经过对房屋结构完损情况的现场检测,该建筑

的结构体系布置合理,其结构平面布置、竖向布置、结构抗侧力作用体系、抗侧力构件均完整。

3.3 安全性鉴定

综合对该建筑的钢构件、焊缝、连接、节点、钢结构系统、围护结构等的安全性鉴定评级,该项目煤仓间的结构安全性鉴定等级评为 Bsu 级,在使用期内无显著影响安全的因素,可不采取措施,仅对少数构件和节点应采取适当措施。

3.4 抗震鉴定

建筑承载力可基本满足抗震鉴定要求,少数结构构件最低延性等级不满足抗震性能化设计要求。

4 结构改造方案

4.1 结构基本信息

结构采用盈建科有限元软件计算。地面粗糙度为 C 类,地震设防烈度为 6 度,设计地震分组为第一组,场地类别为 II 类,抗震等级为四级。采用振型分解反应谱法进行地震作用分析。

4.2 加固改造方案

拆除煤仓间钢结构原 6.662 m 层和 9.562 m 层的 C1 轴主梁、全部次梁、全部吊柱和楼梯,如图 5、图 6 所示。

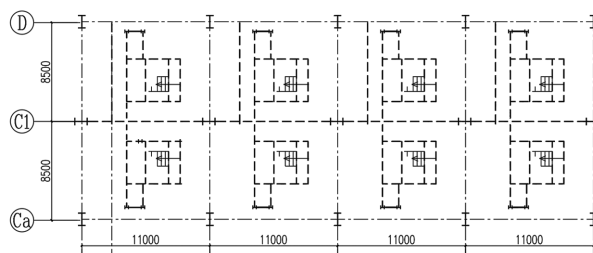


图 5 原 6.662 m 层局部梁拆除图

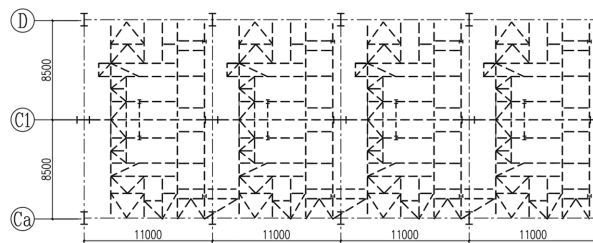


图 6 原 9.562 m 层局部梁拆除图

在 9.562 m 新建一层钢平台(兼检修起吊层),通过水平支撑传递水平力,如图 7 所示。通过柱侧增加斜撑,缩短柱计算长度,保证了框架柱的稳定,

如图 8 所示。避免对框架柱的加固。

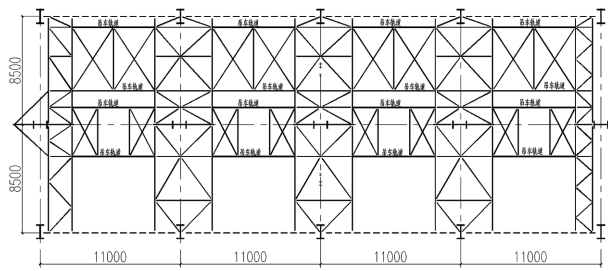


图 7 9.562 m 层新增钢平台图

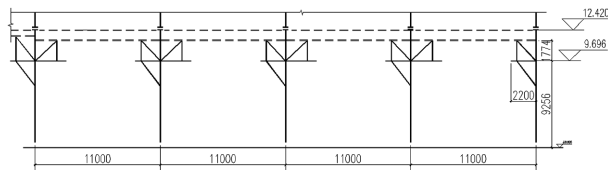


图 8 C1 轴新增斜撑后的立面图

4.3 加固前后的结构性能指标对比

经盈建科软件进行整体计算分析^[3],改造前,风荷载作用下 x 方向和 y 方向楼层位移的最大值分别为 5.6 mm 和 0.1mm;改造后,分别为 5.4 mm 和 0.1 mm。

改造后柱底竖向荷载几乎没有增加,改造前后应力比及结构的变形均符合规范要求,见表 1。

表 1 楼层层间位移角

楼层层间位移角	改造前 (mm)	改造后 (mm)	规范限值
风荷载作用下 x 方向	1/856	1/854	满足
风荷载作用下 y 方向	1/9 999	1/9 999	满足
地震荷载作用下 x 方向	1/1 661	1/1 847	满足
地震荷载作用下 y 方向	1/2 538	1/2 545	满足

地震荷载作用下改造前后 x 方向和 y 方向楼层层间位移如图 9 和图 10 所示。

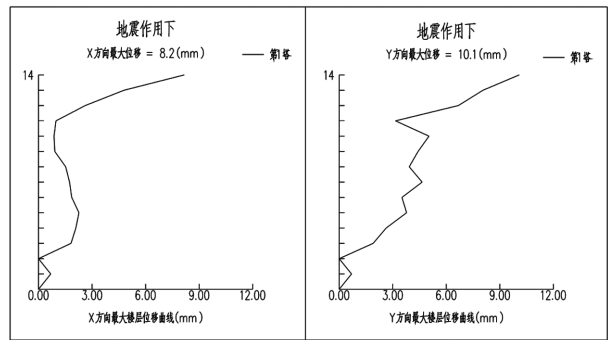


图 9 改造前层间位移

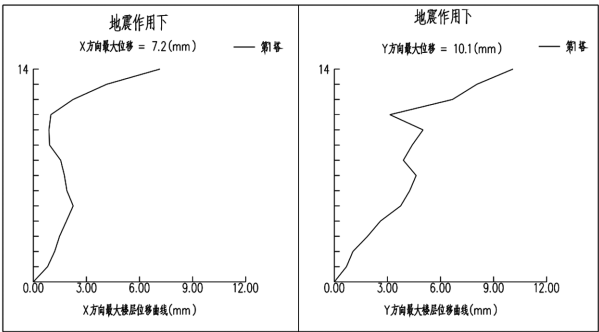


图 10 改造后层间位移

5 结语

本项目的改造实践从结构体系及构件层面进行了充分论证,创新性的提出了局部改造以及在柱侧设置支撑的方案,经过计算与分析,完成了加固方案的设计和验证。本文针对改造工程的方案,思路新颖对类似的工程改造有重要参考价值。在实际改造工程中,加固改造的方案是多样化的,唯有根据具体的结构形式及使用需求,结合施工条件等实际情况,方能制定出安全、经济的改造方案。

参考文献:

[1] 葛然.合理规划煤电升级改造助力构建新型电力系统[J].中国电力企业管理,2022(4):74-75
[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. GB 50144—2019 工业建筑可靠性鉴定标准[S]
[3] 温立平,朱绪平,张亚英,等.某热电厂锅炉钢框架结构的计算分析及加固设计[J].北京工业职业技术学院学报,2023,22(4):1-5

高海拔对燃料电池系统运行的影响 及应对措施分析

曹蕾¹ 唐刚¹ 赵政顺¹ 孔红兵^{1,2} 胡军¹

1. 东方电气(成都)氢能科技有限公司, 成都 611731; 2. 氢电转换四川省重点实验室, 成都 611731

摘要:在全球能源绿色低碳转型和中国实现“双碳”目标大背景下,氢能应用被提上前所未有的高度。处于氢能产业链后端的氢燃料电池系统,随着应用场景被不断拓宽,对其环境适应性的要求也越来越高。高海拔地区空气稀薄、氧分压降低,这类环境会限制质子交换膜燃料电池的发电性能,降低其耐久性。针对燃料电池系统各子系统零部件特点,定性分析了高海拔低气压环境中制约燃料电池系统性能输出的各类影响因素,并提出相应应对措施,为高海拔地区用燃料电池系统的性能设计、零部件选型提供重要依据。

关键词:燃料电池;高海拔;性能影响

中图分类号:TM911.4

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0045-05

Analysis and Countermeasures of High-altitude Effects on PEM Fuel Cell System

CAO Lei¹, TANG Gang¹, ZHAO Zhengshun¹, KONG Hongbing^{1,2}, HU Jun¹

(1. Dongfang Electric(Chengdu) Hydrogen Technology Company, Ltd., 611731, Chengdu, China;

2. Hydrogen Electricity Interconversion Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

Abstract: The utilization of hydrogen is being elevated to an unprecedentedly important role with the aims of green and low-carbon transformation of global energy as well as carbon peaking and carbon neutrality goals. With the growing application of PEM Fuel Cell System (PEM FCS), much higher environmental adaptability performance and longer durability are needed. As the altitude increases, the air is rarefied, oxygen partial pressure is also lower. This kind of environment will limit the performance of PEM FCS and reduce its durability. In this paper, the qualitative analysis of high-altitude effects on the performance of PEM FCS' subsystem, components and parts was carried out. Meanwhile, the corresponding solutions were proposed. Thus, it provides an important basis for the design and component selection of the PEM FCS.

Key words: fuel cell system; high altitude; impact on performance

燃料电池系统的功率性能直接决定了其在车用动力、储能发电等应用领域的综合性能与运行效率。作为燃料电池系统的核心组件,电堆的输出特性直接决定系统性能。其稳定运行依靠氢气供给、氧化剂输送、热力学及电气控制等系统的耦合与协同工作。

在高海拔地区,虽然大气中的饱和水蒸气分压

不变,但空气稀薄、总气压低,导致氧气分压也低。电堆性能输出对阴极的操作条件(包括空气压力和过量系数)非常敏感,故需要及时调整空气策略,避免电堆阴极缺氧导致的性能衰减^[1]。

高海拔的稀薄大气也对热管理回路的散热效能构成挑战,需采取有效措施保障系统稳定运行。同时,高海拔环境对电气设备的起晕电压、外绝缘

收稿日期:2024-09-29

作者简介:曹蕾(1982—),女,2008年毕业于四川大学,硕士研究生,正高级工程师。现在东方电气(成都)氢能科技有限公司从事燃料电池系统集成技术开发工作。邮箱:caol@dongfang.com。

2 高海拔环境对燃料电池子系统的影响分析及应对措施

2.1 电气系统

燃料电池系统的绝大多数零部件都含传感器、接触器、电容、线圈和电机转子等电气部件,都会不同程度受到以下因素的影响^[9]。

2.1.1 空气压力或密度降低

(1)电气设备外绝缘强度下降:这一现象直接影响到直流-直流转换器(DCDC)、电加热器(PTC)、水泵、氢泵以及空压机等设备的外绝缘材料选择,以及电机定子线圈之间的绝缘材料选用,需选用更为可靠的材料以保障绝缘性能。

(2)击穿电压降低:为确保电气零部件在高海拔条件下具备足够的耐击穿能力,必须考虑增加各零部件的电气间隙,以防止电气击穿现象的发生。

(3)电晕起始电压下降:在相同条件下,原本在低海拔地区能有效抑制电晕的屏蔽(均压)环和导线,在高海拔地区可能不再适用,需要重新评估和设计。

(4)空气灭弧介质的开关电器灭弧性能减弱:在燃料电池系统的发电应用中,如配电柜、控制柜等开关类电器的灭弧性能会降低,通断能力下降,电寿命可能因此而缩短。

(5)空气冷却的电气设备冷却效率降低:对于依赖自然对流、强迫通风或空气散热进行散热的电气产品,如空压机、氢泵和水泵机头,由于空气稀薄导致传热能力下降,散热效率降低,会使设备温升增加。然而,考虑到高海拔环境本身较低的环境温度,这种温度降低可以部分或完全补偿因气压降低引起的电气设备的温升。

(6)润滑剂蒸发加速和密封泄漏:在高海拔环境中,散热器电子风扇、节温器、水泵、空压机和氢泵内部传动机构的润滑剂蒸发速度加快,同时气体或液体更容易从密封区域泄漏,导致泄漏率上升,这对设备的维护和可靠性提出了更高的要求。

2.1.2 空气温度变化

在高海拔地区,由于空气日夜温差较大,产品外壳材料易受温度波动影响,从而导致形变、皲裂,密封结构也可能因温度变化而发生破裂。此外,针

对燃料电池系统中的电堆及其他关键零部件,以下因素可能导致密封失效和系统漏水、系统漏气的风险。

(1)密封圈低温失效:在高海拔地区,夜间温度骤降可能导致密封圈材料硬化,弹性降低,从而失去密封效果。

(2)材料膨胀系数不一致:不同材料在温度变化下的膨胀系数差异可能导致密封结构松弛,进而引发泄漏。

(3)管路卡箍扭矩衰减:温度波动可能导致管路卡箍的扭矩发生变化,随着时间的推移,扭矩可能逐渐衰减,导致管路连接不紧密,增加泄漏风险。

为应对这些挑战,燃料电池系统的设计和维护需采取以下措施。

(1)选择具有良好耐温差性能的材料制造产品外壳和密封结构,以减少因温度变化引起的变形和破裂。

(2)采用能够在宽温度范围内保持稳定性能的密封材料,确保在低温条件下仍能保持良好的密封效果。

(3)对管路卡箍进行定期检查和维修,确保其扭矩维持在适当水平,防止因扭矩衰减导致的泄漏问题。

(4)在系统设计时考虑温度补偿机制,以适应高海拔地区剧烈的温差变化,保障系统的长期稳定运行。

2.1.3 空气绝对湿度降低

在高海拔地区,空气绝对湿度的降低对电工产品的外绝缘性能产生显著影响,具体表现为外绝缘强度减弱,以及工频放电电压与冲击闪烁电压的降低。这种湿度引起的性能变化对燃料电池系统中的关键电机部件,如空压机、氢泵和水泵等,均会产生影响。这些电机的绝缘系统需要特别设计,以适应低湿度环境。

针对这些变化,提出如下措施和建议。

(1)选择适合低湿度环境的绝缘材料,这些材料应能够在干燥条件下保持良好的绝缘性能。

(2)对电机绝缘系统进行特殊设计,如增加绝缘层的厚度或采用具有更好耐低湿度性能的绝缘材料。

(3)在电机设计和测试过程中,考虑湿度对绝缘性能的影响,进行相应的湿度修正试验,以确保在低湿度条件下电机的安全运行。

(4)对电机进行定期检查和维修,尤其是在高海拔地区,以监控绝缘状态,防止因绝缘性能下降而导致的故障。

2.1.4 太阳辐射照度增加

随着海拔的升高,特别是在海拔 1 000 m 以上的地区,每增加 1 000 m,太阳辐射照度增加约 6 %。这种增强的热辐射对物体产生加热效应,导致电工产品表面的温升增加,进而降低有机绝缘材料的性能,引起材料变形并产生机械应力。同时,高原地区的紫外线辐射照度也随海拔升高而增强,紫外线会加速绝缘材料的老化过程。因此,对于那些常安装在车辆顶部或集装箱顶部的散热器电子风扇来说,高原环境容易加速其老化速度。

综合上述分析,高海拔气候对电气设备的多个方面产生影响,包括外绝缘强度、电气间隙的击穿电压、电晕现象、开关电器的灭弧性能、产品温升性能以及材料老化等。针对这些影响,可采取如下措施。

(1)尽量将重要的电气零部件置于有遮蔽(顶棚、房间)的环境中。

(2)对于计划在高海拔环境使用的燃料电池系统,需提前对原有零部件的电气性能进行验证,以确保其在高海拔条件下的可靠性和安全性。

(3)必要时,应修改电气设计,以适应高海拔环境的特点,包括但不限于增加电气间隙、使用更适合的绝缘材料等。

(4)考虑更换适用于高海拔环境的零部件电气部分,这些零部件应能够耐受更高的太阳辐射和紫外线辐射,以及更低的空气密度和湿度。

(5)调整运行策略,例如,对于 DCDC 等电气部件,可能需要降压、降容运行,以适应高海拔环境的变化。

通过这些措施,可以确保燃料电池系统电气设备在高海拔环境中的稳定运行,延长设备的使用寿命,并保障系统的整体性能。

2.2 空气子系统

2.2.1 对空压机的影响

由表 1 可知,海拔越高,空气越稀薄,空气气压

越低。从图 1 和表 2 也可见,海拔越高,含氧量也越少。

因此同款空压机运行在高海拔环境时,在和平原同样的转速/功率情况下,吸入的空气量会变少、且相应氧含量也少,空压机输出的空气压力也会降低。如果保持燃料电池系统输出功率不变,空压机应提高转速运行。随转速的变化,会给空压机带来如下影响。

(1)功耗增加。高海拔环境下,为维持电堆操作压力和气量需求,空压机的压比增大,需提高转速。这导致空压机偏离高效工作区间,功耗增大,效率降低,最终导致燃料电池系统净输出功率降低。

(2)工作区间变窄。在高原地区,燃料电池小功率运行时,空压机工作点在性能特性曲线图(MAP 图)上的位置点发生变化,空压机易进入喘振区导致故障。当燃料电池系统高功率运行时,空压机性能不足,无法满足系统需求。平原地区所选空压机无法覆盖高原地区所有工况。

(3)寿命降低。高海拔地区空气稀薄,导致气浮轴承气量不足,加速磨损和过热,降低离心空压机的寿命。

高海拔环境直接影响到空压机性能和寿命,在选用时要评估不同海拔下的空压机 MAP 性能,使之能与燃料电池系统的需求相匹配。同时,空压机的电性能、气动性能及散热等设计也应与平原地区有所区别。

2.2.2 对加湿器的影响

根据表 1 所统计的年平均绝对湿度数据,可以观察到海拔高度与空气绝对湿度之间存在负相关性,即海拔越高,空气的绝对湿度越低。这一现象对在高原地区运行的燃料电池系统提出了特定的要求,尤其是在空气含水量方面的考虑。

由于高原地区空气中的水分含量较低,且同样温度环境中,高原地区相对湿度会明显低于某些平原地区相对湿度:根据气象局的统计,例如环境温度 6 ℃ 的成都、其相对湿度为 81 %,而拉萨的相对湿度仅 6 %。

由此,燃料电池系统在高原运行时,即使调整空压机增加压比,其出口的绝对含水量也会自然减少。因此负责调节进气湿度的加湿器选型需根据

高原气候条件,进行相应调整。

(1)预先评估其膜管数量和总通量是否能够满足高原地区更低绝对水含量情况下,将更低湿度的空压机出口空气加湿到合适的入堆空气湿度的状态。

(2)如果现有加湿器的加湿性能无法满足高原环境的需求,则需选用膜管数量更多或通量更高的加湿器。或者可以定制专门针对高原低湿度环境的加湿器,以优化性能和效率。

2.3 氢气子系统

在高海拔环境中,如果空气子系统降低操作压力运行,则为保持电堆内合理的氢空压差值,氢气子系统压力需随空气子系统的操作压力而调整。

氢气子系统负责燃料输送及排水排氮。在高海拔地区,如青海湖(海拔 3 000 m,大气压力约 70 kPa),较成都(海拔 600 m)低 25 kPa,会影响其排水排氮。内部压力不变时,高原地区排水排氮的内外压差增大,可提升排放能力,但可能降低氢气利用率。

因此,需针对高海拔环境特点,重新调整氢气子系统的排氮排水策略。比如缩短排放的时长和频率,开发更高效的排放控制算法,以实现排放效果与氢气利用率之间的平衡。

2.4 热管理子系统

2.4.1 膨胀水箱

膨胀水箱的压力箱盖,作为膨胀水箱内外气压平衡的“调节阀”,可保持箱外和箱内的压力相等。在高海拔地区,箱外压力低,则通过膨胀水箱盖的通气作用,施加到水箱内液面的压力也降低,可使热管理子系统的液体压力与燃料电池电堆氢气、空气侧压差减小,不会增加电堆的耐压力需求。

2.4.2 水泵

燃料电池系统热管理子系统的水泵起着流体增压和输送的功能。高海拔低气压环境下,膨胀水箱外部气压降低,导致水泵入口压力降低,增加汽蚀风险,降低效率并缩短寿命。因此,需结合高海拔特点,进行水泵选型、吸入管路设计,并调整膨胀水箱和水泵的安装高度,以降低汽蚀风险、保障水泵寿命。

2.4.3 冷却介质

由于高海拔地区大气压力较低,水和其他液体

的沸点会相应降低。例如,在海拔约 3 000 m 的地方,水的沸点降至大约 91 ℃。这对于燃料电池系统的冷却介质选择提出了特殊要求,因为燃料电池系统的运行温度通常在 70~85 ℃ 范围内。为了避免冷却介质在高海拔地区过早沸腾,需采取如下措施。

(1)避免使用去离子水:在高海拔地区,去离子水由于其较低的沸点,可能不适合作为冷却介质。因此,应避免使用去离子水,转而使用专为高海拔环境设计的冷却液。

(2)使用燃料电池专用冷却液,这种冷却液含大量提高沸点的物质,如乙二醇,可以提高冷却液沸点,适合在高海拔地区使用。

2.4.4 散热器

海拔升高导致空气密度降低,同等流速下空气质量流量减小,散热器换热能力下降。为满足散热需求,需调整控制策略、增大风扇转速或改变风扇选型及数量。

此外,高海拔地区环境压力低,导致散热器芯体内外压差增大。为防止芯体损坏,需提高其设计压力,选择能够耐受更高压力的散热器芯体材料或结构,或对现有芯体进行加固处理,以适应高海拔环境。

3 结语

综合梳理了高海拔地区的独特环境气候特征,并结合影响燃料电池系统性能表现的关键影响因素:如空气温度、湿度、绝对水含量、太阳辐射照度等,拆解分析了此类环境因素对电控电气、以及对各子系统和各零部件影响,为高海拔地区燃料电池系统的性能设计和零部件选型提供了重要的参考依据。针对高海拔的特殊低气压环境,调整电气部件及其他零部件的设计及选型,调整系统结构布置和控制策略优化,是确保其稳定、长寿命运行的关键所在。

参考文献:

- [1] 陈骏. 车用燃料电池系统高海拔运行研究[J]. 上海汽车, 2017(2):3-5
- [2] 余晓光. 高海拔地区电气设计探讨[J]. 现代建筑电气, 2017, 8(10):33-36

(下转第 66 页)

智能电网中的网络安全风险和管控措施研究

张达

国网江苏省电力有限公司苏州供电分公司, 江苏 苏州 215000

摘要:智能电网中由于各种智能设备与互联网连接,使其容易受到网络攻击的威胁。以智能电表、智能微电网和智能逆变器为例,对相应的安全风险和管控措施进行了研究分析。智能电表可能受到拒绝服务攻击和恶意软件攻击,威胁电量传输和数据隐私;智能微电网可能受到虚假数据注入攻击和分布式拒绝服务攻击,显著影响其功率和电压稳定性;智能逆变器可能受到欺骗攻击和勒索软件攻击,危害其正常使用功能。为了解决这些风险,提出了采用异常检测、二进制数据可视化、差分隐私技术、UIO 观测器、KL 散度、身份验证系统以及区块链技术策略,这些措施可检测网络攻击、识别恶意软件、保护数据隐私、确保授权访问,增强了智能电网的安全性。

关键词:智能电网;网络安全;异常检测;网络攻击;区块链;管控措施

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)03-0050-04

Research on Cyber Security Risks, Management and Control in Smart Grid

ZHANG Da

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou Power Supply Branch, 215000, Suzhou, Jiangsu, China)

Abstract: Due to the connection between various smart devices and the Internet, the smart grid is vulnerable to cyber attacks. This article takes smart meters, smart microgrids, and smart inverters as examples to study and analyze the corresponding safety risks and control measures. Smart meters may be vulnerable to denial of service (DoS) attacks and malicious software attacks, threatening power transmission and data privacy; Smart microgrids may be vulnerable to false data injection attacks and distributed denial of service attacks, significantly affecting their power and voltage stability; Intelligent inverters may be vulnerable to deception attacks and ransomware attacks, endangering their normal usage function. To address these risks, strategies such as anomaly detection, binary data visualization, differential privacy technology, UIO observer, KL divergence, identity verification system, and blockchain technology have been proposed. These measures can detect network attacks, identify malicious software, protect data privacy, ensure authorized access, and enhance the security of the smart grid.

