

东方电气评论

第三十九卷 第二期

二 0 二 垣





- ◎ 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



公开 ISSN 1001-9006 发行 CN 51-1333/TM

第39卷第2期(总第156期) 国内邮发代号: 62-187 出版日期:2025年3月25日 国内定价:8.00元

ISSN 1001-9006 CN 51-1333/TM



# 京家氣評論

中国东方电气集团有限公司 四川省动力工程学会





京方電氣評論

E

次

伯 梠 禾 吕 스	
	基础研究
土仁安贝: 叻修宝	质子交换膜燃料电池建模方法概述 李敏 胡小勇 张媛(1)
副主任委员・ 董娜 庫健	TOPCon 电池正面银浆用单分散银粉的制备 ••• 杨隽 朱健 张乾等(8)
	核能发电
委员:王大伦 王拯元 王 騃 艾 松 石清华	某核电汽轮机高中压汽缸总装过程数据分析
卢 洪 令红兵 冯 涛 刘泰生 刘德民	周赵伟 陈贝贝 李继朝等(12)
江国焱 孙 奇 李维成 李 婷 李曦滨	第四代核电超高压汽轮机高压外缸设计优化
杨金炳 邹 杰 宋聚众 陈文学 范小平	李继朝 邓凌宇 周赵伟等(18)
周杰赵永智钟连兵袁凌莫尔兵	风力发电
吴春冯 辞 体 采仪伟 討平女 冒明晶 谢光友 哥治国 춃成毅 雪 宝 逶级成	风力发电机组柔性塔架左右阻尼控制 兰杰 林淑(22)
	永磁直驱风力发电机异常工况转轴变形分析 李正飞 杨程涛(28)
	火力发电
秘书长・唐健	基于 PLM 的锅炉管道保温材料计算软件开发 郭峰(33)
	300 Mvar 空冷调相机稳态负序能力分析 肖翦 周光厚 李朝科等(38)
	基于 Workbench 的汽轮机低压叶片振动特性研究
	苟小平 范志飞 程叶叶等(44)
主管: 中国东方电气集团有限公司	径流式叶轮固有频率的影响因素分析 刘晋宾 陈贝贝 梁文杰等(50)
主办: 中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会	数字制造
主编:胡修奎	智能制造:引领未来工业的发展方向
副主编:董娜 唐健	基于线激光扫描的锅炉管件坡口尺寸检测研究
本期责任编辑:李宏	卓磊 缪玉鸿 周东等(63)
英文编辑:张媛	工程技术
编辑出版:《东方电气评论》编辑部	某火力发电厂磨煤机基础改造实践 王雪 徐健 黄子轩等(68)
地址:成都市高新西区西芯大道 18 号	线缆制造业车间照明节能改造探究 程亚兵(73)
邮编: 611731	电力电子与控制
电话: 028-87898263	国产自主分散式控制系统与云平台一体化架构设计
电子信箱: dfdqpl@dongfang.com	温云皓 张亚平 马劲松等(78)
投稿网址: http://dfdqpl.xml-journal.net/	PLC 在透平压缩一体机控制保护系统中的应用 何阳森(81)
印刷单位:成都市新都华兴印务有限公司	UPS 防短路越级跳闸保护技术研究 周恩思 贾春娜(86)
国内发行:四川省报刊发行局	简讯
国外发行:中国出版对外贸易总公司北京 782 信箱	

[期刊基本参数]CN51-1333/TM\*1987\*q\*A4\*88\*zh\*p\*¥8.00\*750\*17\*2025-02

# DONGFANG ELECTRIC REVIEW



## CONTENTS

#### BASIC RESEARCH

Review on Modeling Methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Data Analysis of High and Medium Pressure Cylinder Assembly Process for a Nuclear Power Turbine ...... ZHOU Zhaowei, CHEN Beibei, LI Jichao, et al (12) Design Optimization of High Pressure Outer Cylinder of the GEN-IV Nuclear Power Ultra-high Pressure Steam Turbine

..... LI Jichao, DENG Lingyu, ZHOU Zhaowei, et al(18)

#### WIND POWER

Daming Control of Flexible Tower Side-side for Wind Turbine

Analysis of Shaft Deformation in Abnormal Working Conditions of the PMSG

LI Zhengfei, YANG Chengtao(28)

#### THERMAL POWER

..... LIU Jinbin, CHEN Beibei, LIANG Wenjie, et al (50) DIGITAL MANUFACTURING

#### POWER ELCTRONIC CONTROL

Design of Integrated Architecture of Domestic Autonomous Decentralized Control System and Cloud Platform

WEN Yunhao,ZHANG Yaping,MA Jingsong,et al(78) Application of PLC in the Control and Protection System of Turbine Compressor HE Yangsen(81) Technology for Anti Override Trip Protection of UPS



#### EDITORIAL BOARD Chairman: HU Xiukui

Charman. He Muku

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, SUNQi, 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: LI Hong English Editor:ZHANG Yuan 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 Distrbution by:**

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

## 质子交换膜燃料电池建模方法概述

#### 李敏1 胡小勇2\* 张媛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(福建)创新研究院有限公司,福州 350108

摘要:燃料电池的高效、精确建模预测技术对于其在交通、发电等领域的应用推广极为重要。本文概述了质子交换膜燃料电 池反应机理及建模方法,重点分析了多种维度的机理建模方法与不同算法的数据驱动建模方法,展望了建模方法在燃料电池 性能优化、寿命预测及故障诊断等方向的技术应用与发展趋势。

关键词:质子交换膜燃料电池; 机理模型; 数据驱动模型; 性能优化; 寿命预测

中图分类号:TM911.4 文献标识码:A 文章编号:1001-9006(2025)02-0001-07

#### Review on Modeling Methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

LI Min<sup>1</sup>, HU Xiaoyong<sup>2\*</sup>, ZHANG Yuan<sup>1</sup>

DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;
 Dongfang Electric (Fujian) Innovation Institute Co., Ltd., 350108, Fuzhou, China)

Abstract: The efficient and accurate prediction with fuel cell modeling technology is critical to its commercialization for transportation and power station applications. In this paper, the reaction mechanism and modeling methods of proton exchange membrane fuel cells are reviewed. The multidimensional mechanism modeling methods and various data-driven based methods are summarized. The potential applications of modeling methods on fuel cell performance optimization, lifetime prediction and fault diagnosis are also prospective.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; multi-dimensional mechanism modeling; data-driven modeling; performance optimization; lifetime prediction

质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)是当今最常用的燃料 电池之一,具有高功率密度、低温运行、快速启动和 零排放等优点,可广泛应用于新能源汽车、固定式 电站、便携式电源等领域。随着燃料电池商业化的 进一步发展,对于其在复杂工况下的性能优化、服 役寿命及可靠保障提出了更高的技术需求。<sup>[1-3]</sup>

燃料电池是一个涉及电化学反应、流体力学、 传热传质等多物理过程的复杂非线性系统,其性 能、寿命及可靠性的影响因素众多。在材料部件方 面,涉及高分子膜材料、贵金属催化剂材料、金属或 石墨极板材料等多种理化特性各异的材料;在结构 尺寸方面,涉及纳米级催化剂、微米级多孔介质以 及毫米级阴阳极流场结构设计;在运行工况方面, 涉及电流、温度、压力、湿度等复杂稳动态操作参 数。<sup>[4-5]</sup>因此,建立高效、准确的 PEMFC 模型,探索 燃料电池内部多参数分布特性,精确预测电池稳态 与动态性能,可以支撑燃料电池的设计迭代与控制 参数优化,从而提高其运行可靠性与使用寿命。<sup>[6-8]</sup>

目前,针对 PEMFC 不同层级的技术问题,国内 外已经开展了大量的建模研究工作,研究方法众 多、范围甚广。为了明确燃料电池各模型方法的优

收稿日期:2024-12-12

作者简介:李敏(1988—),女,2012年毕业于复旦大学粒子物理与原子核物理专业,硕士,高级工程师。现任职于东方研究院战略与技术研究 所,主要从事新能源和双碳等领域的研究工作。

胡小勇(1973—),男,1996年毕业于合肥工业大学高分子材料与工程专业,硕士,高级工程师。现任东方电气(福建)创新研究院有限公司副总经理。通信邮箱:huxy@dongfang.com。

#### 京行委員評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

缺点与适用场景,有必要对其进行归纳、总结。本 文首先概述了燃料电池的反应原理与基本构成,在 此基础上综述燃料电池的主要建模方法,重点分析 多维度机理建模方法与不同算法的数据驱动建模 方法两个方面,展望了建模方法在燃料电池性能优 化、寿命预测及故障诊断等方向的应用与发展前景。

#### 1 燃料电池结构与原理

#### 1.1 质子交换膜燃料电池组成结构

PEMFC 电堆由多节相同的单元电池堆叠组成, 以实现更高的输出电压,在汽车应用中可以达到 300多节电池。其中,各节电池通过双极板电子导 电在电路上实现串联,而反应物气体和冷却剂通过 电堆主管道并行分配到每节电池。通常,每节电池 由膜电极组件和双极板组成(图1)。其中,膜电极 由阴阳极气体扩散层、阴阳极催化层以及质子交换 膜组成。氢气(H,)燃料在阳极催化层中氧化成质 子,质子通过质子交换膜传输至阴极,并与阴极催 化层中的氧气发生氧还原反应,在阴极侧生成产物 水。质子在膜内的传输形成内部电流,而被隔膜绝 缘的电子流经外部电路,从而对外发电。双极板部 件与膜电极组件直接装配在一起,并通过密封部件 隔绝氢、氧和冷却剂等流体,从而构建了燃料电池 电堆的总体结构,起到分配反应物、提供冷却剂以 及传导电子的功能。气体扩散层则将燃料和氧化 剂反应物,从双极板的气体流道均匀地传输至催化 剂层,以提高催化层中的反应性能。[9]



图1 燃料电池结构示意图

#### 1.2 质子交换膜燃料电池反应原理

燃料电池的电化学反应过程可分为阳极与阴 极半电池反应两个部分:

其中,阳极侧氢的氧化反应表示为:  
$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$
 (1)

阴极侧氧的还原反应表示为:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \tag{2}$$

燃料电池的全电池反应即为氢与氧电化学反 应生成水、电和热:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + \mathbb{E} + \mathbb{K}$$
(3)

随着燃料电池工作电流密度的增加,输出电压 呈非线性下降。输出电压与理论最大电压之间的 偏差称为极化。其中,理论最大电压为可逆平衡电 位,表示为:

$$E = \frac{\Delta G}{nF} \tag{4}$$

其中,Δ*G*为生成物与反应物的吉布斯自由能 差,是每摩尔燃料产生的最大电能即可逆反应的输 出能量,*n*为氢分子转移的电子数,*F*为法拉第 常数。

对于生成物与反应物的总能量差(焓差),可计 算为:

$$\Delta H = \Delta G + T \Delta S \tag{5}$$

其中 *T* 为温度, Δ*S* 为生成物和反应物之间的熵 差。由于反应过程存在不可逆部分,反应物的能量 不能完全转换为电能,因此燃料电池的能量效率低 于 100 %。

通过可逆反应能量与总能量的比值,可以计算 出燃料电池的理论最大能量效率:

$$g_{\max} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \tag{6}$$

在典型 PEMFC 的极化曲线中(图2),开路电压 (~1 V)小于可逆电池电位(~1.2 V),这部分电压 损失主要是由质子交换膜氢渗透导致的内部电流 引起的。第二部分电压损失是活化极化损失,主要 发生在低电流工作区间,由电极表面发生的氧化还 原反应活性决定,尤其是阴极催化层的氧还原反 应。第三部分电压损失是欧姆极化损失,其下降速 度较慢,几乎呈线性,主要是由电池内阻造成的,由 电子导电相和质子导电相材料的综合电阻来确定。 第四部分电压损失是传质极化损失,表现为电压在 高电流区间的非线性快速下降,取决于电极表面的 反应物浓度与传质速率,其中阴极催化层的氧分压 是极化曲线这一段的主导因素。<sup>[10]</sup>

综合考虑上述电压损失,可以计算出不同电流 密度条件的 PEMFC 电池电压 *E*<sub>cell</sub>:

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{OCV}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{trans}}$$
(7)

实际运行中,燃料电池施加的电流越大,输出 电压越低。<sup>[11]</sup>



#### 2 燃料电池多维度机理建模方法

在过去的几十年里, PEMFC 的基础研究取得 了很大的进展,包括新材料、电池堆设计、系统集 成和控制策略,而 PEMFC 的建模方法在提高性能 和寿命方面发挥了至关重要的作用。<sup>[12]</sup>燃料电池 内部物理化学过程较为复杂, PEMFC 模型需要考 虑电化学反应、两相流体流动和质量传热等效应; 模型描述对象则需考虑燃料电池的各组成部分, 包括膜、催化层、气体扩散层、流道、极板等不同建 模区域。<sup>[13]</sup>不同物理化学过程的控制方程耦合在 一起,描述燃料电池运行的真实过程,涉及模拟对 象的跨空间尺度问题以及模拟过程的跨时间尺度 问题。

从空间维度来看,燃料电池建模方法可以分为 0D、1D、2D和3D建模等方面。在0D模型中,假设 所有参数(电流、电压、含水量、温度、流量、压力等) 在空间上是均匀的,将各参数描述为模型系统输入

#### 京を家評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

输出的平均值。1D 模型则能模拟某一个方向上的 内部参数变化,例如沿着垂直于膜平面的方向或者 沿着反应物流道方向的参数变化。2D 模型可以研 究某一平面的多参数变化特性,比如流道截面方向 上反应物在膜电极与流道内部的传输规律。3D 模 型则能对整个燃料电池的真实几何结构进行建模, 从而描述三维空间内的多参数分布规律。



#### 图 3 PEMFC 的建模结构与描述对象<sup>[13]</sup>

燃料电池不同维度的机理模型可通过 ANSYS Fluent、COMSOL、STAR-CCM 等常用软件,使用有 限元方法来进行建模仿真。<sup>[14]</sup>近年来,国内外开展 了大量 PEMFC 机理建模方法研究,从不同维度和 尺度进行建模,从而研究燃料电池内部的多参数 分布。一般来说,基本的燃料电池模型需要考虑 耦合的多物理过程,包括流体动力学、物质的传 质、电荷输运、多相流水传输、电化学反应以及热 力学过程,在每个反应域中通过相应控制方程来 模拟仿真燃料电池内部的稳动态特性与多参数分 布信息。

在一维模型方面, Rahman 等<sup>[15]</sup>构建了一维多 物理场 PEMFC 模型,该模型考虑了非等温传热、对 流和扩散气体输运、电化学反应、短路和氢渗透电 流、膜内非线性水含量分布及水热平衡等过程,并 通过多种工况下的电池极化性能进行模型验证(图 4)。Jiang 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于非等温两相流的一 维燃料电池模型,该模型考虑了含水量饱和度变 化、水的相变过程以及气液两相输运的耦合效应, 并通过该一维模型分析不确定参数的灵敏度,发现 燃料电池性能对于阴极理化参数比阳极参数更敏 感。总体而言,一维模型具有较高的计算效率,可 描述一维方向上的参数分布情况,但缺乏燃料电池



 $_{\text{5DL}} \quad \delta_{\text{aMPL}} \, \delta_{\text{aCL}} \quad \delta_{\text{Mem}} \quad \delta_{\text{cCL}} \, \delta_{\text{cMPL}} \quad \delta_{\text{cGDL}}$ 

#### 图 4 PEMFC 在垂直于膜平面方向的传热传质过程 建模示意图<sup>[15]</sup>

研究人员还提出了多种二维 PEMFC 模型来分 析两相流动对燃料电池性能的影响,[17-18]其中流道 上的二维几何模型包括气体扩散层、微孔层、催化 剂层、膜和流道以及相邻区域之间的界面。与三维 模型相比,这些二维模型可以节省大量的计算,并 且可以在垂直于流道或平行于流道方向的剖面上 获取燃料电池内部多参数分布信息。至于三维 PEMFC 模型, Yin 等人<sup>[19-20]</sup>建立了基于直流道结构 的三维 PEMFC 模型(图 5),并通过原位检测实验进 行对比验证,研究了燃料电池内部电流、温度、湿度 沿流道方向的多参数分布特征及其随工况条件的 变化规律。Shimpalee 等人<sup>[21]</sup>针对车用燃料电池, 建立了反应面积为 300 cm<sup>2</sup> 的三维 PEMFC 单电池 模型,研究了在阴阳极并行直流道的流场设计对于 燃料电池内部反应参数分布的影响规律。Zhang 等 人<sup>[22]</sup>开发了针对实际阴阳极流场结构的三维多相 流 PEMFC 模型,其有效反应面积为 109.93 cm<sup>2</sup>,研 究了流场中的气液两相流传输特性,及其受表面张 力、壁面粘附、阻力和重力的影响规律。



#### 3 燃料电池数据驱动建模方法

燃料电池的多维度机理模型需要考虑电池内 部复杂的电化学过程与衰减机制,而数据驱动建模 方法则可直接基于实验数据进行分析诊断与预测 优化。燃料电池的数据驱动建模方法基于实验测 试积累的大量数据,提取特征数据,通过不同的建 模算法,进行模型训练与参数优化,以趋近实验数 据。燃料电池数据驱动建模方法主要包括人工神 经网络(Artificial Neural Network, ANN)、卷积神经 网络(Convolutional Neural Network, CNN)、循环神经 网络(Recurrent Neural Network, RNN)、支持向量机 (Support Vector Machine, SVM)等算法,可应用于燃 料电池性能参数优化、剩余寿命预测及故障诊断等 领域。<sup>[23]</sup>

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN) 模型是一种受生物神经系统启发的计算模型,由于 具有很强的非线性关系拟合能力,被广泛应用于各 种领域。<sup>[24]</sup>ANN 是一种层级网络结构,其中包含输 入层、隐藏层和输出层,其通过学习和调整节点间 的连接强度(即权重),来实现特定的输出响应。卷 积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)模 型是一种用于处理二维数据信息的神经网络,具有 深层结构和卷积计算等特征。CNN 是一种前馈神 经网络,具有参数共享的特点,可以处理高维输入, 在图像处理领域得到了广泛的应用。CNN 和 ANN 模型可应用于燃料电池复杂工况下的性能预测与 参数优化。尽管 ANN 与 CNN 模型在处理静态数据 方面取得了重要进展,然而其缺乏捕捉时间动态的 能力,难以有效处理具有时间依赖性的数据。循环 神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)是一种具 有前瞻性记忆功能的神经网络,能够处理含时间序 列信息的数据,尤其适用于需要考虑数据点之间时 间依赖性的任务,例如文本生成、机器翻译等领域, 可应用于燃料电池衰减评估与寿命预测。此外,支 持向量机(Support Vector Machine, SVM)模型可以 用来处理高维度数据的分类问题,可有效应用于燃 料电池状态判断与故障诊断。[25-26]



图 6 燃料电池典型数据驱动建模方法

#### 3.1 性能参数优化

燃料电池数据驱动模型因其强大的非线性映

射能力和自我学习能力,已成为优化电池性能及设 计与操作参数的重要工具。其中,ANN 模型能够从 大量的实验数据中学习,预测电池的性能,从而为 电池的多目标参数优化提供指导。Zou 等人<sup>[27]</sup>结 合人工神经网络(ANN)的预测能力与遗传算法 (GA)的搜索优势,实现了对 PEMFC 流道挡板结构 的多目标优化,同时提升了净功率密度和氧气分布 的均匀性指数,从而增强电池的整体性能。Tian 等 人<sup>[28]</sup>提出了一种结合计算流体动力学、人工神经网 络和粒子群优化算法的燃料电池优化方法,用于同 时优化流道结构和多孔电极的孔隙率。Su 等人<sup>[29]</sup> 针对燃料电池电堆多节电池性能同步预测问题,建 立了基于人工神经网络方法的数据驱动模型,实现 不同工况下 60 kW 电堆 140 节电压的准确预测,预 测偏差低于2mV,为燃料电池的操作参数优化提供 基础(图7)。



图 7 基于人工神经网络模型的燃料电池 性能预测与优化研究<sup>[29]</sup>

#### 3.2 剩余寿命预测

燃料电池剩余寿命预测对于健康状态评估与 在线控制策略优化具有重要意义。由于燃料电池 衰减机制复杂,衰减趋势呈非线性规律,传统机理 模型难以准确、高效的评估,而面向时序特征建模 的数据驱动模型则能提供新的方案和思路。Li等 人<sup>[30]</sup>提出了一种多尺度深度卷积神经网络,该网络 由于其多尺度结构而具有强大的特征提取能力,实 现了良好的预测性能,在没有增加计算负担的情况 下,精确地获得了剩余寿命预测结果。Liu 等人<sup>[31]</sup>

#### 京方電和評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

提出了一种基于长短期记忆 (Long Short Term Memory,LSTM) 递归神经网络的 PEMFC 剩余使用 寿命预测方法。然而,传统的 LSTM 网络在处理深 层网络结构时可能会遇到梯度消失或梯度爆炸的 问题,这限制了模型的学习能力和预测精度。为了 解决这一问题, Ma 等人<sup>[32]</sup>提出了一种网格长短期 记忆(G-LSTM)结构,在传统 LSTM 架构中引入了额 外的 LSTM 单元网络,沿着网络的深度维度分布,有 效缓解了多层网络中的梯度消失问题,提高了模型 的学习能力和寿命预测精度。Zhai 等人<sup>[33]</sup>提出了 一种机理与数据驱动融合的寿命预测模型,基于半 经验的机理模型与优势演员-评论家 (Advantage Actor-Critic, A2C) 深度学习算法, 提取交换电流密 度、渗氢电流、活性面积、电池内阻等老化因子,通 过65 kW 燃料电池客车实际运行衰减数据进行模 型训练与验证,实现燃料电池衰减趋势与寿命的准 确预测,预测偏差低于2.4%(图8)。



#### 3.3 故障诊断

燃料电池系统、电堆及部件的故障高效诊断 对于提升其可靠性至关重要,仅依赖于电压性能 的经验判断方法存在误判、故障分类不清等问 题,而能够解析多维度特征的数据驱动建模方法 则为高效、准确的故障诊断及分类提供了重要路 径。Li等人<sup>[34]</sup>提出了一种基于支持向量机的在 线故障诊断策略模型,在 64 节电池的 PEMFC 实 验平台上的在线验证表明,该方法能够成功地实 时识别和隔离包括低压、高压、低氧计量比、干燥 等在内的多种典型故障,显著提高了 SVM 在实 时故障诊断中的适用性和准确性。Lu 等人<sup>[35]</sup>提 出了一种基于动态半径支持向量机模型的新型 故障诊断方法,通过提取故障状态下的电压、阳

#### 京行委員評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

极压降、阴极压降等特征变量,训练诊断模型,从 而实现燃料电池系统故障的高效识别(图9)。 Wang等人<sup>[36]</sup>将分区电池检测技术和深度学习 建模方法相结合,研究了燃料电池在不同故障工 况下电流分布的动态特性,建立了基于双输入卷 积神经网络的故障诊断模型,融合电流分布信息, 实现了高效、精确的燃料电池故障诊断,其水淹、干 燥等故障诊断正确率达到98.5%。



图 9 基于动态半径支持向量机模型的 燃料电池故障诊断研究<sup>[35]</sup>

#### 4 结语

随着氢能燃料电池技术在新能源汽车与大规 模电站领域的商业化推广,燃料电池的性能、寿命 及可靠性成为技术攻关的热点与难点。本文针对 燃料电池性能优化、寿命预测、故障诊断等研究领 域,从多维度机理模型与数据驱动模型两个角度 综述了燃料电池的主流建模方法。主要结论 如下:

(1)燃料电池内部反应过程涉及复杂的多物理 场作用机制,三维全尺寸燃料电池机理建模能够仿 真实际电堆内部理化过程,但计算量大、难以描述 动态特性,空间上的适当降维与尺度缩减,牺牲局 部参数分布信息,可大幅提高计算效率从而达到在 线应用。

(2)燃料电池外部工况条件与内部衰减机理相 互耦合,极难建立长时衰减的寿命预测机理模型, 而面向时序特征的数据驱动建模方法则能有效应 用于燃料电池衰减趋势评估,可实现车用燃料电池 长时运行的精确寿命预测。

(3)将燃料电池工况条件、设计参数、材料物性等机理特征与数据驱动融合方法进行融合,可有效提高燃料电池模型预测精度与故障诊断效率,成为

燃料电池建模方法的重要研究方向。

#### 参考文献:

- [1] Wang Y, Seo B, Wang B, et al. Fundamentals, materials, and machine learning of polymer electrolyte membrane fuel cell technology [J]. Energy and AI, 2020, 1:100014
- [2] 马洋洋,宋宛泽,王鹏宇.质子交换膜燃料电池建模研究综述[J].电源技术,2021,45(12):1660-1664
- [3] Pourrahmani H, Yavarinasab A, Siavashi M, et al. Progress in the proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) water/thermal management:From theory to the current challenges and real-time fault diagnosis methods [J]. Energy Reviews, 2022, 1(1):100002
- [4] Zhao J, Li X, Shum C, et al. A review of physics-based and datadriven models for real-time control of polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Energy and AI,2021,6:100114
- [5] Ding R, Zhang S, Chen Y, et al. Application of machine learning in optimizing proton exchange membrane fuel cells: a review [J]. Energy and AI, 2022, 9:100170
- [6] 王克勇,鲍大同,周苏.基于数据驱动的车用燃料电池故障在 线自适应诊断算法[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(9); 2107-2118
- [7] George S, Sehgal N, Rana K, et al. A comprehensive review on modelling and maximum power point tracking of PEMFC [J]. Cleaner Energy Systems, 2022, 3:100031
- [8] Cai F, Cai S, Tu Z. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) operation in high current density (HCD): Problem, progress and perspective [J]. Energy Conversion and Management, 2024, 307:118348
- [9] Wu D, Peng C, Yin C, et al. Review of system integration and control of proton exchange membrane fuel cells [ J ]. Electrochemical Energy Reviews, 2020, 3:466-505
- [10] Jiao K, Li X. Water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Progress in energy and combustion Science, 2011, 37 (3):221-291
- [11] Priya K, Sathishkumar K, Rajasekar N. A comprehensive review on parameter estimation techniques for Proton Exchange Membrane fuel cell modelling [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93:121-144
- [12] Wang C Y. Fundamental models for fuel cell engineering [J]. Chemical reviews, 2004, 104(10):4727-4766
- [13] Shah A A, Luo K, Ralph T, et al. Recent trends and developments in polymer electrolyte membrane fuel cell modelling [J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(11):3731-3757
- [14] Asensio F, San Martín J, Zamora I, et al. Analysis of electrochemical and thermal models and modeling techniques for polymer electrolyte

membrane fuel cells [ J ]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 113:109283

- [15] Rahman M A, Mojica F, Sarker M, et al. Development of 1-D multiphysics PEMFC model with dry limiting current experimental validation [J]. Electrochimica Acta, 2019, 320:134601
- [16] Jiang Y, Yang Z, Jiao K, et al. Sensitivity analysis of uncertain parameters based on an improved proton exchange membrane fuel cell analytical model [J]. Energy conversion and management, 2018,164:639-654
- [17] Xing L, Liu X, Alaje T, et al. A two-phase flow and non-isothermal agglomerate model for a proton exchange membrane (PEM) fuel cell [J]. Energy, 2014, 73:618-634
- [18] Xing L, Das PK, Song X, et al. Numerical analysis of the optimum membrane/ionomer water content of PEMFCs: The interaction of Nafion<sup>®</sup> ionomer content and cathode relative humidity [J]. Applied Energy, 2015, 138:242-257
- [19] Yin C, Gao J, Wen X, et al. In situ investigation of proton exchange membrane fuel cell performance with novel segmented cell design and a two-phase flow model [J]. Energy, 2016, 113:1071-1089
- [20] Yin C, Gao Y, Li T, et al. Study of internal multi-parameter distributions of proton exchange membrane fuel cell with segmented cell device and coupled three-dimensional model [J]. Renewable Energy, 2020, 147:650-662
- [21] Shimpalee S, Hirano S, DeBolt M, et al. Macro-scale analysis of large scale PEM fuel cell flow-fields for automotive applications [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2017, 164 (11): E3073-E3080
- [22] Zhang G, Xie X, Xie B, et al. Large-scale multi-phase simulation of proton exchange membrane fuel cell [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130:555-563
- [23] Hong J, Yang J, Weng Z, et al. Review on proton exchange membrane fuel cells: Safety analysis and fault diagnosis [J]. Journal of Power Sources, 2024, 617:235118
- [24] Nanadegani FS, Lay EN, Iranzo A, et al. On neural network modeling to maximize the power output of PEMFCs [J]. Electrochimica acta, 2020, 348:136345
- [25] Zhao X, Zhou Y, Wang L, et al. Classification, summarization and perspective on modeling techniques for polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023,48(57):21864-21885

- [26] Li Z, Outbib R, Giurgea S, et al. Fault diagnosis for fuel cell systems: A data-driven approach using high-precise voltage sensors [J]. Renewable Energy, 2019, 135:1435-1444
- [27] Zou G, Chen K, Chen W, et al. Multi-objective optimization of proton exchange membrane fuel cell flow channel baffle based on artificial neural network and genetic algorithm [J]. Fuel, 2025, 380:133205
- [28] Tian C, Yuan F, Deng T, et al. Coupled optimization of auxiliary channels and porosity gradient of GDL for PEMFC [J]. Energy, 2024,301:131734
- [29] Su Y, Yin C, Hua S, et al. Study of cell voltage uniformity of proton exchange membrane fuel cell stack with an optimized artificial neural network model [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(67):29037-29052
- [30] Li H, Zhao W, Zhang Y, et al. Remaining useful life prediction using multi-scale deep convolutional neural network [J]. Applied Soft Computing, 2020, 89:106113
- [31] Liu J, Li Q, Chen W, et al. Remaining useful life prediction of PEMFC based on long short-term memory recurrent neural networks [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (11): 5470-5480
- [32] Ma R, Yang T, Breaz E, et al. Data-driven proton exchange membrane fuel cell degradation predication through deep learning method [J]. Applied energy, 2018, 231:102-115
- [33] Zhai Y, Yin C, Wang R, et al. Degradation prediction of 65 kW proton exchange membrane fuel cells on city buses using a hybrid approach with the advantage actor-critic method [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50:414-427
- [34] Li Z, Outbib R, Giurgea S, et al. Online implementation of SVM based fault diagnosis strategy for PEMFC systems [J]. Applied energy, 2016, 164:284-293
- [35] Lu J, Gao Y, Zhang L, et al. A novel dynamic radius support vector data description based fault diagnosis method for proton exchange membrane fuel cell systems [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(84):35825-35837
- [36] Wang Z, Gao Y, Yu J, et al. Data-driven fault diagnosis of PEMFC water management with segmented cell and deep learning technologies [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 67:715-727

# 欢迎投稿,欢迎订阅!

東テ電氣評論 2025.3.25

## TOPCon 电池正面银浆用单分散银粉的制备

杨隽 朱健\* 张乾 邱清卿 丁锐

东方电气集团科学技术研究院有限公司,成都 611731

摘要:TOPCon 电池因其高效率成为目前光伏电池的主流技术。正面银粉作为 TOPCon 电池的电极,直接影响电池效率,是 电池的关键基础材料。TOPCon 电池正面银粉要求具有较高一致性的亚微米单分散银粉。传统的单分散银粉采用分步还 原法,先制备晶种再通过还原进一步生长亚微米银粉,但在生产中晶种批次稳定性难以保证。本文借鉴模板法思路,用商 品化稳定的乳液产品作晶种替代经繁琐制备工艺制得的银晶种,同时借助乳液作模板,在乳液和银溶液界面还原生长亚微 米银粉,以提高亚微米银粉产品的批次稳定性,简化分步还原法工艺。本文探究了乳液作晶种制备单分散亚微米银粉的可 行性以及乳液作晶种对制备亚微米银粉的影响规律。结果表明,商品化乳液能够用作晶种,制备出高分散的亚微米球形银 粉;乳液能够起到与银晶种类似的作用,随着乳液掺量的增加,银粉粒度变小,通过调节乳液的掺量能够调控亚微米银粉的 粒度。

关键词:银粉;单分散;乳液;TOPCon 中图分类号:TM914 文献标识码:A 文章编号:1001-9006(2025)02-0008-04

#### The Preparation of Monodisperse Silver Powder Used on the Front Side of TOPCon Solar Cell

YANG Jun, ZHU Jian\*, ZHANG Qian, QIU Qing qing, DING Rui

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

Abstract: TOPCon solar cells have become the dominant technology of photovoltaic cells because of their high cell efficiency. As the electrode of TOPCon solar cells, silver powder on the front side directly affects the efficiency, so it is the key basic material of the cell. The front side of TOPCon cells requires submicron-sized and monodisperse silver powder with high consistency. Traditionally, monodisperse silver powder has been prepared in two steps: firstly, the silver crystal seed has been prepared, then submicron-sized silver powder has been reduced, but the stability of seed batch production is difficult to guarantee. In this paper, using the template method as a reference, a commercially stable emulsion product is used as crystal seed to replace silver crystal seed produced by a complicated preparation process. At the same time, using emulsion as a template, submicron-sized silver powder is reduced and grown at the interface of emulsion and solution to improve the batch stability of submicron-sized silver powder by using emulsion product as crystal seed and the effect of emulsion product as crystal seed on submicron-sized silver powder by using emulsion product as crystal seed and the effect of emulsion can be used as crystal seed to prepare highly dispersed and submicron-sized silver powder can be adjusted by product as crystal seed on submicron-sized silver powder were investigated. The results show that the commercial emulsion product as crystal seed on submicron-sized silver crystal seed, the particle size of silver powder decreasing with the increase of emulsion content shows that the submicron-sized particle size of silver powder can be adjusted by

基金项目:N型高效晶硅电池(TOPCon/HJT)电极微纳银粉批量化及应用技术研究;项目编号:2F-SC0022094。

作者简介:杨隽(1983—),女,2010年毕业于四川大学材料物理与化学专业,硕士,高级工程师。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司 新材料所,主要从事超细银粉及电子浆料研发工作。

朱健(1983—),男,2011年毕业于四川大学高分子科学与工程专业,硕士,高级工程师。现在东方电气集团东方精细电子材料有限 公司任副总经理,主持公司技术质量工作。通信邮箱:3007734@ dongfang.com。

收稿日期:2024-09-19

京が電氣評論 2025.3.25 |第39卷Vol.39总第156期

adjusting the emulsion content.

Key words: silver powder; monodiperse; emulsion; TOPCon

在国家"碳达峰"、"碳中和"战略引领下,新能 源发电逐渐开始替代传统化石能源,呈蓬勃发展之 势。其中光伏装机占新能源装机近半数。目前光 伏发电仍以晶硅电池为主,晶硅电池中,P型PERC 电池已接近理论极限效率24.5%,而TOPCon、HJT 理论极限效率分别为28.7%、27.5%<sup>[1]</sup>,均高于传 统的PERC电池,成为光伏电池领域新的技术方向。 其中TOPCon电池在LECO(激光辅助烧结)技术的 助力下,电池效率提升0.3~0.5%,达到26.7%,且 成本较HJT低,市场份额约占70%,成为目前光伏 电池的主流技术。

导电银粉作为光伏电池的导电相,是光伏电池 的关键基础材料。在降本增效的需求下, TOPCon 电池栅线印刷线宽进一步收窄,需要更细、一致性 更好的亚微米单分散银粉。传统的银粉制造方法 有液相还原法<sup>[2-3]</sup>、蒸发冷凝法<sup>[4]</sup>、喷雾热分解法<sup>[5]</sup> 等。其中液相还原法因成本低,工艺简单成为银粉 生产制备的主要方法。但一步还原法难以将成核 与生长过程分开,无法制备一致性好的单分散银 粉。而分步还原法通过先制备晶种,再通过第二步 还原,实现银粉在晶种上的进一步生长,使成核与 生长过程分开,能够得到粒度均匀、单分散的银粉。 中南大学的李碧渊、甘卫平等采用硼氢化钠制备晶 种,再采用抗坏血酸作还原剂在晶种上成功还原制 备出粒径均匀、分散性好的 1.5 μm 球形银粉。<sup>[6]</sup>中 南大学的吴超采用抗坏血酸制备晶种,再在晶种上 还原制备出 1.8 µm 的单分散球形银粉。<sup>[7]</sup>华中科 技大学的谢劲松采用紫外光照的方法制备纳米晶 种,并在纳米晶种上用抗坏血酸还原制备出平均粒 径 0.8 µm 的单分散球形银粉。<sup>[8]</sup>但是分步还原法 中晶种制备的工艺条件较难控制,导致晶种批次稳 定性较差,会导致大规模生产中用晶种还原生长的 银粉批次稳定性难以保证。

本文借鉴模板法思路<sup>[9-10]</sup>,用商品化稳定的乳 液产品作晶种替代经繁琐制备工艺制得的银晶种, 同时借助乳液作模板,在乳液和银溶液界面还原生 长亚微米类球形银粉,以提高亚微米银粉产品的批 次稳定性,简化分步还原法工艺。该方法在以往的 文献中未见报道,本文希望通过该方法探究乳液作 晶种制备一致性好、单分散亚微米球形银粉的可行 性以及乳液作晶种对制备亚微米银粉的影响规律。

#### 1 实验

#### 1.1 试剂与设备

试剂:商品化水包油乳液产品(1#、2#、3#)、分 析纯的 AgNO<sub>3</sub>、聚乙烯吡咯烷酮、抗坏血酸、氨水、硝 酸,去离子水(自制,电导率 1.0 μs/cm)

设备:水浴锅、电动搅拌机、电子天平、抽滤瓶、 鼓风干燥箱、行星式球磨机、300 目标准筛

#### 1.2 银粉的制备

以商品化乳液产品作为合成底液,同时加入聚 乙烯吡咯烷酮("以下简称 PVP")作为分散剂。用 去离子水溶解分析纯的硝酸银和抗坏血酸,配制成 一定浓度的硝酸银和抗坏血酸(以下简称"Ve")溶 液作为氧化剂和还原剂,放入水浴锅中恒温 35 ℃, 用硝酸或氨水分别调节 pH 至固定值。以1 L/min 的速度将硝酸银和 Ve 同时泵入含有 PVP 和乳液的 底液中进行还原制备银粉,还原过程中以 300 r/min 的速度一边搅拌一边合成。

合成后的银粉采用抽滤瓶用去离子水抽滤清洗3次后,放入鼓风烘箱70℃恒温干燥6h取出。 采用行星式球磨机对烘干银粉进行破碎,再用300 目标准筛去除大颗粒,测试银粉的微观形貌和宏观 粒度。

通过对不同乳液产品制备银粉的粒度分布分 析以及调整乳液掺量对银粉形貌、粒度分布的影响 分析,验证乳液作为晶种制备一致性好、单分散亚 微米球形银粉的可行性,研究乳液作为晶种对亚微 米银粉生长的影响规律。

#### 1.3 测试与表征

利用 Tescan Vega 扫描电镜观察银粉的形貌和 粒径。利用软件统计粒径分布。利用马尔文 2000 湿法粒度仪测试银粉及乳液的粒度及粒度分布。 利用 HY-100 型振实密度仪测银粉的振实密度。

#### 京行委系評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

#### 2 结果与讨论

#### 2.1 不同乳液产品的粒度分布及与原材料的兼 容性

外购3款不同水包油乳液产品,固含量均为60%, 分别命名为1#、2#、3#。3款乳液产品的粒度及粒度 分布如表1和图1所示:

表1 3款乳液产品的粒度数据 μm 编号 D10 D50 D90 D95 0.273 0.178 0.248 1# 0.132 0.147 2# 0.203 0.291 0.321 0.446 3# 0.147 0.253 0.507



图 1 3 款乳液产品的粒度分布

如表1、图1所示,1#、2#、3#粒度逐渐变大,粒度分布依次变宽。

3款乳液产品与原材料硝酸银溶液的兼容性如 图 2 所示:



图 2 从左到右依次为 1#、2#、3#乳液产品在一定浓度的 硝酸银溶液中的溶解情况

由图 2 可知,3 款乳液产品与硝酸银溶液混合, 未出现不溶解的液滴及分层现象;另外,对比图 1、3 发现,3 款乳液产品与硝酸银溶液混合后粒度没有 明显变化。由此推断,3 款乳液产品与硝酸银溶液 兼容,可用作底液,作为晶种,用于制备亚微米银粉。

#### 2.2 不同乳液产品对合成亚微米银粉的影响

取固定量的1#、2#、3#乳液产品作为晶种,用作 底液,与分散剂 PVP 混合。同时加入一定浓度的硝 酸银和 Ve 溶液,不同乳液所合成的亚微米银粉粒 度及粒度分布如图 4 所示。



图 3 3 款乳液产品与硝酸银溶液混合后的粒度分布



图 4 3 款乳液作晶种对应合成的亚微米银粉粒度分布

表 2 3 款乳液作晶种对应合成的亚微米银粉粒度数据 µm

编号	D10	D50	D90	D95	
1#乳液合成银粉	2.168	3.134	4. 532	4.986	
2#乳液合成银粉	2.465	3.679	5.505	6.107	
3#乳液合成银粉	2.533	4.007	6.37	7.143	
					-

如表 2、图 4 所示,1#、2#、3#乳液对应合成的亚 微米银粉粒度逐渐变大,分布依次变宽,与乳液的 粒度分布相对应,说明乳液起到晶种作用。

3 款乳液对应合成的亚微米银粉形貌如图 5 所示:



图 5 (1#)、(2#)、(3#)乳液分别对应 合成亚微米银粉的形貌

由图 5 可知,3 款乳液均能制备出亚微米类球 形银粉,其中 1#乳液制备的亚微米银粉最细,一致 性最好,与粒度测试趋势一致,其他乳液所制备的 银粉均有少部分粘连,导致粒度分布宽化。优选 1# 乳液用作晶种,进行乳液掺量的调节。

#### 2.3 相同乳液产品不同乳液掺量对合成亚微米银 粉的影响

采用 1#乳液作为晶种,用作底液与 PVP 混合, 调整乳液的用量,同时泵入一定浓度的硝酸银和 Vc 溶液在不同掺量的乳液上进行还原生长,粒度及粒 度分布图 6 和表 3 所示:



图 6 不问乳液渗量 G 成的亚碱木银初桠度 5 布 表 3 不同乳液掺量合成的亚微米银粉粒度数据 um

1#乳液掺量	D10	D50	D90	D95
少	1.385	2.039	3.001	3.319
中	0.975	1.498	2.316	2.58
多	0.18	1.18	1.902	2.14

如上图 6、表 3,通过对 1#乳液掺量的调整发现 随着乳液掺量的增加, D50 由 2.039 μm 减小至 1.18 μm,同时 D10 处有小峰出现,说明随着乳液添 加量的增加,合成的亚微米银粉变细,与晶种数量 增加颗粒越细的规律一致,说明乳液起到晶种作 用,且能通过乳液调节亚微米银粉的粒度至 TOPCon 电池所需尺度范围。

1#乳液不同添加量所合成的亚微米银粉形貌如 图 7 所示,随着添加量的增加,银粉粒度变细,符合 粒度测试规律,粉体分散性良好,适用于 TOPCon 电 池栅线电极。

以乳液作晶种能够制备出一致性好、高分散的 亚微米球形银粉,能够起到与银晶种一样的效果, 且能够像调节银晶种数量一样通过调节乳液的掺 量来改变合成亚微米银粉粒度的大小。本文推测

#### たって 東京・ で 泉戸 二 か 、 2025.3.25 第39巻 Vol.39 总第156期

反应液中的 Ag<sup>+</sup>通过配位与乳液中的非离子聚醚表 面活性剂作用(在张杰的文章中也提过 Ag<sup>+</sup>会通过 配位作用吸附在表面活性剂上<sup>[10]</sup>),吸附在水包油 乳液表面,再通过 Vc 还原成包裹在水包油乳液颗 粒表面的类球形银粉,如图 7(2#)中有中空的银粉 结构。这样乳液就起到了类似银晶种的作用。



图 7 1#乳液不同添加量下合成的亚微米银粉形貌

#### 3 结语

经上述实验验证,可得以下结论:

(1)商品化乳液能够用作晶种,制备出一致性 好、高分散的亚微米球形银粉。该方法更简单,能 够适用于大规模亚微米银粉的制备。

(2)乳液能够起到与银晶种类似的作用,随着 乳液掺量的增加,银粉粒度变小。通过调节乳液的 掺量能够调控亚微米银粉的粒度。

#### 参考文献:

- [1] Schmidt J, Peibst R, Brendel R. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: Past, present and future[J]. Silicon PV 2019
- [2] 缪新,杨声海,陈永明.液相还原法制备单分散球形超细银粉[J].湿法治金,2013.32(6):403-406
- [3] 郭桂全,甘卫平,罗贱,等.正交设计法优化高分散超细银粉的 制备工艺[J].稀有金属材料与工程,2011,40(10):1827-1831
- [4] 钟景明,王立惠,施文峰,等.光伏银浆用银粉的研究[J].粉末 冶金工业,2015,25(6):6-13
- [5] 刘志宏,刘志勇,李启厚,等.喷雾热解法制备超细银粉及形貌 控制[J].中国有色金属学报,2007,17(1):149-155
- [6] 李碧渊,甘卫平,黎应芬,等.分布还原法制备电子浆料用球形 银粉及其形貌与粒径[J].粉末冶金材料科学与工程,2016,21
   (1):109-115
- [7] 吴超. 微米级超细银粉的可控制备[D]. 中南大学, 2012
- [8] 谢劲松. 球形银粉的液相合成与性能研究[D]. 华中科技大学,2018
- [9] 李中春,罗胜利.SDS/Brij30/H20体系分子有序组合体中合成 银纳米粒子[J].江苏技术师范学院学报(自然科学版),2009, 15(2):5-10
- [10] 张杰. 具有特殊形貌的金属、硫化物纳米材料的制备[D]. 南京 师范大学,2005

## 某核电泛轮机高中压泛缸总装过程数据分析

周赵伟 陈贝贝 李继朝 伍文华

东方电气集团东方汽轮机有限公司,四川 德阳 618000

摘要:文章介绍了某核电汽轮机高中压汽缸总体结构,对高中压汽缸总装全过程进行跟踪,并对关键工序进行了数据测量。 通过数据对比分析,找出了高中压汽缸变形规律,验证了高中压汽缸刚性补强措施的有效性,对后续汽缸设计起到了一定借 鉴作用。

关键词:核电汽轮机;高中压汽缸;刚性;实测数据;对比分析 中图分类号:TM623 文献标识码:A 文章编号:1001-9006(2025)02-0012-06

#### Data Analysis of High and Medium Pressure Cylinder Assembly Process for a Nuclear Power Turbine

ZHOU Zhaowei, CHEN Beibei, LI Jichao, WU Wenhua (Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: The article introduces the overall structure of the high and medium pressure cylinders of a nuclear power turbine, tracks the entire assembly process of the high and medium pressure cylinders, and measures the data of key processes. Through data comparison and analysis, the deformation law of high and medium pressure cylinders was identified, and the effectiveness of rigid reinforcement measures for high and medium pressure cylinders was verified. This provides a certain reference for subsequent cylinder design.