Key words: smart grid; cyber security; anomaly detection; cyber attacks; blockchain; control measures

智能电网提高了能源利用效率、整合了各种可再生能源、降低了环境污染。尽管智能电网具有许多优势,但各种先进技术的引入使得电网与互联网的连接越发紧密,因此也更容易受到网络攻击的威胁,例如数据欺骗、重播攻击、非授权访问、拒绝服务攻击和密码窃取等,这些攻击削弱了智能电网

的完整性、可靠性和稳定性。^[1-2] 为了应对这些风险,研究人员提出了一系列降低智能电网网络安全风险的方法,例如 IP 快速跳跃^[3]、向信道中添加噪声^[4]以及对网络进行分割^[5]等策略,这些策略对于降低网络攻击风险和保护智能电网可靠性至关重要。IP 快速跳跃是频繁且迅速地更改电网内设备

收稿日期: 2024-11-11

作者简介: 张达(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统运行与控制,电力安全技术。

的 IP 地址,使攻击者难以追踪和定位智能设备,增强系统抵御潜在入侵能力。^[3]向信道中发送噪声是指通过发送无效的随机数据,增加连接信道内的噪声,使得攻击者难以拦截或篡改在电网内传输的信息,以增加通信安全性。^[4]对网络进行分割是指将智能电网分割为多个区域,每个区域都有自己的安全机制,通过这种隔离限制攻击者将对整个系统的访问。^[5]为了应对不断增加的网络风险,保证智能电网的完整性和可靠性,有必要将这些管控技术进行应用推广。

本文探讨了智能电网内智能电表、智能微电网、智能逆变器等关键设备的安全漏洞,并分析其特有的安全风险特征,针对网络攻击提出了有效的管控策略,并研讨了区块链技术在智能逆变器整体安全性应用方面的潜力。

1 智能电网关键设备的安全风险分析

1.1 智能电表

智能电表是智能电网的关键组成部分,其主要用于居民和工商业用电中的电能监控和计费,如图 1 所示。智能电表接入互联网带来了许多便利性,但也同时产生了许多安全漏洞。为了保护终端用户的用电安全和财产安全,需要对智能电表相关的安全问题进行研究。智能电表可能遭受潜在攻击形式如下。

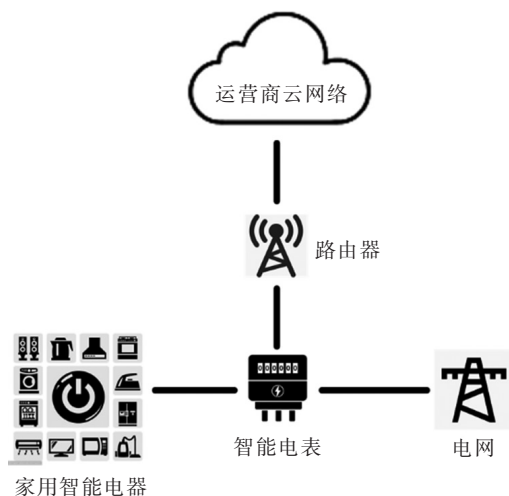


图 1 智能电表示意图

(1)拒绝服务攻击:拒绝服务攻击可能阻止智能电表采集、计量和传输电量数据,影响电表与电

网运营商的网络通信,导致用户大范围停电。^[6]

(2)恶意软件攻击:恶意软件通过利用智能电表软件中的漏洞来攻击,攻击者可以利用恶意软件获取未经授权的访问权限,即使电表中没有 Web 服务器,也可能破坏其电能监测和费率计量功能,引发服务中断,侵犯用户数据隐私。^[7]

1.2 智能微电网

智能微电网是集成了可再生能源、储能设备和智能控制系统的小型配电系统,这种系统具有明确的电气边界,既能在与主电网相连接时以联网模式运行,也能够在与主电网脱离连接时以孤岛模式运行,如图 2 所示。^[8]微电网具有许多优势,其中最显著的优势之一是充分利用本地分布式可再生能源,避免了电能长距离传输中发生的损耗。然而,与连接到互联网的任何其他系统一样,其可能受到特定的网络攻击。智能微电网可能遭受到潜在攻击形式如下。

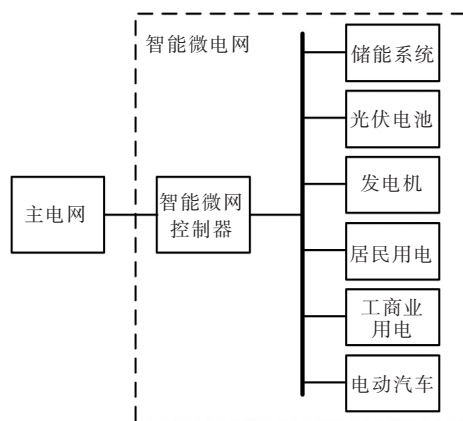


图 2 智能微电网示意图

(1)延迟攻击:智能微电网中的不同设备具有不同的时延要求以实现最佳性能。例如,继保装置的最大延时限值通常为毫秒级。对这些设备进行延迟攻击可能会影响其正常运行,并对智能微电网的整体稳定性和可靠性产生不利影响。^[9]

(2)拒绝服务攻击:拒绝服务攻击使用大量流量来淹没微电网所在目标网络,使其无法处理正常网络请求。拒绝服务攻击针对智能微电网的通信基础设施,发起大量的无用请求堵塞网络,占用完所有的网络带宽和路由器资源,严重损害微电网的实时通信和控制能力。

(3)分布式拒绝服务攻击:分布式拒绝服务攻

击同样会淹没目标网络,类似于拒绝服务攻击。然而,分布式拒绝服务攻击具有多个攻击流量来源,相比拒绝服务攻击更加难以防范。对智能微电网的布式拒绝服务攻击会严重损害网络性能、阻塞关键通信线路以及危及整个系统的运行稳定性,甚至令电网崩溃。^[10]

(4) 虚假数据注入攻击: 虚假数据注入攻击对智能微电网的电压和功率控制构成了严重威胁,这些攻击在不改变系统可观察性的情况下引入恶意数据到测量的数据流中。由于这一特点,使用一般监测方法难以发现虚假数据注入攻击。虚假数据注入攻击可以改变用于电压控制和功率管理的数据,导致设备损坏和电网可靠性下降。^[11]

1.3 智能逆变器

智能电网中,智能逆变器是一种将直流电能转换为交流电的设备,如图3所示。直流电能来自可再生能源,如太阳能电池和风力发电机。由于可再生能源的不断发展,智能逆变器在智能电网中的应用范围越来越大。因此,分析其安全风险是很有必要的。智能逆变器可能遭受到潜在攻击形式如下。

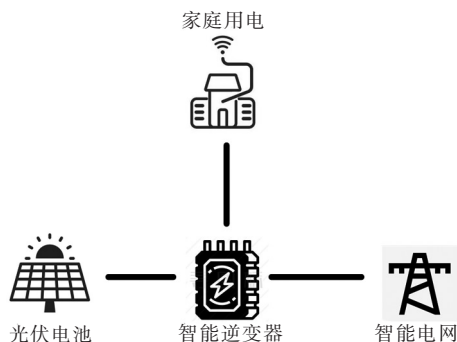


图3 智能逆变器示意图

(1) 欺骗攻击: 攻击者伪装为授权人员,在未经授权的情况下获取对智能逆变器的访问权。^[12]攻击者可以使用IP地址欺骗或MAC地址欺骗来实现这一目的,进而更改逆变器的设置,危害其正常功能,例如更改其控制参数,为电网提供错误的电压基准和功率流。

(2) 抵赖: 当用户调整了逆变器的设置或使用了逆变器的功能而拒不承认,这种行为被称为抵赖。抵赖行为难以进行责任划分,用户或攻击者可能会利用这个缺陷更改逆变器的设置,然后否认进行了更改,这可能导致额外的安全风险,难以对安

全事件进行定责。

(3) 勒索软件攻击: 勒索软件攻击会锁定智能逆变器,运营商必须支付赎金才能重新获得对逆变器的控制权限。^[13]勒索软件通常会加密逆变器的控制界面或限制用户访问,使设备无法操作,除非支付赎金。功率传输和电压支撑等功能在支付赎金之前无法使用,严重影响微电网的正常运行,同时对运营商造成严重的经济损失。

2 智能电网关键设备的管控措施

2.1 智能电表

针对智能电表所遭受到的网络攻击,首先可以通过引入绝对中位差指标,可以对电表数据集中的偏差和异常值进行识别,从而实现对潜在网络攻击的检测。绝对中位差指标有助于减少误报,提高网络攻击检测的准确性。此外,使用二进制数据可视化技术有助于识别和防止对智能电表的恶意软件攻击,通过可视化文件的二进制属性,更容易检测到智能电表的异常,增强了识别和抵御潜在恶意软件攻击的能力。^[14]

对于智能电表的数据隐私保护,可以使用差分隐私技术,通过向数据传输中添加噪音,隐藏真实信息,这种方法有效保证了数据隐私,不影响通信效率,但需要大量的处理器资源,难以解决复杂信息的传输。^[15]对于智能电表的未授权访问,通过应用身份验证系统,可以提高安全性并防止未经授权的操纵,确保只有经过授权的用户才能访问电表并与智能电表进行交互。

2.2 智能微电网

智能微电网经常受到虚假数据注入攻击,具有隐蔽性高难以监测的特点,严重威胁微电网的稳定运行。鉴于此,相关研究提出了一些防护技术,其中最出名的为UIO观测器^[16]和KL散度(Kullback-Leibler divergence)^[17]。

UIO观测器通过追踪系统的状态变量,并将其与预测值进行对比,如果测量值与预测值之间存在任何偏差,UIO观测器就会发出虚假数据注入攻击的警报。UIO观测器有助于发现微电网中的异常行为并提前预警潜在的攻击。然而,UIO观测器的缺点是需要为每个微电网构建一个专有的观察器,观

测器必须经过严密的参数整定,以适应特定微电网的动态和特征,这可能会消耗大量的时间和计算资源。

另一种技术是 KL 散度方法,这种方法是一种用来衡量两个概率分布 P 和 Q 之间的差异性的度量方法。其中 P 表示当前和之前时间步长间的变化概率, Q 代表历史或预测数据。在正常工况下, P 和 Q 之间的 KL 散度值很小甚至为零,当系统受到虚假数据注入攻击时,KL 散度值将急剧上升,可以预示发生了攻击。然而,KL 散度在处理重复攻击或连续重播攻击时存在局限性,其可能无法区分真实的数据变化和重复攻击之间的差异,导致预测有效性在某些工况下大幅降低。

2.3 智能逆变器

为了防止智能逆变器受到篡改和非授权访问,必须采取必要的管控措施以降低其安全风险。

首先可以建立物理安全措施,智能逆变器需要得到物理保护,与未经授权的人和设备进行隔离。为了避免人或设备的实体入侵,重要的是确保设备放置在有限的空间或封闭区域,例如安全柜或控制室内,同时设置门禁系统和专人值守。

另一个管控措施是进行网络分割。通过建立防火墙规则和虚拟专用网络(VPN),可以隔离网络风险区域,减少攻击和非授权访问的来源和内网漫游攻击的风险。通过这种隔离,逆变器内任何潜在的安全漏洞都得到了防护,攻击者难以对安全漏洞直接发起攻击。

此外,区块链技术也可以用于保护智能逆变器系统免受网络攻击。^[18] 由于区块链具有去中心化特征,节点之间没有直接连接,攻击者在攻击一个节点的同时无法继续攻击下一个节点,从而保护其他节点的安全性。同时基于区块链可以建立不可篡改的交易账本,确保逆变器之间的安全通信,区块链可以记录逆变器数据的任何更改或偏差,提高数据的透明度和追溯性,从而提高了智能逆变器的整体安全性。需要注意的是,为了将区块链整合到智能电网中,需要在可扩展性、能耗和与兼容性等方面进行进一步研究和开发。

3 结语

研究分析了智能电网内关键设备的网络安全

风险以及相应的安全管控措施。以智能电表、智能微电网和智能逆变器为例,首先分析了相应设备可能遭受到的网络攻击类型,主要包含拒绝服务攻击、分布式拒绝服务攻击、恶意软件攻击、虚假数据注入攻击和勒索软件攻击等等。为了应对这些网络攻击风险,探讨了各种管控策略,包括异常检测、二进制数据可视化、差分隐私技术、UIO 观测器、KL 散度、网络分割以及区块链技术等等。其中,像 UIO 观测器和 KL 散度这样的方法对于保护智能电网的安全起到了至关重要的作用,但其无法对智能电网实现网络安全威胁全覆盖,因此本文考虑了区块链技术在智能电网安全管控上的显著潜力,区块链的去中心化和防篡改特性保证了电网数据的完整性和安全性,其数据透明性和可追溯性可以追踪攻击来源,增强了智能电网的整体安全性。纵然现有的先进技术可以增强智能电网的网络安全性,但是如何基于先进技术对智能电网安全系统进行严格的设计、实施和持续监控,是未来智能电网网络安全防护的重点研究方向。

参考文献:

- [1] 汤奕,王琦,倪明,等. 电力信息物理融合系统中的网络攻击分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(6):148-151
- [2] 叶夏明. 电力信息物理系统通信网络性能分析及网络安全评估[D]. 浙江大学,2015
- [3] Chang Sang-Yoon, Park Younghee, Babu Bhavana Babu Ashok. Fast IP Hopping Randomization to Secure Hop-by-Hop Access in SDN[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2019, 16(1):308-320
- [4] 王祥青. 光网络物理层安全认证及加密技术研究[D]. 北京邮电大学,2021
- [5] 刘海峰,荣晓燕,李晨旸,等. 一种基于安全域的云计算网络安全保障方法研究[J]. 信息安全研究,2020,6(4):362-366
- [6] 万里. 拒绝服务攻击下的多区域电力系统负荷频率控制研究[D]. 西南大学,2023
- [7] 王战红. 新网络环境下恶意软件攻击分析与防范[J]. 网络安全技术与应用,2015(8):35-36+38
- [8] 杜杰. 智能微电网的控制策略研究综述[J]. 化工管理,2022(29):127-130
- [9] 张颖,沈曦,黎其浩,等. 基于马尔可夫逻辑树和系统脆性分析的智慧变电站协议延迟攻击检测与恢复模型[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(3):113-121

(下转第83页)

基于 CPFD 的半干脱硫塔结构优化

李鹏¹ 刘四威^{1*} 杜文韬² 银登国² 颜学芳² 胡春云¹ 庄原发^{2,3}

1. 东方电气(成都)创新研究有限公司,成都 611731; 2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司,四川 自贡 643000;
3. 能源清洁低碳热转化利用技术与装备四川省重点实验室,成都 611731

摘要:以循环流化床脱硫(CFB-FGD)塔为研究对象,采用计算颗粒流体力学(CPFD)方法对脱硫塔内的流场进行模拟分析,探究了烟道角变化、停留时间对脱硫塔性能的影响。结果表明:烟道角从 28°增加到 35°,烟道角处的涡流减小,流动得到改善;停留时间增加促进 SO₂ 进一步脱除,减温水的蒸发率进一步提高,脱硫塔直段高度为 18 000 mm 时,出口截面 SO₂ 去除率为 99.56 %,减温水蒸发率为 94 %,能够实现高效的脱硫。

关键词:循环流化床脱硫塔;气固两相流;CPFD

中图分类号:X701.3

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0054-04

Research on Structure Optimization of Semi-dry Desulfurization Based on CPFD Method

LI Peng¹, LIU Siwei^{1*}, DU Wentao², YIN Dengguo², YAN Xuefang², HU Chunyun¹, ZHUANG Yuanfa^{2,3}

(1. Dongfang Electric (Chengdu) Innovation Research Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

2. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643000, Zigong, Sichuan, China;

3. Clean Energy Low-Carbon Thermal Utilization Technology and Equipment Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

Abstract: In this study, with the circulating fluidized bed desulfurization (CFB-FGD) tower as the research focus, the computational particle fluid dynamics (CPFD) method was employed to conduct simulations and analyses of the flow field within the desulfurization tower. Additionally, the impacts of the change in the flue angle and the residence time on the performance of the desulfurization tower were investigated. The results show that the flue angle increases from 28° to 35°, the vortex at the flue angle decreases, and the flow is improved. When the height of the straight pipe section of the desulfurization tower is 18 000 mm, the removal rate of SO₂ in the section is 99.56 %, and the evaporation rate of the desuperheating water is 94 %, which can achieve efficient desulfurization.

Key words: circulating fluidized bed scrubbers; gas-solid two-phase flow; CPFD

电力、冶金等众多工业过程排放的烟气中含有大量的 SO₂ 气体,含 SO₂ 等酸性气体的烟气直接排放会对地球环境造成严重的破坏。^[1-2] 干法脱硫、半干法脱硫、湿法脱硫是目前主要的工业烟气脱硫技术。^[3] 半干法脱硫技术主要是将干态脱硫剂和减温

水喷入脱硫塔内与烟气接触,SO₂ 在脱硫剂表面的水膜中与 Ca(OH)₂ 发生反应,从而达到脱硫的目的。循环流化床脱硫(Circulating Fluidized Bed Flue Gas Desulfurization, CFB-FGD)是一种用于工业烟气处理的半干法脱硫技术,其优点是不产生废水、对

收稿日期:2025-01-17

基金项目:燃煤火电机组生物质经济性掺烧关键技术研究;项目编号:CDSC25003。

作者简介:李鹏(1995—),男,2021年毕业于西安理工大学,硕士,工程师。现在东方电气(成都)创新研究有限公司从事节能环保技术研发工作。邮箱:lip9985@dongfang.com。

刘四威(1985—),男,2012年毕业于石油化工科学技术研究院,硕士,高级工程师。现在东方电气(成都)创新研究有限公司从事节能环保技术研发工作。邮箱:liusw@dongfang.com。

酸、重金属等多种污染物具有较好的吸收脱除作用。^[4]

刘鹏等采用 CPFD 方法对循环流化床内的气固流动特性进行了研究,分析了脱硫剂浆液液滴在脱硫塔内的运动过程。^[4-5] 郁连等对用于烧结烟气循环流化床脱硫塔结构进行优化。^[6] 许聪等基于 Fluent 平台,针对扰流器作用下,烟气在循环流化床脱硫塔内的作用进行了研究。^[7] 上述文献均直接以浆液液滴作为脱硫剂开展研究工作,未探讨脱硫剂与雾化水分离开注入脱硫塔内碰撞后形成浆液液滴的工艺条件下脱硫塔结构的优化。

1 计算方法

CPFD(Comptational Particle Fluid Dynamics)方法是基于 MP-PIC(Multiphase Particle-in-Cell)方法的高密度流化床计算方法。该方法能够高效的解决大规模颗粒-流体耦合数值计算问题。

1.1 连续相控制方程

连续相控制方程为:

$$\frac{\partial(\varepsilon_f \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_f \rho_f u_f) = 0 \quad (1)$$

式中: ε_f 为流体相体积分数; u_f 为流体相速度, m/s; ρ_f 为流体相密度, kg/m³; ∇ 为梯度计算。

连续相的动量方程:

$$\frac{\partial(\varepsilon_f \rho_f u_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_f \rho_f u_f u_f) = -\varepsilon_f \nabla p + \varepsilon_f \rho_f g + \nabla \cdot (\varepsilon_f \tau_f) - S \quad (2)$$

g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; S 为是气固两相动量交换; τ 为连续相应力张量; P 为平均压力。

1.2 离散相控制方程

离散相在空间的分布控制方程如方程(3)所示,该方程由 Liouville 方程求解:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (f u_p) + \nabla u_p \cdot \left(f \frac{du_p}{dt} \right) = 0 \quad (3)$$

式中: f 为颗粒空间坐标 X_p 、颗粒速度 u_p 、颗粒质量 m_p 、颗粒温度 T_p 和时间 t 的函数。

颗粒运动方程:

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad (4)$$

式中, x_p 为计算颗粒的空间坐标。

颗粒加速度方程:

$$\frac{du_p}{dt} = D(u_g - u_p) + \frac{\nabla P}{\rho_p} - \frac{\nabla \tau_p}{\varphi_p \rho_p} + g \quad (5)$$

式中, D 为曳力系数, ρ_p 为颗粒的密度, τ_p 为颗粒之间碰撞的应力, φ_p 为离散相的体积分数。

1.3 曳力模型

流体相与颗粒相之间的动量交换主要体现在曳力上。本研究中脱硫塔内的气固两相流动既存在稀疏相流动,又存在密相流动,而 Gidaspow 模型将 Wen-Yu 曳力模型和 Ergun 曳力模型相结合,在空隙率大于 0.8 时采用 Wen-Yu 曳力模型,而在空隙率小于 0.8 时采用 Ergun 曳力模型。Wen-yu 曳力模型和 Ergun 曳力模型的控制方程如式(6-8)所示。

Wen-yu 曳力模型:

$$F_{sp} = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}^{0.687} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0.44 \frac{\text{Re}}{24} & \text{Re} > 1000 \end{cases} \quad (6)$$

$$F(f, \text{Re}) = F_{sp} \theta_f^{-3.65} \quad (7)$$

Ergun 曳力模型:

$$F(\varphi, \text{Re}) = \frac{c_0 \text{Re} + c_1(1 - \theta_f)}{18\theta_f^2} \quad (8)$$

2 计算模型与边界条件

2.1 计算模型

本研究以某工厂烟气循环流化床脱硫塔为原型,结构尺寸如图 1 所示。脱硫塔由烟气入口段、脱硫剂入口段、文丘里管、文丘里出口渐扩段、直管段、烟气出口段等六部分组成,其中,文丘里管段由七个相同的小文丘里管组成,文丘里直管段直径为 1 m。