Key words: nuclear turbine; hip casing; rigid; measured data; comparative analysis

某核电汽轮机高中压汽缸具有尺寸大,重量 重,结构复杂的显著特点。根据已投运机组经验反 馈,为避免高中压汽缸总装时开档面轴向错位过 大,多次进行开档面返修的情况发生,某核电高中 压汽缸结构设计初期提出了汽缸刚性的加强措施。 本文以高中压汽缸总装全过程的实测数据为依据, 对汽缸刚性加强措施的有效性和有限元分析计算 的合理性进行分析,<sup>[1]</sup>得到了高中压汽缸刚性变化 的规律,为汽缸结构设计提供参考。

#### 1 高中压汽缸总体结构

某核电高中压汽缸为整体铸造成型,上、下半 通过水平中分面法兰连接,内部放置有高、中压隔 板和汽封体<sup>[2-4]</sup>,适用于 1 200 MW~1 800 MW 等 级核电汽轮机。高中压汽缸为单层缸复杂结构,尺寸



收稿日期:2024-08-22

**作者简介:**周赵伟(1989—),男,2012年毕业于大连理工大学涡轮机专业,本科,高级工程师。现任职于东方汽轮机有限公司,主要从事汽轮 机结构设计等方面的工作。

京方電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

大(长10270mm×宽6440mm×高7315mm),重 量重达383吨,总装过程汽缸变形难以控制。因 此,有必要对总装过程的变形数据进行分析,找出 汽缸刚性变化规律并验证刚性加强措施的有 效性。

#### 2 高中压汽缸实测数据对比分析

#### 2.1 高中压汽缸总装过程

在高中压汽缸实缸状态下,根据工艺要求对缸 内各隔板、汽封体开档定位面利用刀口尺和塞尺测 量轴向错位量(如图2中的H面),图3为厂内总装 数据测量的实物图。



图 2 高中压汽缸轴向定位面错位量检查示意图



图 3 高中压汽缸总装过程

#### 2.2 实测数据对比分析

为便于数据分析,选取四个类似结构汽缸变形 最大的位置进行分析。总装过程高中压汽缸全实 缸轴向定位面错位量实测数据见表1。根据表1,各 机组的高中压汽缸轴向定位面错位量沿轴向变化 趋势如图4所示。

## 表 1 高中压汽缸轴向定位面错位量实测数据统计 mm

序号	测量位置	机组 A1	机组 A2	机组 A3	机组 D1
1	H6	1.05	0.98	1.1	0.5
2	Н5	0.73	0.48	0.65	0.3
3	H3	0.54	0.44	0.55	0.25
4	H1	0.5	0.3	0.45	0.27
5	H0	-0.6	-0.48	-0.6	-0.35
6	H7	-0.15	-0.12	-0.2	0.15
7	Н9	0.62	0.63	0.65	0.7





图 4 高中压汽缸轴向定位面错位量变化趋势对比图

根据表1和图4数据对比,分析得出以下2点:

(1)同类型结构的机组高中压汽缸轴向定位面 错位量沿轴向变化趋势基本一致,位于 H0 的位置 具有最大负变形。

(2) 机组 D1 高中压汽缸主基准面 H0 轴向错位 量明显小于其他机组。

说明:机组 D1 采取的刚性加强措施对高中压 汽缸的刚性起到了很好的补强效果。

#### 3 高中压汽缸有限元计算数据验证分析

针对高中压汽缸有限元计算结果与实测数据,

对各项内容进行详细分析。由于验证方案为高中 压汽缸总装全过程,故分别对高中压汽缸总装过程 中的下半空缸、下半实缸、全空缸自由状态和全实 缸螺栓把和状态等4种工况进行有限元计算,计算 只施加装配过程中需要的静载,温度、压力、管道载 荷等不作为载荷施加,高中压汽缸在装配过程中的 位移云图如图 5~8 所示,U1 代表天地向位移,U2 代表轴向位移。为减少计算工作量,未对高中压汽 缸全实缸自由放置工况进行直接计算,其变形数据 可以间接通过图 5、图 6 和图 7 计算得出。



京を取評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期



图 6 高中压汽缸下半全实缸位移云图



图 7 高中压汽缸全空缸自由放置位移云图



图 8 高中压汽缸全实缸螺栓把紧位移云图

#### 3.1 高中压汽缸轴向定位面变形对比

为方便数据对比,实测数据取表 1 中机组 D1 的左、右侧实测数据的平均值。由于厂内实际总装

过程,高中压汽缸轴向定位面错位量是在螺栓把紧 状态下测得,因此对如下安装工况进行数据对比分 析,详见表 2 和图 9。

表 2 高中压汽缸轴向定位面错位量对比表

	3时目.			安装状态		
序号 <sup>侧里</sup> 位置	工况 1:全空缸自由 放置计算数据	工况 2:全空缸螺栓 把紧实测数据	工况 3:全实缸自由 放置计算数据	工况4:全实缸螺栓 把紧计算数据	工况 5:全实缸螺栓 把紧实测数据	
1	H6	0. 776	0.32	1.267	-0.001	0. 475
2	Н5	0. 486	0.29	0. 703	-0.008	0.275
3	Н3	0.446	0. 225	0.633	-0.023	0. 225
4	H1	0.405	0. 185	0. 558	-0.008	0. 25
5	H0	-0.405	-0.15	-0.562	0.019	-0.285
6	H7	-0.179	0	-0.193	-0.002	0. 15
7	H9	0. 529	0.15	0.989	-0.004	0.7

mm



图 9 高中压汽缸轴向定位面错位量对比图

根据表2和图9数据对比,分析得出以下2点:

第39卷Vol.39总第156期

(1)除工况4,高中压汽缸轴向定位面错位量计 算值与实测值沿轴向变化趋势基本一致。在数据 上,工况2、5实测数据要远小于工况1、3计算数据, 造成数据差异的主要原因如下:

实际总装时,高中压汽缸轴向定位面错位量是 在中分面安装有紧固件的情况下测得,而在有限元 计算中,高中压汽缸中分面既没有安装螺栓,也没 有安装锥销,汽缸上、下半之间的变形相互独立,变 形不受控制。

(2) 工况 4 计算数据表明: 汽缸把紧螺栓导致

轴向定位面基本无错位,而通过对比工况1、3和工 况2、5,考虑到汽缸铸造、加工偏差,把紧螺栓对汽 缸刚性有加强作用,但不会完全消除轴向变形。

说明:高中压汽缸中分面把紧螺栓和安装锥销 可以很好的控制汽缸变形,减少汽缸的轴向错位, 但轴向错位不会完全消除。

#### 3.2 高中压汽缸中分面变形对比

为方便数据对比,只选取高中压汽缸自由放置 状态下的中分面间隙进行对比,实测数据取左、右 侧实测数据的平均值目靠近轴向定位面处的最大 间隙,详见表3和图10。

表 3	局中压汽缸中分面间隙对比表

mm

序号 视		安装状态				
	<b></b> 例里 位置	工况 1:全空缸自由 放置计算数据	工况 2:全空缸自由 放置实测数据	工况 3:全实缸自由 放置计算数据	工况 4:全实缸自由 放置实测数据	
1	H6	0. 119	0	0.525	_	
2	Н5	0.18	0.045	0.833	0.8	
3	Н3	0. 262	0	1.19	1.075	
4	H1	0.355	0.025	1.526	1.35	
5	H0	0.402	0.025	1.674	1.45	
6	H7	0.405	0.055	1.55	1.5	
7	Н9	0. 236	0.05	0.849	—	



图 10 高中压汽缸中分面间隙对比图

根据表 3 和图 10 数据对比可知:高中压汽缸实 缸状态水平中分面实测间隙与理论计算间隙相当, 空缸状态实测间隙比理论计算间隙偏小。

#### 4 结语

本文对高中压汽缸总装全过程进行跟踪测量, 通过对高中压汽缸总装过程的开档面轴向错位数 据、中分面间隙与有限元计算数据进行对比,得到 了各个过程的汽缸变形规律,对后续汽缸设计起到 了一定借鉴作用。采用该结构的汽缸已在多台机 组顺利投运,验证了高中压汽缸变形控制措施是有

#### 效的。

#### 参考文献:

- [1] 李进, 卢平, 刘东旗. 东方自主核电低压内缸有限元刚性计算 与实测数据的对比分析[J]. 东方汽轮机, 2022(4):36-41
- [2] 中国动力工程学会主编.火力发电设备技术手册第二卷:汽轮 机[M].北京:机械工业出版社,1999
- [3] 高宏喜. 东方自主大型核电汽轮机总体方案简介[J]. 东方汽 轮机,2014(1):1-6+12
- [4] 卢平,高宏喜.东方自主核电汽轮机滑销系统分析[J].东方汽 轮机,2014(2):5-10

# 欢迎投稿,欢迎订阅!

# 第四代核电超高压污轮机高压外缸设计优化

李继朝 邓凌宇 周赵伟 章艳

东方电气集团东方汽轮机有限公司,四川 德阳 618000

摘要:随着核电技术的进步与发展,第四代核电站已在逐步开始商用化,其主蒸汽参数可以达到常规火电超高压汽轮机的水平,而高压外缸的特性却与火电机组和压水堆核电机组有着很大区别。本文通过有限元分析的方法,对第四代超高压核电汽轮机高压外缸的强度、刚性、汽密性进行了全面的分析和评估,并采取了多种优化措施,最终使得汽缸性能满足设计要求。 关键词:第四代核电:超高压:高压外缸:设计优化

中图分类号:TM623 文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)02-0018-04

#### Design Optimization of High Pressure Outer Cylinder of the GEN-IV Nuclear Power Ultra-high Pressure Steam Turbine

LI Jichao, DENG Lingyu, ZHOU Zhaowei, ZHANG Yan (Dongfang Turbine, Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: With the progress and development of nuclear power technology, the GEN-IV nuclear power plant has gradually begun to be commercialized, and its main steam parameters can reach the level of conventional thermal power ultra-high pressure steam turbines, but the characteristics of the high-pressure outer cylinder are very different from those of thermal power units and PWR nuclear power units. In this paper, the strength, rigidity and steam tightness of the outer cylinder of the GEN-IV ultra-high pressure nuclear power turbine are analyzed and evaluated comprehensively by the finite element method, and a variety of optimization measures are taken to make the cylinder performance meet the design requirements. Key words: GEN-IV nuclear power; ultra-high pressure; high pressure outer cylinder; design optimization

从 20 世纪 50 年代世界上首个核电站——前苏 联的 Obninsk 建成后,人类和平利用核能发电已有 70 年的历史,已经演化发展到了第四代核反应堆技 术。按照我国核电"热中子堆——快中子堆——核 聚变堆"的发展战略<sup>[1]</sup>,第四代核反应堆已经在从 实验堆向商用堆迈进,中国原子能科学研究院和清 华大学分别建成了实验快堆(CEFR)和高温气冷实 验堆(HTR-10)。2023 年 12 月,国家重大科技专项 的标志性成果——山东荣成石岛湾的高温气冷堆 核电站示范工程顺利投入商业运行。相比二代、三 代核电的压水堆,第四代核电机组的经济性有了明 显提升,核岛主蒸汽参数可以达到 13 MPa/560 ℃ 左右,按进汽参数划分已经属于超高压汽轮机的 范畴。<sup>[2]</sup>

相比同类参数的常规火电,核电机组的功率和 流量要大得多;相比目前主流的压水堆核电,第四 代核电的蒸汽参数又高得多,给汽轮机的设计带来 一系列挑战,特别是工作条件严苛的高压外缸,其 强度、刚度、汽密性直接关系到机组能否安全、高 效、稳定地运行<sup>[3]</sup>,因此,有必要对第四代核电超高 压汽轮机高压外缸开展设计优化研究。

#### 1 高压外缸设计方案

本文研究的高压外缸用于某第四代核电项目,

收稿日期:2024-08-14

作者简介:李继朝(1984—),男,2005年毕业于西安理工大学机械设计专业,本科,高级工程师,现任职于东方汽轮机有限公司,主要从事核电 汽轮机设计工作。

京テ電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

高压模块采用单流设计、水平切向进汽。由于核岛 主蒸汽参数较高,为减小汽缸承受的温差和压差, 高压缸采用内外双层缸加隔板套的结构。高压模 块方案示意图如图1。



图 1 第四代核电超高压汽轮机高压模块示意图

高压外缸采用下猫爪支撑,通过下半缸前后四 个猫爪支撑在高压前、后轴承箱上。作为汽轮机的 关键部件,高压外缸内部介质为高温高压的蒸汽, 缸体需要承受蒸汽内外的压差和沿轴向的压力变 化,以及内缸、隔板及隔板套、轴封等静子部件的重 量和外部管道的作用力。另外,由于蒸汽在汽缸内 膨胀做功,温度逐渐降低,所以缸体沿轴向方向的 温度分布并不均匀,蒸汽膨胀产生的温度变化会引 起热应力和缸体变形,特别是对于汽缸的水平中分 面法兰,为了保证汽密性,法兰形状及螺栓布置也 是设计过程中需要重点考虑的因素。<sup>[4]</sup>

通过对汽缸理论壁厚进行计算,对其持环应 力、密封紧力和法兰强度进行校核,得到了高压外 缸的初步设计参数,建立了三维模型,如图2所示, 以便下一步进行有限元分析和设计优化。



图 2 超高压核电汽轮机高压外缸三维模型

#### 2 高压外缸有限元分析

#### 2.1 边界条件

位移边界条件:外缸轴向位置由后猫爪与轴承 箱之间的横向键限位,缸体由电机侧向汽机侧膨 胀;横向位置由汽缸前后两端上下半的轴向键限 位,缸体由中间向两侧膨胀;天地方向由四个下猫 爪限位。

温度边界条件:取阀门全开(VWO)工况进行校 核。内壁为蒸汽温度,外壁与内壁的温差按 20℃ 确定。<sup>[5]</sup>

载荷边界条件:汽缸承受的载荷主要有各部件 的重力和管道接口载荷,以及螺栓初始预紧应力。 缸体内壁为蒸汽压力,外壁为大气压。高压内缸及 隔板套等内部部件的轴向推力等效为肩胛面的压 力作用在外缸上,见计算公式(1)。

$$P = \frac{X(P_0 - P'_0)A_0 + (P_0 - P'_0)A_1}{A}$$
(1)

式(1)中:P—肩胛面上的压力, MPa;X—隔板 压差系数; $P_0$ —部件级前压力, MPa; $P'_0$ —部件级后 压力, MPa; $A_0$ —隔板压差作用面积, mm<sup>2</sup>; $A_1$ —隔板 套压差作用面积, mm<sup>2</sup>;A—肩胛面面积, mm<sup>2</sup>。

#### 2.2 分析结果

(1)位移分析结果:额定工况下,高压外缸轴向 最大位移发生在前猫爪处(图3)。电机侧端汽封处 的上下半轴向位移差别较大,原因在于该位置上下半 的刚性相差较大。从结构上比较,上半缸高排处缸壁 较为单薄,刚性略差;下半缸高排处由于设有猫爪结 构,起到了加强刚性的作用,刚性略好。因此,高压外 缸排汽位置的刚性,特别是上半缸的刚性需要加强。



图 3 高压外缸额定工况位移云图(mm)

(2)应力分析结果:缸体整体的应力水平较低,缸 壁的平均应力在 90 MPa 以下,安全系数为4 倍以上。 局部有一定的应力集中,但远远小于屈服强度(图4), 强度能满足设计要求,汽缸的壁厚是合理的。



图 4 高压外缸额定工况应力云图(MPa)

#### 京行委員評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

(3)汽密性分析结果:额定工况下,汽缸中分面 大部分区域的接触应力不低于 20 MPa(图 5),远大 于正常工作时的内外压力差,汽密性基本满足要 求,但仍有部分区域接触应力不足,特别是缸体前 后两端的汽封体位置,接触应力较小,容易导致机 组运行时出现漏汽现象,因此汽缸的汽密性需要进 行改善。



图 5 高压外缸额定工况中分面接触情况

#### 3 高压外缸设计优化

#### 3.1 优化措施

针对高压外缸刚性和汽密性不足的问题,结合 工程实践中常用的优化措施<sup>[6]</sup>,决定对高压外缸进 行以下设计优化:

#### 3.1.1 针对高排位置刚性不足的问题

(1)缸体外壁增设加强筋,筒身部分上下半各布置两道,沿轴向分布;高排端壁上下半各布置三道,沿径向分布。

(2)高排腔室内部圆周方向上增设加强杆,上 下半各四根,通过焊接方式与缸体内部预先铸造出 来的凸台连接。

#### 3.1.2 针对前后端汽封处密封性不足的问题

(1)调整高压进汽处汽封位置的结构尺寸,沿 轴向方向增加螺栓。

(2)高压排汽位置由于管口为横向布置,中分 面法兰已无螺栓布置空间,因此新设两根从上半缸 顶部穿入的螺栓,连接至中分面。

改进后的螺栓布置及汽缸三维模型示意如图 6 所示。



图 6 改进后的高压外缸螺栓布置及三维模型

#### 3.2 优化后的结果

(1)位移分析结果:改进后,汽缸额定工况时上下半轴向变形量基本一致(图7),此前出现的高排位置轴向位移差异明显的现象已经消失,缸体上下半的刚性,特别是高排位置的刚性得到了明显改善。



图 7 高压外缸额定工况位移云图(mm)

(2)应力分析结果:额定工况下的缸体整体应 力水平较低,缸壁的平均应力在100 MPa以下,法 兰最大应力为185 MPa,新增的缸壁加强筋最大应 力为245 MPa(图8),均小于材料的许用应力,缸 壁、法兰以及加强筋的强度满足设计要求。



图 8 高压外缸额定工况应力云图(MPa)

(3)汽密性分析结果:额定工况下,汽缸中分面的 汽密性得到了一定程度的改善,接触应力小于 20 MPa 的区域较改进前有所减少,特别是高排汽封体位置, 已经不存在内外贯通的不接触区域,表明新设的两 根穿缸螺栓明显提高了中分面汽密性。但从整体 上看,中分面仍有局部区域接触应力不足,存在漏 汽风险,主要位置在汽机侧的端汽封处和 1#隔板套 定位肩胛处(图 9),因此还需要继续修改法兰结构 和螺栓布置来改善汽密性。



注:左:接触应力 MPa,右:张口量 mm 图 9 高压外缸额定工况中分面接触

#### 3.3 汽密性改进措施与结果

由于汽缸在1#隔板套和汽机侧端汽封附近出 现了张口,现对这两个位置的中分面法兰和螺栓进 行优化,微调了螺栓位置,增加了中分面刮面<sup>[7]</sup>,具



体措施如图 10 所示,其中红色的线条为优化前,黑 色线条为优化后。



图 10 高压外缸中分面优化前后对比

采取上述优化措施后,重新对中分面接触情况 进行了分析,结果如图 11 所示。可以看出,优化后 中分面整体的汽密性较好,不存在内外贯通的不接 触情况,只有局部小范围存在内漏现象。由于结构 上的原因,这些局部连通的区域已经很难继续优 化,考虑到这些位置的蒸汽不会泄露到汽缸外部, 并且张口量也仅在 0.01 mm 左右,因此认为额定工 况下汽密性能满足要求。



#### 4 结语

本文对超高压核电汽轮机高压外缸的强度、 刚度、汽密性进行了分析,根据分析结果采取了提 高刚度和汽密性的措施,对优化后的汽缸进行了 进一步计算,并对局部汽密性不足的位置进行了 二次优化,最终保证高压外缸的性能满足设计 要求。

本文所设计的高压外缸结构,可以为后续超高 压核电汽轮机的设计提供参考,所采用的汽缸刚性 和汽密性的优化改进措施,对后续同类型机组汽缸 的设计也有一定的借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 何佳闰,郭正荣. 钠冷快堆发展综述[J]. 东方电气评论, 2013, 27(3):36-43
- [2] 中国动力工程学会主编.火力发电设备技术手册,第二卷:汽 轮机[M].北京:机械工业出版社,1999
- [3] 方宇,刘东旗,喻刚. 300 MW 汽轮机高中压外缸强度分析[J].东方电气评论,2007(2):27-32
- [4] 吴方松,尹刚,尹华劼,等.汽轮机中分面法兰刚度与密封性能 分析及优化[J].东方汽轮机,2023(3):10-15
- [5] 魏红明,蔡林,侯修群,等.1000 MW 核电汽轮机高压缸启动过 程热应力及汽密性分析[J].热能动力工程,2016,31(10):32-37+124
- [6] 黄柳燕,侯明军,王鑫,等.汽轮机不同高压内缸结构径向变形的分析探讨及结构优化[J].东方汽轮机,2020(2):15-18
- [7] 杨德存,陈兴东,陈明东,等.汽轮机汽缸中分面间隙超标的原因分析及处理方法探讨[J].东方汽轮机,2020(2):75-78

# 欢迎投稿,欢迎订阅!

京方東京評論 2025.3.25

## 风力发电机组柔性塔架左右阻尼控制

兰杰<sup>1,2</sup> 林淑<sup>1</sup>

1. 东方电气风电股份有限公司,四川 德阳 618000; 2. 四川大学,成都 610000

摘要:以大型风力发电机组柔性塔架为研究对象,首先对塔架结构动力学和气动学模型进行分析,并结合系统动力学模型,研 究力矩控制对塔架左右振动阻尼控制的可行性,通过线性化模型的可控性秩判据进行证明。再基于塔架顶部左右加速度测 量值,通过积分环节得到塔架顶部左右振动速度,以设计一种塔架左右阻尼控制器。最后通过仿真和现场测试验证了本算法 的有效性,可降低塔架左右振动值,对保障机组安全运行具有重大意义。

关键词:风力发电机组;柔塔;塔架左右振动;阻尼控制器

中图分类号:TP273;TM614

文章编号:1001-9006(2025)02-0022-06

#### Daming Control of Flexible Tower Side-side for Wind Turbine

LAN Jie<sup>1, 2</sup>, LIN Shu<sup>1</sup>

(1. Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China;
 2. Sichuan University, 610000, Chengdu, China)

Abstract: Taking the flexible tower of a large wind turbine as the research object, first analyze the tower structure dynamics

and aerodynamic model, and combine the system dynamics model to study the feasibility of torque control on the right and left vibration damping control of the tower, through linearization the controllability rank criterion of the model is proved. Based on the measured values of the left and right accelerations of the tower top, the left and right vibration speeds of the tower top are obtained through the integration link to design a tower left and right damping controller. Finally, simulation and field tests verify the effectiveness of the algorithm, which can reduce the vibration value of the tower on the left and right, which is of great significance to ensure the safe operation of the wind turbine.

Key words: wind turbine; flexible tower; tower side-side vibration; damp controller

文献标识码:A

近年来,国内风资源快速开发,叶片不断加长, 塔架高度也随之增加。当风机在自然风条件下运 行时,作用在机组叶片上的空气动力、惯性力和弹 性力等交变载荷会使弹性振动体叶片和塔架产生 耦合振动,如果外界激振力的频率与系统的固有频 率相同时,若该固有频率的模态阻尼较小,就极易 发生共振,导致疲劳破坏,缩短机组使用寿命,严重 时甚至会倒塔,塔架振动控制对风机具有重要意义。

当塔架高度超过100米后,为降低机组开发成本,通常采用柔性塔架。相对于刚性塔架,柔性塔

架更易发生振动。针对柔性塔架加阻,已有大量研究。最为直接的是增加各种阻尼器装置<sup>[1-3]</sup>,但是成本较贵。为降低成本,大量学者研究采用阻尼控制算法增加塔架阻尼。文献[4]采用分段塔架加阻方法,对于额定风速附近的塔架振荡有一定的效果。文献[5]分析了引起塔架左右振动的载荷来源,但并未进行主动加阻。文献[6]基于灾变遗传算法优化实现了塔架主动阻尼控制,但智能算法是否最优尚待工程验证。文献[7-8]通过变桨实现塔架前后阻尼控制器,但柔性塔架前后气动阻尼较大,

收稿日期:2024-07-16

基金项目:国家重点研发计划;项目编号:2022YFB4201303。

**作者简介:**兰杰(1985—),男,四川大学在读博士生,高级工程师。现任职于东方电气风电股份有限公司,主要从事控制算法研究与故障诊断工作。

而左右气动阻尼小,机组运行过程中左右振动值通常 更大,效果并非最佳。文献[9]通过线性扩张状态观 测器和无源控制实现了塔架的前后、左右阻尼控制, 但是其控制器结构复杂,很难进行工程应用。 文献[10]基于实测数据来分析机舱振动加速度数据, 获得机组塔架的阻尼,但无法参与实时控制。

基于以上分析,本文采用经典控制理论设计一 种可应于与工程的塔架左右阻尼控制器,并通过仿 真和现场测试进行验证。

#### 1 风力发电机组数学模型

#### 1.1 结构动力学模型

为突出塔架左右振动产生的机理,仅考虑塔架 左右振动自由度,忽略塔架前后和叶片柔性:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \tag{1}$$

式中,X 是塔架各节点左右位移,设塔架一共有 n 个节点,节点 1 为塔架底部,节点 n 为塔架顶部。 则 X 为 n×1 维向量,M 是 n×n 维质量矩阵,C 是 n× n 维阻尼矩阵,K 是 n×n 维刚度矩阵,F 是各节点受 到的外载荷,为 n×1 维向量。为缩减运动自由度, 采用模态分析法:

$$\boldsymbol{X}(m,t) = \boldsymbol{\Phi}(m)\boldsymbol{P}(t), m = 1 \cdots n$$
(2)

式中,P(t)是  $k \times 1$  模态位移向量,P(t)的维数 k 代表选取的自由度的数量, $\Phi(m)$ 是  $n \times k$  塔架模 态振型,带入式(1)得:

 $\boldsymbol{M}\boldsymbol{\Phi}(m)\boldsymbol{\ddot{P}}(t) + \boldsymbol{C}\boldsymbol{\Phi}(m)\boldsymbol{\dot{P}}(t) + \boldsymbol{K}\boldsymbol{\Phi}(m)\boldsymbol{P}(t) = \boldsymbol{F}$ (3)

风轮传动链系统考虑为单质量块系统。

$$T_{\rm A} - T_{\rm G} = J\dot{\Omega} \tag{4}$$

式中, $T_{A}$ 是风轮气动扭矩, $T_{G}$ 是发电机电磁扭矩,J是风轮转动惯量, $\Omega$ 是风轮转速。

1.2 气动学模型

依据二维翼型升阻力系数, dr 微段的叶片产生的切向和轴向力如下:

$$dF_{\rm A} = f(V_{\rm x}, V_{\rm y}, \beta) \, dr \tag{5}$$

$$dF_{\rm T} = g(V_{\rm x}, V_{\rm y}, \beta) dr \tag{6}$$

式中, $dF_{\rm A}$  是微段轴向力, $dF_{\rm T}$  是微段切线力,  $V_{\rm x}$  是轴向相对风速, $V_{\rm y}$  是切向相对风速, $\beta$  是翼型 角度。



2025.3.25

第39卷Vol.39总第156期

東方家氣評論

$$V_{\rm x} = U_{\infty} \left( 1 - a \right) + \Delta v_{\rm x} \tag{7}$$

$$V_{\rm y} = \Omega r (1 + a') + \Delta v_{\rm y} \tag{8}$$

式中, $U_x$ 为风轮未受扰动来流风速,r为叶素半径,a是轴向诱导因子,a'是切向诱导因子, $\Delta v_x$ 是由 于微段轴向运动引起的额外速度, $\Delta v_y$ 是由于微段 切向运动引起的额外速度。a和a'的求解采用叶素 动量理论(BEM)进行迭代求解<sup>[11]</sup>,对应产生的扭 矩为:

 $dT_{\rm A} = dF_{\rm T} \times r \tag{9}$ 





对整个叶片积分,就得到作用于主轴上的合力 矩  $T_A$ 、切向合力  $F_T$ 、轴向合力  $F_A$ 。

$$F_{\rm A} = \int_{R_1}^{R_2} dF_{\rm A} \tag{10}$$

$$F_{\rm T} = \int_{R_1}^{R_2} \cos\theta \ dF_{\rm T} \tag{11}$$

$$T_{\rm A} = \int_{R_1}^{R_2} dT_{\rm A} \tag{12}$$

其中, θ风轮方位角。

#### 1.3 系统动力学模型

为简化分析,仅考虑塔架左右一阶,并区别于

#### 京方電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

式(2),式(13)中模态振型矩阵和模态位移采用小 写字母表达。

$$\boldsymbol{X}(m,t) = \boldsymbol{\varphi} \times \boldsymbol{p}(t) = \left[ \boldsymbol{\varphi}_{1} \cdots \boldsymbol{\varphi}_{n} \right]^{T} \boldsymbol{p}(t), m = 1 \cdots n$$
(13)

其中, $\varphi$ 是*n*×1 向量,*p*(*t*)是标量。

则塔顶位移表示为:

 $x(n,t) = \varphi_n p(t)$  (14) 塔顶速度表示为:

$$v(n,t) = \dot{x}(n,t) = \varphi_{p}\dot{p}(t)$$
(15)

考虑整个风轮为刚性,则风轮随着塔架顶部做 相同平动,因此,式(7)、式(8)中由于塔架左右振动 产生的额外速度分别为:

$$\Delta v_{\rm x} = 0 \tag{16}$$

$$\Delta v_{\rm y} = v(n,t) \tag{17}$$

由图 2 可知,由于塔架左右振动对相对风速入 流角的影响,使得主轴上受到的合力矩、切向合力、 轴向合力还与塔架左右振动有关,即式(10)~(12) 可表示为:

$$F_{\rm A} = F(\Omega, U_{\infty}, \beta, \dot{p}(t))$$
(18)

$$F_{\mathrm{T}} = G(\Omega, U_{\infty}, \beta, \dot{p}(t))$$
(19)

$$T_{\rm A} = M(\Omega, U_{\infty}, \beta, \dot{p}(t))$$
<sup>(20)</sup>

由于塔架通常为圆形,不产生升力,阻力也以 粘性阻力和压差阻力为主,相对风轮来讲,风对塔 架直接产生的载荷较小,可忽略风对塔架直接产生 的载荷,因此式(3)中等式右边可表示为:

$$\boldsymbol{F}^{T} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & F(n) \end{bmatrix}$$
(21)

并令式(19)中 F<sub>T</sub>等于式(21)中等式右边 F (n)可得:

$$\boldsymbol{F}^{T} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & F_{T} \end{bmatrix}$$
(22)

将式(22)带人式(3),并在方程两边乘以 φ<sup>T</sup>
 (*m*),将式(19)带入式(4)可得:

$$M_{\rm p}\ddot{p}(t) + C_{\rm p}\dot{p}(t) + K_{\rm p}p(t) = \varphi_{\rm n}F(\Omega, U_{\infty}, \beta, \dot{p}(t))$$
(23)

$$J\dot{\Omega} = M(\Omega, U_{\infty}, \beta, \dot{p}(t)) - T_{\rm G}$$
<sup>(24)</sup>

 ${\begin{subarray}{c} {\begin{subarray}{c} {\begi$ 

从式(23)、式(24)可知,正是由于塔架顶部水 平速度的耦合,才能使得通过电磁力矩 T<sub>c</sub> 实现对塔 架一阶左右加阻控制,后面将通过线性化模型的可 控性来进一步证明该控制原理的可行性。

#### 2 控制器设计及仿真验证

#### 2.1 模型线性化

从式(23)、式(24)可知,考虑了塔架左右振动, 使得风轮转速 Ω 和塔架左右一阶模态位移 p(t)相 互耦合。为设计出塔架左右阻尼控制器,需先将 1. 3 节得到的系统动力学模型进行线性化。非线性的 产生是由于气动模型的非线性,因此选取不同的稳 态运行点进行线性化。

假设稳态运行点为  $\Omega_0$ ,  $\Omega_0 = 0$ ,  $U_{\infty}^0$ ,  $\beta_0$ ,  $p_0(t)$ ,  $\dot{p}_0(t) = 0$ ,  $\ddot{p}_0(t) = 0$ ,  $T_c^0$ , 将稳态运行点代入式(23)、式(24)可得:

$$K\varphi(s)p_0(t) = \varphi_n F(\Omega_0, U_0^{\infty}, \beta_0, \dot{p}(t))$$
(25)

$$J\Omega_{0} = M(\Omega_{0}, U_{0}^{\infty}, \beta_{0}, \dot{p}(t)) - T_{G}^{0} = 0$$
 (26)

在该稳态运行点对式(23)、式(24)进行 Taylor 展开,并忽略高阶项,可得:

$$M_{p}\ddot{p}(t) + C_{p}\dot{p}(t) + K_{p}p(t) = \varphi_{n}$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \Omega}\Delta\Omega + \frac{\partial F}{\partial\beta}\Delta\beta + \frac{\partial F}{\partial U_{\infty}}\Delta U_{\infty} + \frac{\partial F}{\partial\dot{p}(t)}\dot{p}(t) + F_{0}\right)$$
(27)

$$J\Omega = \frac{\partial M}{\partial \Omega} \Delta \Omega + \frac{\partial M}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial M}{\partial U_{\infty}} \Delta U_{\infty} + \frac{\partial M}{\partial \dot{p}(t)} \dot{p}(t) + M_0 - T_G^0$$

(28)

(30)

$$-\Delta T_{\rm G}$$

将式(27)减去式(25),式(28)减去式(26) 可得:

$$M_{p}\Delta p(t) + C_{p}\Delta p(t) + K_{p}\Delta p(t) = \varphi_{n}$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \Omega}\Delta \Omega + \frac{\partial F}{\partial \beta}\Delta \beta + \frac{\partial F}{\partial U_{\infty}}\Delta U_{\infty} + \frac{\partial F}{\partial \dot{p}(t)}\Delta \dot{p}(t)\right) \qquad (29)$$

$$J\Delta\Omega = \frac{\partial M}{\partial\Omega}\Delta\Omega + \frac{\partial M}{\partial\beta}\Delta\beta + \frac{\partial M}{\partial U_{\infty}}\Delta U_{\infty} + \frac{\partial M}{\partial \dot{p}(t)}\Delta \dot{p}(t) - \frac{\partial M}{\partial \dot{p}(t)}\partial \dot{p}(t) - \frac{\partial M}{\partial \dot{p}(t)}\partial \dot{p}(t) - \frac{\partial M}{\partial \dot{$$

 $\Delta T_{\rm G}$ 

令 $x_1 = \Delta p(t), x_2 = \Delta p(t), x_3 = \Delta \Omega$ ,整理后得到 状态空间模型为:

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{U}$$
(31)  

$$\boldsymbol{\Xi} \boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{X}^{T} = [x_{1} x_{2} x_{3}], \boldsymbol{U}^{T} = [\Delta U_{\infty} \Delta \boldsymbol{\beta} \Delta T_{G}],$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_{\rm p}}{M_{\rm p}} & \frac{\varphi_{\rm n}}{\partial p} \frac{\partial F}{\partial p} - C_{\rm p} & \varphi_{\rm n}}{M_{\rm p}} & \frac{\partial F}{\partial \Omega} \\ -\frac{\partial M}{M_{\rm p}} & \frac{\partial M}{M_{\rm p}} & \frac{\partial M}{\partial \Omega} \\ 0 & \frac{\partial p}{J} & \frac{\partial M}{\partial \Omega} \\ \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{\varphi_{\rm n}}{\partial U_{\infty}} & \frac{\partial F}{\partial M_{\rm p}} & \frac{\partial F}{\partial \beta} & 0 \\ \frac{\partial M}{\partial U_{\infty}} & \frac{\partial M}{\partial \beta} & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}^{\circ}$$

#### 2.2 阻尼控制器设计原理

风力发电机组塔架顶部通常安装有加速度传 感器,令输出方程

Y = CX(32)  $\ddagger \Psi, C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{\circ}$ 

因此,得到从 $\Delta T_{\rm c}$ 到 $\Delta p(t)$ 的单输入单输出状态空间模型,且很容易验证,该模型满足完全可控性,即

$$\operatorname{rank} \begin{bmatrix} \boldsymbol{b} & \boldsymbol{b} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{b} \boldsymbol{A}^2 \end{bmatrix} = 3 \tag{33}$$

其中, $\boldsymbol{b}^{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}$ ,进一步验证了通过电

磁力矩 T<sub>c</sub> 可实现对塔架左右加阻控制。

控制器的设计原理框图如下图 3 所示。



图 3 控制器结构

由于主要是针对塔架一阶左右振动频率加阻, 则通过积分得到塔架左右振动速度后,并采用低通 滤波器消除高频噪声,再通过一个相位校正器,获 得塔架一阶左右振动速度值,最后乘以增益系数, 获得最终的阻尼力矩,阻尼控制器的传递函数结构 如式(34)所示。 京が安和評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

$$G(s) = \frac{K}{s} \times \frac{\frac{s^2}{\omega_1^2} + \frac{2\xi_1 s}{\omega_1} + 1}{\frac{s^2}{\omega_2^2} + \frac{2\xi_2 s}{\omega_2} + 1} \times \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_3^2} + \frac{2\xi_3 s}{\omega_3} + 1}$$
(34)

式中:K为阻尼控制器增益, $\omega_3$ 和 $\xi_3$ 分别是低 通滤波器的截止频率和阻尼比, $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\xi_1$ 和 $\xi_2$ 分别 是相位校正器参数,具体参数值如下表1所示:

表1 阻尼控制器参数表

参数名称	符号	单位	参数值	
阻尼控制器增益	K	Nm/(m/s)	57 245	
相位校正器1频率	$\omega_1$	rad/s	7.5	
相位校正器1阻尼比	$\xi_1$	-	0.1	
相位校正器2频率	$\omega_2$	rad/s	4.6	
相位校正器2阻尼比	$\xi_2$	-	0.5	
低通滤波器截止频率	$\omega_3$	rad/s	6.5	
低通滤波器阻尼比	$\xi_3$	-	1	

阻尼控制器设计完成后,进行 Simulink 仿真如 图 4 所示,结果表明,阻尼控制器有效提高了塔架左 右阻尼。



图 4 单位阶跃响应对比

#### 2.3 仿真验证

本文采用 Bladed 仿真软件<sup>[12]</sup>,对某国产柔性 风力发电机组进行仿真验证,对比在有阻尼和无阻 尼控制下的效果。机组参数表如表 2 所示。

表 2 机组参数表

参数名称	参数值
风轮直径(m)	127
塔架高度(m)	120
塔架一阶左右频率(Hz)	0.18
风轮额定转速(r/min)	13.3
额定功率(kW)	2 000

### またをあい評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

因塔架一阶左右频率为 0.177 Hz,为避免变桨 动作对气动阻尼的影响,采用图 3 所示风力发电机 组力矩控制器,使风轮在 11.55 r/min 附近恒转速 运行,此时未达到额定功率和额定转速,变桨角度 保持不变。此时风轮 1P 频率为 0.192 Hz,与塔架 一阶左右频率的上避开率为 7 %。











图 5~7 仿真结果表明采用塔架阻尼控制器能 够有效降低塔架左右振动,提高机组运行稳定性, 且在 20 s~40 s之间,由于风速降低,风轮转速最低 达到 11.35 r/min,1P 频率与塔架一阶左右频率的 上避开率为 5%,更容易激励塔架一阶左右振动,因 此振动幅值快速增加。

#### 3 现场测试

将设计完成的控制器和参数,在风场机组上进 行测试,并选取现场测试工况相近的数据进行对 比,结果如下。

图 8~10 测试结果表明,采用塔架阻尼控制器 能够有效降低塔架左右振动。







图 9 现场测试功率



图 10 现场测试塔筒左右振动加速度

进一步地对比仿真与测试结果塔架左右加速 度最大值及有效值,可得表 3 、表 4:

表 3 塔筒左右振动加速度最大值

振动最大值	无阻尼	有阻尼	减小百分比
仿真结果(g)	0.049	0.042	16.67 %
实测结果(g)	0.034	0.029	17.24 %

#### 表 4 塔筒左右振动加速度有效值

振动有效值	无阻尼	有阻尼	减小百分比
仿真结果(g)	0.036	0.029	24.14 %
实测结果(g)	0.023	0.020	15.00 %

从表 3、表 4 可知,带有阻尼控制器的运行机组 振动明显降低,与仿真结论一致。即所设计的阻尼 控制器工程上可以实现,也能有效降低柔性塔架风 力发电机组左右振动值。

#### 4 结语

塔架振动控制对风机具有重要意义。本研究 在推导风力发电机组塔架左右振动的耦合模型后, 从机理上解释了塔架左右振动对风轮受载的影响。 将非线性模型线性化处理,并通过线性系统的可控

#### 京で東新評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

性秩判据,证明设计力矩-塔架左右振动阻尼控制器 的可行性。依据经典控制理论设计了易于工程应 用的塔架左右阻尼控制器,通过仿真和现场测试, 验证了所设计算法的有效性,有效保障了机组稳定 运行。

#### 参考文献:

- [1] 阎石,牛健,于君元,等.风力发电机塔架结构减振控制研究综述[J].防灾减灾工程学报,2016,36(1):75-83
- [2] 李杨,兰涌森,李强,等.风力机塔架结构振动控制研究及方法 综述[J].船舶工程,2020,42(S2):248-253
- [3] 陈易明,朱才朝,宋朝省,等. 基于 TMD 的单柱式海上风力发电机系统动态特性分析[J].太阳能学报,2020,41(10): 276-284
- [4] 闵睿,王瑞良,孙勇,等.风力发电机组分段塔架加阻技术研究[J].机电信息,2022(19):81-83+88
- [5] 孙建湖.大型风力发电机组的振动分析与控制策略[D].上海 交通大学,2017
- [6] 刘颖明,张书源,王晓东.基于塔架主动阻尼控制的风电机组
   变速控制参数优化策略研究[J].太阳能学报,2023,44(10):
   296-304
- [7] 陶学军,卢晓光.基于控制方法的风机塔架减振研究[J].机电 工程,2014,31(3):325-329
- [8] 应有,朱重喜,杨帆,等.大型风电机组塔架主动阻尼控制技术 研究[J].太阳能学报,2015,36(1):54-60
- [9] 任丽娜,杨欢欢,毛晨红,等. 基于 LESO 的海上风机塔架振动 无源控制[J].中国电机工程学报,2018,38(19):5854-5862 +5943
- [10] 宋磊建,路绪恒,曹广启,等.基于实测数据的风电机组塔架阻 尼研究[J].风能,2020(4):80-83
- [11] Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe, et al. Wind Energy Handbook, 2nd Edition[M]. Wiley, 2011
- [12] Bossanyi E A. GH bladed user manual [R]. Bristol; Garrand Hassan and Partners Limited, 2009.

# 欢迎投稿,欢迎订阅!

# 永磁直驱风力发电机异常工况 转轴变形分析

#### 李正飞 杨程涛

#### 东方电气集团东方电机有限公司,四川 德阳 618000

摘要:电机作为风力发电机组的核心,长期安全稳定至关重要。某风场一台2MW 永磁直驱电机在台风来临时,发生制动器故障,制动器无法松开刹车盘,导致刹车盘急剧磨损,因刹车盘位于电机轴系,为确定故障对电机零部件是否造成损伤,对该台 电机进行下架返厂拆解检查维修。本文通过拆解后电机零部件实际尺寸测量以及对测量出现差异的转轴使用有限元分析方 法对转轴变形进行复核,分析制动器闭合工况下发电机持续运行对转轴造成的影响,分析发现电机转轴变形,刹车盘磨损严 重.无法继续使用。对永磁直驱风力发电机的设计参数的确定、风场运维运行监控提供了参考价值。

关键词:永磁直驱风力发电机;有限元法;制动器异常;变形分析

中图分类号:TM315 文献标识码:A 文章编号:1001-9006(2025)02-0028-05

#### Analysis of Shaft Deformation in Abnormal Working Conditions of the PMSG

#### LI Zhengfei, YANG Chengtao

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

Abstract: As the core of a wind turbine, the motor is very important for long-term safety and stability. When a 2 MW permanent magnet synchronous generator (PMSG) in an extreme weather of typhoon was coming, the brake failed, and the brake disc could not be released, resulting in sharp wear of the brake disc. The brake disc was located in the motor shafting. In order to determine whether the fault caused damage to the motor parts, the motor was removed from the shelf and returned to the factory for dismantling, inspection and maintenance. This paper measured the actual size of the motor parts after disassembly and used finite element analysis method to review the deformation of the shaft with differences in measurement, analyzed the impact of the continuous operation of the motor on the shaft under the closing condition of the brake, and found that the shaft of the motor was deformed, and the brake disc was seriously worn, making it impossible to continue to use. It provides a reference value for determining the design parameters of PMSG and monitoring the operation and maintenance of the wind farm.