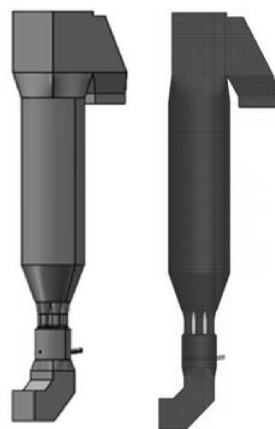


图 1 半干脱硫塔物理模型及网格

2.2 边界条件

本研究的目的在于对脱硫塔内部结构进行优化,从而改善内流场。进口烟气物性参数如表 1 所示,脱硫灰粒度特征参数如表 2 所示。

表 1 进口烟气参数

序号	名称	单位	数值
1	反应塔进口烟温	℃	130.0
2	反应塔进口风量(标态)	Nm ³ /h	820 000
3	反应塔进口风量(工况)	m ³ /h	1 274 208
4	反应塔入口压力(表压)	kPa	-0.1
5	当地平均大气压	kPa	96.34
6	当地平均气温	℃	12.6
7	当地平均相对湿度	%	58

表 2 脱硫灰粒度特征参数

项目	数值
中位粒径 D50/μm	6.46
体积平均径/μm	8.65
面积平均径	2.96
遮光率/%	28.13
D3/μm	0.59
D6/μm	0.79
D16/μm	2.10
D25/μm	3.24
D75/μm	11.20
D84/μm	14.80
D97/μm	29.84
D98/μm	32.74

3 结果与讨论

3.1 颗粒分布分析

CFB-FGD 脱硫塔内颗粒来源分为减温水颗粒、新鲜脱硫剂颗粒、循环回料颗粒,其中塔内的物料主要是循环回料。图 2 显示为塔内颗粒体积分数云图,可观察到颗粒分布在空间中属于稀相分布,颗粒体积分数基本在 0.02 以下。在 15 s 以后,颗粒分布基本处于稳定运行状态。在颗粒进口段存在体积分数高于 0.2 的区域。

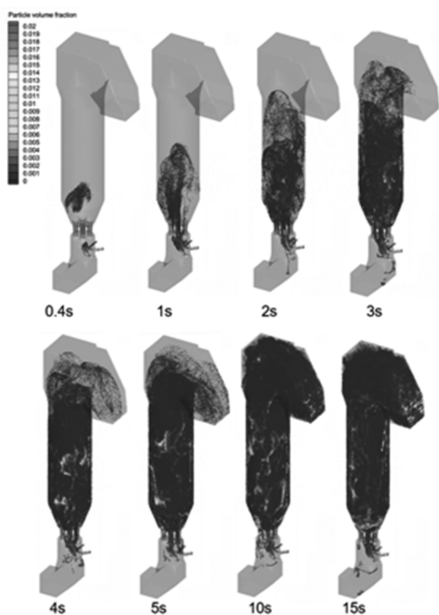


图 2 塔内颗粒体积分数云图

3.2 烟道角变化的影响

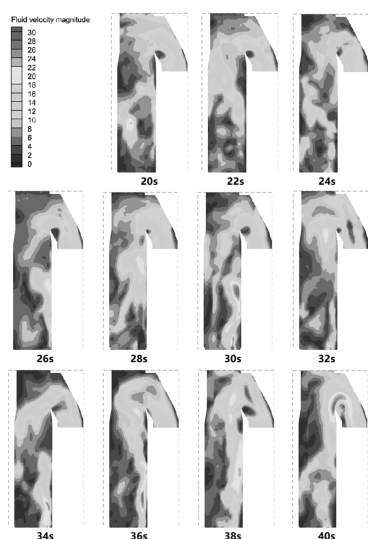
烟道角结构参数对于脱硫塔烟道拐角处烟道的磨损及床料的沉积问题具有较大的影响。

图 3 显示的分别是烟道角 28°、32°、35°的脱硫塔从 20 s 到 40 s 的中心截面速度云图。结果表明:随着烟道角的增大,在烟道处的涡流越不明显,这说明烟道拐角处的流动向好的方向发展。由于流动的改善,脱硫塔内在烟道角处的磨损也会有进一步改善。另外,脱硫塔烟道夹角的增大有利于脱硫灰在夹角处的积累,因此,脱硫塔的夹角应尽可能控制在经验取值的下沿。

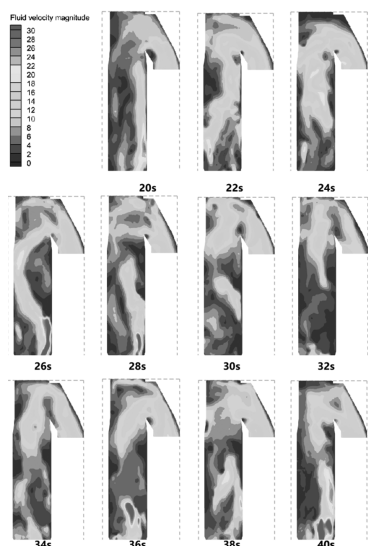
3.3 停留时间的影响

停留时间是针对化学反应而言,反映到结构上的变化主要是通过改变脱硫塔竖直段高度,如图 4 所示。脱硫塔的具体结构参数如表 3 所示。脱硫塔的其他尺寸不变,脱硫塔竖直段高度从 15 500 mm 增加到 28 000 mm。其他条件按照设计工况参数。

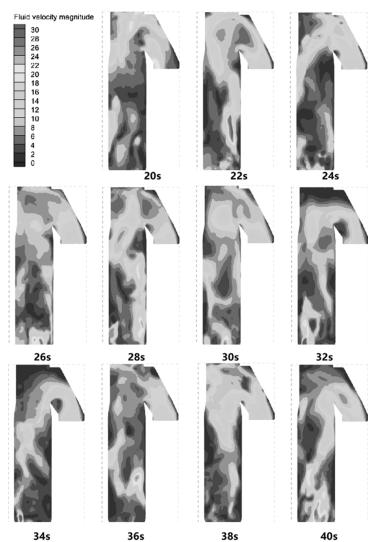
图 5 显示的是不同停留时间条件下脱硫塔出口 SO₂ 去除率和出口截面水蒸气蒸发率。结果表明,截面 SO₂ 的质量流量和水蒸气的质量流量与截面高度相关。在脱硫塔直管段的高度为 18 000 mm 时,脱硫塔出口的截面 SO₂ 去除率为 99.56 %,水蒸气的蒸发量为 5.63 kg/h,蒸发率为 94 %。考虑到计算的误差,可以认为已满足设计要求,可以实现高效的脱硫及水分蒸发。



(a) 烟道角 28°



(b) 烟道角 32°



(c) 烟道角 35°

图3 烟道拐角截面速度云图

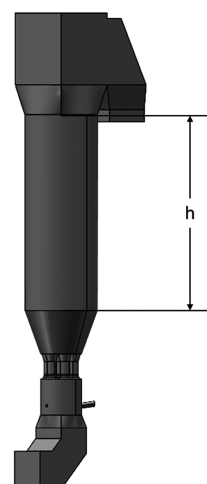


图4 停留时间计算脱硫塔模型图

表3 停留时间计算工况结构参数

序号	停留时间	脱硫塔直管段高度(h)
	s	mm
1	4.25	15 500
2	4.7	18 000
3	5.13	20 500
4	5.57	23 000
5	6	25 500
6	6.45	28 000

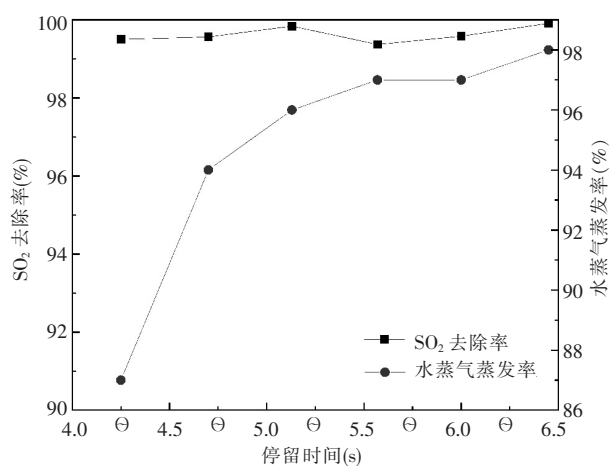


图5 SO_2 去除率和水蒸气蒸发率随停留时间变化曲线

4 结语

通过 CFB-FGD 半干脱硫塔的数值模拟,可以得出如下结论。

(1)脱硫塔出口烟道角从 28° 变化到 35° ,对于脱硫效率的影响并没有明显的影响。因此,在一定角度范围内,可以根据现场的布置情况需求进行调整。

(下转第 83 页)

空冷 1 030 mm 末级叶片开发与验证

李音 陈涛 周显丁 杨长柱

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:以超超临界 660 MW 空冷机组为依托,采用可控涡流型设计、全三维气动分析及优化、有限元强度、振动设计等先进设计技术,开发了结构形式先进,具有优良气动、强度、振动特性的空冷 1 030 mm 末级长叶片。实物叶片动频试验结果表明,1 030 mm 末级长叶片振动特性满足设计规范要求。

关键词:空冷汽轮机;末级叶片;全三维;动频试验

中图分类号:TK262

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0058-04

Development and Verification of 1 030 mm Last Stage Blade of Air Cooling Turbine

LI Yin, CHEN Tao, ZHOU Xianding, YANG Changzhu

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

Abstract: Based on the ultra-supercritical 660 MW air cooling turbine, the 1 030 mm last stage long blade with advanced structure and excellent aerodynamic, strength and vibration characteristics are developed by adopting advanced design technologies such as controllable eddy current design, full three-dimensional aerodynamic analysis and optimization, and three-dimensional finite element strength and vibration design. The dynamic frequency test results show that the vibration characteristics of 1 030 mm last stage long blade meet the design specifications.

Key words: air cooling turbine; last stage blade; all three dimensional; dynamic frequency test

空冷汽轮机是一种特殊的蒸汽轮机,与湿冷汽轮机相比,它经常处于高背压小容积流量工况运行,且背压变化范围大、变化频繁,这些运行条件极大地限制了空冷汽轮机末级叶片的设计。^[1]此外,空冷汽轮机的经济性与安全性在很大程度上与低压末几级叶片的设计密切相关,其中尤以低压末级叶片设计难度最大,代表了一个汽轮机制造商的综合实力和市场竞争力。^[2]如何在兼顾经济性的前提下,设计出强度合格、振动性能优良的空冷末级叶片,是汽轮机制造厂面临的一个巨大挑战。目前有能力独立完成空冷机组末级叶片研发的汽轮机制造厂并不多。可以说,空冷汽轮机末级叶片是空冷汽轮机的核心技术,是空冷汽轮机先进性的重要标志。

空冷汽轮机可以分为直接空冷汽轮机和间接空冷汽轮机。随着技术水平的进步,当前空冷机组多采用间接空冷技术,可以具有更低的背压,因此,对空冷汽轮机末级叶片的长度提出了更高的要求。

东方汽轮机有限公司(以下简称东汽)已成功开发了 661 mm、770 mm、863 mm 三只具有世界先进水平的空冷末级长叶片,并且都已成功的投入了商业运行,这表明东汽已具有世界先进的空冷汽轮机末级长叶片研发水平。

1 030 mm 末级长叶片是东汽近年来新开发设计的适用于超临界和超超临界 2F-660 MW、4F-1200 MW 等级的先进的空冷末级叶片,它是一只以传承气动性能优良母型,通过优化得到具有高的级效

收稿日期:2024-06-17

作者简介:李音(1984—),男,2007年毕业于华中科技大学热能工程专业,工学硕士,高级工程师。现在东方电气集团东方汽轮机有限公司从事汽轮机通流和叶片设计工作。

率、高的根部反动度、低的顶部反动度,且具有可控涡优化流型、优良变工况特性的空冷末级叶片。叶片采用了自带围带和自带拉筋凸台成圈的双阻尼成圈结构,大幅度削减动应力峰值。1 030 mm 叶片代表了新一代 660 MW、1 200 MW 等级的空冷末级叶片的先进特性。目前,1 030 mm 空冷末级叶片是世界上排汽面积最大的空冷末级叶片。

1 开发设计

1.1 设计目标

该末级叶片的总体设计目标如下:

以 2F-660 MW、4F-1 300 MW 空冷汽轮机末级叶片作为开发设计目标叶片,其研制目标如下:

(1)适用机型:亚临界、超临界、超超临界空冷机组;

(2)功率范围:2F-600~660 MW

4F-1 000~1 300 MW;

(3)设计背压范围:10 kPa~15 kPa;

(4)设计寿命:大于 30 年。

1.2 热力设计及叶片基本特性参数

该叶片的开发,是以超超临界 660 MW 机型为依托,给定的设计背压为 10.0 kPa,设计时以全年运行经济性最高为优化目标,经过分析论证,最终确定最佳高度为 1 030 mm,相应级负荷为 15.82 kg/s/m²,轴向出口马赫数为 0.53。

经过热力、叶片的联合优化,最终确定了 1 030 mm 叶片的热力设计参数作为叶片设计输入条件,其设计参数见表 1。

表 1 1 030 mm 末级长叶片基本参数

项目	单位	
工作转速	r/min	3 000
叶片汽道高度	mm	1 030
排汽面积	m ²	9.5
叶根形式	---	斜齿枫树型
叶片结构	---	自带围带和自带拉筋成圈
设计材料	---	高 Cr 合金钢

从排汽速度来判定,1 030 mm 叶片用于 660 MW 等级的两排汽空冷机组是很合适的。从变工况的角度考虑,其处于较佳的设计点附近,如图 1 所示。

排汽损失

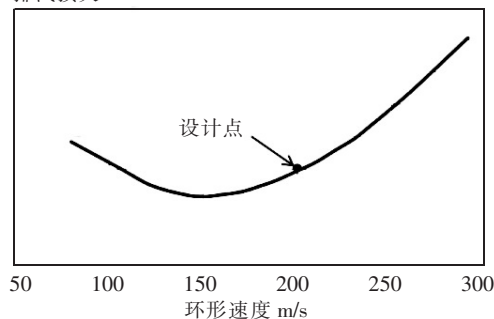


图 1 1 030 mm 叶片排汽损失随排汽速度变化曲线

1.3 气动设计

1.3.1 动、静叶型线设计

汽轮机通流设计中,型线设计与开发技术其中的核心技术,其水平高低直接决定汽轮机通流效率的高低。对于末级长叶片,由于其具有强烈的三维效应,且末级叶片部分区域处于超音速区域,更加大了叶片的气动损失。因此如何使得叶片的诸多气动参数在径向、轴向和切向更加合理的分布,是通流设计人员在末级长叶片设计中持续追寻优化的一个目标。

在设计 1 030 mm 末级叶片时,动叶根部叶型采用先进的有利于减少二次流损失的“K”型通道叶型;顶部区域叶型采用先进的适合跨音速流动的具有最优性能的背弧斜切部分为直线的缩放叶型。背弧斜切部分为直线的叶型,能抑制出汽边附近的过度膨胀,同时具有对于设计点以下的压力,压力分布变动也少的特点。其结果,这一叶片在跨音速范围内性能特别良好,就是在部分负荷时工作也稳定,激振力亦小。一方面,为了有效地利用背弧斜切部分为直线叶片的特性,依靠流型控制,极力抑制叶片顶部的马赫数,以取得更好的效果。

静叶根部设计成先上凸后下凹的型式,这样设计的目的是使静、动间隙中近根部流线有负的曲率,从而提高根部反动度,减小沿叶高反动度变化梯度,改善末级流动特性,特别有利于变工况。

1.3.2 全三维气动性能分析

采用 CFD 软件对该末级叶片的流场进行了分析计算,为使全三维流场特性达到最优,做了数个方案的对比分析,最终完全确定静动叶的叶型及成形规律。最终方案的计算结果表明,1 030 mm 弯扭静叶片方案具有较高的级效率和优良的气动特性。

图2为1 030 mm末级动叶片设计工况下根、中、顶部马赫数分布。

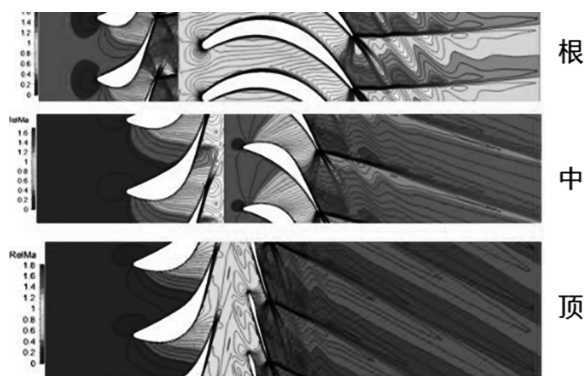


图2 设计工况末级叶片根部、中、顶部马赫数分布

1.3.3 变工况性能

对该末级叶片进行了回流工况、低负荷工况等典型工况的气动性能分析。计算表明:在背压为5.0 kPa~30 kPa范围内,1 030 mm叶片沿叶高不发生脱流,说明1 030 mm叶片在很大的背压范围内均具有较高的效率。

1.4 结构、强度及振动设计

1.4.1 结构设计

1 030 mm末级长叶片采用自带围带和自带拉筋凸台成圈的双阻尼成圈结构,材料采用具有优良运行业绩、高抗腐蚀性、冲击韧性好的高Cr不锈钢材料。叶根及轮缘采用承载能力高且有优秀运行业绩的斜齿枫树型叶根。1 030 mm叶片结构示意图见图3。

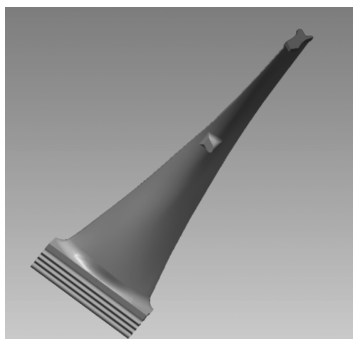


图3 1 030 mm叶片三维模型

1.4.2 防水蚀措施

1 030 mm末级长叶片采用的防水蚀措施为高频淬火。高频淬火防水蚀作为一种性能优良的防水蚀措施,广泛应用于东方生产的湿冷机组上。由于空冷机组背压较高,其水蚀风险要远小于湿冷机组,因此

高频淬火措施足以满足该叶片的防水蚀要求。

1.4.3 强度、振动特性

1 030 mm末级长叶片采用自带围带和自带拉筋凸台成圈的双阻尼成圈结构。通过采用有限元分析软件进行详细的非线性弹塑性有限元解析,可以更加准确的评估叶片的真实应力情况,从而更加有效的保证设计叶片的安全和可靠。

常规强度分析结果表明,1 030 mm末级长叶片的常规强度满足设计要求。有限元强度分析结果显示,叶型部位的最大应力小于叶片材料的屈服强度,如图4所示。此外,对叶片、轮槽的接触情况进行有限元分析,如图5所示,计算结果满足设计规范要求。

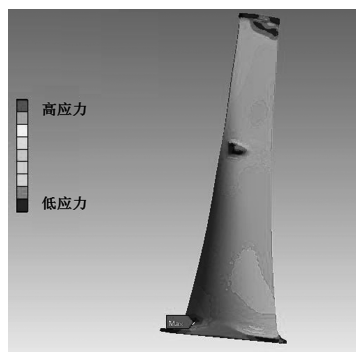


图4 叶身等效应力分布

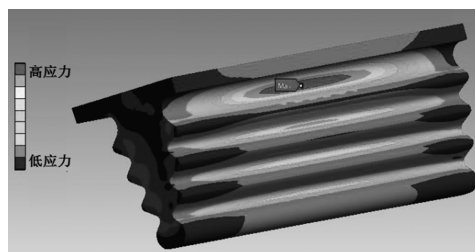


图5 叶根等效应力分布

空冷机组由于背压变化范围大且波动剧烈,并且可能经常变工况运行,承受强烈且不稳定的气流激振力作用,如果叶片在工作转速下发生共振,会产生大的危害,甚至会导致叶片断裂。因此保证叶片频率避开工作转速共振区域的振动设计工作至关重要。

1 030 mm叶片采用有限元分析软件对叶片的振动、阻尼特性进行了详细分析,避开低频共振频率以保证整圈叶片的安全性和稳定性。

2 动频试验验证

为了验证叶片振动特性,在进行了详细计算分

析基础上,对 1 030 mm 末级长叶片进行了实物叶片动频试验,以保证该叶片振动特性符合设计规范要求。图 6 是 1 030 mm 叶片动调频试验的试验转子。

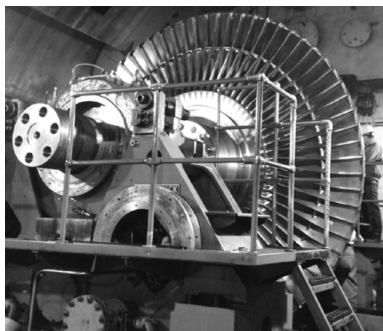


图 6 1 030 mm 叶片试验转子

试验结果表明,在 2 850 r/min~3 090 r/min 范围内,10 节径以下都无“三重点”共振,该叶片振动特性满足设计规范要求。动调频试验最终坎贝尔图见图 7。

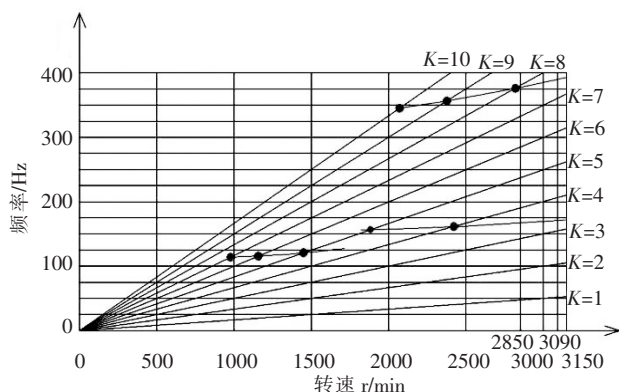


图 7 1 030 mm 叶片试验坎贝尔图

(上接第 40 页)

效率,最大程度地避免风险的产生和降低风险造成的损失,进而有效确保核电设备得以安全、顺利地运抵核电现场。

参考文献:

- [1] 许谨良. 风险管理(第三版)[M]. 北京:中国金融出版社,2006
- [2] 王凯全. 风险管理与保险[M]. 北京:机械工业出版社,2008
- [3] 叶陈刚,郑君彦. 企业风险评估与控制[M]. 北京:机械工业出

3 结语

1 030 mm 叶片的研发历经数年时间,其间经过通流匹配、气动设计、结构设计、强度振动设计等方面的迭代优化,再加以动频试验验证,最终完成了空冷 1 030 mm 末级长叶片的开发设计。该叶片具有下列先进特性。

(1)采用了先进的可控涡流型设计、CFD 分析与优化等气动设计技术,实现了流型优化匹配,使该叶片具有优良的气动性能和变工况性能。

(2)叶片结构设计先进,拉筋凸台和围带的双阻尼成圈结构,具有优良的强度、阻尼特性。

(3)动频试验结果表明,叶片振动特性优良,满足设计规范要求,完全适应空冷机组的运行要求。

该叶片首次应用于大唐蔚县超超临界空冷 660 MW 项目,该项目#2 机组于 2019 年 6 月正式投入商业运行,并于 9 月完成了性能试验,机组各项性能指标均满足合同要求,性能优异。截至 2024 年初,采用 1 030 mm 末级叶片的投运机组已达到 20 余台,均运行情况良好,进一步验证了 1 030 mm 末级叶片的开发成功。

参考文献:

- [1] 中国动力工程协会. 火力发电设备技术手册[M]. 机械工业出版社,1998
- [2] 范志飞,范小平,钟刚云,等. 半速核电 1 828 mm 末级长叶片开发[J]. 东方汽轮机,2018(1):1-4

版社,2009

- [4] 吉姆·怀廷,王光远,宁丙文. 安全风险管理标准 ISO31000[J]. 劳动保护,2009(2):18-20
- [5] 曹元坤,王光俊. 企业风险管理发展历程及其研究趋势的新认识[J]. 当代财经,2011(1):85-92
- [6] 杨杰. 军队汽车运输安全风险评估与控制研究[D]. 华中科技大学硕士论文,2013
- [7] 谢天. 浅析核电设备陆运风险评价指标体系[J]. 东方电气评论,2024,38(4):78-82

火电厂变频循环水泵智能优化控制研究

徐卫华¹ 刘畅²

(1. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120; 2. 西安热工研究院有限公司, 西安 710043)

摘要:基于变频循环水泵的冷端优化智能控制系统,根据环境条件和机组参数,实时监测和分析冷端系统及各设备的性能状态变化,优化循环水泵运行方式并实时修正变频循环水泵运行频率,在机组保证安全稳定运行的前提下,使得发电机功率与循环泵耗功之差在机组当前状态及条件下达到最大,尽可能地提升机组在部分负荷下的经济性。

关键词:循环水泵;冷端优化;变频器;智能控制;凝汽器;最佳真空

中图分类号:TK323

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0062-05

The Research of Intelligent Optimization Control Technology Based on Frequency Circulating Water Pump

XU Weihua¹, LIU Chang²

(1. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, 100120, Beijing, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 710043, Xi'an, China)

Abstract: Based on the intelligent control system for optimization of the cold end of the variable frequency circulating water pump, according to the environmental conditions and unit parameters, real-time monitoring and analysis of the performance changes of the cold end system and equipment, optimization of circulating water pump operation mode and real-time correction of the operating frequency of the variable frequency circulating water pump make the difference between the power of the generator and the power consumption of the circulating pump in the current unit under the premise of ensuring safe and stable operation of the unit. Maximum operating condition and conditions can be achieved to maximize the economy of the unit under partial load as far as possible.