Key words: PMSG; finite element method; brake anomaly; deformation analysis

电机作为风力发电机组的核心驱动部件,要求 电机能够长期在较恶劣环境中工作,其风机运行的 稳定性对于整个发电机枢纽系统稳定运行具有重 大意义,一旦电机出现某种严峻故障而导致停机, 会造成巨大的经济损失,有时甚至烧毁设备或者威 胁人身安全等事故,如图1所示。<sup>[1]</sup>统计数据显示风 力发电机组各类故障比率,其中发电机液压系统故障 占比13.3%,液压系统主要有主轴制动回路、偏航回 路和风轮锁定回路。<sup>[2]</sup>某沿海风场装机多台2MW 永 磁直驱风力发电机,该风场一台电机主轴制动器在

收稿日期:2024-08-09

作者简介:李正飞(1994—),男,2016年毕业于上海理工大学机械设计制造及其自动化专业,大学本科学历,工程师。现任职于东方电气集团 东方电机有限公司,主要从事风力发电机工艺相关工作。

某次台风来临期间,因制动器液压系统控制策略故 障,造成发电机在制动器闭合状态下连续运行约4 小时,导致发电机刹车盘严重磨损及塑性变形,制 动器受损。为确定此次故障对电机及相关零部件 的影响,本文对该台电机进行拆解检查并建立电机 轴系三维模型,通过有限元分析方法进行仿真模拟 计算与实测尺寸进行相互对比验证,确定异常工况 下发电机零部件转轴出现塑性变形情况。



#### 1 电机结构介绍

#### 1.1 发电机结构介绍

2 MW 永磁直驱风力发电机采用外转子、内定 子、单轴承的结构形式,轮毂与发电机转轴直接连 接,机舱与发电机定轴连接。轴系采用一件双列圆 锥滚子轴承的单点支持结构,轴承与定轴采用过渡 配合并在轴承外圈使用螺栓安装紧固,轴承与转轴 采用过盈配合,轴承端面使用轴承压圈压紧。发电 机主轴制动系统位于电机转轴机舱侧,制动环与转 轴整体铸造加工成型,制动器采用支架安装在电机 定轴 2 点和 11 点方向,对称分布着两组常开式液压 盘式制动器,由上下壳体、螺柱、弹簧、活塞、主轴刹 车盘及密封件组成<sup>[2]</sup>,当风力发电机组需要制动 时,液压系统将制动器内部活塞顶出,活塞将液压 力传递至刹车摩擦片,摩擦片抱紧制动环,发电机 实现减速制动。

#### 1.2 故障过程简介

2023 年 10 月故障时,风电场处于台风过境时 期,风速较大且风向变化剧烈。该台机组报制动器 故障,故障期间制动器处于制动状态,电机偏航调 整后,电机仍在低速旋转,随后机舱报高温预警。 台风后登机检查发现机组主轴制动器摩擦片磨损

#### あって あい 気みが 論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

严重,制动器本体部分磨损、边角破损,主轴制动环 严重磨损,内外环磨损量不一致。制动环发现高温 过火情况,轴内腔体存在大量黑色烟雾痕迹。将制 动器更换后,运行时电机内部出现异响情况,为查 明原因,将该台电机下架返厂检修。

#### 2 电机回厂检查情况

(1)电机整体状态:回厂后对电机再次进行电 气检查,定子绝缘性能良好,采用电动机法进行电 机试验,试验参数正常,无异响、振动超差等情况;

(2)对该台电机零部件逐个拆解检查,经检查 电机定子、转子均无异常;拆解发电机轴系,检测轴 承内部油脂成份未发现异常;

(3)复测轴承与转轴端面高度差,该尺寸较初始尺寸偏小,可能存在转轴或轴承轴向尺寸变化;

(4)复测轴承尺寸、定轴尺寸、轴承压圈尺寸, 均与出厂前状态基本一致。复测转轴尺寸,对比转 轴装配前尺寸,发现转轴轴承档尺寸整体变小,且 越靠近机舱侧(刹车盘端)变形越严重,变形量从轮 毂侧至机舱侧为0.25~0.68 mm,轴承档整体为锥 形,整体高度拉长约0.16 mm;转轴出现塑性变形情 况。转轴尺寸复测数据如下表1所示;

表1 转轴尺寸复测

初始	1	2	2	4	5	6	拘估
尺寸	1	2	3	4	5	0	均但
直径	-0.28	-0.2	-0.12	-0.14	-0.21	-0.27	-0.203
D+	-0.06	+0.02	+0.09	+0.06	-0.01	-0.05	+0.008
0.48	+0.18	+0.25	+0.27	+0.25	+0.24	+0.21	+0.233
高度 H+	10.16	10.17	10.17	10.16	10.16	0.17	0 165
0.01	+0.10	+0.17	+0.17	+0.10	+0.10	+0.17	+0.105

(5)检查转轴刹车盘尺寸,刹车盘厚度尺寸急 剧变小,剩余厚度33 mm(原为40 mm),刹车盘内径 尺寸变大,刹车盘出现塑性变形。

(6)经零部件尺寸检查,该台电机除转轴出现 塑性变形外,其余零部件无异常情况,重点对该台 转轴变形进行详细分析。

#### 3 转轴变形分析计算

该台电机转轴采用球墨铸铁 QT400 整体铸造 加工成型,轴承内圈与转轴采用过盈配合,过盈量

mm

#### 京が安和評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

为 0.6~0.8 mm。制动器异常闭合状态下,转轴制 动环端近视于固定,轮毂端在台风期间输入较大弯 矩和扭矩,导致转轴变形。在轴承存在过盈预紧力 的前提下,为确定制动器异常对刹车盘造成有害塑 性变形的理论计算依据,通过进一步建立三维模型 使用有限元分析方法对转轴在台风期间受力情况 进行分析,得到转轴变形计算数据。

#### 3.1 材料参数

根据轴系的实际材料,在有限元模型中定义零 部件材料属性,设置其弹性模量、泊松比、密度等参数。这些参数将直接影响有限元分析结果的准确 性。机组轴系各部件材料参数见下表 2:

部件	材料	弹性模 量 MPa	泊松比	宓臣	屈服	强度
				街皮	极限	极限
				kg∕ m'	MPa	MPa
定轴	QT400	1.69×10 <sup>5</sup>	0.275	7.1×10 <sup>-9</sup>	220	360
转轴	QT400	$1.69 \times 10^{5}$	0.275	7.1×10 <sup>-9</sup>	220	360
端盖	Q345D	2. 10×10 <sup>5</sup>	0.3	7.85×10 <sup>-9</sup>	285	450

表 2 轴系部件材料参数

#### 3.2 计算方法及软件

有限元分析作为一种高效的数值计算方法,在 机械工程领域得到了广泛应用。本文采用有限元 分析软件,对发电机转轴在强风载荷下制动器闭合 状态的变形情况进行了模拟和分析,确定了制动器 闭合状态运行对发电机转轴造成的量化变形和 趋势。

#### 3.3 有限元模型及边界条件

#### 3.3.1 单位制

发电机模型计算采用的单位制以 mm 为长度单位为基础,其详细的各单位如下表 3 所示:

表 3 模型计算单位示例

长度/位移	质量	密度	弹性模量	泊松比	力	转矩
mm	kg	$kg/m^3$	MPa	-	Ν	Nmm

#### 3.3.2 有限元模型

根据 2 MW 永磁直驱风力发电机轴系的结构, 如图 2 所示,首先用三维软件对模型无关特征进行 清理,去掉结构中不涉及分析的螺栓孔、连接螺栓、 垫圈等;对小尺寸且不影响模型有限元计算的倒角 和圆角进行删除简化。建立轴系的几何模型,机组 实体由定轴、转轴、轴承等部件组成,对轴系的几何 模型进行网格划分,生成有限元分析所需的网格模型。添加轴系零部件模型参数,有限元剖面模型如图3所示。



图 2 发电机组轴系三维模型



图 3 轴系三维模型剖面图

#### 3.4 边界条件

根据台风等强风天气下发电机转轴所受的实际载荷情况、轴承过盈量产生的预紧力,设置相应的载荷和边界条件。载荷包括风载荷、重力载荷等,边界条件包括转轴与发电机、风轮等部件的连接方式等。轴系各部件之间螺栓连接的位置均采用绑定约束,轴承接触位置边界条件设置如图4,其中绿色为Bonded,红色为Frictional。



图 4 轴系接触对设置

有限元模型中根据实际载荷作用方向,在本文 中,载荷在 GL 轮毂中心坐标系中给出,在转轴与轮 毂贴合面中心建立与 GL 相同的分析坐标系,同时 应力在相同的计算软件坐标系中给出。轮毂坐标 系的原点定位在旋转中心,并且不能随转轴一起旋 转。电机与主机架的安装位置采用固定约束,外部 载荷设置位置在轮毂中心,在电机与轮毂把合面到 轮毂中心建立载荷伞,轮毂中心距离电机与轮毂安 装面尺寸为 L。载荷设置如图 5 所示。



#### 图 5 轴系载荷设置

#### 3.5 载荷的确定

台风期间,风速和风向变化剧烈,对风力发电 机的转速产生直接影响,该台电机在偏航系统及制 动器闭合状态下,电机转速较低。发电机转速为0~ 2.6 r/min。经调取台风来临期间风速,确定电机故 障期间风速为 8~30 m/s,根据电机转速、故障风速、 结合发电机初始设计输入载荷,设置异常工况载荷 参数,其中 Mx、My、Mz、Fx、Fy、Fz 分别表示在轮毂中 心坐标系下各方向的力矩和力。<sup>[3]</sup>设置的载荷参数 如下表 4 所示:

表 4 制动器闭合工况载荷

	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	安全系数
单位	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	-
载荷	960	-7 500	-600	-260	45	-850	1.5

#### 3.6 计算结果

制动器的摩擦副通过摩擦将机械能转换为热 能使摩擦副的温度升高,但是制动器摩擦副的温度 升高并不是在所有位置或所有点发生相同规律的 变化,而是会由于摩擦的位置和材料的特性的差 异,最终在摩擦副的表面呈现出一种温度的不规则

#### またを和評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

分布,称作温度场。这种温度场的差异使制动盘表 面存在温度梯度,从而影响制动盘的寿命。<sup>[4]</sup>我们 采用了有限元分析方法对在制动器闭合的工况下 转轴刹车盘处的温度分布进行了深入分析。结果 发现,在制动过程中,工件在刹车盘处所达到的最 高温度约为600℃,并沿制动器支架向定轴扩散,沿 刹车盘向转轴轴承档扩散,扩散至转轴轴承档表面 最高温度为340℃。如图6所示。



#### 图 6 轴系温度分布

使用有限元计算软件求解转轴在制动器闭合 工况载荷下的应力分布如图 7 所示,转轴承受了极 高的应力,最大应力值高达 2 140 MPa,已经超出了 转轴的材料的屈服强度 220 MPa,转轴部分轴承档 区域应力也已超过转轴许用应力 200 MPa(材料安 全系数取 1.1)。该工况已经超出转轴的极限强度 设计要求。同理,在忽略轴承等工件对转轴的限 制,仅计算转轴在该工况下的变形,得到转轴最大 径向变形量达到了 3 mm,超过转轴材料的弹性变形 范围。如图 8 所示。



图 7 转轴应力分布

京家東評論 2025.3.25

第39卷Vol.39总第156期



图 8 转轴轴承档径向变形

#### 3.7 计算结论

通过对发电机零部件进行尺寸检查和对轴系 进行三维建模刚强度分析计算,发现在制动器闭合 工况下发电机零部件情况如下:

(1)该台电机虽然在制动器闭合状态下连续运行4小时,但制动器作用在转轴刹车盘上,对定轴、 轴承以及更外部的定子、转子未造成损伤,风险可 控制在关联的转轴上。

(2)制动器异常制动时,摩擦片与制动环产生 大量热量,使制动环长时间处于加热状态,导致材 料发生疲劳变形。<sup>[5]</sup>该台电机刹车盘应力计算已经 超过其材料屈服极限,产生了严重塑性变形,与实 际拆解情况一致;

(3)转轴轴承档大部分位置应力计算也超过其 材料屈服极限,且离热源越近(越靠近刹车盘)变形 越严重且发生了塑性变形,虽变形计算量较实际测 量值存在偏差,原因在于变形计算时将转轴独立出 来单独考虑,未考虑电机轴承、定轴等对转轴变形的限制,但理论计算变形趋势与发电机转轴复测尺 寸变形趋势高度吻合,计算符合实际情况。

#### 4 结语

本文通过对制动器异常工况闭合运行下的电 机进行拆解检查和建立模型进行有限元分析发现, 发电机零部件除转轴外未发生变形。转轴因承受 摩擦产生的高温和台风带来的交变载荷,造成转轴 的塑性变形。因此,在直驱机组设计初期,除考虑 正常工况外,应考虑制动器异常、液压系统等故障 带来的零部件损伤,避免因极端天气或偶发性故障 对电机带来损伤。同时在日常运行维护过程中,除 定子、轴承的运行温度监控外,建议加强对定转轴、 转子磁钢的温度监控,在台风来临等极端天气下, 电机应使用锁销锁定,避免制动器连续作用造成的 零部件失效。

#### 参考文献:

- [1] 于文彬. 永磁风力发电机典型故障的电磁特征分析[D]. 沈阳 工业大学,2023
- [2] 杨宗浩,陈曼龙,齐锐丽,等.兆瓦级风轮发电机液压制动系统的设计与应用[J].机电技术,2018(6):63-66
- [3] 唐斌.风力发电机组铸造主轴的结构设计与强度分析[J].铸造工程,2024,48(3):48-51
- [4] 张杰.盘式制动器摩擦副热结构耦合及模态分析[D].太原理 工大学,2016
- [5] 黎乾,罗泽文.大型水轮发电机组制动系统故障分析[J].人民 长江,2023,54(S1):138-140

# 欢迎投稿,欢迎订阅!

# 基于 PLM 的锅炉管道保温材料计算软件开发

#### 郭峰1,2

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

摘要:在锅炉管道设计领域,保温设计是确保管壁传热控制和蒸汽参数稳定性的关键环节。面对多样化的锅炉连接管温度和 管径规格,以及保温材料层数和数量的多样性,准确且高效地计算保温材料数量对于企业来说至关重要。本研究采用 VB. NET 编程语言,开发一款专门的设计软件。该软件通过自动化设计创新,显著提高了保温设计工作的效率和质量。本文提出 的技术方案和开发策略不仅为锅炉管道保温设计提供了实用的工具,也为类似开发提供了参考价值。

关键词:PLM; 保温材料; 计算软件; 软件开发

中图分类号:TK222 文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)02-0033-05

#### Development of Calculation Software for Boiler Pipe Insulation Materials Based on PLM

#### GUO Feng<sup>1, 2</sup>

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

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

Abstract: In the field of boiler pipeline design, insulation design is a critical link to ensure heat transfer control of pipe walls and stability of steam parameters. Faced with diverse temperature and diameter specifications of boiler connecting pipes, as well as the diversity of insulation material layers and quantities, accurate and efficient calculation of insulation material quantity is crucial for enterprises. This study employs the VB. NET programming language to develop dedicated design software. The software significantly improves the efficiency and quality of insulation design work through innovative automated design. The proposed technical solutions and development strategies not only provide practical tools for boiler pipeline insulation design but also offer reference value for similar developments.

Key words: PLM; insulation material; calculation software; software development

东方电气集团东方锅炉股份有限公司(以下简称"东方锅炉")作为中国电站锅炉设备供应的领军 企业,肩负着众多电站高温、高压管道、容器产品的 设计重任,为使产品安全、可靠,需对产品外壁保温 进行设计。从给水分配管道到受热面之间连接管, 从蒸汽管道到汽轮机、吹灰器、排汽管,到燃油系统 和各种容器,保温设计无所不包。

保温设计实施过程较为复杂,需考虑以下关键 因素: (1)外径:管道外径不同,敷设方式也有所不同。
外径 38 mm 到 1 100 mm 管道需按层敷设,38 mm
以下则需缠绕保温绳。对容器产品(直段可按管道处理),筒身外径超过 1 100 mm,则需专门设计。

(2)温度:管道或容器温度从 100 ℃到 650 ℃ 变化范围大,对应的管道保温厚度则从 60 mm 到 400 mm,并需按标准选取。为精简材料规格,将保 温材料按厚度进一步分为 30 mm、40 mm、50 mm 三 种常用厚度规格的组合。

#### 收稿日期:2024-09-20

作者简介:郭峰(1980—),男,2004年毕业于西安理工大学,本科,工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司从事锅炉技术研发工作。 邮箱:mailguofeng@163.com。
### 京行を和評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

(3)垂直高度:对于高度方向长度超过1m的 垂直管道,为防止材料滑落,需每隔1m设一承重 环,承重环与保温厚度匹配。为了固定并满足业主 对于管道外观的要求,保温最外层需包裹铁丝网, 且每隔一定长度用细铁丝捆扎,并用金属外护板进 行包裹密封。如图1所示。



图1 管道保温基本结构

保温设计完成后,需对所有管道使用金属材料、承重环零件、保温材料进行统计汇总,给出每个锅炉管道部件分层敷设的方法,以指导现场施工。

施工现场为及时完成安装,需在管道安装就绪 之后立即开展保温敷设,导致保温设计周期非常短 暂。然而,以前采用人工查阅管道布置图、利用 Excel输入管子各种数据并进行保温设计计算的方 式,往往需要3周左右的时间才能完成一台锅炉的 保温设计。

因此,本文探讨采用软件开发来解决上述设计 周期较长的问题。主要思路是利用锅炉管道和容 器设备的 PLM(产品生命周期管理系统)数据,结合 保温设计经验进行开发,软件架构如下图 2 所示。



#### 1 使用的资源和技术

#### 1.1 PLM 系统数据

管道保温设计,首先需获得管子外径和长度数据。设计人员以往是通过管道设计图纸,人工输入

Excel 进行数据整理,工作量大,易出错。

本软件开发采用 PLM 系统数据。系统中每种 产品名称、规格均按一定规则、规范书写,利于计算 机处理。比如,所有的管子名称均为"管子",规格 均为类似"φ 外径数字×壁厚数字;L=管长(可省 略)"。

所有管道零件数据均在 PLM 系统,只需设计者 将涉及管道部件导出为 mdb 格式 Access 数据库文 件文件即可获得准确的数据,如图 3。

```
170N07MX_2019-08-13_16-05-51.mdb
170N08-0_2019-08-13_16-06-09.mdb
170N091-0_2019-08-13_16-06-28.mdb
170N161-0_2019-08-13_16-06-28.mdb
170N162MX_2019-08-13_16-07-50.mdb
170N163MX_2019-08-13_16-08-05.mdb
170N164-0_2019-08-13_16-08-26.mdb
170N166MX_2019-08-13_16-09-01.mdb
170N1660X_2019-08-13_16-09-21.mdb
170N0661-0_2019-08-13_16-04-57.mdb
170N0663-0_2019-08-13_16-05-21.mdb
170N0664-0_2019-08-13_16-05-36.mdb
170N1415MX_2019-08-13_16-07-01.mdb
170N1435MX_2019-08-13_16-07-21.mdb
```

图 3 管道部件导出为 Access 数据库文件

#### 1.2 VB. NET 开发技术

VB.NET(Visual Basic.NET)是一种面向对象 的高级编程语言,广泛被应用于软件开发,融合了 多种计算机编程技术。利用该语言开发出的管道 保温材料设计软件,具有良好的适用性和兼容性。

1.2.1 文件操作技术

利用 VB. NET 的文件操作代码模块(图 4),<sup>[1]</sup> 实现了 Access 文件数据批量提取,为下一步识别、 提取管道和容器筒身规格数据做好准备。

```
Public Sub InitializeOpenFileDialog()
ofd2.FileName = ""
Me.ofd2.Filter = _
"所有 mdb 文件(*.mdb)l*.mdbl" + _
"All files (*.*)l*.*"
Me.ofd2.Multiselect = True
Me.ofd2.Title = " 打开所有 mdb 文件"
End Sub
```

图 4 批量打开 Access 文件的函数代码

京方電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

#### 1.2.2 正则表达式技术

正则表达式(Regular Expression)描述了一种字 符串匹配的模式(Pattern),可用来检查一个串是否 含有某种子串或者从某个串中取出符合某个条件 的子串等。<sup>[2-3]</sup>例如,"φ外径数字×壁厚数字",转成 正则表达式可以是" $[\Phi|\phi](\langle d+ \rangle, * \langle d* \rangle)$  [×|x| X](\d+\. \* \d \*)",此表达式含义是:找到一段字 符串,该字符串以"Φ"或"φ"开头,带一个整数或者 小数的数字(外径),后续带"×(乘号)"、"x"(小写 字符)或者"X"(大写字符),然后带一个利用软件 从数据中找到管子零件规格,并提取出相应的管子 的外径、壁厚,结合管子的材料、密度和重量,即可 计算出管子的长度(表1,仅示意)。

|--|

规格	材料	单重	管径	壁厚	长度
φ mm×δ mm	_	kg	mm	mm	mm
φ28×4	20G	118	28	4	49 841.5
φ159×16	20G	134	159	16	2 374.8
φ159×16	20G	274	159	16	4 856
φ273×28	20G	926	273	28	5 473.6
φ273×28	20G	1110	273	28	6 561.2

#### 1.2.3 Excel 交互技术

为便于设计人员使用,软件开发利用了 VB. NET 的 COM 组件操作技术,实现对 Excel 表的交互 操作。<sup>[4-5]</sup>设计人员可用软件直接操作 Excel 中的数 据,实现保温壁厚自动填入、保温材料汇总、自动选 择匹配承重环规格并汇总等等,提高了设计者的设 计效率。

#### 1.3 管道保温设计经验

软件开发将东方锅炉丰富的保温设计经验提 炼得到的经验算式编入程序,简化软件计算流程的 同时,精确计算出实际施工的保温材料数据,提高 了计算效率和准确性。例如,对汽包内连接管道的 三通保温长度计算、弯头保温长度计算等。

#### 1.4 设计人员计算机技能

通过调研设计人员的知识背景和技能水平,确 定以用户为中心的软件开发策略,使用兼容 Excel 操作技术完成了软件开发。经设计人员实际操作, 上手效果良好,得到广泛好评,达到了提升设计工 作效率和质量的目的。

#### 2 开发、调试与迭代升级

开发中,采用"开发→使用→反馈→再开发"的 快速循环迭代升级策略,持续完善软件功能、提升 用户体验。2019年3月至2023年11月,软件迭代 升级70余次,满足保温设计中的众多需求,得到了 保温设计人员充分认可。

开发过程中,软件版本更新频繁,有效的版本 控制至关重要,确保设计人员始终使用的是最新、 最稳定的版本。保障软件使用的安全性和可靠性, 避免使用过时版本引发的各种问题,提升软件的服 务质量和用户满意度。

#### 3 开发成果与成效评估

#### 3.1 软件界面及主要功能

锅炉管道保温材料计算软件按照功能划分主 要分为"管道保温数据表处理"和"管道保温扩展计 算"板块(如图5)。

3.1.1 管道保温数据表处理

"管道保温数据表处理"功能全面覆盖了保温 设计流程中的三个核心步骤。

(1)数据输入。具体包括从 Access 文件中批量 提取数据(如图 5 所示,点击"mdb 批量提取"按 钮),并将数据添加到 Excel 的工作表中(点击"加到 sheet"按钮)。用户可以利用软件提取的 mdb 文件 所涉及的部件名称编码,对工作表进行重新命名 (点击图 5 中的"sheet 更名"按钮)。



#### 图 5 锅炉管道保温材料计算软件主界面(局部)

(2)数据完善。该阶段,需保温设计人员补充 管道的信息到 Excel 表中。例如, mdb 文件中可能 只有管道的名称"管子",此时就需要补充管径、管 子长度等详细信息。此外,还需补充计算保温壁厚 所必要的数据,如管子外壁温度、垂直段长度、弯头

### 京行委員評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

数量、大包内的管道长度、外护板的厚度、管道是否 位于大包内、每段管子所需的具体保温材料类型、 材料密度、管子所处环境温度。数据填写完整后, 用户可点击图 6 中的"保温厚度及层数计算"按钮, 进行保温厚度及分层方法的计算。



#### 图 6 保温厚度及分层计算界面

在保温厚度及分层计算过程中,若遇到管道外 径超出1100 mm 或其他特殊设计要求,则需单独定 制设计,包括对保温材料的选择和保温层厚度的确 定。例如,当保温层由多层不同材料组成,即所谓 的"复合层"保温时,为了便于后续的材料统计和管 理,需对复合层进行详细的分层处理。在 Excel 表 格中,这种分层处理通常体现为在数据表中增加额 外的行来区分不同的材料层(见表 2,第二行中的保 温外径 1940 mm 是由第一行的保温外径 1780 mm 加上两侧各 80 mm 的保温厚度计算得出的,且在此 行中使用了不同的保温材料)。此处理方法不仅有 助于精确计算所需的保温材料数量,亦使施工和材 料管理更为高效有序。