Key words: circulating water pump, optimization of cold-end system, frequency converter, intelligent control, condenser, optimum vacuum

随着我国国民经济转型和电力工业技术革新的深入,在深入推进电力工业节能减排和智能发电的大背景下,越来越多的火电厂采用了变频循环水泵。在年利用小时数逐渐降低且宽负荷调峰需求提高的情况下,采用变频循环水泵具备更加显著的节能潜力,但现有依赖人工经验给定循泵运行频率的手段无法真正发挥变频循环水泵的真正作用。

目前应用较多的是定速或双速循环水泵,可通过泵的启停或高低速的切换实现循泵运行组合的

改变,从而适应冷端工况的变化。^[1-2]但是无论是6 kV电机的启停还是高低速切换都不可能频繁连续进行,因此往往只能针对长周期的季节变化进行有限次数的调整,对于昼夜环境温差变化、海水潮汐水位变化等无法做出有效响应。

循环水泵采用变频调节为实现冷端实时智能控制提供了技术前提。变频循环水泵具有更加自由和精确的连续变频调节能力,不仅可根据负荷等工况变化实时采用变转速控制,还可以在高负荷段

收稿日期:2025-01-06

作者简介:徐卫华(1977—),男,湖北麻城人,硕士,高级工程师,主要从事火力发电厂自动化控制设计、科研及咨询工作。邮箱:xuwh@ncpe.com.cn。

采用工频运行,适应性非常广泛。尤其对于海水直接冷却系统,海水潮位会大幅影响循环水系统的动力特性,潮位的大幅涨落将大幅改变循环水泵所需压头,从而得以发掘更广泛的节能潜力加以利用。^[3] 本文主要探讨如何实现循环水泵变频实时调节的冷端智能优化控制技术。

1 冷端系统热力学计算

1.1 凝汽器凝汽器热负荷计算

循环水带走凝汽器的大部分热量以建立凝汽器真空,有利于提高机组有效焓降且使低品质蒸汽转化为凝结水以便升压。循环水管道直径偏大,大部分电厂不在该管段上安装节流装置测量循环水流量,并且难以进行循环泵及循环水管路特性曲线测试而获得循环水流量,比如利用超声波流量计获得的测量值波动较大。因此,需要通过热平衡方法来计算实际循环水流量。

一般来说,进入凝汽器的热量来自于:低压缸排汽 Q_1 、给水泵汽轮机排汽 Q_2 、热力系统内漏至疏水扩容器 Q_3 、热网回水及其它辅助热量 Q_4 等。

忽略凝汽器水位变化,流入和流出凝汽器的流量应满足质量守恒定律(或偏差较小)。凝汽器总热负荷:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - G_c \times h_{hw} \quad (1)$$

式中: G_c 为凝结水流量; h_{hw} 为热井出水焓,可通过查询饱和温度表获得。引入综合热量系数 μ , 式(1)可写为:

$$Q = \mu \times G \times h_{lep} - G_c \times h_{hw} \quad (2)$$

式中: G 为低压缸排汽流量可采用改进型弗留盖尔公式计算,公式计算结果与性能试验结果对比误差在 0.7% 以内, h_{lep} 为低压缸排汽焓 μ 为综合热量系数,是对凝汽器其他热量来源的修正,由试验获得。详细公式可参考汽轮机性能试验规程,不再赘述。

1.2 凝汽器传热模型

凝汽器运行清洁系数表征了当前凝汽器的换热性能优劣,取值范围为 $[0, 1]$, 数值越大凝汽器换热特性越好。凝汽器清洁系数展示于 DCS 画面,运行人员可根据运行清洁系数取值进行胶球投放清洗等凝汽器清污工作。

对数平均温差 $LMTD$:

$$LMTD = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{t_s - t_1}{t_s - t_2}\right)} = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{\delta t + \Delta t}{\delta t}\right)} \quad (3)$$

式中: t_s 为饱和蒸汽温度; t_1 为进口温度; t_2 为出口温度; Δt 为温升; δt 为凝汽器传热端差。

进入凝汽器换热的循环水流量 W :

$$W = \frac{Q}{c_p \times (t_2 - t_1)}$$

式中: c_p 为冷却水平均温度下的比热容,针对海水直冷电厂,需特别列出海水物理性质表。

凝汽器总体传热系数 K_T :

$$K_T = \frac{Q}{A \times LMTD}$$

式中: A 为凝汽器有效换热面积。为获得准确的凝汽器有效换热面积,需要收集凝汽器设计参数、运行水位状态、管道破损情况等。

美国传热学会 (HEI) 标准中的总体传热系数 K_{HEI} :

$$K_{HEI} = \sqrt{\nu} \times c_1 \times c_2 \times c_3 \times c_4$$

式中: c_1 为管径系数, c_2 为进口温度修正系数, c_3 为壁厚修正系数, c_4 为设计清洁度。

ν 为管内平均流速:

$$\nu = \frac{Z D_w}{\rho n \frac{\pi}{4} d_2^2}$$

式中: Z 为凝汽器流程数, n 为凝汽器冷却管数, d_2 为凝汽器冷却管内径; ρ 为循环冷却水密度,近似认为是凝结水平温和管内压力的二元函数。

凝汽器的管内结垢是对凝汽器换热性能产生显著影响的关键因素之一。微生物滋生以及非有机物沉淀会致使凝汽器管内出现结垢现象。这些沉积物会增大管内换热热阻,进而使得凝汽器的换热能力下降。凝汽器内壁的结垢程度以及清洗胶球装置的投入和回收,凝汽器运行清洁系数 c_0 会实时变化:

$$c_0 = K_T / K_{HEI}$$

1.3 变频循环水泵计算模型

根据泵的相似定律:流量与转速成正比,扬程与转速的平方成正比,轴功率与转速的立方成正比。由此可见,泵转速可引起的流量降低,但轴功

率下降幅度更大,因此变工况运行下比定速泵更节能。但是,变频泵调速存在一个高效范围,一般要求转速在 75 %至 100 %范围内,效率因数为 0.75 至 0.80,当转速低于 50 %时,效率因数为 0.3 至 0.5,即使轴功率下降但有效做功更低。因此,需要根据机组变工况循环水流量变化范围,核算泵运行的最佳可调转速范围,以免效率过低。

变频循环水泵的入口压头会随着潮汐变化而改变。当泵处于运行状态时,其入口会形成一定程度的真空环境,因此工质会发生汽化现象。汽化过程中产生的气泡,在液体质点的不断撞击和运动作用下,会持续冲击叶轮等金属表面,进而对这些金属表面造成剥蚀损害,严重损害设备。因此,根据设计和试验数据,计算变频循环水泵入口应保证的液位高度,并在控制设计中实现根据实时液位高度计算循环泵的运行工况数据。

变频循环水泵的扬程 H :

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + Z_2 - Z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (4)$$

式中: P_2 为出口压力; P_1 为进口压力; ρ 为进、出口水的平均密度; g 为重力加速度; z_2 为出口测量截面标高; z_1 为进口测量截面标高; v_2 为出口管道流速; v_1 为进口管道流速。变频循环水泵进、出口管道管径一致时,进、出口管道流速认为一样;进、出口测量截面标高由现场压力测点取压孔位置决定。对于海水直冷电厂,海水的含有大量的矿物质,NaCl 浓度也可能跟随洋流变化而不同,因此,在计算循环水密度前,需要调研海水的钠盐及各类矿物质含量是否具有较大方差。如果方差不大,可以认为 NaCl 浓度为定值,否则需要根据时间序列对海水物性进行预测,并利用预测值参与随后的热力计算。

利用变频循环水泵的特性曲线解以下方程可计算循环水流量 $q^{[4]}$:

$$\begin{cases} H = H_0 K_n^2 + A_1 k_n q + A_2 q^2, \text{单泵运行} \\ H = H_0 K_n^2 + \frac{A_1 k_n}{2} q + \frac{A_2}{4} q^2, \text{双泵并列运行} \end{cases} \quad (5)$$

式中: H_0 为变频循环水泵额定扬程; k_n 为变频循环水泵运行转速与额定转速的比值; A_1 、 A_2 为待定系数,由试验获取。

考虑到变频循环水泵功耗最终取决于电动机输入功率,在变频循环水泵调节过程中,原转速工况下变频循环水泵功耗 P_c 可表示为:

$$P_c = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (6)$$

式中: U 为变频循环水泵电压; I 为实测电流值; $\cos \varphi$ 为功率因数。增(减)转速工况下变频循环水泵功耗 P_c :

$$\begin{cases} P_c = m(N_0 k_n^3 + B_1 k_n^2 q + B_2 k_n q^2), \text{单泵运行} \\ P_c = n(2N_0 k_n^3 + B_1 k_n^2 q + B_2 k_n q^2), \text{双泵并列运行} \end{cases} \quad (7)$$

式中: m 、 n 分别为单泵运行、双泵并联运行时的功耗修正系数,其表征了转速对电动机效率等的影响,由试验获取; N_0 为变频循环水泵额定功率; B_1 、 B_2 为待定系数,由试验获取。

2 汽轮机排汽压力特性曲线

机组的出力受凝汽器压力变化的影响较为显著。汽轮机功率背压特性曲线展现了汽轮机组背压变化时,汽轮机功率所产生的相应变化特性。这一曲线是汽轮机性能考核以及冷端系统优化的重要依据。在现场实际中,汽轮机功率背压特性一般被叫做汽轮机的微增功率曲线。该特性曲线通常是由汽轮机组制造厂商所提供的,用于体现汽轮机低压缸排汽压力对功率修正情况的曲线;当然,也可以是通过现场试验得到的,反映背压变化与机组出力变化关系的曲线。

汽轮机排汽压力特性曲线表示了不同负荷下,排汽压力变化对机组出力的影响量,降低排汽压力是以增加循环泵耗电为代价的。冷端智能控制的基本原理就是变频循环水泵在不同转速下由于不同的循环水流量将会形成不同凝汽器真空,通过计算不同转速下的凝汽器真空和汽轮机微增功率,比较微增功率和循环水泵功耗,计算得到当前运行状态下的循环水泵最优运行频率。

热力计算说明书中提供了汽轮机排汽压力对功率的修正曲线,但该曲线应用在冷端优化中应注意以下几点:①出于商务考虑,制造厂提供修正曲线修正量可能偏大,为获得比较准确的修正量,一方面可以做变背压性能试验获得各负荷下的真实特性曲线,另一方面可以根据同类型机组情况取合理经验值;②特性曲线的汽轮机排汽压力是指凝汽

器喉部的压力,而计算凝汽器性能的凝汽器压力是指热井水位以上 1~1.5 m 位置的凝汽器中心压力,制造厂提供的设计特性曲线认为两处压力相同、功率修正规律一致,但机组实际运行中为维持工质向热井方向流动,凝汽器喉部压力会略大于凝汽器中心压力,因此应用与冷端优化的实际特性曲线应以凝汽器中心压力为基准;③有些制造厂提供的特性曲线仅以 THA 工况(阀点、额定负荷工况)为基础,缺乏对部分负荷下特性的考查,一方面可以请制造厂进行变工况热力计算出部分负荷或不同排汽流量下的特性曲线,另一方面可以对一年四季的电厂 DCS 运行数据进行挖掘分析以获得功率随排汽压力变化规律。

为获得准确的汽轮机排汽压力特性曲线,可进行机组微增功率试验,分别在 100 %、90 %、80 %、70 %、60 %、50 % 额定负荷段开展背压的试验^[5]。最终得到微增功率与机组背压的关系式:

$$\Delta N_T = f_1(N, P_k) \quad (8)$$

式中: ΔN_T 为机组微增功率; N 为机组负荷; P_k 为机组背压。

最佳运行背压是以机组功率、冷却水进口温度和冷却水流量为变量的目标函数,在量值上为机组功率的增量与循环水泵耗功增量之差最大时的凝汽器压力^[6],即:

$$F(N, t, W) = \Delta N_T - \Delta N_p, \text{ 当}$$

$$\frac{\partial F(N, t, W)}{\partial W} = 0 \text{ 时, 机组背压最佳, 即:}$$

$$\frac{\partial f_1(N, P_k)}{\partial P_k} \times \frac{\partial P_k}{\partial W} = \frac{\partial \Delta N_p}{\partial W} \quad (9)$$

3 冷端智能控制策略

根据以上分析可以得到汽轮机冷端系统数学模型中的所有参数之间的关系全图,如图 1 所示。在环境条件保持不变且汽轮机负荷稳定的情况下,循环水流量成为决定背压的关键因素。当循环水流量增大时,机组背压会随之降低,进而促使汽轮机功率得以提升。然而,需要注意的是,循环水流量的增加会导致循环水泵耗功率上升。这二者的差值即为当前循环水泵运行状态下的系统净收益。

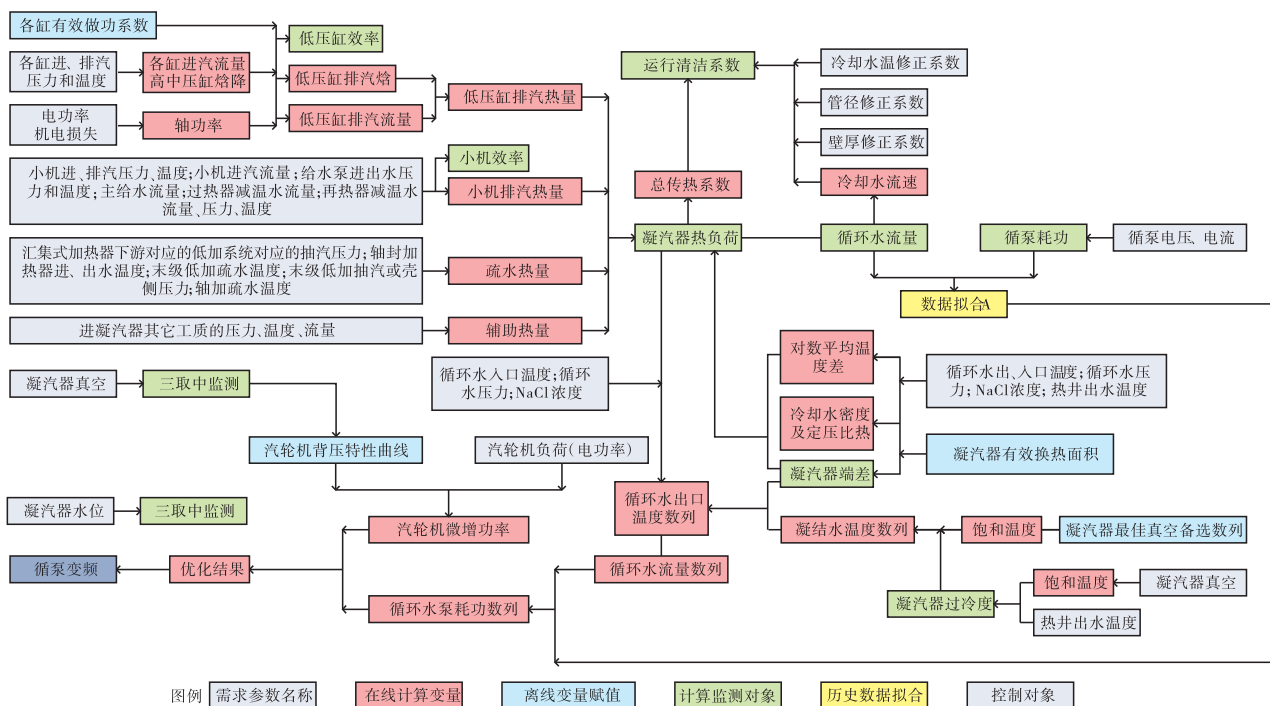


图 1 冷端系统数学模型各参数间关系示意图

我们称变频循环水泵当前转速为“原转速工况”,增加 3 r/min 为“增转速工况”),减少 3 r/min

为“减转速工况”。循环水泵变频智能控制策略实现方法如下。

3.1 原转速工况的系统净收益计算

根据式 6 由实测的循环水泵电流、电压计算出原转速工况下循环水泵的功耗。由实测的凝汽器压力值依据式 8 计算出汽轮机的微增功率。两者相减,即可得到系统净收益。

3.2 变转速工况的系统净收益计算

循环水泵变转速工况后凝汽器的热负荷不变,通过式 2 计算出凝汽器热负荷。在凝汽器里,汽轮机排出的蒸汽与冷却水之间的热量交换,严格遵循能量守恒定律。具体而言,汽轮机排汽所释放出的热量,恰好等同于循环水吸收的热量,因此:

$$Q = D_w C_p \Delta t \quad (10)$$

式中: Q 为凝汽器的热负荷; D_w 为循环水流量; C_p 为冷却水定压比热; Δt 为循环水温升。

利用前池液位,循环水泵出口压力等参数及变频循环泵特性曲线,根据式(5)计算出变转速工况下循环水流量。式(5)、式(10)联立可计算出变转速工况下循环水出水温度,进而计算出变转速工况下的凝汽器绝对压力。再根据对应的变工况下凝汽器压力、机组负荷等参数通过汽轮机排气压力特性曲线(式(8))计算出变转速工况机组的微增功率。全工况条件下的功率背压曲线可采用线性插值进行拟合。

最后,根据式(7)计算出变转速工况下循环水泵的功耗。变转速工况下机组的微增功率减去变转速工况下循环水泵的功耗最终得到增(减)转速工况下系统净收益。

3.3 最优频率输出信号

通过变频循环水泵、凝汽器性能试验及微增出力试验获得了机组在试验状态下的变频循环水泵优化运行结果,即机组负荷与最佳变频循环泵转速之

间的静态曲线,作为系统控制信号的静态优化值。

根据 3.1、3.2 节计算结果,实时比较三种工况下系统净收益的最大值。该最大值对应的经过限速(1 r/min/min)、限幅(± 6 r/min)后作为动态优化值。

动态优化值与静态优化值进行叠加计算为最终输出给变频器的指令:

$$y = y_s + y_d$$

式中: y 为最优频率输出; y_s 为静态优化值; y_d 为动态优化值。

4 结束语

本文给出了火电厂循环水泵变频的冷端智能优化控制技术的实现方法,综合考虑循环水温度、潮位、凝汽器性能等工况变化对机组运行经济性的影响,实时输出变频循环水泵的最优频率。这项研究,可以改变循环水泵变频改造后依赖人工经验给定运行频率的现状,能充分发挥变频循环水泵的冷端优化节能潜力。

参考文献:

- [1] 王攀,王永涛,王宝玉. 汽轮机冷端优化运行和最佳背压的研究与应用[J]. 汽轮机技术,2016,58(1):55-57+60
- [2] 黄惠军. 双速循环泵冷端优化模型及其应用[J]. 工业技术创新,2017,4(5):82-85
- [3] 夏林,刘德有,王丰,等. 考虑潮汐影响的凝汽器变工况特性及最佳真空[J]. 动力工程学报,2013,33(8):619-624+647
- [4] 沈发荣,赵明,崔海波,等. 循环水泵计算模型及节能分析[J]. 热力发电,2018,47(3):12-17
- [5] 吴永存,罗志浩,陈卫,等. 1 000 MW 超超临界机组全程背压修正及滑压优化研究[J]. 电站系统工程,2012,28(2):22-24
- [6] 李尔堪,高林,童博,等. 汽轮机冷端运行自动优化控制技术研究[J]. 汽轮机技术,2017,59(3):224-226+186
- [6] CTI. CTI ATC—105 Acceptance Test Code For Water Cooling Towers[S]. 2019
- [7] IAPWS. IAPWS R14-08(2011) Revised Release on the Pressure along the Melting and Sublimation Curves of Ordinary Water Substance[EB/OL]. <http://www.iapws.org>
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T19608.3—2004 特殊环境条件分级第3部分:高原[S]
- [9] 李德龙,李素奇. 高原型气候对电气设备的影响[J]. 青海师专学报,2009,29(5):70-74

(上接第 49 页)

- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 20626.1—2017 特殊环境条件高原电子电子产品第1部分:通用技术要求[S]
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50392—2016 机械通风冷却塔工艺设计规范[S]
- [5] 韩玲,方黎. 蒸发水量计算公式对循环冷却水节水的影响[J]. 工业用水与废水,2009,40(3):70-72

沿海某风力发电机组防盐雾冷却系统的应用研究

王玉¹ 邓智春² 杨希¹ 张翔¹

1. 东方电气新能科技(成都)有限公司, 成都 610036; 2. 东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:为应对沿海及海上环境具有的高湿度、强盐雾和高温等对风力发电机组的严重腐蚀情况,影响风力发电机组稳定运行,通过开发防盐雾冷却系统,增加机舱、轮毂环境控制装置等措施改善甚至解决沿海某风力发电机组运行过程中机舱、轮毂内部受到的严重腐蚀和高温问题。

关键词:风力发电机冷却系统;沿海;盐雾;腐蚀;高温;机舱环境;轮毂环境

中图分类号:TM614

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0067-06

Research and Application of The Anti-salt Mist Cooling System for Coastal Wind Turbines

WANG Yu¹, DENG Zhichun², YANG Xi¹, ZHANG Xiang¹

(1. Dongfang Electric New Energy Technology (Chengdu) Co., Ltd., 610036, Chengdu, China;

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

Abstract: To address the severe corrosion of wind turbine generators caused by high humidity, high salt fog, and high temperatures in coastal and marine environments, which affect the stable operation of wind turbines, measures such as developing anti-salt fog cooling systems and adding environmental control devices to the nacelle and hub have been implemented to improve or even resolve the severe corrosion and high-temperature issues experienced by certain coastal wind turbine generators during operation.

Key words: wind turbine cooling system; offshore salt spray protection; coastal, salt spray; cooling; corrosion; high temperature; engine room environment; hub environment

沿海或海上风电机组运行环境不同于陆上机组,海上环境通常具有高湿度、强盐雾和强紫外线等,特别是低纬度地区还必须面对高温考验,强盐雾和高温是金属腐蚀快速发展最有利的环境因素。为保证机组长期保持具有较高的可利用率,机组整体必须具有良好的运行可靠性,包括具有极强的防腐性能。

沿海或海上风电机组的防腐设计主要从两个方面进行:第一是被动防腐,每个部件具有足够的

耐腐蚀能力,能抵抗相应腐蚀因素侵袭;第二是主动防腐,通过主动方式把腐蚀因素阻隔开,主要采用环境控制技术对风电机组内部环境进行调控,让机组内部环境腐蚀性降低,甚至不具腐蚀性,环境控制技术是十分有效的防盐雾腐蚀技术。

结合某风电场机型运行的实际情况,该风场冷却系统原设计布置于机舱顶部,冷却系统处于外部暴露状态,如果按照海上风电机组标准,对冷却系统进行重新设计,增加机舱、轮毂环境控制装置等

收稿日期:2024-06-25

作者简介:王玉(1988—),男,现任职于东方电气新能科技(成都)有限公司,主要研究方向:风电机组大部件结构设计、热管理设计。邮箱: wangy8013@dongfang.com。

措施,便可改善甚至解决该风场机组运行过程中受到的严重盐雾污染和机舱、轮毂内环境的高温等问题,保障机组的长期平稳运行,通过设计,预期可以将风机内部达到海上风电机组防盐雾标准,可有效降低机舱、轮毂内部环境温度,满足各部套正常使用需求。

1 防盐雾冷却系统研究内容

1.1 防盐雾系统整体结构设计

对该机型防盐雾冷却系统进行整体设计(图1),主要有以下几部分构成:冷却平台支架、气象架、发电机盐雾过滤器、机舱盐雾过滤器、发电机冷却风机、机舱冷却风机、风管、轮毂冷却风机等部件。

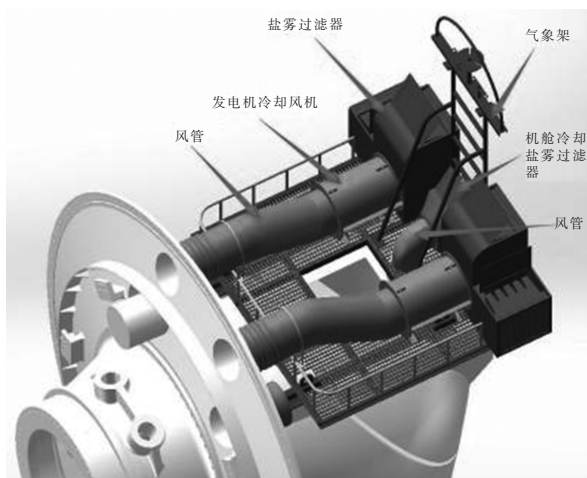


图1 整体设计结构图

1.2 盐雾过滤系统原理

盐雾过滤系统主要由通风壳体、水气分离器、初效过滤器、亚高效过滤器、冷却风机等组成。

盐雾过滤系统包含初效和高效盐雾过滤设备,确保送入机组内的冷却空气为洁净状态,同时可避免下雨天大量水分进入,并对整体散热系统结构进行相应调整,确保结构更加合理。

盐雾过滤系统的主要作用是过滤沿海及海上环境中进入风力发电机组的空气中的盐雾成分,以防止盐雾对机组内部的腐蚀。

风机启动,将外界空气经过水汽分离器侧进入过滤器,再经过初效过滤和亚高效过滤层进行尘埃和盐雾过滤,空气中的粉尘和盐雾颗粒将得到95%以上的隔离,然后经过风机进入设备内部。形式如图2。

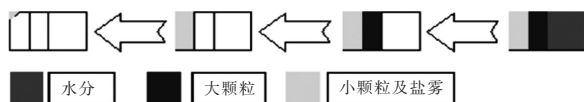


图2 空气过滤过程

盐雾过滤系统参数:

过滤精度:过滤器分为初效和亚高效过滤等级,初效为G4,亚高效为H10。

风机风量:满足原机型需求风量。

整体防腐等级:不低于ISO12944 CX。

1.3 机舱内防盐雾冷却系统

根据该机组结构特点,针对机舱空间的冷却和防腐,同样可采用增加盐雾过滤器的方案,在机舱顶部安装过滤器及冷却风机,使机组外的空气经过盐雾过滤器过滤后送入机舱内,对机舱形成微正压状态,既对机舱实现了散热冷却,同时还避免外界含盐空气进入机组内(图3)。

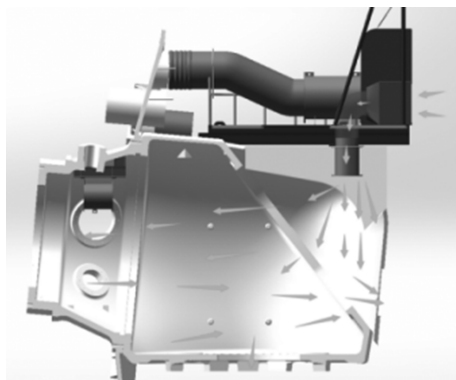


图3 机舱空气流向示意图

1.4 轮毂内防盐雾冷却系统

变桨系统运行会产生大量的热能,因该机型发电机的中心孔为缩颈结构,导致轮毂空间内热能无法进入机舱,也就导致轮毂内出现高温问题,在发电机内部悬臂梁上安装小型通风设备,通过导风管在轮毂空间与机舱空间之间创造对流循环,实现热能的转移,结合机舱增加的过滤冷却设备,实现轮毂内冷却和防盐雾功能。如图4所示:

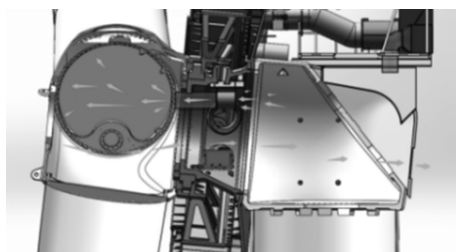


图4 轮毂散热改造示例图

2 仿真实验分析

2.1 参数设置

在整个模拟机型内外流场耦合分析时,同时打开湍流模型、能量模型、辐射模型。固体材料选择玻璃钢材料和钢材料,气体选择不可压缩理想气体。

模拟该机型在发电的同时,发电机损耗热量,机组采用风机对发电机进行直接散热。线圈体热源为 $386\,000\text{ W/m}^3$,总功率 150 kW ;变桨系统和主控柜总功率分别为 200 W ,热源分别为 770 W/m^3 、 440 W/m^3 ;发电机进风口风量 $4\text{ m}^3/\text{s}$,机舱盐雾过滤器打开时进风量 $3\,000\text{ m}^3/\text{h}$,轮毂用冷却风机打开时 $1\,500\text{ m}^3/\text{h}$;机舱外环境温度 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 。

通过仿真验证分析,可以直观的看到不同工况下,机舱内部和轮毂内部的气流流向和温度分布,从而验证防盐雾冷却系统的可行性。

2.2 结果分析

下面从机组内部速度、温度方面分析机组各冷却风机不同工况(表1)时的结果。

表1 字母所代表工况示意

字母	工况
a	机舱、轮毂风机均开启
b	机舱风机关闭、轮毂风机开启
c	机舱风机开启、轮毂风机关闭
d	机舱风机、轮毂风机均关闭

2.2.1 机舱、轮毂流线分析

表1不同工况下,从图5中可以明显看到冷却风机开启后经过冷却风机出口的流线轨迹,同时用速度大小进行渲染。轮毂内冷却风机打开时,轮毂内部空气能够得到充分搅拌,这有利于轮毂内部部件的冷却,同时该风机打开对机舱内部的空气流动起促进作用。图6中机舱与轮毂内部空气速度矢量图也能明确反映该速度分布,在轮毂用冷却风机和机舱冷却风机均关闭时,内部的气流紊乱,没有流动规律。

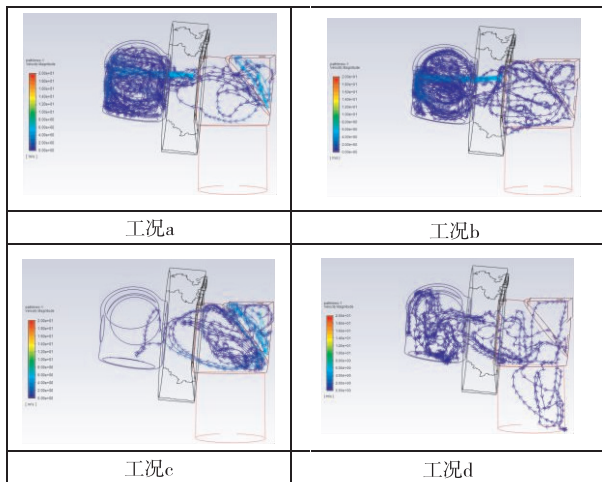


图5 不同工况速度流线

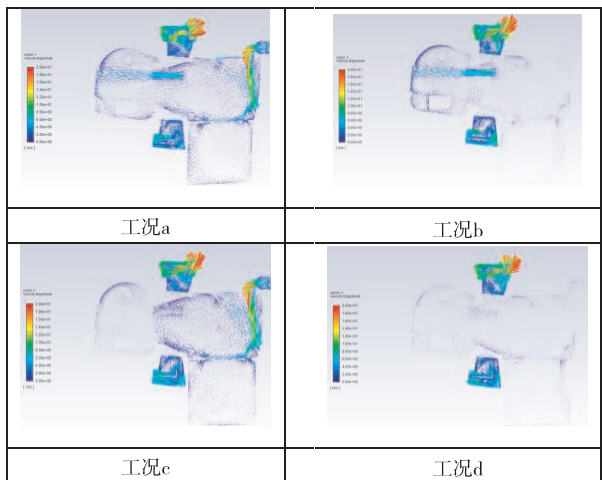


图6 不同工况机舱与轮毂内部空气速度矢量图

2.2.2 温度分析结果

以图7的云图分别展示各工况机组机舱与轮毂内部温度分布。

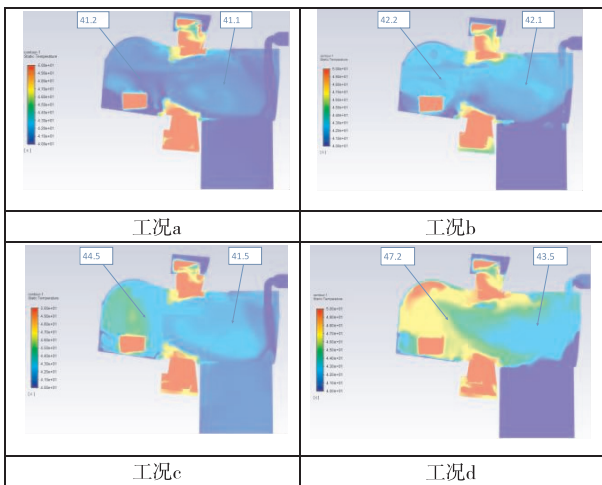


图7 不同工况机舱与轮毂内部温度分布

对比云图,机舱风机、轮毂风机均关闭时,机组内部空气缺少动力源,无法充分搅动,机组内部空气温度迅速升高,由于大气压力,空气从罩壳尾部通风口进入机组内部,机组内部空间仅靠自然对流方式散热,轮毂内部大部分空间温度在 47 ℃ 以上,局部温度在 50 ℃ 以上,因此轮毂内部需要强制通风散热。

机舱风机、轮毂风机均开启时,机组内部空气获得较大的动能,空气对流加剧,带走机组内部更多热量,机组温度降低。

3 应用验证分析

为了验证该机型防盐雾冷却系统的效果,对改造后的机舱内外部环境的温湿度、盐雾、大气腐蚀性等级等进行测试。

3.1 温湿度检测

3.1.1 检测位置

采用温湿度仪对机舱内部、轮毂内部、变桨柜的温湿度进行监测,监测位置如图 8。



图 8 温湿度监测位置

3.1.2 检测标准依据

依据 NB/T 10927—2022 中华人民共和国能源行业标准-海上风力发电机组 电器设备 服役环境评价导则,按测量的温度和湿度数据划分为 H1、H2、H3 和 HX 四级,温湿度等级评价见表 2,具体描述如下:^[1]

(1)H1 级(良好):海洋环境海上风电电气设备温度和湿度控制好,环境温湿度不是影响设备可靠运行的决定因素。

(2)H2 级(中等):海洋环境海上风电电气设备温度和湿度得到控制,环境温湿度可能是决定设备可靠运行的因素之一。

(3)H3 级(严酷):海洋环境海上风电电气设备温度和湿度尚未得到有效控制,环境温湿度是决定设备可靠运行的主要因素,需对散热设计、除湿设备进行改进或增加。

(4)HX 级(极其严酷):待说明或有特殊要求的环境等级及参数。

表 2 温湿度等级评价^[1]

环境温湿度等级 a	最高环境温度℃	平均相对湿度 %	最高相对湿度 %	相对湿度变化率%/h
H1	≤40	≤50	≤60	≤5
H2	≤50	≤60	≤70	≤10
H3	≤60	≤70	≤80	≤10
HXb	—	—	—	—

注:1. 等级评价应以最严格的情况为准,设备的环境温湿度参数在满足某一等级所有条件时才可被评价为该等级。

2. 因设备原因,如故障停机、自身发热等,导致服役环境温湿度参数超过限值。

3.1.3 温湿度检测结果

机舱内部、轮毂内部和变桨轴柜温湿度监测统计结果见表 3。根据表 2 环境温湿度等级对机组各部位温湿度进行评级,得到表 4 机组温湿度评级结果。

机组变桨轴柜最高湿度低于 60 %,处于 H2 等级,机舱内部最高湿度低于 70 %,平均湿度小于 50 %,处于 H2 等级;轮毂内部湿度低于 70 %,最高温度超过 40 ℃,处于 H2 等级。

表 3 机组各部位温湿度数据

位置	温湿度统计	9 月	10 月	11 月	12 月	平均
机舱内部	平均	37.4	33.5	28.4	25.0	31.1
	温度					
	最高	39.9	40.2	33.3	31.4	40.2
	最低	35.4	25.7	20.5	16.9	16.9
	湿度					
	平均	49.6	40.4	49.5	44.1	45.9
轮毂内部	最高	53.7	62.9	65.8	63.3	61.4
	最低	45.8	24.2	33.3	35.1	24.2
	温度					
	平均	39.3	38.5	31.0	29.1	34.5
	最高	41.4	45.7	38.7	39.4	45.7
	最低	36.9	31.3	21.3	17.5	17.5
变桨轴柜	平均	45.9	32.2	43.7	36.6	39.6
	湿度					
	最高	50.5	60.9	68.9	60.4	68.9
	最低	42.9	17.1	24.3	25.4	17.1
	温度					
	平均	39.0	37.5	31.5	30.9	34.7
变桨轴柜	最高	40.9	42.1	37.3	37.6	42.1
	最低	37.4	31.7	22.8	18.7	18.7
	湿度					
	平均	46.0	32.9	41.8	33.0	38.4
	最高	49.0	55.2	59.9	56.4	59.9
	最低	42.9	19.7	26.3	21.8	19.7

表 4 机组温湿度等级

机舱内	轮毂内	变桨轴柜
H2	H2	H2

根据 GB/T 33630—2017 海上风力发电机组防腐规范对于干洁区腐蚀环境要求,温度应 $\leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 65\%$ 。^[2]从表 3 可以看出,机组机舱内部、轮毂内部和变桨轴柜温度均小于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均相对湿度均小于 65% ,满足该标准下对于干洁区腐蚀环境的定义要求。

3.2 盐雾粒子浓度检测

3.2.1 检测位置

选择机舱外部、机舱内部共 2 个位置开展盐雾粒子含量监测,机舱外部盐雾粒子采集滤膜放置在户外环境测试百叶箱中,如图 9 所示。

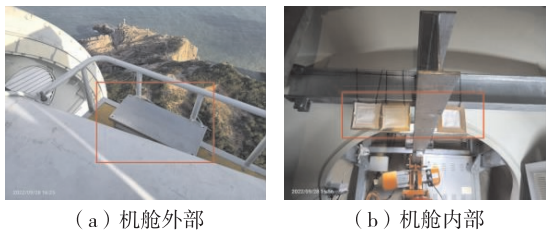


图 9 机组盐雾检测位置

3.2.2 检测标准依据

依据 NB/T 10927—2022,海洋环境下盐雾等级按测量到的盐雾含量和盐雾沉降率划分为 S1、S2、S3 和 SX 四级,盐雾等级评价见表 5,具体描述如下:^[1]

- (1)S1 级(良好):海洋环境盐雾控制得足够好,盐雾不是影响设备可靠运行的决定因素。
- (2)S2 级(中等):海洋环境盐雾得到控制,盐雾可能是决定设备可靠运行的因素之一。
- (3)S3 级(严酷):环境盐雾含量和沉降率高,盐雾是决定设备可靠运行的主要因素,需采取密封、环境控制等措施。
- (4)SX 级(极其严酷):暴露于户外的海洋大气环境。

表 5 环境盐雾参数等级特征^[1]

等级	盐雾含量 mg/m^3	盐雾沉降率(干片法) $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
S1	≤ 0.05	≤ 0.10
S2	≤ 0.15	≤ 1.25
S3	≤ 0.5	≤ 25.0
SX	> 0.5	> 25.0

3.2.3 盐雾粒子浓度检测结果

机组盐雾沉降量测量结果见表 6,机组机舱外

盐雾沉降较高,达到 SX,机组机舱内盐雾沉降较低为 S2 级,机舱外安装的防盐雾冷却系统对盐雾具有明显的过滤作用。

表 6 机组盐雾沉降量测量数据

检测位置	海盐粒子沉降率($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$)干片法	等级
机舱内	0.17	S2
机舱外	27.18	SX

3.3 大气腐蚀等级检测

3.3.1 测试位置

依据标准 GB/T 19292.4—2018 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 4 部分:用于评估腐蚀性的标准试样的腐蚀速率的测定^[3],在机组机舱外部、机舱内部共 2 个位置的标准试样失重情况,从而得出该位置的腐蚀速率,测试位置如图 10 所示。

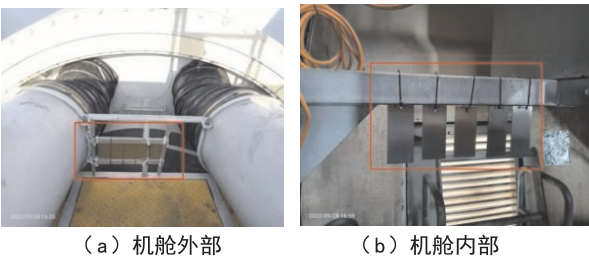


图 10 大气腐蚀等级测试位置

3.3.2 检测标准依据

如表 7 所示,依据 GB/T 30790.2—2014 色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第 2 部分:环境分类,大气腐蚀性等级划分为以下环境等级。^[4]

表 7 环境等级分类^[4]

等级	单位	碳钢腐蚀速率
C1 很低	$\text{g}/(\text{m}^2\text{a})$	$\gamma \leq 10$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$\gamma \leq 1.3$
C2 低	$\text{g}/(\text{m}^2\text{a})$	$10 < \gamma \leq 200$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$1.3 < \gamma \leq 25$
C3 中等	$\text{g}/(\text{m}^2\text{a})$	$200 < \gamma \leq 400$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$25 < \gamma \leq 50$
C4 高	$\text{g}/(\text{m}^2\text{a})$	$400 < \gamma \leq 650$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$50 < \gamma \leq 80$
C5 很高	$\text{g}/(\text{m}^2\text{a})$	$650 < \gamma \leq 1\ 500$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$80 < \gamma \leq 200$
CX 极端	$\text{g}/(\text{m}^2\text{a})$	$1\ 500 < \gamma \leq 5\ 500$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$200 < \gamma \leq 700$

3.3.3 大气腐蚀性等级检测结果

机组大气腐蚀性等级测量结果见表 8、图 11。机舱内碳钢样品表面有少量轻微腐蚀,腐蚀等级为 C1。机舱外碳钢样品腐蚀严重,腐蚀等级为 C5。

表 8 碳钢在风机组中腐蚀速率

位置	腐蚀速率(μm/a)	腐蚀等级
机舱内	0.26	C1
机舱外	112.29	C5

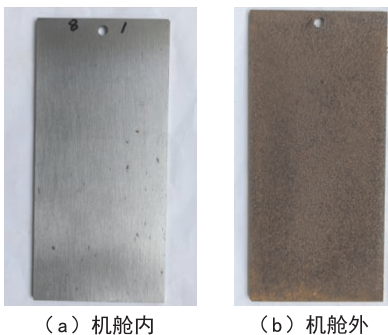


图 11 金属挂板自然暴露试验后外观形貌

根据 GB/T 33630—2017 海上风力发电机组防腐规范对于干洁区腐蚀环境要求,大气腐蚀性等级≤C3。^[2] 机组机舱内大气腐蚀性等级为 C1 级,符合干洁区腐蚀环境要求。