#### 表 2 简身复合层保温按材料拆分(仅为示意)

名称	管径	长度	温度	保温厚度	保温材料	
单位	mm	mm	°C	mm	_	
筒身	1 780	7 000	500	80	硅棉	
筒身	1 940	7 000	500	120	高温玻璃棉	

(3)数据汇总。通过点击图 7 中的"保温材料 汇总"按钮,即可完成该步骤。



图 7 保温材料汇总界面

该步详细列出保温金属材料,具体包括金属外 护板的规格和重量,抽芯铝铆钉数量,承重环的零 件信息等。涉及管径、使用位置、介质温度、环境温 度、保温层厚度、所需数量以及参考图号等。

针对保温材料,要统计保温棉或保温毯的名称、规格、厚度、总重。对于铁丝网,需计算重量,并 按铁丝的规格(外径)和重量进行分类统计。

为确保施工准确、高效,详细说明每根管道保 温材料分层敷设方法,包括管子所属部件的名称、 管径、介质温度、环境温度、管道长度、保温层厚度、 总层数以及不同厚度保温层(如 50 mm、40 mm、 30 mm)的具体层数,保温材料类型等信息。

通过上述汇总统计,软件能够提供一个全面、 详细的保温材料清单和敷设指南,为施工提供清晰 的指导,确保保温施工顺利进行。

3.1.2 管道保温扩展计算

"管道保温扩展计算"用于辅助完成保温设计 流程之外的一系列计算任务。其核心目标是将各 种非标准管件转化为易于计算的管状模型,以便于 进行保温设计和计算。具体包括以下几个计算 功能:

(1) 疏水扩容器等设备的外保温计算。当容器 外径超过1100 mm 时,单独保温设计能够准确计算 出所需的各种材料数量,包括扁钢的长度,以及容 器封头折算为筒身管子长度所需的材料量。

(2)纤维绳体积转换为纤维绳长度。对于直径 φ38以下的管子,该功能将缠绕指定厚度的纤维绳 体积转换为纤维绳的实际长度,简化了材料的采购 和使用(见图 8)。



#### 图 8 纤维绳体积转换为纤维绳长度

(3)伴温管道外周长计算。某些管道需伴温管 道加热,该功能可计算两种管道包扎一起时外围总 周长(参见图 9)。

京テ電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

汗温向氏折异外径 MM						
大管径	108					
小管径	25					
管间距	0					
切线长	51.96152					
外周长	368.7749					
折算外径	117.3847					

#### 图 9 伴温管道外周长计算

(4)保温厚度及分层方案的计算功能,帮助用 户快速获取不同保温层厚度的推荐方案,优化保温 材料分层,并保持方案一致性(见图 10)。

辅助计算功能提高了保温设计的灵活性、准确 性、一致性。

保温厚度查试	洵 mm
管径	483
壁温	576
环境温度	27
□ 大包内	🗏 降档 🗏 室内
保温厚	280
保温分层	
50mm	4
40mm	2
30mm	0

图 10 保温厚度及分层方法计算

#### 3.2 成效评估

本次开发以下七个方面显著提升了保温设计 人员工作效率,降低了工作强度,提高了设计质量:

(1)自动数据处理:批量提取数据并生成完整的 Excel 数据表格与公式配置,减轻了设计人员在数据复制、收集、公式编写以及进行大量情况判断的工作负担,使设计人员精力集中在输入关键数据这一核心工作上。

(2)自动计算:软件依据预设的标准和数据表 信息,自动进行保温厚度和分层方法的批量计算, 显著减少了手动计算工作,提升了计算效率。

(3)自动数据汇总:自动汇总计算结果,设计人员仅需执行少量辅助计算和检查工作。

(4)智能查询与匹配:软件能够自动查询并提 供相近的承重环图号,对于通用件还能自动给出所 需材料和重量信息,减少了查询和匹配承重环的 时间。

(5)自动生成汇总表:能够自动生成承重环汇 总表和保温材料汇总表,自动合并相同的单元格, 大幅降低设计人员数据汇总工作量。

(6)适用广泛:软件的适用范围广泛,只需提供 管道部件 PLM 数据清单,即可提取管道数据并迅速 开展保温设计工作。它不仅适用于各种类型的锅 炉产品,也适用于非锅炉产品。

(7)易学易用:软件的设计注重用户体验,对于 初学者来说,软件提供的引导可以引导快速收集所 需数据,有效缩短学习周期。

#### 3.3 使用软件前后工作成效

由使用软件前后工作效率对比(表 3),可见保 温设计软件的使用对提升工作效率成效显著。

表 3 软件使用前后工作效率对比

	炉型	S/N/M	K/H/J/A/B	
工作日数	原设计	15	12.5	
	原校对	10	7.5	
	现设计	5	3	
	现校对	4	3	
效率提升	设计	200 %	317 %	
	校对	150 %	150 %	

#### 4 结语

本文通过对锅炉管道保温设计提质增效定制化 开发分析,形成专门设计软件,解决了传统设计模式 的弊病,提升了设计质量和效率。随着锅炉保温技术 的进步、设计环境的优化升级、保温设计新的需求出 现,该软件还存在提升空间,仍需不断提升与改进,向 更高效率、更高质量、更加智能化的方向发展。

#### 参考文献:

- [1] 陈志泊. Visual Basic. NET 程序设计教程[M]. 人民邮电出版 社,2009年4月第1版:218-307
- [2] 刘智慧. 正则表达式的应用[J]. 电脑编程技巧与维护,2010(12):22-23+38
- [3] 罗恒洋,张林. Java 中的正则表达式应用探讨[J]. 电脑知识与 技术,2019,15(32):95-98
- [4] 苏庆,李忠良,吴伟民.在 C#. NET 下实现数据导入 Excel 的方 法研究[J]. 计算机与现代化,2011(4):29-31
- [5] 孟小红.对 Excel 表格的 BOM 表数据处理[J]. 电脑编程技巧 与维护,2020(6):92-94

京を東評論 2025.3.25

## 300 Mvar 空冷调相机稳态负序能力分析

肖翦 周光厚 李朝科 王勇 杨勇 牛童

东方电气集团东方电机有限公司,四川 德阳 618000

摘要:本文建立了以橫向月牙槽为主要关注点的三维电磁场有限元计算模型,分析了 300 Mvar 空冷调相机不同负序时的涡流 损耗分布情况。由于局部三维温度场分析的边界条件设置难度大,精确模拟转子最高温度值比较难。而且与 300 Mvar 空冷 调相机的结构型式和冷却方式等方面都完全相同的 412 MVA 空冷汽轮发电机已经完成了厂内负序能力试验。因此本文通过 这两个电机的负序涡流场的有限元对比分析与 412 MVA 空冷发电机试验测试相结合的方法来确定 300 Mvar 空冷调相机的稳 态负序能力。

关键词:调相机; 负序能力; 涡流损耗; 有限元 中图分类号:TM311 文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)02-0038-06

### Analysis of Steady-state Negative Sequence Capability of 300 Mvar Air-cooled Condenser

XIAO Jian, ZHOU Guanghou, LI Chaoke, WANG Yong, YANG Yong, NIU Tong

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

Abstract: A three-dimensional electromagnetic field finite element calculation model with the transverse crescent groove as the focus was established in this paper. The distribution of eddy current losses of the 300 Mvar air-cooled condenser under different negative sequence state was analyzed. Due to the difficulty in setting boundary conditions for local three-dimensional temperature field analysis, it is difficult to accurately simulate the maximum temperature value of the rotor. The negative sequence capacity test of the 412 MVA air-cooled turbogenerator, which is identical in terms of structure and cooling method to the 300 Mvar air-cooled condenser, was completed in the factory. Therefore, the steady-state negative sequence capacity of the 300 Mvar air-cooled condenser was determined in this paper by means of finite element comparative analysis of the negative sequence eddy current field and the 412 MVA air-cooled generator test. Key words: condenser; negative sequence capacity; eddy current loss; finite element

正常运行时,调相机的定子电流为三相对称的 正序电流,此对称的正序电流产生的磁场为同步速 度的正序旋转磁场。当发生不对称运行时,定子绕 组中会出现负序电流。该电流所产生的负序磁场 也以同步转速旋转,但与正序磁场的旋转方向相 反,从而在转子表面各部件上感应2倍工频电流。 由于2倍工频电流在转子上分布不均匀,发热也不 均匀,容易出现局部过热,可能导致转子局部烧损, 影响局部结构的机械性能。而大型调相机的转子 转速很高,对转子各部件的机械性能有着严格的要求,局部的机械性能降低有可能带来灾难性的后果,导致转子结构遭到严重破坏,威胁到电机的安全。

早期汽轮发电机负序能力的研究以试验研究 分析为主;随着有限元仿真分析方法推广应用,又 多采用二维或局部三维电磁场和温度场仿真分析 来确定其负序能力。<sup>[1-3]</sup>由于温度场分析是局部三 维计算模型,转子表面存在较多沟、槽、孔等,边界

收稿日期:2024-09-14

作者简介:肖翦(1984—),男,硕士,研究方向为电机电磁分析与试验研究。邮箱:xiaojian2005e@126.com。

条件设置难度高,精确模拟转子最高温度值会比较 难。而试验研究成本高、耗时长。如果结构型式和 冷却方式等相似,采用电磁场仿真对比分析与试验 测试相结合的方法来确定电机的负序能力则能兼 顾两种方法的优点。

本文要分析的 300 Mvar 空冷调相机与已开发 的 412 MVA 空冷汽轮发电机在结构型式和冷却方 式等方面都完全相同,仅仅只是线负荷及转子几何 尺寸略有差异。而 412 MVA 空冷汽轮发电机已经 完成了厂内负序能力试验,取得了足够的数据,确 定了其负序能力。故本文采用电磁场有限元对比 分析和试验测试相结合的方法来确定 300 Mvar 空 冷调相机的稳态负序能力。

#### 1 计算模型

#### 1.1 调相机基本参数

300 Mvar 空冷调相机的设计参数见表 1。

项目	数值	单位
额定容量	300	Mvar
额定电压	20	kV
额定电流	8 660.3	А
极数	2	/
相数	3	/
额定频率	50	Hz

#### 表 1 300 Mvar 空冷调相机基本参数

#### 1.2 仿真模型

412 MVA 空冷发电机的试验表明其高温点在 横向月牙槽端头,由于两机的结构型式和冷却方式 完全一样,可以认为 300 Mvar 空冷调相机的高温点 亦如此。因此,本文以横向月牙槽为主要关注点建 立了的电机的三维电磁计算模型,考虑了定子铁 心、定子绕组、转子铁心、转子绕组、转子槽楔、阻尼 绕组。该模型在电机的轴向取一个整月牙槽长度 和一个整非开槽部分的长度。网格剖分采用了局 部细剖技术,提高网格质量,提高计算精度。

负序工况的加载方式,是在额定正序电流的基础上,再叠加一定程度的负序电流,从而计算出满载情况下的损耗情况。相比以往多数文献中只加载负序电流而忽略正序电流的做法,本方法更加符合实际情况。

### 京が電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

在考虑满足工程精度要求的前提下,为了方便 计算作如下假设:

(1)忽略定子绕组中的涡流;

(2)由于槽楔和阻尼绕组的作用,在转子绕组 中感应的涡流值很小,故忽略了转子绕组中的涡流;

(3)激励源和各场量均按正弦规律变化,忽略 谐波分量;

(4)忽略位移电流;

(5)材料的电阻率恒定。



图 1 300 Mvar 空冷调相机计算模型



图 2 412 MVA 空冷汽轮发电机计算模型

#### 2 有限元计算离散方程

三维涡流场的定解可以一般化地归结为如图 3 所示典型求解区域内的电磁场定解问题。求解 域分为无源的导电涡流区和包含电流源的非涡流 区。图中的 *S*<sub>12</sub> 为有源和无源域的分界面;*S*<sub>B</sub> 和 *S*<sub>H</sub> 为计算域 *V* 的边界上给定磁感应强度的法向、 切向分量的外边界面。在各边界面上均加载齐次 边界条件。

调相机三维正弦涡流场边值问题可表述为如 下离散方程<sup>[47]</sup>:





图 3 涡流问题求解域示意图

$$\nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \cdot A) +$$

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \varphi = 0$$

$$a \dot{A}$$

 $\nabla \cdot \left( -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \varphi \right) = 0$   $\nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \cdot A) = J_{s} \qquad \text{ tr} V_{2} \ \text{P}(2)$ 

$$\begin{array}{c} n \cdot A = 0 \\ (v \nabla \times A) \times n = 0 \end{array}$$
  $(E S_{\rm H} \perp (4))$ 

$$\begin{array}{l} \dot{A}_{1} = \dot{A}_{2} \\ v_{1} \nabla \cdot \dot{A}_{1} = v_{2} \nabla \cdot \dot{A}_{2} \\ (v_{1} \nabla \times \dot{A}_{1}) \times n_{12} = \\ (v_{2} \nabla \times \dot{A}_{2}) \times n_{12} \\ n \cdot (-\sigma \frac{\partial \dot{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \dot{\varphi}) = 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \notin S_{12} \perp (5) \\ \notin S_{12} \perp (5) \\ \end{cases}$$

式中,*n* 为外边界  $S_{\rm B}$  或  $S_{\rm H}$  的单位法向矢量; $n_{12}$  为  $S_{12}$  的单位法向矢量,方向从  $V_1$  指向  $V_2$ ; $J_s$  为电流源密度。

#### 3 电磁仿真计算结果

以下电磁场仿真工况均为稳态负序工况。

#### 3.1 412 MVA 空冷发电机电磁仿真结果

412 MVA 空冷发电机 10 % 负序工况的仿真结 果如图 4~9 所示。其中图 4 是转子铁心磁密分布 图,图 5 为转子铁心涡流损耗分布图,图 6 是槽楔磁 密分布图,图 7 为槽楔涡流损耗分布图,图 8 是阻尼





图 4 转子铁心磁密分布



图 5 转子铁心涡流损耗分布



图 6 槽楔磁密分布



图 7 槽楔涡流损耗分布



图 9 阻尼绕组涡流损耗分布

表 2 412 MVA 发电机转子部件平均损耗 (kW)

项目	额定负载	10%负序	15 %负序
转子铁心	1.45	5.96	11.77
槽楔	0.85	2.03	3.65
阻尼绕组	0.92	0.43	0.95
总损耗	3.22	8.42	16.37

注:损耗为计算模型轴向长度的转子部件损耗。

仿真结果显示,在将损耗分解为正序损耗和负 序损耗后,可以发现负序引起的损耗基本与负序程 度的平方成正比。转子铁心涡流损耗集中在大齿 表面,小齿上的涡流损耗值较小,涡流透入深度较 大齿浅。当412 MVA 空冷汽轮发电机运行在10% 负序工况时,转子铁心涡流损耗最高点为3.79E7 W/m<sup>3</sup>;槽楔涡流损耗最高点为3.36E6 W/m<sup>3</sup>;阻尼 绕组涡流损耗最高点为1.07E6 W/m<sup>3</sup>。

#### 3.2 300 Mvar 空冷调相机电磁仿真结果

300 Mvar 空冷调相机 15 % 负序工况的仿真结 果如图 10~15 所示。其中图 10 是转子铁心磁密分 布图,图 11 为转子铁心涡流损耗分布图,图 12 是槽 楔磁密分布图,图 13 为槽楔涡流损耗分布图,图 14 是阻尼绕组磁密分布图,图 15 为阻尼绕组涡流损耗 分布图。



第39卷Vol.39总第156期

京家東評論 2025.3.25

IGFANG ELECTRIC REVIEW

图 10 转子铁心磁密分布



图 11 转子铁心涡流损耗分布



41





表 3 300Mvar 调相机转子部件平均损耗 (kW)

项目	额定负载	10%负序	15 %负序
转子铁心	0.68	3.33	6.76
槽楔	0.47	1.10	1.96
阻尼绕组	0.09	0.25	0.56
总损耗	1.24	4.68	9.28

注:损耗为计算模型轴向长度的转子部件损耗。

仿真结果表明,当300 Mvar 空冷调相机运行在 15%负序工况时,转子铁心涡流损耗最高点为 3.72E7 W/m<sup>3</sup>:槽楔涡流损耗最高点为 3.12E6 W/m<sup>3</sup>: 阻尼绕组涡流损耗最高点为 3.34E5 W/m<sup>3</sup>。

#### 4 412 MVA 空冷发电机负序能力试验

图 16 是 412 MVA 空冷发电机稳态负序能力试 验中转子表面测点在不同负序程度时的最大温升 数据。该试验结果表明限制发电机负序程度的部 位在大齿的月牙槽附近。根据该温升试验数据进 行推算可以得到各部件对应最大温升允许值时的 负序程度,相关数据见表4。试验结果分析表明当 转子部件温度到130℃时,发电机的稳态负序程度

为10.4%,这说明412 MVA 空冷发电机的稳态负 序能力为10.4%。



图 16 稳态负序能力试验温升结果

表 4 稳态负序能力试验值

温升	5.10 %	7.02 %	9.94 %	允许	负序
项目				温度	程度
槽楔	16.97	22.82	38.25	130	10.6 %
小齿	14.12	15.82	21.8	130	17.0 %
大齿	19.45	24.99	39.46	130	10.4 %
护环搭接面	17.69	21.94	31.2	130	12.5 %

#### 300 MVar 空冷调相机负序能力计算 5

试验表明 412 MVA 空冷发电机的最高温度位 于大齿的月牙槽附近,300 Mvar 空冷调相机在结构 型式和冷却方式等方面与 412 MVA 空冷汽轮发电 机完全相同,因此其最高温度也在同一区域。

温升计算满足牛顿冷却定律:

 $q = \alpha \Delta T$ 

(6)

式中,q表示单位时间单位面积上释放的热量,  $\Delta T$  为部件表面温升. $\alpha$  为部件的散热系数。

由于 300 Mvar 空冷调相机和 412 MVA 空冷汽 轮发电机的最高温度在同一区域,因此它们允许的 最大温升就应该一样,由(6)式可得[8]:

 $q'/\alpha' = q''/\alpha''$ (7)

式中,q'、q"表示 412 MVA 空冷发电机和 300 Mvar 空冷调相机的散热量,  $\alpha'$ 、 $\alpha''$ 表示电机的散热 系数。影响散热系数 α 的因数很多,但由于工况、 转速、直径、转子线速度相同,冷却方式也相同,因 此散热系数可以认为是相同的。

两电机的发热量、电密的关系如公式8所示:  $(J'/J'')^2 = q'/q''$ (8) 式中,J'、J"表示 412 MVA 空冷发电机和 300 Mvar 的电密。

根据上述电磁场有限元仿真结果,当412 MVA 空冷汽轮发电机为10%负序工况时,转子本体涡流 损耗最高点为3.79E7 W/m<sup>3</sup>;当300 Mvar 空冷调相 机为15%负序工况时,转子本体涡流损耗最高点为3.72E7 W/m<sup>3</sup>。试验结果表明412 MVA 空冷发电 机的稳态负序能力为10.4%,由此可以计算412 MVA 空冷发电机允许涡流损耗密度。

 $p' = (\frac{0.104}{0.1})^2 \times 3.79 = 4.099 3 \text{ (E7 W/m}^3)$ 

300 Mvar 调相机的负序电流可由以下公式确定。

$$I''_2 = \sqrt{\frac{4.0993}{3.7195}} \times 15 \% = 15.75 \%$$

计算结果表明 300 Mvar 空冷调相机稳态负序 能力为 15.75 %。

#### 6 结语

本文通过电磁场有限元法对 412 MVA 空冷汽 轮发电机和 300 Mvar 空冷调相机在不同负序程度 的负序涡流场进行了对比分析,并结合 412 MVA 空 冷汽轮发电机的真机负序试验结果推算了 300 Mvar 空冷调相机的稳态负序能力。通过分析可以得出 以下结论:

(1)300 MVar 空冷调相机承受稳态负序能力为 15.75%,负序能力满足标准和技术合同的要求;

### 京を東評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

(2)负序试验和仿真分析均表明转子大齿的月 牙槽附近是涡流比较集中、温升最高的区域,它限 制了电机的负序能力。分析也表明月牙槽的宽度、 深度等参数都会影响转子表面涡流分布;

(3)由于计算规模限制,计算中未考虑转子配 重螺孔的影响,但可以定性判断的是,在月牙槽附 近的配重螺孔,也会产生挤流效应,特别距离月牙 槽越近,影响越显著,在满足机械性能的情况下,应 使配重螺孔尽可能地远离月牙槽。

#### 参考文献:

- [1] D. Ban, D. Zarko and Ivan Mandic. Turbogenerator end-winding leakage inductance calculation using a 3-D analytical approach based on the solution of Neumann Integrals. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2005, 20:98 -105
- [2] 夏海霞,姚缨英,熊素铭,等.1000 MW 汽轮发电机端部磁\_热耦合分析[J].中国电机工程学报,2008,28(14):118-121
- [3] 钟后鸿,咸哲龙,刘明慧. 330 MW 蒸发冷却汽轮发电机负序涡 流场三维分析与损耗计算[J].大电机技术,2008(4):51-54
- [4] 梁艳萍,陆永平,朱宽宁,等.汽轮发电机失磁异步运行时转子 端部漏磁参数与涡流损耗的分析计算.中国电机工程学报, 2004,24(11):112-113
- [5] 高金龙.大型水轮发电机端部涡流损耗计算[D].哈尔滨理工 大学硕士学位论文,2011,17-19
- [6] 黄浩.大型空冷汽轮发电机端部三维涡流场有限元分析[D].哈尔滨理工大学硕士学位论文,2006,8-11
- [7] 李朝科,李志强,肖翦,等. 300 MVar 调相机端部电磁场三维有 限元分析[J].东方电气评论,2016,30(3):19-23
- [8] 周光厚,候小全.东方 600 MW 汽轮发电机负序能力研究[J]. 东方电气评论,2004,18(1):20-23

المستار ا

#### 东方电气评论关于启用投审稿系统的公告

#### 致作者和审稿专家:

为提高服务和沟通质量、进一步提升期刊的投审稿效率,《东方电气评论》自2025年3月25日起正式启用投审稿平台。 平台为北京仁和汇智投审稿管理系统,基于阿里云服务器部署,支持用户使用手机号码及电子邮箱注册激活,推荐使用以下 方式访问登陆使用:访问地址1:http://dfdqpl.xml-journal.net/,主页点选"作者投稿/专家审稿"。访问地址2:https://www. manuscripts.com.cn/dfdqpl。投审稿系统启用后,已通过邮箱 dfdqpl@ dongfang.com 投稿的稿件不受影响,如有问题,请与编辑 部联系。联系电话:028-87898263;邮箱:dfdqpl@ dongfang.com

感谢各位专家学者一直以来的关注和支持,编辑部将继续完善投审稿平台的功能和数字化流程,不断提高服务满意度, 欢迎广大科研工作者、专家、学者投稿。

> 《东方电气评论》编辑部 2025年3月25日

# 基于 Workbench 的污轮机低压叶片 振动特性研究

苟小平 范志飞 程叶叶 谢贞军

东方电气集团东方汽轮机有限公司,四川 德阳 618000

摘要:利用 Workbench 对低压 333 叶片和 633 叶片进行了带预应力的模态分析。每只叶片的分析分为两种模式,一种是计算 考虑相邻围带之间的接触,另一种是围带印记面法计算共振频率。两种模式都分别更改围带和叶根的接触方式,以尽可能的 模拟真实的接触刚度。得到了不同计算模式下叶片的共振频率,并将共振频率与试验结果进行了对比,找到了最接近试验结 果的计算方式。为后续叶片的振动设计提供了参考。

关键词:振动;有限元;叶片;接触

中图分类号:TK263 文献标

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)02-0044-06

### Research on Vibration Characteristics of Steam Turbine Low Pressure Blade Based on Workbench

GOU Xiaoping, FAN Zhifei, CHENG Yeye, XIE Zhenjun

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

Abstract: The pre-stress modal analysis of low pressure 333 blade and 633 blade is carried out by the workbench. There are two modes of analysis for each blade. One method considered the contact behavior between adjacent shroud. The other is to calculate the resonance frequency by the shroud imprinting surface method. Both modes change the contact mode of shroud and blade root respectively to simulate the real contact stiffness as much as possible. The resonant frequencies of the blades under different calculation modes are obtained, and the resonant frequencies are compared with the experimental results. The calculation method closest to the test results is found. It provides a reference for the vibration design of subsequent blades.

Key words: vibration; finite element; blade; contact

汽轮机是一种大型的动力设备,主要用于火电 站、核电站以及工业驱动领域。汽轮机在社会经济 发展中起到了一定的作用。但汽轮机事故也屡屡 发生,在汽轮机事故中叶片断裂的事故占到了很大 的比重。汽轮机叶片的断裂是一个非常复杂的问 题,但其中因为振动而导致叶片的断裂是一个不可 忽视的原因。因此学者们对叶片的振动展开了大 量的研究。

袁巍等对带冠预扭涡轮叶片的振动特性进行

了研究。<sup>[1]</sup>龙伦等对航空发动机带冠涡轮叶片的振动特性也进行了研究,发现考虑围带接触面积计算得到的频率值更接近真实值。<sup>[2]</sup>

汽轮机叶片分为静叶片和动叶片,静叶片由于 不转动,属于静子部件,其运行过程中相对于动叶 片来说比较安全。因此对静叶片的振动特性研究 较少。动叶片大致分为短叶片和长叶片。一般高 压叶片属于短叶片,短叶片在振动设计时主要考虑 的是高频共振问题。而低压末三级就属于长叶片

收稿日期:2024-09-23

作者简介: 苟小平(1986—), 男, 毕业于四川大学工程力学专业, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事汽轮机关键叶片的研发工作。

了,长叶片在振动设计过程中主要考虑的是低频共振。在低压末三级叶片中,比较特殊的是末级和次次末级。末级也就是低压倒数第一级由于叶片长度最长,叶根和叶型截面受到的离心力很大,再加上水蚀的作用,导致其运行工况恶劣。<sup>[3]</sup>容易因为强度和水蚀的原因导致破坏。低压次次末级由于工作在干湿蒸汽过渡区,导致其发生事故的可能性也随之增加。

本文对汽轮机低压次次末级(低压倒数第三 级)333 叶片以及低压次末级(低压倒数第二级)633 叶片的振动特性进行了计算。计算分为两种模式, 一种是考虑围带之间的接触,并更改围带和叶根的 接触状态,计算不同组合情况下叶片的共振频率。 另一种是围带采用印记面法计算叶片的共振频率, 更改围带印记面的大小、位置并调整叶根的接触设 置,计算不同组合情况下叶片的共振频率。调整围 带、叶根的接触状态是为了研究不同的接触状态对 接触刚度的影响,不同的接触刚度将影响计算得到 的共振频率。最后将计算得到的共振频率与叶片 的试验共振频率进行了比较,找到了最接近试验共 振频率的计算方式,为叶片的振动设计提供了参考 依据。

#### 1 333 叶片和 633 叶片结构简介

333 叶片的结构示意图如图 1 所示。333 叶片围 带设计成 V 字冠预扭成圈结构,叶片在工作状态下, 图中圆圈所示的围带内背弧两个面会与相邻叶片的 这两个面紧密贴合。实现叶片工作状态下形成整圈 结构,这有助于改善叶片的振动特性,降低振动时叶 片的动应力。叶根中间体背弧有一个突出的轴向定 位凸台。333 叶片叶根采用 3 齿菌型叶根。



图 1 333 叶片结构示意图



图 2 633 叶片结构示意图

633 叶片的结构示意图如图 2 所示。633 叶片 的围带同样设计成 V 字冠成圈结构,叶根采用 5 叉 叉型叶根,叶根通过上中下三根销钉将叶片固定在 叶轮上。

#### 2 低压叶片共振频率的确定

图 3 给出了低压叶片振动坎贝尔图的示意。图 中横坐标是转速,单位是转/分,纵坐标是频率,单 位是 Hz,红色斜线是谐波阶数 K。图 4 是图一中黑 色圆圈部分的局部放大图。



共振频率的确定方法如下,利用商业有限元分析 软件计算得到叶片在两个不同转速下的节径振动频 率,比如图 4 中点 1 是 3 000 r/min 下叶片的 6 节径

### 京方 安 和 評論 2025.3.25 第39卷 Vol.39总第156期

1 阶频率值,点2是3300 r/min 下叶片的6节径1阶 频率值。点1和点2的连线与K=6斜线的交点3就 是叶片的6节径1阶共振点,该点对应的横坐标就是 共振转速,纵坐标就是共振频率。

#### 3 333 叶片振动特性分析

333 叶片考虑围带接触的计算模型如图 3 所示。将叶片劈开成两半,以模拟相邻围带工作面之间的接触。计算边界条件如下:

(1) 围带和叶轮径向面设置了循环对称边界;

(2) 围带工作面设置接触;

(3)叶根与轮槽接触面设置接触;

(4)模型整体施加 3 000 r/min 或 3 300 r/min 的转速;

(5)叶轮进汽侧端面施加无摩擦支撑;

(6) 叶轮进汽侧和出汽侧径向面施加圆柱面 约束。



#### 图 5 333 叶片围带接触计算模型

333 叶片的危险节径频率是 6 节径 1 阶和 7 节径 1 阶。333 叶片考虑围带接触计算得到的共振频率如表 1 所示。333 叶片的 6 节径 1 阶试验共振频

率是312.2 Hz,7 节径1 阶试验共振频率是317.6 Hz。 表中频率差异是计算频率与试验频率的差值。通 过更改叶根、围带、凸台的接触状态,一共对5 种不 同的接触组合情况进行了计算。

图 6 给出了 333 叶片在围带绑定,凸台绑定,叶 根接触情况下的 6 节径 1 阶和 7 节径 1 阶振型图。 他们的振型都是典型的节径振动。



图 6 333 叶片 6 节径 1 阶(上)和 7 节径 1 阶(下)振型图 根据计算经验,由于绑定得到的接触刚度远大
于接触得到的接触刚度,因此,本文对于叶根、围
带、凸台接触设置选取绑定还是接触,初始进行了
试算。当接触设置得到的频率低于试验值时,将接
触改为绑定。当绑定计算得到的频率值高于试验
值时,将绑定改为接触,运用了试凑法的思路。文
中没有将所有的接触绑定组合情况一一列举出来,
但将典型的五种情况进行了罗列。

表 1	333 叶片围带考虑接触共振频率计算结果

		共振频	共振频率/Hz		差异/Hz	围带平均接		
叶根	围带	凸台	6节径	7 节径	6节径	7 节径	触应力/MPa	
绑定	绑定	接触	310.31	314.77	-1.89	-2.83	-15.8	
接触	接触	接触	174.81	177.12	-137.39	-140.48	6.8	
绑定	绑定	绑定	320.18	325.9	7.98	8.3	-27.4	
绑定	接触	绑定	164.34	158.24	-147.86	-159.36	6.7	
接触	绑定	绑定	303.18	308.26	-9.02	-9.34	-16.3	

由表1中的数据可知,叶根与轮槽之间的接触 设置为绑定,相邻围带之间的接触设置为绑定,叶 根定位凸台与叶根中间体的接触设置为接触时计 算得到的333叶片6节径1阶和7节径1阶共振频 率与试验值只相差2Hz左右,已经非常接近了。同时,从计算结果还可以看出,围带之间的接触设置 对结果影响很大,对于333这种类型的叶片,相邻围 带之间设置为绑定能更好的模拟接触刚度。若围

带之间设置为接触,则接触刚度远低于真实情况。

另外,表1中也列出了围带接触应力,相对于叶 根的接触应力来说,在叶片的振动分析以及结构设 计方面,设计人员更关心的是围带的接触应力,围 带的接触应力直接关系到叶片工作状态下是否能 够满足成圈的要求。由表中第一行数据可知,叶根 绑定,围带绑定,凸台接触时计算共振频率与试验 频率只相差2Hz左右的围带平均接触应力为-15.8 MPa。负值表示围带接触面之间是拉应力,这是由 于绑定约束是强行将围带两个面约束在一起,此时 接触面上某些区域是压应力,也有一些区域是拉应 力。图7给出了此时围带接触应力的分布图,从图 中可以看出围带接触面顶部绝大部分区域是压应 力,但围带接触面右侧和底部绝大部分区域都是拉 应力,这是由于绑定约束造成的这种情况。即绑定 可以模拟围带的接触刚度,但对于围带接触应力的 计算,结果只能作为参考。



图 7 333 叶片围带绑定设置接触应力分布示意图

图 8 给出了表 1 中第二种情况,即叶根接触,围 带接触,凸台接触情况下计算得到的围带接触应 力。从图中可以看出,围带接触面应力都为正,即 压应力,这与实际情况相符。另外,围带接触面左 上方取得最大接触应力 31.2 MPa,围带右下方区域 接触应力为 0。整个围带接触面的平均接触应力为 6.8 MPa。

333 叶片采用围带印记面法计算共振频率的计 算模型如图 9 所示。在围带的接触区域,分别选取 了 3 块不同大小和位置的区域作为印记面,这三个 印记面的示意图如图 10 所示。其中计算模型 1 的 印记面选取在图中围带背弧接触面的右上角,为一 小块矩形区域;计算模型2的印记面选取在围带背 弧接触面的下方,为一小块矩形区域;计算模型3的 印记面选取围带背弧的几乎整个接触面,为一大块 矩形区域。



图 8 333 叶片围带接触设置接触应力分布示意图



333 叶片采用围带印记面法计算共振频率的边 界条件与上部分考虑围带接触的基本一致,只是将 围带内背弧的印记面也做循环对称约束。计算得 到的共振频率结果如表 2 所示。

#### 東方で東い評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

#### 表 2 333 叶片采用围带印记面法共振频率计算结果

		共振频率/Hz		共振频率差异/Hz	
叶根接触状态		6节径	7 节径	6节径	7 节径
模型1	绑定	310.48	313.6	-1.72	-4
	接触	294.55	297.28	-17.65	-20.32
模型 2	绑定	308.72	311.4	-3.48	-6.2
	接触	292.15	294.48	-20.05	-23.12
模型3	绑定	315.6	320.78	3.4	-13.38
	接触	299.42	304.22	-12.78	3.18

由表 2 中的数据可知,采用围带印记面法计算 得到的共振频率只有叶根接触设置为绑定时才比 较接近试验共振频率。此时,6、7 节径计算共振频 率与试验值的差异在-6.2~3.4 Hz 之间。当叶根 接触设置为接触时,接触刚度比真实情况低很多, 计算得到的 6、7 节径共振频率比试验值低 12.8~ 23.1 Hz。

由于采用印记面法计算叶片的频率没法模拟 相邻叶片之间的围带接触,也就没法提取围带接触 应力,因此本部分没有列出围带接触应力结果。

用围带印记面法计算共振频率时,计算值与印 记面的大小和位置有关,选取不同的印记面大小和 位置将对结果产生很大影响。相比之下,333 叶片 利用第一种考虑围带接触的计算方法计算共振频 率更加稳定可靠。

#### 4 633 叶片振动特性分析

633 叶片考虑围带接触的计算模型如图 11 所示。将围带内弧切割一部分旋转一个径向角度到 背弧,以模拟相邻围带之间的接触。计算边界条件 如下:



图 11 633 叶片围带接触计算模型(1)围带和叶轮径向面设置了循环对称边界;(2)围带工作面设置接触;

(3) 销钉与叶根和轮槽接触面设置接触;

(4)模型整体施加 3 000 r/min 或 3 300 r/min 的转速;

(5)叶轮进汽侧端面施加无摩擦支撑;

(6)叶轮进汽侧和出汽侧径向面施加圆柱面 约束。

633 叶片的危险节径频率是 6 节径 2 阶和 7 节径 2 阶。633 叶片考虑围带接触计算得到的共振频率如表 3 所示。633 叶片的 6 节径 2 阶试验共振频率是 325.6 Hz,7 节径 2 阶试验共振频率是 312.7 Hz。 表中频率差异是计算频率与试验频率的差值。通过改变销钉与叶根轮槽以及围带的接触状态设置, 一共对 4 种不同的组合情况进行了计算。

表 3 633 叶片围带考虑接触共振频率计算结果

接触状态		共振频率/Hz		共振频率差异/Hz		围带平均
销钉与叶	围带	(	,步公	(当公	7	接触应力/
根轮槽		0 17 任	/ 11/王	0 1 任	/ 月住	MPa
绑定	绑定	357.67	342.84	32.07	30.14	-190.5
接触	接触	131.58	131.4	-194.02	-181.3	5.6
绑定	接触	139.12	138.08	-186.48	-174.62	5.6
接触	绑定	328.55	315.66	2.95	2.96	-166.6

图 12 给出了 633 叶片在围带接触,销钉与叶根 轮槽接触情况下的 6 节径 2 阶和 7 节径 2 阶振型 图。他们的振型都是典型的节径振动。



图 12 633 叶片6节径2阶(上)和7节径2阶(下)振型图 由表 3 中的数据可知,销钉与叶根和轮槽之间 的接触设置为接触,相邻围带之间的接触设置为绑 定时计算得到的 633 叶片6节径2阶和7节径2阶

京方安和評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

共振频率与试验值只相差 2.95 Hz,已经非常接近 了。同时,从计算结果还可以看出,围带之间的接 触状态设置对结果影响很大。当围带之间设置为 接触,而不是绑定时,计算共振频率远低于试验结 果,即此时围带之间的接触刚度远低于真实情况。 对于 633 这种类型的叶片,相邻围带之间设置为绑 定能更好的模拟接触刚度。

另外,表3中也列出了围带接触应力,由表中第 四行数据可知,销钉与叶根轮槽接触,围带绑定时 计算共振频率与试验频率只相差2.95 Hz的围带平 均接触应力为-166.6 MPa。负值表示围带接触面 之间是拉应力,这是由于绑定约束造成的。图13 给 出了此时围带接触应力的分布图,从图中可以看出 围带接触面绝大部分区域是拉应力,只有围带顶部 和左侧边缘应力为0。



图 13 633 叶片围带绑定设置接触应力分布示意图





图 14 给出了表 3 中第二种情况,即叶根接触, 围带接触情况下计算得到的围带接触应力。从图 中可以看出,围带接触面应力都为正,即压应力,这 与实际情况相符。另外,围带接触面左上方取得最 大接触应力 51.8 MPa,围带右下方大部分区域接触 应力为 0。整个围带接触面的平均接触应力为 5.6 MPa。

633 叶片利用围带印记面法计算共振频率的计 算模型如图 15 所示。这种分析模式叶片的围带不 需要切割,保持一个整体。在围带的接触区域,分 别选取了 3 块不同大小和位置的区域作为印记面, 这三个印记面的位置示意图如图 16 所示。其中计 算模型 1 的印记面选取在图中围带背弧接触面的右 上角,为一小矩形块,计算模型 2 的印记面选取围带 背弧的几乎整个接触面,为一大矩形块。计算模型 3 的印记面选取在围带背弧接触面的左下方,为一 小矩形块。



图 15 633 叶片围带印记面法计算共振频率模型



图 16 633 叶片围带 3 个印记面位置示意

633 叶片采用围带印记面法计算共振频率的边 界条件与上部分考虑围带接触的基本一致,只是将 围带内背弧的印记面也做循环对称约束。计算得 到的共振频率结果如表4所示。

表 4 633 叶片采用围带印记面法共振频率计算结果

		共振频率/Hz		共振频率差异/Hz	
叶根接触状态		6节径	7 节径	6节径	7 节径
模型1	绑定	341.78	332.17	16.18	19.47
	接触	317.83	308.75	-7.77	-3.95
模型 2	绑定	357.76	342.93	32.16	30.23
	接触	329.61	316.73	4.01	4.03
模型3	绑定	339.06	330. 18	13.46	17.48
	接触	315.64	307.08	-9.96	-5.62

(下转第53页)

東テ電氣評論 2025.3.25

#### 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

## 径流式叶轮固有频率的影响因素分析

刘晋宾 陈贝贝 梁文杰 章艳 刘伟鹏

东方电气集团东方汽轮机有限公司,四川 德阳 618000

摘要:本文基于某径流式叶轮结构,建立了叶轮有限元数值计算模型,并通过实验验证了计算结果的准确性,以叶片厚度、轮 盘厚度、轮盘凹槽角度为研究目标分析了叶轮固有频率影响因素,计算结果表明:通过改变叶片厚度可以调整叶轮叶片振动 的固有频率;轮盘厚度、轮盘凹槽角度与叶轮一阶固有频率之间呈线性关系,不同节径数的线性斜率规律不同,对今后叶轮轮 盘振动调频提供方法规律。同时,对比独立叶轮模型与叶轮和转子装配模型的振动分析结果,说明了带转子模型进行分析对 低节径下叶轮轮盘振动频率影响较大。

关键词:径流式叶轮;有限元;固有频率;轮盘振动 中图分类号:TK05 文献标识码:A 文章编号

文章编号:1001-9006(2025)02-0050-04

### Analysis of Influence Factors of Natural Frequency of the Radial-flow Impeller

LIU Jinbin, CHEN Beibei, LIANG Wenjie, ZHANG Yan, LIU Weipeng

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

Abstract: In this paper, based on a radial-flow impeller structure, the finite element numerical calculation model of the impeller is established, and the accuracy of the calculation results is verified through experiments. The influence of the impeller natural frequency is analyzed by blade thickness, disc thickness, and disc groove angle. The calculation results show that the natural frequency of the impeller blade can be adjusted by changing the blade thickness. There is a linear relationship between the disc thickness, the disc groove angle, and the first-order natural frequency of the impeller. But the linear slope laws of different pitch diameters are different, which provides a method for frequency modulation of the impeller disc vibration in the future. However, the linear slope laws of different nodal diameter numbers are different, which provides a method for frequency modulation of the impeller disc vibration in the future. Comparing the vibration analysis results of the independent impeller model and the impeller-rotor assembly model, it is shown that the analysis with rotor has an effect on the natural frequency of the impeller disk vibration at low nodal diameter.

Key words: radial-flow Impeller; finite element; natural frequency; disk vibration

径流式叶轮是向心透平、离心压缩机等旋转机 械的最重要零部件之一,是关系到机组能否安全、 可靠运行的关键。在机组运行时,转子不平衡的离 心力及静叶出口的不均匀汽流力等周期性的力会 构成迫使叶轮强迫振动的激振力。如果激振力的 频率与叶轮固有频率相近即会产生共振,发生危 险。因此,研究叶轮固有频率的影响规律从而避开 共振就尤为重要。

叶轮的结构参数是影响其振动特性的主要因 素之一,叶轮振动包括轮盘及叶片两部分振动组 成。研究者对叶轮结构参数和力学特性进行了大 量研究。李铜桥<sup>[1]</sup>对比整圈模型,验证了周期循环

收稿日期:2024-09-23

作者简介:刘晋宾(1993—),男,2019年毕业于昆明理工大学机械工程专业,硕士,工程师,从事汽轮机安全可靠性等方面的研究。

对称模型计算的可靠性;张原<sup>[2]</sup>等研究了温度场及 离心载荷对叶轮振动特性的影响;李颂<sup>[3]</sup>等提出叶 片梯度角概念,研究了梯度角对叶轮叶片固有频率 的影响规律,但目前有关轮盘结构振动特性的研究 较少看到。

本文针对某项目径流式透平叶轮结构,开展叶 轮振动特性研究。分析了不同叶片厚度、轮盘厚 度、轮盘凹槽角度对叶轮固有频率的影响规律,同 时,对带转子与独立叶轮模型的固有频率进行了比 较。本文的研究方法对今后叶轮振动调频提供了 思路。

1 叶轮有限元模型及实验验证

#### 1.1 有限元模型

本文的径流式叶轮叶片只数为18只,其结构如 图1所示,以叶片厚度 B、轮盘厚度 H、轮盘凹槽角 度 θ为研究对象,分析结构参数对叶轮的固有频率 影响。



#### 图1 叶轮几何参数

本次计算采用结构分析软件 ABAQUS。根据叶 轮结构和工作特点,建立力学模型。叶轮是轴对称 结构,采用循环对称模型进行简化,切出一个叶片 扇区模型进行网格划分,如图2所示,采用二阶四面 体单元。叶轮采用铝制材料,约束叶轮端面轴向 位移。



#### 图 2 叶轮扇区网格模型

1.2 实验验证

为验证径流式叶轮振动模拟计算的准确性,对

### 京が安和評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

叶轮固有频率进行了实验验证。采用锤击法对该 叶轮进行激励,通过传感器采集信号并测量结构响 应,得到径流式叶轮的固有频率,如图3所示。将有 限元结果与实验测试结果进行对比,见表1,二者结 果存在一定偏差,但非常接近,试验所得固有频率 与计算模拟之间误差控制在5%以内,表明计算 可靠。



图 3 测试试验

表1 固有频率试验值与有限元计算值的对比

节径数	计算值(Hz)	试验值(Hz)	误差(%)
一节径	1 863	1 776	4.7
二节径	3 820	3 723	2.5
三节径	4 624	4 561	1.3
四节径	5 152	5 089	1.2
五节径	5 769	5 750	0.3

#### 2 计算结果分析

#### 2.1 叶片厚度尺寸对频率特性的影响

叶片相较轮盘厚度薄,悬臂长,刚度小,因此叶 片比轮盘部分固有频率低,更容易发生共振,发生 疲劳断裂。图4所示为叶片厚度2mm的叶轮叶片 振动模态,其固有频率为3442Hz,叶片振动为弯曲 振动,振幅最大位置在叶轮出口叶片尖顶处。当叶 片与激振频率接近时有共振风险,为避免发生共振 通过优化叶片以满足避开率裕度,当增加叶片厚度 为4mm时,叶片振动一阶固有频率增至4737Hz, 增长非常明显,叶片振动规律与图4相同,但加厚叶 片往往会使效率降低,因此通过优化叶片厚度改变 固有频率的方式需要综合考量。



2.2 轮盘厚度尺寸对频率特性的影响

叶轮前几阶固有频率低,但振幅大,危害性大。 当叶轮振动为轮盘振动时,通过优化叶片的方式对 叶轮固有频率影响不大,可以采用改变轮盘厚度尺 寸 *H* 和轮盘槽角度 θ 进行调频。叶轮在自身平面 内刚性非常大,因此轮盘振动均为轴向振动,图 5 为 不同节径的轮盘振动一阶振型。



图 5 不同节径叶轮轮盘振动

图 6 为不同节径的轮盘厚度 H 和一阶固有频 率之间关系,由图可见,当轮盘厚度发生变化时,叶 轮固有频率也发生变化,但是在不同节径下变化规 律不同。若以厚度 1 mm 作为一个单位,1 kHz 为一 个单位,随轮盘厚度增加,一节径、二节径轮盘振动 的一阶固有频率分别沿斜率约 k = -0.058、-0.045 呈线性递减关系,三节径、四节径、五节径轮盘振动 的一阶固有频率分别沿斜率约 k = 0.025、0.15、 0.275 呈线性递增关系,轮盘振动节径数越多,固有 频率对轮盘厚度变化越敏感。