4 总结

通过对沿海风力发电机组防盐雾冷却系统的研究与应用,使用仿真系统对冷却效果的可行性进行了验证,对改造后的机舱内外部环境数据进行测

试对比,机舱内环境温湿度为 H2,大气腐蚀性等级为 C1 级,满足 GB/T 33630—2017 海上风力发电机组防腐规范 对于干洁区腐蚀环境的定义要求;机舱内盐雾沉降为 S2 级,防盐雾冷却系统对盐雾具有明显的过滤作用;通过机舱防盐雾冷却风机使机舱和轮毂内形成微正压,进一步防止盐雾和水分对风机内部的腐蚀。

5 结语

对沿海风力发电机组防盐雾冷却系统的研究与应用,改善甚至解决该风场机组运行过程中受到的严重盐雾污染和机舱、轮毂内环境的高温等问题,保障了机组的长期平稳运行,达到了预期效果,对沿海风力发电机组的防腐、冷却方式具有良好的借鉴意义。

参考文献:

[1] 国家能源局. NB/T 10927—2022 中华人民共和国能源行业标准-海上风力发电机组设备服役环境评价导则[S]
[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 33630—2017 海上风力发电机组防腐规范[S]
[3] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 19292.4—2018 金属和合金的腐蚀大气腐蚀性第 4 部分:用于评估腐蚀性的标准试样的腐蚀速率的测定[S]
[4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 30790.2—2014 色漆和清漆防护涂料体系对钢结构的防腐保护第 2 部分:环境分类[S]

(上接第 24 页)

[6] 刘守英. 富氧燃烧技术在节能减排中的应用[J]. 现代农业科技, 2011(24):300+307
[7] 袁恒菊,刘志林,吴爱忠. 富氧燃烧技术在水泥生产中的应用[J]. 中国水泥,2023(S1):174-177
[8] 章高霞,李志涛,林常枫. 高耗能行业富氧燃烧技术的前景分析[J]. 能源研究与管理,2023,15(4):91-98
[9] 杨志芳,卿山. 富氧燃烧在水泥生产中的应用[J]. 工业加热, 2013,42(4):7-10
[10] 贾华平. 富氧煅烧在水泥熟料生产中的节煤机理[J]. 四川水泥,2013(1):112-115
[11] 朱文尚, 颜碧兰. 富氧燃烧技术及在水泥生产中的研究利用现状[J]. 材料导报,2014,28(S1):336-338
[12] 李明飞,陶从喜,李小金,等. 富氧燃烧技术在水泥窑的应用[J]. 水泥技术,2014(4):17-20
[13] 郭涛,彭学平,刘继开,等. 水泥窑富氧燃烧技术研究现状及分

析[J]. 水泥技术,2015(1):46-48
[14] 杨勇,张义华,蔡律律,等. 富氧燃烧的工业应用进展分析[J]. 能源与节能,2021(7):179-181
[15] 赵青林,唐登航,周和敏,等. 高原环境下煤粉燃烧特性及水泥熟料烧成系统优化分析[J]. 新世纪水泥导报,2019(1):42-48+6
[16] 李婉君,刘正刚,汪澜. 氢能煅烧水泥熟料技术研究及应用进展[J]. 水泥,2024(10):1-4
[17] 马娇媚,彭学平,范道荣,等. 氢能耦合替代燃料悬浮煅烧水泥技术研究[J]. 水泥技术,2024(6):7-14
[18] 史玉梅,安宁,郑碧莹,等. 氢能在重卡动力总成应用现状与展望[J]. 汽车实用技术,2023,48(6):197-202
[19] 李福胜. 甲烷/氢气预混火焰传播及火焰锋面胞状结构特性研究[D]. 北京交通大学,2018
[20] 蔡冲冲,苏洋,王燕. 富氢甲烷的爆燃特性与爆炸抑制研究进展[J]. 爆炸与冲击,2024,44(7):1-24

浅谈变桨电机转矩与转速对热平衡的影响

王淋

东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:变桨电机作为变桨系统的核心部件,它的性能与安全影响着变桨系统乃至整个风力发电机组的可靠性与安全性。本文旨在通过理论分析和实验验证,探讨转矩和转速对变桨电机热平衡的影响,为变桨电机的控制策略提供科学依据。

关键词:变桨电机;转速;转矩;热平衡

中图分类号:TM315

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0073-03

The Influence of Torque and Rotational Speed on the Thermal Equilibrium of Pitch Motors

WANG Lin

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

Abstract: The pitch motor, serving as the pivotal element of the pitch control system, significantly influences the reliability and safety of the system and the entire wind turbine generator unit. This paper is dedicated to investigating the effects of torque and speed on the thermal equilibrium of the pitch motor through theoretical analysis and experimental validation, thereby offering a scientific foundation for the development of control strategies for the pitch motor.

Key words: pitch motor; speed; torque; thermal equilibrium

风力发电作为一种清洁的可再生能源,在全球能源结构中占据着越来越重要的地位,其效率和可靠性也越发受到重视。^[1]在风力发电机组中,变桨电机作为关键的执行元件,负责调节风机的桨叶角度,由于其特殊的运行环境,如频繁启动、急停、加减速以及其他恶劣工况,势必会产生大量损耗,且所处的轮毂,安装位置难以接触,散热条件较差,若不能有效管理电机在运行过程中产生的热量,将对变桨电机的性能和寿命产生不利影响。^[2]

变桨电机的转矩与转速,直接影响电机的输出功率和运行效率。充分利用变桨电机的带载能力,以应对目前行业内降本要求。

基于变桨电机运行工况与安装位置的特殊性,电机的散热条件更加苛刻,为了避免电机温度过高导致的永磁体不可逆退磁,或者绝缘迅速老化,从

而影响电机的使用年限,甚至有可能损毁电机,对变桨电机热平衡的研究尤为重要。^[2]

1 变桨电机

永磁同步电机具有结构简单、体积小、重量轻、效率高等特点,已基本取代了直流电机和交流异步电机,成为变桨电机主力军。通过改变电机的转速和力矩来调整风力发电机组的桨叶角度,以适应不同的风速条件,进而优化能量转换效率并确保系统的安全运行。^[3-4]

转矩与转速作为电机最基本的两个性能参数。转矩是电机输出的旋转力矩,与电机的电流和磁场强度有关,在变桨电机中,转矩的变化直接影响电机的负载条件,决定了电机能够提供多大的力矩来驱动桨叶。较大的转矩会导致电机内部电流增加,

收稿日期:2024-06-24

作者简介:王淋(1992—),女,2015年毕业于沈阳工业大学,本科,工程师。现在东方电气集团东方风电股份有限公司从事变桨技术研发工作。

从而增加铜损耗和磁损耗,产生更多的热量。转速,是电机轴每分钟旋转的圈数,通常用转每分钟(r/min)来表示。变桨电机的转速关系到电机的运行速度和能量输出频率,决定了电机是否能快速响应桨叶角度变化要求。转速的变化会影响其内部磁场的变化频率,进而影响电机的热损耗。在低速运行时,电机的热损耗相对较小,但随着转速的增加,电机内部的铜损耗和铁损耗会显著增加,导致电机温度升高。在实际应用中,电机的转矩与转速需要根据外部风速的变化进行动态调整,以达到最佳的工作状态。这种调整过程不可避免地会导致电机内部产生额外的热能,进而影响变桨电机的热平衡状态。

2 电机热平衡

热平衡是指电机在一定时间内产生的热量与散发的热量达到平衡的状态。电机的热平衡不仅关系到其内部温度的稳定,还直接影响到电机材料的老化速度和机械部件的磨损程度。如果电机长时间处于过热状态,可能会导致绝缘材料退化、线圈烧毁甚至整个电机的故障。

不同于大型电机其内部有冷却装置,受安装位置限制,变桨电机必须尽可能的小且便于维护,多采用自然冷却的方式,电机运行状态改变时导致的电机温升加快,无法通过对冷却介质或回路的控制来缓解,由此导致的电机过热,可能会造成电机退磁,绝缘老化等一系列问题。因此,必须考虑对变桨电机进行热保护,但过度的热保护会限制电机带载能力,影响电机利用率,出现“大马拉小车”的现象。^[5-6]

为减少变桨电机故障率,提高变桨电机利用率,进而提高整个变桨系统的效率和利用率,从负载管理入手,这是一种相对简单、易于实时处理的热保护技术。

3 实验设备与方法

3.1 实验设备

变桨系统热平衡测试需要一个变桨驱动器、一个变桨电机、PLC 以及测试电脑等设备搭建一个最

小变桨系统,通过东方风电专利独有的变桨加载柜给最小变桨系统供电并为变桨电机提供各种转矩。变桨系统与加载柜的结构关系见图 1。

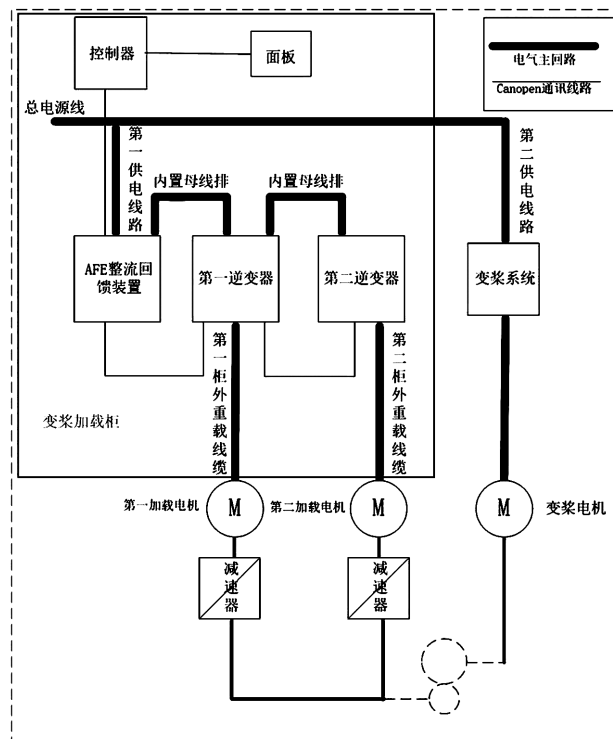


图 1 变桨系统与加载柜的结构关系示意图

3.2 实验方法

在正常环境温度下(15℃~25℃),给变桨驱动器发送指定的转速,给加载电机下发要求的转矩,变桨电机带动加载电机转动,记录变桨电机和环境温度,当前后 1 小时内变桨电机温度变化值小于 1℃时,即可认为电机温度达到平衡。用埋入电机内部的 KTY84 来测量温度,该测温计在电机制造过程中埋置于电机内外部无法触及的部位,环境温度用通过 PT100 测量。通过控制变量法,对变桨电机进行多次温升测试,分别是:实验 1,电机转矩 65 N·m,转速 1 000 r/min;实验 2,电机转矩 60 N·m,转速 1 000 r/min;实验 3,电机转矩 65 N·m,转速 873 r/min。

4 实验结果与分析

4.1 实验 1 测试结果

变桨电机转矩 65 N·m,转速 1 000 r/min,环境温度 21℃,运行 4 小时后,电机未热平衡,温升数据见图 2。

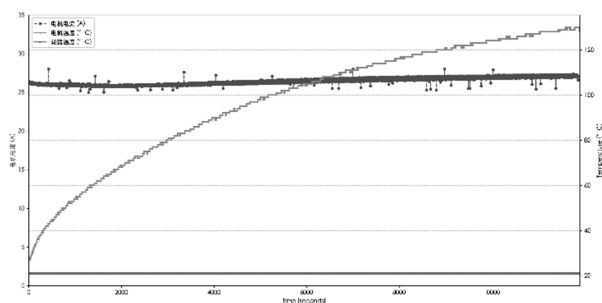


图2 转矩 65 N·m 1 000 r/min 温升折线图

4.2 实验 2 测试结果

为了验证转速不变的情况下,转矩对热平衡的影响,与实验 1 对比,变桨电机转速为 1 000 r/min 保持不变,变桨电机转矩减为 60 N·m,环境温度 21 ℃,运行 4.3 小时后,电机热平衡,温升数据见图 3。

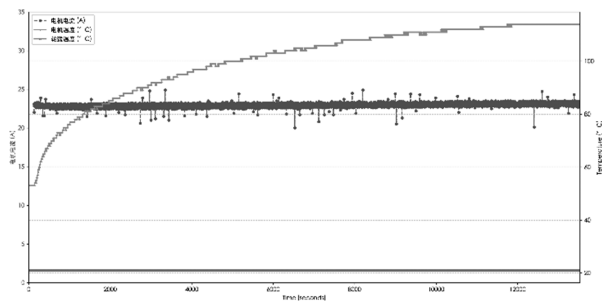


图3 转矩 60 N·m 1 000 r/min 温升折线图

4.3 实验 3 测试结果

为了验证转矩不变的情况下,转速对变桨电机热平衡的影响,与实验 1 对比,变桨电机转矩为 65 N·m 保持不变,转速降为 873 r/min,环境温度 17 ℃,运行 6 小时后,变桨电机热平衡,温升数据见图 4。

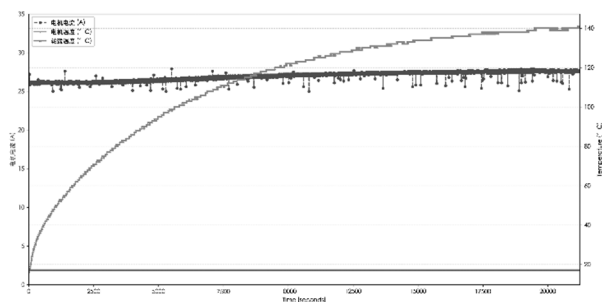


图4 转矩 65 N·m 873 r/min 温升折线图

4.4 实验结果分析

通过控制变量法,分别完成三种温升测试,实验 1 测试 4 小时之后,电机温度达到 130 ℃,未达到电机热平衡。以实验 1 为基础,实验 2 保持转速不变,转矩减小的情况下,测试 4.3 小时后,电机温度

110 ℃就达到了电机热平衡;仍以实验 1 为基础,实验 3 保持转矩不变,转速减小的情况下,测试了 6 小时之后,电机温度 140 ℃,勉强达到了电机热平衡。尽管实验 2 比实验 3 输出功率多 340 W,温升仍然更低,更快达到热平衡。从以上的实验可以看出,变桨电机转矩的变化相较于转速的变化,更影响电机热平衡。

5 结语

通过理论分析和实验验证,探讨了转矩和转速对变桨电机热平衡的影响。阐述了变桨电机的工作原理以及转矩和转速的基本概念,并完成了相关的温升实验。实验结果表明,转矩和转速的增加都会导致电机内部热量的增加,影响热平衡状态,且转矩的增加,对电机热平衡的状态影响更大。综合来看,不同工况下,转矩与转速的组合对热平衡的影响各异,为变桨电机的负载管理、变桨系统控制策略及收桨曲线提供了实践指导。

在目前行业严峻的降本压力下,如何最优地利用资源,节省更多的材料,在变桨电机有限的体积内,尽可能地提高电机的功率密度以满足在一定的功率要求下尽可能地减小变桨电机的体积,不止是变桨电机,更是其他特殊应用中的伺服系统存在及需要解决的问题。然而,更小体积的电机,内部结构与热平衡的研究,需要综合多学科知识,多物理变化的复杂过程,本文只是简单的通过调整不同的转矩与转速的负载管理来确定电机的热平衡,更深入且综合的研究和创新,还需要更多的专家学者来推动。

参考文献:

- [1] 范军,孙宏昌,林静,等. 永磁同步电机在工业领域的节能技术研究[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(S1):46-49
- [2] 刘婉. 永磁同步电机温升建模及冷却性能分析[D]. 上海电机学院,2016
- [3] 黄富长. 永磁同步电机伺服驱动系统若干关键技术研究[D]. 大连理工大学,2014
- [4] 李明. 永磁交流伺服电动机损耗与温升的计算分析[D]. 沈阳工业大学,2013
- [5] 黄旭珍. 高功率密度永磁电机的损耗及温升特性的研究[D]. 哈尔滨工业大学,2008
- [6] 杨菲. 永磁电机温升计算及冷却系统设计[D]. 沈阳工业大学,2007

面向风电场站的故障预警平台设计与应用

王清照 杨鹤立 张辉

东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 目前风力发电机组应用故障预警大多基于大数据云平台模式, 风电场站管理人员无法及时有效掌握风力发电机组是否存在运行风险, 只能被动接收来自云端的故障预警结果并按运维建议被动进行现场运维, 因此设计了一种面向风电场站部署应用的风力发电机组故障预警平台。首先从平台框架和功能模块设计阐述了平台整体设计; 其次结合风电行业平价上网背景, 在分析已有故障预警方法基础上提出一种基于异常偏离监测的故障预警通用设计方法, 重点阐述和说明了平台的故障预警功能实现; 最后为验证平台实际应用效果, 以试点风场为测试样本将平台进行部署应用。实际风电场运行情况表明, 该平台系统稳定、可靠, 能够满足实际需要。

关键词: 风力发电机组; 边缘计算; SCADA; 故障预警; 异常偏离检测; 预测性维护

中图分类号: TK81

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)03-0076-08

Fault Warning Platform for Wind Farm Design and Application

WANG Qingzhao, YANG Heli, ZHANG Hui

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

Abstract: At present, wind turbine application fault warning is mostly based on the big data cloud platform mode, and wind farm station managers cannot timely and effectively grasp whether wind turbine operation risks exist and can only passively receive fault warning results from the cloud and passively carry out on-site operation and maintenance according to operation and maintenance suggestions. Therefore, a wind turbine fault warning platform is designed for deployment and application of wind farm stations. Firstly, the overall design of the platform is described from the platform framework and function module design. Secondly, combined with the background of parity online in the wind power industry, a general design method of fault early warning based on anomaly deviation monitoring is proposed based on the analysis of existing fault early warning methods, and the realization of the fault early warning function of the platform is emphasized. Finally, in order to verify the practical application effect of the platform, the pilot wind field is used as a test sample to deploy the platform. The actual operation of the wind farm shows that the platform system is stable and reliable and can meet the practical needs.

Key words: wind turbine; edge computing; SCADA; fault warning; abnormal deviation detection; predictive maintenance

随着机器学习、人工智能技术在风电行业的应用与发展, 在设备状态评估、环境状态预测以及任务状态规划等方面, 智能运维、少人或无人值守将逐步取代现有模式, 成为未来风电行业运维服务发展的新方向。风力发电机组设备的故障模式多为渐变故障, 零部件、元器件的磨损、疲劳、老化、烧

蚀、腐蚀、失调等故障模式大多经历由潜在故障发展到功能故障的过程。^[1]传统的依靠恒定整定值作为是否触发故障的指标体系, 容易造成不报、误报及排查时间不足等问题。研究如何利用风电机组及其辅助监测设备的数据对风电机组进行有效的故障预警, 避免潜在故障向功能故障进一步劣化,

收稿日期: 2024-06-04

作者简介: 王清照(1986—), 男, 2023年毕业于西南科技大学控制工程专业, 硕士, 高级工程师。现任职于东方电气风电股份有限公司, 主要从事风电项目管理的工作。

具有一定的理论和工程参考价值。

当前市场中的风电故障预警平台大多采用基于大数据的云平台模式,即将风电场风电机组的原始运行数据通过互联网回传到云平台的大数据中心,借助大数据中心部署的故障预警算法实现风电机组的故障预警分析。^[2]通常,基于云平台模式的故障预警平台需要在大数据中心配备大量的数据分析和运维管理人员,从而对接入的数据开展故障监测与预警。同时,大数据中心建设需要投入大量的人力和硬件成本,现场数据回传严重依赖互联网。近年,随着我国对电力信息网络安全逐步加强,风电场站的网络和数据安全越来越受到重视,现已逐步禁止场站就地系统连接公共互联网,现场数据只能由运维人员定期通过安全介质拷贝后再上传大数据中心,导致云平台模式下的故障预警平台分析结果出现严重滞后,进而延误潜在故障的窗口处理时间。

针对现有故障预警平台设计方法存在的安全性、时效性、经济性问题,本文设计了一种面向风电场站的风电故障预警平台,通过将离线预训练的故障预警模型部署应用于风电场站,实现对被监测设备的实时数据分析和故障预警监测。平台一旦监测到设备故障预警风险,实时输出分级的故障预警结果,现场运维人员据此组织实施及时、有效地运维,避免潜在故障长时间得不到解决引发的部套进一步劣化甚至停机,提高设备利用率,减少故障停机引起的电量损失,进而降低风电机组全生命周期的运维成本。^[3-4]

1 平台整体设计

1.1 平台框架

平台以风力发电机组为监测对象,通过实时采集和处理风电机组运行数据,并部署应用离线预训练的故障预警模型,实现对场站内风电机组运行状态的就地监测和故障预警功能。平台整体架构如图1所示。基础设备层,融合边缘计算硬件网络、计算、存储的能力,对风电机组关键部套及辅助监测设备运行过程中产生的多源异构数据进行统一采集及预处理。^[5]数据层,根据平台不同业务及数据粒度需求,基于 Redis、MySQL、MongoDB 及 Kafka 等

技术栈实现实时数据、结构化数据和非结构化数据的分级存储;同时,为应对新能源大基地海量数据的处理和分析需求,平台具备分布式扩展能力。通过灵活配置服务器和硬盘资源,可以满足不同数量风机场站下的数据分析和存储需求。业务层,将平台整体业务解耦为基础服务和平台服务两类。其中,基础服务,主要完成数据记录、终端管理、数据采集策略管理、Docker 容器管理、权限控制管理、用户管理、算法基础运行环境及对外 API 网关等业务;平台服务,主要完成故障预警核心功能,包括算法调度管理、算法运行管理、算法运行日志管理、语音播报服务、系统报表以及专家库管理等。网络层,基于硬件防火墙和软件 Nginx 实现业务层软硬件的对外安全隔离。最终在展示层以 Web 浏览器统一对外提供平台的监控管理。

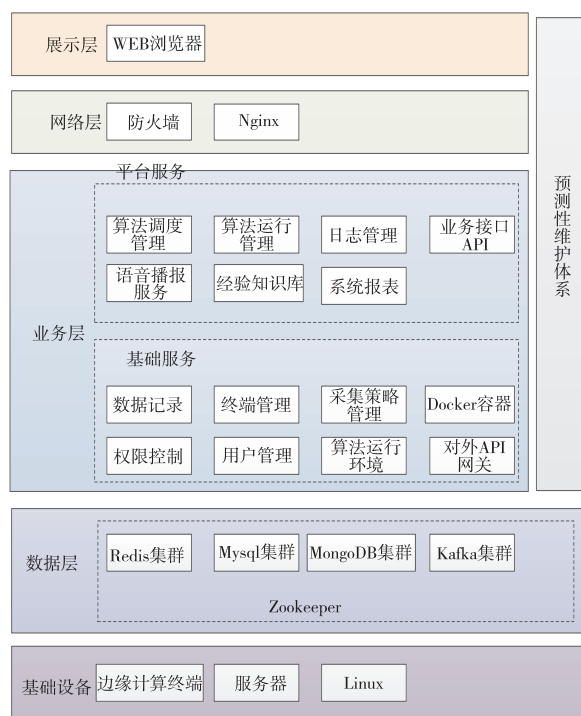


图1 平台整体架构

综合考虑当前风电机组机型多样化、现场人员复杂化及风电大基地建设的背景^[6],依靠传统的事后检修和定检维护方式已很难应对新形势下风电整机设备的运维管理要求,因此实施预测性维护成为风电场提高设备管理水平的必然趋势^[7]。依托风力发电机组故障预警平台提供的故障预警功能,构建了风电场站级的预测性闭环运维流程,具体如下。

(1) 依托边缘计算终端采集风电机组关键部件及辅助监测设备的实时运行数据,开展包括清洗、降维及工况识别筛选等在内的数据预处理。

(2) 将采集和预处理后的数据按不同的数据类型和时间粒度进行分级存储。

(3) 基于预处理后数据开展算法的离线预训练和被监测故障的在线故障预警,依托平台提供的可视化界面、系统报表、语音报警等业务功能将在线计算故障预警结果及时通知现场运维人员。

(4) 现场运维管理者综合平台故障预警结果和风电机组历史故障等信息,为风电机组制订“一机一策”的定制化运维计划。

(5) 运维执行人员按制订的运维计划开展巡检和维护,并将人员构成、使用器具、具体实施措施、预警是否准确等运维结果信息记录反馈。

(6) 根据记录反馈的运维结果,评估运维效果,针对性地优化数据采集及模型参数,持续提高故障预警输出的准确性和有效性。

1.2 平台模块功能

依照平台整体框架,设计实现了边缘计算、模型调度、可视化展示和对外 API 网关等 4 大核心功能模块,以下分别对上述模块进行设计说明。

1.2.1 边缘计算模块

边缘计算利用网络边缘的智能处理,集成了计算、存储、信息和网络技术,适用于业务动态管理、边缘安全和隐私保护等。^[8] 由于原始的风电机组数据采集与监控系统(SCADA)中通常包含大量的异常数据,难以准确反映风电机组的运行状态^[9],因此在靠近设备侧的风电机组中部署一套边缘计算模块,用于开展异常采集数据的识别及剔除,从而构建风电机组对内统一的数据采集终端及对外统一的规约化数据存储网关^[10],为平台故障预警核心功能提供数据支撑。同时,为了降低无效数据对平台业务数据分析的干扰、减少场站数据计算和存储量、降低场站服务器的计算负载和网络带宽压力、提高数据整体处理效率,按照不同故障预警算法对源数据的要求,边缘计算模块在合理利用有限设备资源的前提下,将数据分级处理为毫秒级、秒级及分钟级等不同粒度的数据并记录到场站业务服务器中供算法调取分析。^[11-14]

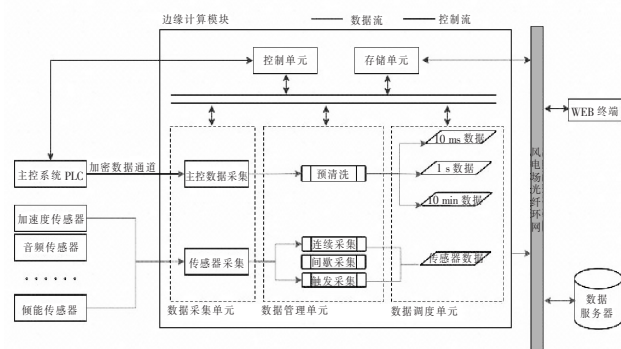


图2 边缘计算模块功能架构图

图2为边缘计算模块功能架构图,整体采用模块化设计思想,其主要由控制单元、存储单元、数据采集单元、数据管理单元及数据调度单元等组成。数据采集单元主要完成主控系统和加装传感器的数据采集。考虑到风电机组数据安全,主控制系统数据通过独立的加密通道采集。此外,不同工程项目存在加装传感器数量和类型差异,因此传感器数据采集设计为可插拔扩展的采集板卡形式,从而根据项目具体配置进行灵活扩展。数据管理和调度单元结合人工智能技术,通过部署应用轻量级 AI 算法完成采集数据的预清洗、采集方式管理和数据规约化处理,提高回传场站数据的整体质量。其中,采集方式设计了连续式、间歇式及触发式等三种采集模式,用以满足不同业务场景及算法模型运行的数据需求。连续式采集,是通用传统的不间断采集数据;间歇式采集,是根据预设周期对数据进行间歇式采集;触发式采集,利用 AI 算法智能识别被采数据,当达到设定阈值时才启动采集,为本模块的特有采集方式。控制单元和存储单元协同对外提供管理功能,借助 Web 浏览器实现对边缘计算终端的软件升级、采集方式、采集数据配置及 AI 算法升级等功能的管理。

1.2.2 模型调度模块

平台故障预警的核心功能依托于大量针对特定故障的算法模型的在线计算分析,为合理调度管理这些算法模型设计了模型调度模块,其主要完成算法模型的配置和调度管理,实现平台模型的对外统一管理。为应对最多达上百台风电机组不同算法模型分析计算的需求,模块整体采用可扩展、分布式计算框架,将大规模数据处理任务分散到多个计算节点,提高处理速度和效率。图3为该模块的

功能结构,主要功能设计说明如下。

(1) 模型管理

主要实现算法模型的增删改查、算法源数据映射管理、部署设备管理等功能。其中,模型的增删改查,主要完成模型的新增、删除、查看及更新修改功能;算法源数据映射管理,主要完成模型源数据与风电机组采集数据点位的映射,从而满足模型正常运行的数据需求;部署设备管理,主要完成已部署模型与风电机组的关联,实现部署模型设备的自定义配置。

(2) 模型运行调度

主要实现已关联设备模型的运行策略管理和运行控制管理等功能。其中,运行策略管理,主要完成模型的开始运行时间、运行间隔时间、结束运行时间等运行参数的配置;运行控制管理,主要完成模型运行的启停控制。

(3) 日志管理

实现故障预警模型的历史运行日志查询和导出功能。历史运行日志内容包括模型名称、关联风电机组编号、是否运行成功、开始运行时间和结束运行时间等信息。

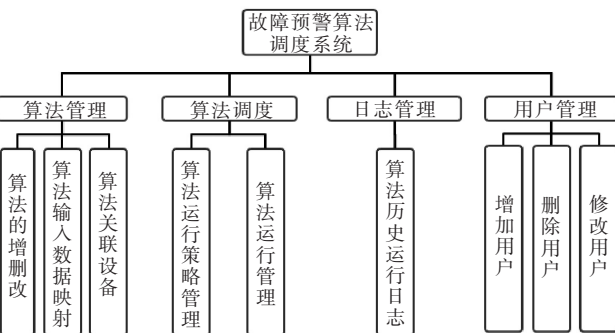


图3 模型调度模块功能结构

1.2.3 可视化展示模块

为方便用户查看平台中故障预警模型的运行情况,需要为风电场运维和管理人员提供一套用户友好的可视化界面。基于以上需求设计了可视化展示模块,主要用于平台与用户的交互。图4为可视化展示模块的功能结构,各主要功能设计说明如下。

(1) 风电场整体预警监控

主要实现对全场风电机组故障预警运行情况的可视化监控,包括全场故障预警触发统计、已部

署模型清单以及预警模型的实时触发情况。

(2) 单机预警实时监控

主要实现单台风电机组已部署预警模型的可视化实时监控,包括预警模型近两周的趋势图、模型单次运行的源数据、判据数据及运维建议。

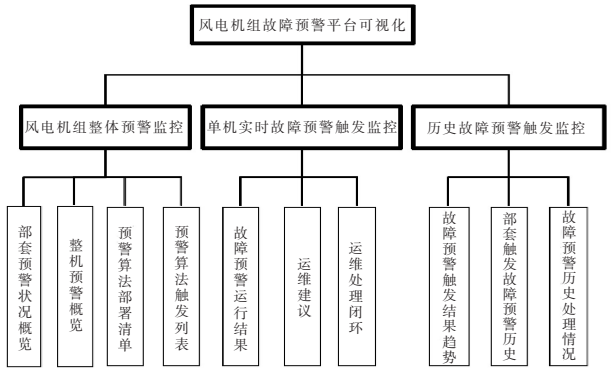


图4 可视化展示模块功能结构

(3) 历史预警监控

主要实现预警模型历史运行结果的可视化查询,包括模型的历史运行结果、历史预警结果及触发预警的历史处理情况。借助上述历史结果评估预警模型的准确性,为持续优化并提升预警模型的准确度提供依据。

1.2.4 对外 API 网关模块

随着当前风电机组设备大型化、复杂化的发展趋势,依靠单个的系统或平台管理风电场的运维已日渐捉襟见肘,系统和平台间的数据共享已成为风电管理类平台的发展趋势和方向。对外 API 网关模块主要用于多风场数据集成及与第三方平台的数据共享。对外以 HTTP 协议统一提供数据,第三方系统通过访问 API 网关,获取平台的模型实时运行数据和历史运行数据等信息。同时,对外 API 网关模块还设计了验签、鉴权、限流、降级等功能,从而保障第三方系统的安全、快速接入。

2 故障预警功能实现

在风电场连接到电网前,通常通过安装的 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition,数据采集与监视控制系统)采集和处理风电机组的气象和运行状态数据,为现场运行和远程监控提供人机界面,并可根据管理人员发出的指令对风力发电机组进行远程控制。^[15]国内外学者关于风电机组设

备状态监测的研究中,基于 SCADA 数据和基于振动传感器信号是两大热门研究方向。^[16-17] 基于振动传感器信号的风电机组设备状态研究大部分研究集中在故障诊断方面,而 SCADA 数据参数多且数据量庞大,但数据采集频率较低,更适用于故障预警研究。^[18] 同时,基于 SCADA 系统开展风电机组的故障预警技术研究,无需加装额外的传感器,在当前风电平价上网和降本需求日益突出的行业背景下更具经济性。^[19] 本文重点研究基于 SCADA 数据的故障预警功能实现。

通常,SCADA 采集的风电机组运行数据具有以下特点:数据粒度多为秒级和分钟级、数据无故障标签、数据无准确故障时间、数据多为温度传感器数据。基于上述有限的数据尤其是在没有故障标签数据的情况下,很难对特定故障建立模型。因此,本文提出一种基于异常偏离检测的故障预警通用设计方法,具体设计思路为:首先定义偏离正常的状态为异常;其次定义正常状态下的物理过程为正常;最后异常即对正常的偏离,通过分类模型或距离来度量这种偏离状态并对偏离的程度进行量化,从而实现异常程度的判断。基于异常偏离监测的故障预警流程如图 5 所示,针对特定被监测故障的故障预警流程如下。

(1) 由于 SCADA 系统的存储或人为原因可能导致 SCADA 系统采集的部分数据为空值或异常值,需要清洗这部分数据。^[20] 为保证清洗后的数据量满足算法训练需求,采集 SCADA 不低于 30 天的历史运行数据并对其进行预处理,按预处理类型可分为零数据及空数据预处理、数据缩减预处理和工况筛选预处理等类型。其中,零数据及空数据预处理用于消除采集过程中因传感器故障、控制器通道故障或采集程序异常等原因导致数据为零或空的无效数据。数据缩减预处理用于在不失去原有数据特征的情况下将连续采集的数据降采样压缩为 5 s 间隔或 10 min 平均的数据。工况筛选预处理使用风机主状态、散热风扇启动、并网转速、报警和故障整定值、历史故障记录等条件筛选处于启动及正常发电状态下的历史健康运行数据。

(2) 依据被检测故障特点,提取表征被检测故障的特征数据,将预处理后的特征数据依据数据特

点选取合适算法离线训练并保存模型,将其作为被监测故障的正常基线。对于同类型多变量的特征数据(如变桨电机速度值、变桨电机温度值、偏航电机速度值等),首先将同类型的多组特征数据进行两两差值的二次处理并将其进行离散化处理,最终将离线预训练后的一组特征向量作为正常基线;对于单变量的特征数据(如主轴轴承温度值、齿轮箱轴承温度值、发电机轴承温度值等),将基于特征数据离线预训练的预测模型作为正常基线。同时,对预处理后的特征数据根据 3σ 准则进行统计学分析,将计算得到的 3σ 上下限作为正常基线的阈值范围,用于识别实际运行状态下被检测故障特征数据的异常数据。

(3) 依托边缘计算模块采集和预处理后的实际运行数据,在线提取固定采集周期下(24 h)表征被监测故障的特征数据,使用和训练正常基线一致的算法再计算一组实际基线。对于被监测故障特征数据为同类型多变量的情况,实际基线为当次采集周期下基于实际运行数据计算的一组特征向量;对于被监测故障的特征数据为单变量的情况,实际基线为当次采集周期下的特征数据实测值。

(4) 对于固定采集周期下实际基线为一组特征向量的情况,借助马氏距离计算实际基线(基于实际运行状态数据计算的特征向量)与正常基线(离线预训练的特征向量)的距离值,用于度量当次采集周期下被检测故障和健康状态的实际偏差程度;对于固定采集周期下实际基线为被检测故障特征数据实测值的情况,基于离线预训练预测模型计算预测值概率残差图与实际值概率残差图的顶点距离,用于度量当次采集周期下被检测故障和健康状态的实际偏差程度。随后借助步骤 2 得到的正常基线阈值范围,将正常基线与实际基线的偏差值映射为更为语义化的 0 到 100 数值区间的健康值。

(5) 将故障预警输出的健康值按所属区间分级输出为四个等级的预警,即正常(60 100]、关注[40 60)、异常[20 40)和严重异常[0 20)。其中,“关注”对应数据区间为大于等于 40 且小于 60,“异常”对应数据区间为大于等于 20 且小于 40,“严重异常”对应数据区间为大于等于 0 且小于 20。同时,

为便于运维人员进一步分析评估设备异常程度,将上述四个等级预警按运维紧急程度划分为四类,作为运维建议进行输出。四类运维紧急程度分别定义为:继续运行、下次登机处理(3个月内)、尽快处理(2周内)和立即处理(48h内)。故障预警等级及紧急程度定义见表1。

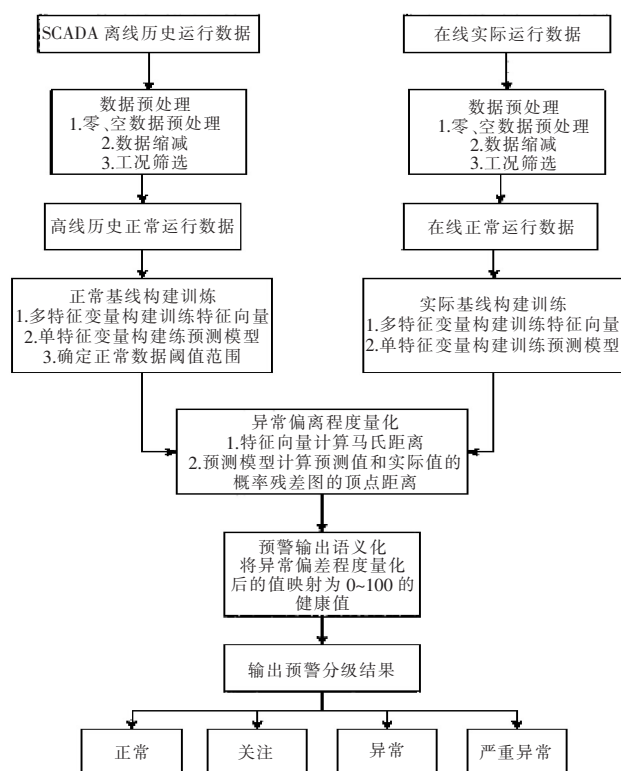


图5 基于异常偏离检测的故障预警流程

表1 预警等级及紧急程度的定义

故障预警健康值	预警等级	运维紧急程度
[0 20]	严重异常	立即处理(48 h 内)
(20 40]	异常	尽快处理(2 周内)
(40 60]	关注	下次登机处理(3 个月内)
(60 100]	正常	继续运行

3 平台应用

为验证平台实际应用效果,以内蒙古霍林河某风场为试点,将平台部署应用于该风场进行监测运行。

3.1 预警结果界面整体设计

为方便直观查看故障预警模型的运行情况,需设计一套用户友好的可视化界面供现场运维及管

理人员查看。因此,每个故障预警模型均需结合自身数据特点设计对应的预警结果界面。如图6所示,故障预警结果界面整体设计了以下四个部分。

(1)左侧上半部分①,按照运维经验知识并结合故障产生机理,对不同等级预警结果提供运维建议,现场运维人员参考运维建议制订合理的运维计划。

(2)左侧下半部分②,为预警模型最近两周预警健康值的趋势图,点击任一健康值时右侧图表联动显示当次运行周期下的输入数据及预警结果判据。

(3)右侧上半部分③,为预警模型当次运行周期下的源数据。

(4)右侧下半部分④,为预警模型当次运行周期下的预警结果判据,用户借此可对当次模型运行结果有更加直观地认识。



图6 变桨电机控制异常预警实际运行界面

3.2 变桨控制异常预警应用测试

如图7为变桨电机控制异常预警应用测试期间的运行结果。通过点击图7中②健康值趋势图的任一点(对应一个采集周期下模型输出的健康值),图7中①可查看对应采集周期下的运维建议,图7中③可查看变桨电机1速度、变桨电机2速度、变桨电机3速度等原始特征数据以及风速和功率数据,图7中④可查看当次采集周期下变桨电机1速度、变桨电机2速度和变桨电机3速度两两速度差的残差概率图和离线训练的健康状态下的残差概率图。对比查询部署预警算法风电机组的历史故障记录,未发现变桨电机速度类故障,登机检查变桨电机未发现明显异常。测试结果表明,变桨控制异常预警结果未出现误报。



图7 故障预警结果界面整体设计框架

3.3 发电机轴承温度异常预警应用测试

如图8为发电机轴承温度异常预警应用测试期间的运行结果。通过点击图8中②健康值趋势图的任一点(对应一个采集周期下模型输出的健康值),图8中①可查看对应采集周期下的运维建议,图8中③可查看发电机轴承预测温度模型的源数据、温度实际值和预测值的对比曲线以及风电机组转速和功率数据,图8中④可查看当次采集周期下发电机轴承温度的残差分布图。



图8 发电机轴承温度异常预警实际运行界面

测试期间发现:2021年9月份预警结果中监测到现场T37#风机的发电机轴承温度异常预警触发“关注”级预警(如图8所示)。同时,从图8中的④残差图也可直观看出,对应采集周期下预警模型计算的残差值已明显偏离正常阈值范围。但当时现场运维人员未引起足够重视,未及时登机检查。至2021年11月初,该台风机频报“发电机轴承温度高”故障停机。现场运维人员登机检查后发现,发电机轴承已存在不可修复的机械损伤,轴承内部出现大量机械磨损碎屑(如图9所示),确认发电机已无法继续运行,需下架更换。测试结果表明,依托平台监测的发电机轴承温度异常预警,早于故障发生前近两个月触发预警。



图9 发电机轴承内部碎屑

4 结语

平台面向风电场站部署应用,融合边缘计算、人工智能、信息工程等技术,基于风力发电机组实时运行数据连续监测风电机组设备发生故障预警风险,为风电机组的运维提供科学的决策依据。借助平台搭建场站级预测性维护体系数字底座,保障风电机组的长期安全、稳定的运行。目前,平台已应用到全国近40多个新建风电项目中。

参考文献:

- [1] 刘帅. 基于实时监测数据挖掘的风电机组故障预警方法研究[D]. 华北电力大学(北京), 2019
- [2] 张滨泉. 基于集团级大数据中心的智慧风电运营关键技术研究及应用. 北京市, 龙源电力集团股份有限公司, 2020-06-12
- [3] LI Yang, SHEN Xiaojun. Anomaly Detection and Classification Method for Wind Speed Data of Wind Turbines Using Spatiotemporal Dependency Structure[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 4(14): 2417-2431
- [4] 曾军, 陈艳峰, 杨苹, 等. 基于小波变换和峭度的风力发电机组轴承故障诊断[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 46-51
- [5] 李天楚, 容斌, 伍智鹏, 等. 基于边缘计算的风电群非故意发射超高次谐波抑制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 200-206+215
- [6] 田猛, 吴劲芳, 杨林, 等. 风电场运维管理体系实践[J]. 电力安全技术, 2020, 22(7): 25-28
- [7] 祝旭. 故障诊断及预测性维护在智能制造中的应用[J]. 自动化仪表, 2019, 40(7): 66-69
- [8] 赵静, 余恒洁, 林聪, 等. 基于边缘计算的智能电网多源异构数据监测[J]. 信息技术, 2023(9): 77-82+90
- [9] 李特, 王荣喜, 高建民. 风电机组数据采集与监控系统异常数据识别方法[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(3): 106-116
- [10] 张喜平, 吴智泉, 吴春, 等. 基于边缘计算的智慧风场数据采集与分析计算方法[J]. 电工技术, 2021(10): 54-57+79
- [11] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924
- [12] 彭鹏, 薛东. 基于边缘代理的云边协同物联网框架设计及其应用研究[J]. 广东电力, 2023, 36(5): 18-26

- [13] 罗鸿轩,肖勇,杨劲锋,等. 基于边缘计算与 MapReduce 的智能量测终端数据处理方法[J]. 智慧电力,2020,48(3):22-29
- [14] 谢玮,夏水斌,何行,等. 基于边缘计算的电力末端融合系统的优化[J]. 电测与仪表,2019,56(16):61-66
- [15] 张传俊,张春芳,李艳华,等. 基于人工智能的故障预警系统研究[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版),2020,34(4):52-56+114
- [16] LIU Yuhan, ZHENG Yuqiao, MA Zhuang, et al. Wind Turbine Spindle Operating State Recognition and Early Warning Driven by SCADA Data[J]. Energy Engineering, 2023, 120(5):1223-1237
- [17] PENG Jieyang, KIMMIG Andreas, NIU Zhibin, et al. Wind turbine

failure prediction and health assessment based on adaptive maximum mean discrepancy[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 134:107391

- [18] 夏博,李春杨,万露露,等. 基于深度学习的风力发电机组故障预警方法研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9):3577-3587
- [19] 杨靖文,张双益. 陆上风电场技术降本方案研究[J]. 能源与环境,2020(1):65-67
- [20] 李琰. 风力发电机组故障预警策略探讨[J]. 机电信息, 2022(5):48-51

(上接第 53 页)

- [10] 韩长江,丁俊芳. 物联网分布式拒绝服务攻击流量检测研究概述[J]. 通信电源技术,2020,37(3):185-186
- [11] 谢云云,严欣腾,燕子敖,等. 面向交直流混联电网的虚假数据注入攻击策略优化[J]. 电力工程技术,2023,42(4):94-101
- [12] 黄健. 基于欺骗防御技术的网络安全攻击检测与实现[J]. 邮电设计技术,2023(8):62-66
- [13] 王英哲. 如何防止勒索软件攻击[J]. 计算机与网络,2021,47(5):49-50
- [14] 黄轲轩. 二进制漏洞利用可视化系统的设计与实现[D]. 华中

科技大学,2021

- [15] 林思昕. 基于差分隐私的数据分析技术研究[D]. 广州大学,2023
- [16] 高升,张伟,龚海里,等. 基于未知输入观测器的直流电机鲁棒故障估计[J]. 测控技术,2023,42(3):134-142
- [17] 夏蕾,杨蕾,王国卉,等. 基于 KL 散度的含储能机组组合分布鲁棒优化方法[J]. 电测与仪表,2022,59(7):106-113
- [18] 袁昊,王雪,郝婷. 基于区块链技术的电网数据认责溯源体系设计[J]. 自动化技术与应用,2023,42(11):105-109

(上接第 57 页)

(2) 工程设计中主要通过控制脱硫塔直管段高度来对控制停留时间。结果表明,停留时间对于脱硫效率的影响较小,对于减温水蒸发的影响较大。脱硫塔直管段的高度在 18 000 mm 时,减温水的蒸发量已达到 94 %,考虑到数值计算误差的影响,可以认为已经完全蒸发。因此可以考虑选取文丘里管数值段高度为 18 000 mm 的高度为最佳高度。

参考文献:

- [1] 李凤果,熊仁艳,张敏,等. 烟气脱硫技术应用于电解铝的研究进展[J]. 现代化工,2023,43(S2):72-75

- [2] 荆楚瑶. 烟气脱硫的研究进展及煤基固废物的资源化利用[C]//中国环境科学学会. 第二十五届大气污染防治技术研讨会论文集. 内蒙古工业大学化工学院, 2021:13-16
- [3] 王超,宋国良,吕清刚. 循环流化床超低 NO_x 与 SO_2 排放技术研究进展[J]. 洁净煤技术,2021,27(4):17-25
- [4] 吴珣,刘鹏,魏楠,等. 循环流化床脱硫塔气固流动特性 CPFD 模拟[J]. 中国电机工程学报,2020,40(10):3229-3241
- [5] 刘鹏. 循环流化床脱硫塔内多相流动与脱硫特性的数值模拟研究[D]. 内蒙古科技大学,2021
- [6] 郁连,陈静,周冠文. 烧结烟气循环流化床脱硫塔结构设计优化[J/OL]. 材料与冶金学报,1-14[2025-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1473.tf.20240111.1330.002.html>
- [7] 许聪,赖雅茹,周冠辰,等. 扰流器作用下循环流化床烟气脱硫塔内流动行为研究[J]. 热科学与技术,2023,22(2):181-190

基于数据分析的风机叶片异常状态监测

肖文静 刘征宇* 王多平 洪成骐 王正杰

东方电气集团科学技术研究院有限公司,成都 611731

摘要:在风机大型化、低成本化叠加基于碳纤维复合材料轻量化叶片应用的背景下,叶片断裂事故频发,当前保障风电场无故障运行是客户首要关注内容。本文分别建立了基于长短期记忆网络(LSTM)的自编码神经网络模型、基于 Bootstrap 阈值的多元控制图模型,对风机叶片运行数据开展了分析和异常状态监测,两种方法均能较好地抑制噪声,获得叶片状态异常状态。

关键词:风机叶片;状态监测;故障诊断;振动分析

中图分类号:TM614

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)03-0084-05

Monitoring of Abnormal States of Wind Turbine Blades Based on Data Analysis

XIAO Wenjing, LIU Zhengyu*, WANG Duoping, HONG Chengqi, WANG Zhengjie

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

Abstract: Against the backdrop of the large-scale development and cost reduction of wind turbines, coupled with the application of lightweight blades made of carbon fiber composite materials, blade fracture accidents occur frequently. Currently, ensuring the trouble-free operation of wind farms is the primary concern of customers. This paper establishes a self-coding neural network model based on Long Short-Term Memory (LSTM) and a multivariate control chart model based on the Bootstrap threshold respectively. The operation data of wind turbine blades are analyzed, and the abnormal states are monitored. Both methods can effectively suppress noise and identify the abnormal states of the blades.

Key words: wind turbine blades; condition monitoring; fault diagnosis; vibration analysis

近年来,随着碳减排碳中和及构建新型系统的迫切需求,国内风电装机规模不断增大,2024 年国内风电新增并网装机约 88 GW。截至 2024 年底,风电累计并网装机容量约 5.3 亿千瓦,在整个电源结构中占比超 15 %。此外,海上风电延续增长态势,加速向漂浮式和机组大型化发展,当前并网容量已超 3 900 万千瓦,占全球总容量 50 %。与此同时,国内风电整机市场竞争日趋白热化。2020 年以来,风机大型化快速推进,叠加行业竞争加剧,风电产业链成本与价格快速下降,2024 年 9 月整机中标均

价 1 475 元/千瓦,较 2020 年高点已下降 65 %。

在风机大型化、低成本化叠加基于碳纤维复合材料轻量化叶片应用的背景下,叶片断裂事故频发,如海南某风场 20 MW 风电机组叶片断裂;湖南永州某风电场叶片断裂等,造成巨大经济损失且对品牌造成恶劣影响。当前,保障风电场无故障运行是客户首要关注内容,智慧风电场的发展趋势是,借助数字化、人工智能技术等手段改变设备运维模式,变“被动”为“主动”、变“告警”为“预警”,开展预测性维护,提升工作效率、降低运营维护成本。

收稿日期:2025-03-20

基金项目:国家重点研发计划项目:亚临界煤电机组深度灵活调峰关键技术及工程示范;项目编号:2023YFB4102900。

作者简介:肖文静(1987—),女,工学硕士,高级工程师,研究方向发电机组智能化、人工智能技术。

刘征宇(1982—),男,工学硕士,高级工程师,研究方向发电机组智能化、状态检修。

1 风机叶片异常状态监测

风电机组叶片穿透损伤监测及诊断关键技术是基于材料科学、传感技术与智能算法深度融合的综合性状态评估技术,旨在通过非侵入式手段实时捕捉叶片内部结构损伤并实现精准诊断。风机叶片的状态监测与故障诊断通常根据数据采集与监视控制系统(SCADA)数据、振动、图像、声纹和热感等多源数据,构建物理和机器学习模型进行数据挖掘和状态评估^[1]。

随着人工智能、物联网与高精度传感技术的突破,该领域技术体系持续完善:传统无损检测技术(如超声波、X射线)不断优化,与激光扫描、光纤传感等新兴技术形成多模态协同检测体系,例如超声波检测在分层缺陷识别中展现高灵敏度,而激光检测可精确捕捉表面微裂纹。然而,技术应用仍面临环境干扰(如高风速、温度波动)、全生命周期数据建模复杂度高、多源异构数据融合标准缺失等挑战。

基于振动数据的叶片异常状态监测与故障诊断技术通常使用专业的振动传感器或加速度计测量数据,采集叶片在运行过程中的振动信号,通过对振动信号的分析,如频率、振幅、相位等特征,来判断叶片是否存在异常。优势是不受叶片位置 and 环境的限制,可实现远程监控,但振动信号易受外界环境干扰,如风速、风向变化等,可能导致误判。

声学检测法利用声学传感器采集叶片在运行过程中产生的声音信号,分析声音的频率、幅值等特征,判断叶片是否存在异常。例如,当叶片表面有裂纹扩展或部件松动时,会产生特定频率的噪声。优点是对叶片表面和内部缺陷都有一定的检测能力,缺点是对于一些低频声音信号的检测和分析较为困难,且成本相对较高。

红外热成像、超声波等检测方法通常需要在叶片停机状态下进行检测,难以实现在线分线和故障诊断。

2 基于自编码神经网络的异常检测方法

由于风电机组叶片振动数据缺少标签、环境噪声大,本文采用一种使用自编码(Autoencoder)神经网络算法的异常检测工具,使用长短期记忆(Long

Short-Term Memory, LSTM)作为神经网络单元的自编码器。本方法适用于无监督学习场合,模型能够捕捉到数据的真实特征,抑制噪声的影响,可实现风机叶片振动序列数据的关键特征提取和序列重构任务,识别准确率高。

2.1 自编码神经网络

自编码神经网络是一种特殊的无监督学习神经网络堆叠形式,具有对称的结构,由编码器和解码器两部分组成。编码器将输入数据映射到低维空间,解码器再将低维表示映射回原始数据空间,整体上呈现一种“压缩-解压”的架构,目标是使网络输出与输入近似相同,其结构如图1所示。

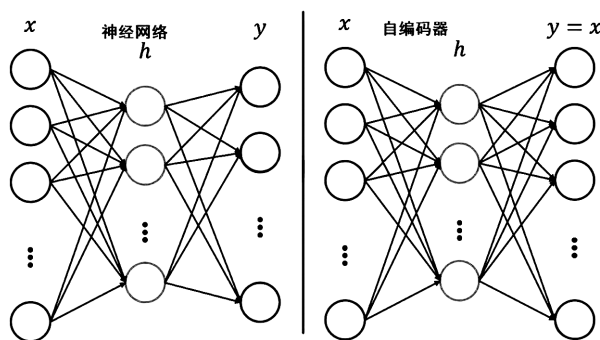


图1 自编码神经网络结构

本文构建的风机叶片异常状态监测算法,采用长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)作为神经网络单元的自编码器。将输入序列记作 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_T\}$, 其中 x_t 是第 t 时刻的输入向量, T 是序列的长度。在 LSTM 编码器中,每个时刻的计算步骤如下。

(1) 遗忘门:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1)$$

其中, σ 为激活函数,可采用 Sigmoid 函数、ReLU 函数等,本文采用 Sigmoid 函数; W_f 是遗忘门的权重矩阵; b_f 是遗忘门的偏置向量; $[h_{t-1}, x_t]$ 表示将 h_{t-1} (上一时刻的隐藏状态) 与 x_t (当前时刻的输入) 拼接。

(2) 输入门:

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (2)$$

其中, W_i 是输入门的权重矩阵; b_i 是输入门的偏置向量; 输入门决定了当前时刻的输入 x_t 有多少信息需要被添加到记忆细胞中。

(3) 候选记忆细胞:

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (3)$$

(4) 记忆细胞更新:

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t \quad (4)$$

(5) 输出门:

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (5)$$

(6) 隐藏状态更新:

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \quad (6)$$

经过 T 个时间步的计算后,取最后一个时间步的隐藏状态 h_T 作为 LSTM 编码器的输出。

本文同样采用 LSTM 作为解码器,计算过程与编码器类似。将初始隐藏状态、记忆细胞状态分别设置为编码器的最后一个时间步的隐藏状态 h_T 和记忆细胞状态 C_T 。

$$\hat{x}_t = \text{softmax}(W_{\text{out}} h'_t + b_{\text{out}}) \quad (7)$$

其中, W_{out} 是输出层的权重矩阵; b_{out} 是输出层的偏置向量; softmax 函数用于将输出转换为概率分布。

自编码神经网络的目标是最小化重建误差,损失函数采用均方误差(MSE)损失函数:

$$\text{saL} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \|x_i - \hat{x}_i\|^2 \quad (8)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示向量的范数。通过不断最小化损失函数 L ,可以训练自编码器,使得编码器能够学习到输入数据的有效表示,解码器能够将编码表示还原为原始输入。

本文构建的基于自编码神经网络的异常检测算法流程如图 2 所示。

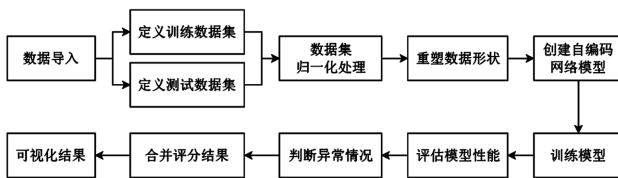


图2 基于自编码神经网络的异常检测算法流程

2.2 数据采集与处理

数据来源为某风电场中的 8 台风机三支叶片的振动监测系统的采集数据,系统采集信号的采样频率为 2 560 Hz,采样点数为 128 kB。采集数据时间为 2023 年 6 月至 2024 年 1 月。根据叶片摆振 X 和叶片挥舞 Z 两个维度的加速度时序数据分析风机叶片的运行情况。叶片振动信号噪声较

大,主要为低频振动,且叶片旋转时会产生与叶片旋转周期相同的正弦干扰。^[2]经测试对比,本文采用 Butterworth 高通数字滤波器,截止频率选择为 0.1 Hz,滤波阶数为 10 阶。图 3 为该风场#5 风机 1 号叶片振动信号滤波前后效果对比,可见噪声抑制效果明显。

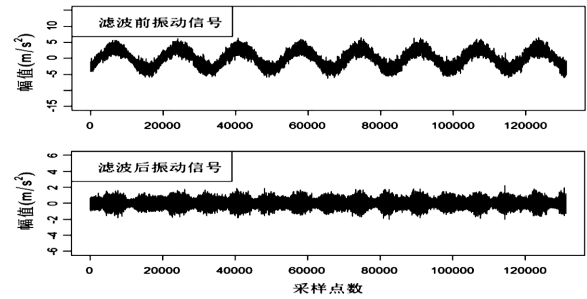


图3 #5 风机 1 号叶片振动信号滤波效果

2.3 算例验证及异常监测结果

首先,通过构建自监督神经网络实现时序数据的特征表达和单个叶片摆振 X 轴和叶片挥舞 Z 轴特征融合,然后利用损失函数进行模型训练。该神经网络能够学习到叶片在 X/Z 轴上的运动特征,并融合这些特征,以使得输入序列和预测序列的均值差异最小。

然后,通过融合参数,获取每个子序列中各叶片的时空特征。然后,通过比较三个叶片特征分布的差异大小来判断叶片运行是否异常。叶片时空特征的分布差异,表示不同叶片之间运行情况的差异。当同风机的一个叶片与另两片的特征分布差异大时,表示该叶片异常。

通过以上建模,结合该结果与从力学角度分析结论一致,加速度越小,受损叶片加速度异常越明显,整个风机所有叶片的同步性变差,破损叶片周期性变差尤其明显。

通过分析该风场 16 台风机数据,2023 年 6 月至 2023 年 8 月,风机#1-#16 均不存在单个叶片异常数据的情形。2023 年 9 月至 2024 年 1 月, #4、#5、#8、#14 风机出现明显异常数据,具体如表 1 所示。风机#11、#13 存在较严重样本缺失,推测可能测点损坏或网络异常,难以判断是否有故障。

图 4 为针对#4 风机叶片 3 单独构建的 X/Z 轴融合特征模型,其中 x 轴为时序标记点(对应实际时间), y 轴为误差值。可见 11 月 2 日、11 月 14 日

存在明显异常点,与前述结果一致。

表1 异常状态分析结果

叶片编号	可能发生故障时间
#4 风机叶片 3	2023-11-02, 2023-11-14
#5 风机叶片 1	2023-11-02
#8 风机叶片 3	2023-09-28, 2023-09-29
#14 风机叶片 1	2023-12-23
#14 风机叶片 3	2023-12-25

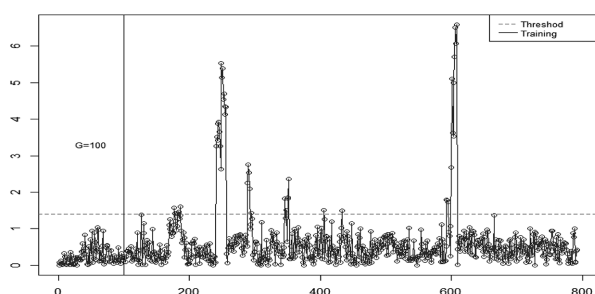


图4 #4 风机3号叶片 X/Z 轴融合时序模型

3 基于 Bootstrap 控制图的异常检测方法

研究同时采用了多元控制图方法来建立叶片状态评估模型。首先基于实际采集的叶片振动数据建立了叶片状态的评估指标,即故障敏感特征(Fault Sensitive Features, FSF),并利用 Hotelling T^2 控制图对叶片进行状态监测^[3],其中阈值设定采用 Bootstrap 方法。结果表明,基于 Bootstrap 的 Hotelling T^2 控制图可有效监测到叶片状态的变化,并及时诊断预警叶片异常振动状态。

3.1 基于 Bootstrap 的多元控制图

采用多元控制图,利用统计假设检验,可以系统性地区分预设的正常振动状态和未知的异常振动状态。当 T^2 控制图中的统计量超出控制阈值(Control Limit, CL)时,认为过程发生了偏移,具体如下。

定义一个 p 维 FSF 向量 X_t ,假设其均值和方差矩阵为:

$$EX_t = \mu_t \quad (9)$$

$$\text{Var}(X_t) = \Sigma$$

当某一支叶片发生异常振动时,FSF 向量 X_t 的均值发生偏移,表示为:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_t &= \mu_0, t=1, \dots \\ H_1: \mu_t &= \mu_0, 1 \leq t \leq k; \mu_t = \mu_0 + \delta, t > k \end{aligned} \quad (10)$$

其中 δ 表示偏移量, k 为失控时刻。

传统控制阈值 CL 的设定依赖于从业人员的经验或 FSF 的统计分布。实际应用中,若向量 X_t (叶片振动信号)不服从正态分布,诊断结论会发生较大误差,难以满足需求。

采用 Bootstrap 方法来确定控制图的控制阈值 CL,具体如下:

(1) 从训练阶段样本 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 中有放回地抽取 Bootstrap 样本 $\{X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*\}$;

(2) 计算 Bootstrap 样本下的 T^2 统计量 $\{T_1^*, T_2^*, \dots, T_n^*\}$, 其中:

$$T_i^{2*} = (X_i^* - \overline{X_1^*})^T S_{X^*}^{-1} (X_i^* - \overline{X_1^*});$$

(3) 重复抽取 B 次,得到 $B \times n$ 个 Bootstrap T^2 统计量;

(4) 将所有 Bootstrap 统计量按照从小到大的顺序排列,并取控制阈值 CL 为:

$$CL_{B,\alpha} = T_{\lfloor B(1-\alpha) \rfloor}^{2*} \quad (11)$$

根据风场业主需求,将报警层级划分为 2 层,第一层为“异常”,阈值 CL 设置为 $CL_{B,\alpha}$;第二层为“报警”,阈值 CL 设置为 $CL_{B,\max}$,即所有 Bootstrap 统计量的最大值。

3.2 数据采集与处理

数据来源与 2.2 节一致,并采取同样方式滤波。本方法将同一台风机三支叶片的振动信号分割为 8 个短时间信号片段,提取这些片段中三支叶片振动信号的均方根(RMS)特征,并分别记为 RMS_{1t} , RMS_{2t} , RMS_{3t} 。

$$RMS = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

对三支叶片提取的 RMS 序列进行两两作差,以此作为叶片状态评估指标(故障敏感特征):

$$X_t = \begin{pmatrix} \text{diff}_{1t} \\ \text{diff}_{2t} \\ \text{diff}_{3t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RMS_{1t} - RMS_{2t} \\ RMS_{2t} - RMS_{3t} \\ RMS_{3t} - RMS_{1t} \end{pmatrix} \quad (13)$$

当某一支叶片出现异常振动后,该叶片的振动强度将与另外两支叶片产生显著区别,因而 X_t 将发生明显偏移。

提取#5 风机正常运行状态下的故障敏感特征,如图 5 所示,可见正常状态下的故障敏感特征分布均匀。为了对三支叶片进行状态监测,将正常振动状态

下的故障敏感特征 X_i 用于训练 T^2 控制图,并基于训练完成的 T^2 控制图对后续收集到叶片振动信号的故障敏感特征进行监测,以检测叶片的异常振动。

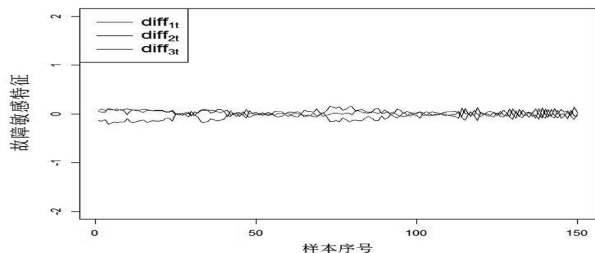


图5 #5 风机叶片 FSF 时域图

3.3 算例验证及异常监测结果

对#5 风机三支叶片正常状态下的振动信号进行预处理后提取故障敏感特征样本,使用前 150 个样本训练控制图并确定控制限(报警阈值)。

使用训练完成的控制图对后续振动信号的故障敏感特征进行监测,对#5 风机 1 号叶片进行状态监测的结果如图 6 所示。可见样本点 600 左右 T^2 统计量明显增大并超出报警阈值。对应异常发生的时间为 2023 年 11 月 2 日左右,与方法 1 的分析结论一致。

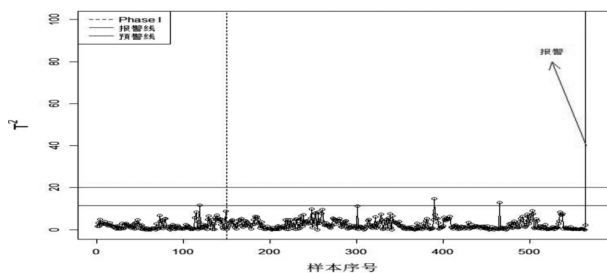


图6 #5 风机 1 号叶片状态监测结果

对比异常振动前后#5 风机三支叶片振动 RMS 信号,如图 7 所示,可见叶片 RMS 显著高于其他两支叶片,分析结论正确。

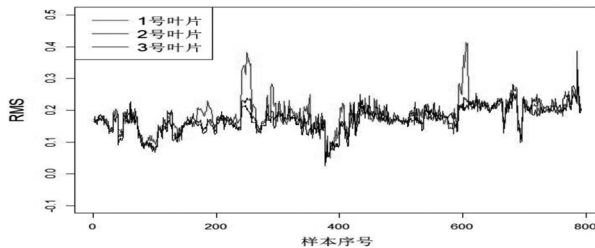


图7 #5 风机 1 号叶片状态监测结果

4 结语

研究分别采用了 LSTM 自编码神经网络、Bootstrap 多元控制图两种方法,对风机叶片运行数据开展了分析和异常状态监测。两种方法均能获得叶片状态异常状态,且与风场运行人员提供的反馈信息基本吻合。

受风场故障样本信息、传感器种类和数量限制,本文研究仅限于风机叶片明显故障。后续将针对风机叶片早期故障开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 龙寰,杨婷,徐劭辉,等. 基于数据驱动的风电机组状态监测与故障诊断技术综述[J]. 电力系统自动化,2023,47(23):55-69
- [2] 王博特,王宇楠,郑涛,等. 大型风力发电机叶片振动测试与分析[J]. 噪声与振动控制,2021, 41(4):253-258
- [3] 孙静,杨穆尔. 多元自相关过程的残差 T^2 控制图[J]. 清华大学学报(自然科学版),2007(12):2184-2187

欢迎投稿,欢迎订阅!