图 7 为不同轮盘凹槽角度 θ 和一阶固有频率之 间关系,由图可见,当轮盘凹槽角度减小时,一节径 振动的一阶固有频率变化不大,其余节径数振动的 一阶固有频率均按斜率约 k=0.23 呈线性递增关 系,这是由于减小凹槽会导致叶轮轮盘刚度增加的 缘故。



### 2.4 独立叶轮模型与叶轮和转子整体装配模型频 率分析比较

叶轮与转子之间有多种装配关系,在分析叶轮 振动频率特性时,转子对其固有频率计算结果有一 定影响,改变了叶轮结构刚度。为了研究在分析时 是否需要带转子模型的必要性及转子对叶轮分析 的影响,对比了独立叶轮模型与叶轮带转子模型的 一阶固有频率,见表2。可以看出,独立叶轮模型与 叶轮和转子整体装配模型对叶片振动固有频率影 响并不大,但对轮盘振动固有频率影响大,同时,轮 盘振动节径数越少,影响越大。因此,当分析叶轮 轮盘振动时,需考虑转子装配关系对叶轮固有频率 的影响。

京家東評論 2025.3.25

第39卷Vol.39总第156期

表 2 独立叶轮模型与叶轮和转子整体装配模型模态分析对比

振动类型	八七井町	不同节径的第一阶固有频率(Hz)			
	刀机侠型	一节径	二节径	三节径	四节径
叶片振动	独立叶轮分析	2 143	2 057	2 125	2 128
	叶轮和转子整体分析	2 131	2 135	2 134	2 134
	二者偏差	12	78	9	6
轮盘振动	独立叶轮分析	1 421	2 198	3 408	3 947
	叶轮和转子整体分析	3 055	3 528	3 735	4 023
	二者偏差	1 634	1 330	328	76

#### 3 结语

本文根据某径流式叶轮振动的特性分析,通过 实验测试验证了有限元模型的准确性,对比了不同 结构参数叶轮的固有频率,主要结论如下:

(1)利用叶轮叶片厚度控制可以调整其固有频 率使之满足可靠的避开裕度。

(2)轮盘厚度及轮盘凹槽角与叶轮一阶固有频 率之间趋于线性关系,轮盘厚度随节径数增大对叶 轮固有频率影响越大,轮盘凹槽角度对轮盘固有频 率影响规律大致相同,对今后叶轮轮盘振动调频提 供方法规律。

## (上接第49页)

由表4中的数据可知,采用围带印记面法计算 得到的共振频率只有叶根接触设置为接触时才比 较接近试验共振频率。此时,6、7节径共振频率与 试验值的差异在-10~4 Hz之间。这一结论与333 叶片不一样,333 叶片是叶根接触设置为绑定时计 算共振频率更接近试验值。对于633 叶片,当叶 根接触设置为绑定时,接触刚度比真实情况高很 多,计算得到的共振频率比试验值高13.5~ 32.2 Hz。

用印记面法计算共振频率时,计算值与印记面 的大小和位置有关,选取不同的印记面大小和位置 将对结果产生很大影响。对于 633 叶片,用印记面 法计算共振频率的 3 个模型中,只有模型 2,即围带 的几乎整个接触面作为印记面得到的结果最接近 试验共振频率,此时计算共振频率比试验值高 4 Hz。 (3)通过对比独立叶轮模型与叶轮和转子装配 模型的振动分析结果,说明了带转子模型进行分析 对叶轮轮盘振动频率有影响,确定了在轮盘振动分 析时带转子模型的必要性。

#### 参考文献:

- [1] 李铜桥. 径流式叶轮周期性有限元强度振动数值研究[J]. 汽 轮机技术,2016,58(2):109-113
- [2] 张原,辛庆伟,郁大照.燃气涡轮盘/叶耦合系统振动特性分析[J].海军航空工程学院学报,2012,27(1):61-65
- [3] 李颂,杨新乐,李惟慷,等.叶片梯度角对压气机叶轮固有频率的影响规律[J].中国机械工程,2022,33(2):243-251

#### 5 结语

(1)利用有限元法分别得到了 333 叶片和 633 叶片在两种不同振动计算方式下的共振频率。

(2)分别找到了两只叶片围带考虑接触情况下 的计算共振频率与试验共振频率最接近的接触状 态设置。

(3)印记面法计算叶片的共振频率与印记面的 大小和位置有关,推荐采用考虑围带接触的方式计 算叶片的共振频率。

#### 参考文献:

- [1] 袁巍,陈国智,张红晓,等.带冠预扭涡轮叶片模态分析及动应 力测试验证[J]. 航空动力学报,2020,35(10):2186-2194
- [2] 龙伦,袁巍,成晓鸣,等.航空发动机带冠涡轮叶片振动特性分析及验证[J].机械强度,2021,43(4):960-965
- [3] 中国动力工程学会.火力发电设备技术手册:第二卷:汽轮机 [M].北京:机械工业出版社,1999

## 智能制造:引领未来工业的发展方向

黄菊

天府永兴实验室,成都 610213

摘要:随着全球科技迅猛发展,传统制造业正面临着资源环境压力、市场需求变化等多方面挑战,以及效率低下和环境污染等问题。智能制造作为解决这些问题的关键,将信息通信技术与先进制造技术二者深度融合,实现了制造流程的网络化、数字化及智能化。本文通过对智能制造进行深入讨论,把握未来工业发展的趋势,探索其在不同领域的实践路径,研究其与新兴技术如5G和区块链深度融合,推动全球协同制造和绿色智能制造,为国家和企业制定战略决策提供科学依据。

关键词:智能制造;关键技术;应用实践;发展趋势

文献标识码:A

中图分类号:F424;TH16

文章编号:1001-9006(2025)02-0054-09

### Intelligent Manufacturing: Leading the Direction of Future Industrial Development

#### HUANG Ju

(Tianfu Yongxing laboritory, 610213, Chengdu, China)

Abstract: With the rapid development of global technology, traditional manufacturing is facing challenges such as resource and environmental pressures and changes in market demand, leading to issues such as inefficiency and environmental pollution. Intelligent manufacturing, as a key solution to these problems, integrates information and communication technology with advanced manufacturing technology to digitalize, network, and smarten the manufacturing process. This paper conducts an in-depth discussion on intelligent manufacturing, grasps the trends of future industrial development, explores its practical pathways in various fields, studies its deep integration with emerging technologies such as 5G and blockchain, promotes global collaborative manufacturing and green intelligent manufacturing, and provides a scientific basis for national and corporate strategic decision-making.

Key words: intelligent manufacturing; key technologies; practical applications; development trends

随着全球科技的迅猛发展,制造业正经历着深 刻的变革。传统制造业在过去的几十年中,为全球 经济的发展做出了巨大贡献。然而,随着资源环境 压力的增加和市场需求的变化,传统制造模式的弊 端日益显现。能源和资源的过度消耗、环境污染、 生产效率低下以及对市场变化反应迟缓等问题,限 制了制造业的进一步发展。与此同时,全球市场竞 争加剧,客户需求日益多样化和个性化,迫使制造 企业寻求新的发展模式。 近些年,智能制造(Intelligent Manufacturing)技术快速发展,为这些问题提供了有效的解决方案。 智能制造是基于新一代信息通信技术与先进制造 技术的深度融合,通过物联网、人工智能、大数据、 云计算等技术的应用,实现制造过程的智能化、网 络化和柔性化。<sup>[1]</sup>智能制造作为新一轮工业革命的 核心驱动力,正在引领未来工业的发展方向。它不 仅是制造业转型升级的关键,也是提升国家综合竞 争力的重要途径。<sup>[2]</sup>通过应用数字化和智能化技术

收稿日期:2024-01-09

作者简介:黄菊(1982一),女,西南科技大学,博士(在读),高级工程师。现任天府永兴实验室科技创新部副部长,从事清洁低碳能源、资源碳 中和、制造工程等领域技术研发和管理工作。

京テ電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

优化生产过程,制造企业可提高资源利用效率,降 低生产成本,提高产品质量和市场竞争力。智能制 造还能够实现生产的柔性化,满足客户的个性化需 求,提高企业的竞争力。

与此同时,在全球范围内,第四次工业革命正 如火如荼地进行,智能制造被视为这次革命的核心 内容。<sup>[34]</sup>与前三次工业革命不同,第四次工业革命 强调信息技术与制造业的深度融合,致力于实现制 造业的智能化转型。智能制造的研究具有重要的 理论和现实意义。从理论上讲,它丰富了制造科学 和工程的研究内容,推动了制造技术与信息技术的 融合发展,有助于构建新的工业体系和生产模式。 从现实意义上看,智能制造的推广和应用,可以促 进产业结构的调整和优化,推动经济的可持续发展。

在国家层面,发展智能制造是提升国家制造业 竞争力的重要举措。<sup>[5-7]</sup>各国纷纷制定战略,将智能 制造置于重要位置。例如,德国的"工业4.0"、美国 的"先进制造伙伴计划",以及中国的"制造业强国 战略"等,都将智能制造作为未来发展的重点。而 对于企业而言,智能制造能够帮助其实现数字化转 型,提高生产效率和产品质量,增强市场竞争力。 在全球化背景下,只有掌握先进的制造技术,才能 在激烈的国际竞争中立于不败之地。智能制造还 可以促进企业的组织结构和管理模式的变革,推动 企业向着更高效、更灵活的方向发展。

因此,本文将对对智能制造进行深入讨论,通 过研究智能制造的理论、技术和应用,把握未来工 业发展的趋势,探索其在不同领域的实践路径,为 国家和企业制定战略决策提供科学依据,推动经济 高质量发展,实现社会效益和经济效益的双赢。

#### 1 智能制造概念及特征优势

#### 1.1 智能制造的概念

智能制造是指利用新一代信息通信技术与先 进制造技术的深度融合,实现制造过程的数字化、 网络化和智能化。<sup>[1-2]</sup>它通过物联网、云计算、大数 据、人工智能等先进技术的应用,对制造资源进行 全面感知、实时分析、自主决策和精准执行,从而提 高生产效率、产品质量和市场响应速度。智能制造 不仅是一种先进的生产方式,更是制造业未来发展 的重要方向。

#### 1.2 智能制造的特征

(1)数字化:智能制造以数字化技术为基础,实现了从设计、生产到服务全过程的数据采集、传输和分析。通过数字化模型和仿真技术,可以在虚拟环境中进行产品设计和工艺优化,减少试错成本。

(2)网络化:借助高速网络和物联网技术,智能 制造实现了人、机、物的互联互通。设备、系统和人 员之间可以实时共享信息,提高协同效率。

(3)智能化:利用人工智能和机器学习算法,智能制造系统具备了自感知、自学习、自决策和自适应的能力。它可以根据实时数据和历史数据,优化生产参数,预测设备故障,实现自主调节。

(4)柔性化:智能制造能够灵活地调整生产计 划和工艺流程,适应多品种、小批量的生产需求。 通过模块化和可重构的生产系统,可以快速响应市 场变化。

(5)定制化:满足客户的个性化需求是智能制造的重要特征之一。通过与客户的互动和数据分析,定制化的产品设计和生产成为可能,提高了客户满意度。

(6)实时响应:智能制造系统具备实时监控和 反馈能力,能够迅速应对生产过程中的异常情况。 通过实时数据分析,可以及时调整生产计划,避免 资源浪费。

#### 1.3 智能制造与传统制造对比

(1)技术基础的差异:传统制造以机械化和自 动化技术为主,信息化程度较低。生产设备相对独 立,缺乏互联互通,数据多以人工方式收集和处理; 智能制造基于先进的信息通信技术,如物联网、云 计算、大数据和人工智能。设备和系统高度互联, 数据实现自动采集、传输和分析。<sup>[8]</sup>

(2)生产模式的差异:传统制造主要采用大规 模流水线生产,强调标准化和批量化。生产计划固 定,难以灵活调整,对市场变化反应迟缓;智能制造 采用柔性化生产方式,能够快速调整生产计划和工 艺流程。支持小批量、多品种和定制化生产,快速 响应市场需求。<sup>[8]</sup>

(3)管理方式的差异:传统制造的管理层级多, 信息传递链条长,决策依赖于经验和人工判断。缺 乏实时数据支持,管理效率较低;智能制造可实现 管理的数字化和智能化。基于实时数据分析,决策

### 京行委員評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

过程更加科学高效。管理层可以实时掌握生产动态,及时做出调整。<sup>[8]</sup>

(4)产品生命周期的差异:传统制造关注生产 阶段,产品设计、生产和售后服务相对独立,信息不 共享。产品生命周期管理缺乏整体性。智能制造 贯穿产品的全生命周期管理。设计、生产、物流和 服务各环节的数据互联互通,实现全流程优化。<sup>[8]</sup>

(5)人机关系的差异:传统制造以人为主导,机器为辅助。操作人员需要进行大量的体力劳动和 重复性工作;智能制造以机器为主导,智能系统辅助人类决策。人从繁重的体力劳动中解放出来,更 加专注于创新和管理。<sup>[8]</sup>

#### 1.4 智能制造的优势

(1)柔性化:智能制造通过柔性制造系统 (FMS)和可重构制造系统(RMS),实现了生产资源 的灵活配置。生产线可以根据不同的产品需求,快 速调整设备和工艺流程。这种柔性化使得企业能 够适应市场的快速变化,缩短产品的上市时间,减 少库存压力。例如,在汽车制造领域,智能制造使 得同一条生产线可以生产不同型号的汽车,而无需 长时间的设备调整。这不仅提高了设备的利用率, 也降低了生产成本。

(2)定制化:智能制造利用大数据和客户关系 管理系统,深入了解客户的个性化需求。通过模块 化设计和生产,企业可以提供定制化的产品和服 务。例如,在家电行业,客户可以通过网络平台定 制自己喜欢的颜色、功能和配置。生产系统根据客 户的订单信息,自动安排生产和物流,实现了大规 模定制化生产。

(3)实时响应:智能制造系统具备实时监控和 数据分析能力,能够对生产过程中的异常情况迅速 做出反应。通过传感器和物联网技术,设备的运行 状态和产品质量数据可以实时获取。当出现设备 故障或质量问题时,系统可以自动报警,甚至主动 调整生产参数,避免损失扩大。实时响应能力提高 了生产的稳定性和产品的质量。

#### 2 智能制造关键技术

#### 2.1 物联网(IoT)

物联网(IoT)是智能制造的基础技术,通过传感器、RFID和无线通信等手段,将设备、产品和人员

连接到网络,实现实时的信息交互和共享。如图 1 所示,它使得设备与设备、设备与人之间能够无缝 通信,提升了生产过程的可见性和可控性。物联网 的应用有效融合了制造过程中的信息流、物质流和 价值流,为智能制造的实现提供了坚实的技术支 撑。<sup>[9]</sup>在风电设备监测中,传感器网络可实时采集 叶片应力、塔筒振动等数据,结合边缘计算技术实 现本地化数据处理,降低传输延迟。例如,金风科 技的智能风机通过 5G 网络将数据上传至云端,结 合 AI 算法预测设备故障,提前发出预警,减少非计 划停机时间。<sup>[10]</sup>



#### 图 1 物联网技术示意图

#### 2.2 人工智能(AI)

人工智能(AI)在智能制造中扮演着核心角色, 赋予制造系统自学习、自决策和自适应的能力。它 在预测性维护、质量控制和生产优化等领域发挥着 重要作用。通过机器学习和深度学习算法,如图 2 所示,AI可以分析大量生产数据,预测设备故障,优 化生产参数,提高产品质量和生产效率,从而实现 制造过程的智能化。<sup>[11-12]</sup>在光伏组件生产中,AI 算 法通过分析工艺数据,优化硅片切割参数,减少材 料损耗。例如,隆基绿能利用深度学习模型动态调 整镀膜工艺,使组件光电转换效率大幅提升。<sup>[13]</sup>



图 2 AI 技术示意图

#### 2.3 大数据分析

大数据分析通过对海量生产数据的收集、存储

京テ電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

和深入分析,支持企业的决策优化和流程改进,如 图 3 所示。大数据分析借助统计分析、数据挖掘和 机器学习技术,发掘出数据背后隐藏的关联和模 式,为企业决策提供实时的支撑。它帮助企业实现 精益生产,提高资源利用效率,增强市场竞争 力。<sup>[14-15]</sup>在动力电池生产中,大数据分析用于优化 电解液注液工艺。例如宁德时代通过数字孪生平 台模拟注液过程,结合实时生产数据调整参数,使 工艺优化周期缩短。<sup>[16]</sup>



图 3 大数据技术示意图

#### 2.4 云计算和边缘计算

云计算和边缘计算为智能制造提供了强大的 数据处理和存储能力。云计算通过灵活的计算资 源和存储空间,支持大规模的数据处理和跨地域协 同。边缘计算将计算能力下沉到靠近数据源的设 备端,降低数据传输延迟,满足实时应用的需求。 两者的协同工作确保了智能制造系统的高效性、灵 活性和可扩展性,<sup>[17]</sup>如图4所示。在风电设备运维 中,边缘计算用于实时处理风机运行数据,结合云 计算进行全局优化。例如,远景能源的风电场通过 边缘计算设备本地处理数据,结合云端 AI 模型优化 风机出力策略,使发电效率得到提升。<sup>[18]</sup>



#### 2.5 机器人技术

机器人技术是智能制造的重要组成部分,智能 机器人在装配、搬运和加工等环节的应用显著提高 了生产效率和产品质量,如图 5 所示。通过先进的 控制算法和传感技术,机器人具备了自主导航、精 准操作和人机协作的能力。它们能够执行复杂的 任务,减少人工误差,提高生产的自动化和智能化 水平。<sup>[19]</sup>



图 5 机器人技术示意图

智能制造的关键技术相互融合,共同构建了一 个高度智能化和协同化的制造系统。物联网实现 了设备、产品和人员的互联互通,人工智能赋予系 统智能决策能力,大数据分析提供了决策支持,云 计算和边缘计算提供了强大的计算和存储能力,机 器人技术提高了生产的自动化和智能化水平。这 些技术的综合应用,使得智能制造具备了高度的柔 性化、定制化和实时响应能力,满足了现代市场对 产品质量、交付速度和个性化的高要求。企业通过 应用这些关键技术,可以实现生产效率的提升、成 本的降低和竞争力的增强,引领制造业的未来发展 方向。

#### 3 智能制造的应用实践

#### 3.1 能源装备制造业

能源装备制造业作为国家能源安全和经济社 会发展的重要基础产业,是先进制造技术集成应用 的关键领域。在全球能源结构加速调整、能源需求 日益多元复杂的大背景下,传统的生产制造与服务 模式已难以满足行业发展的新需求。

智能制造技术的深度融入,促使能源装备制造 完成了质的转变,从传统制造迈向智能新时代。借 助工业物联网、先进传感器与自动化控制技术,生

### 京行を和評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

产线各环节设备实现信息的无缝交互与深度协同。 实时数据的精准采集与智能分析,极大提高了生产 过程的透明化与可控度。例如远景能源在甘肃武 威民勤建设的智能风机制造基地,通过智能制造技 术实现了风电整机、叶片、储能设备的规模化生产, 如图 6 所示。基地采用数字化生产线和智能管理系 统,实现了年产 2 GW 风电整机和 400 套智能风机 叶片的能力。此外,基地还建设了智慧储能工厂, 年产能达 1 GW 时以上,为区域多能互补能源系统 提供了重要支撑。<sup>[18]</sup>



图 6 远景能源智能风机制造

#### 3.1 汽车制造业

汽车制造业是智能制造技术应用最为广泛的 领域之一。当今市场对汽车的需求愈发呈现出多 样化和个性化的趋势,传统的大规模、标准化生产 模式已难以适应市场的变化。智能制造的引入,使 得汽车生产实现了从自动化到智能化飞跃,如图 7 所示。



#### 图 7 汽车智能制造车间图

通过物联网和自动化技术,生产线上的设备和 机器人实现了互联互通。实时数据采集和分析使 得生产过程更加透明和可控。智能生产线能够自 动调整生产节奏,优化资源配置,提高生产效率。 在无人车间中,智能机器人和自动化设备承担了大 部分的生产任务。从物料搬运、零部件装配到质量 检测,均由机器人自主完成。无人车间不仅降低了 人工成本,还提高了生产的精确度和一致性。利用 柔性制造系统和大数据分析,汽车制造商可以根据 客户的个性化需求,定制生产车辆。客户可以在网 上选择配置,生产系统自动安排生产计划,实现按 需生产。这种模式提高了客户满意度,减少了库存 压力。<sup>[14]</sup>

#### 3.2 电子制造业

电子制造业面临着产品生命周期短、技术更新 快的挑战。智能制造技术的应用,使得电子产品的 生产更加灵活和高效,如图 8 所示。通过引入高速 贴片机、智能检测设备和自动化物流系统,电子制 造企业能够快速调整生产线,适应不同产品的生产 需求。柔性生产线减少了设备的重复投资,提高了 设备利用率。利用机器视觉和大数据分析,实时监 控生产过程中的质量问题。系统能够自动识别缺 陷产品,及时调整生产参数,降低次品率。通过物 联网和云平台,实现供应商、制造商和客户之间的 信息共享。供应链的可视化和协同优化,提高了响 应速度,降低了库存和物流成本。<sup>[20]</sup>



图 8 电子业智能制造车间图

#### 3.3 医疗器械制造

医疗器械制造对产品的精度和质量有着极高的要求,同时也需要满足患者的个性化需求。智能制造技术在这一领域的应用,推动了医疗器械生产的革命性变化,如图9所示。3D打印(增材制造)技术能够根据患者的具体情况,快速生产定制化的医疗器械和植入物。如定制的假肢、牙科器具和植入物,精确匹配患者的解剖结构,提高了治疗效果。利用高精度的传感器和检测设备,对产品进行全方位的质量检测。通过大数据分析,及时发现和纠正生产中的偏差,确保产品符合严格的医疗标准。通

过数字化建模和仿真技术,加速了新产品的研发和 测试过程。数字化的设计数据可以直接用于生产, 缩短了产品的上市时间。



图 9 医疗器械智能制造车间图

#### 3.5 小结

智能制造在不同的行业中展现出了强大的生命力和适应性。能源装备制造业利用智能制造技术助力制造企业快速转型,灵活调整产能布局和产品类型,实现产业快速升级;汽车制造业通过智能生产线和无人车间,实现了生产的柔性化和定制化;电子制造业利用高速柔性生产线,满足了快速变化的市场需求;医疗器械制造借助 3D 打印和智能检测,实现了高精度和个性化的生产。

智能制造的应用实践表明,技术的融合与创新 是驱动制造业变革的核心动力。企业需要结合自 身的特点,积极拥抱智能制造技术,才能在激烈的 市场竞争中立于不败之地。

#### 4 智能制造未来发展趋势

智能制造正处于快速发展和持续演进的阶段, 未来的发展趋势将深刻影响全球制造业的格局。 以下从三个方面探讨智能制造的未来发展趋势:与 新兴技术融合、全球协同制造以及绿色智能 制造。<sup>[22-23]</sup>

#### 4.1 与新兴技术融合

(1)5G技术在智能制造中的应用:5G(第五代 移动通信技术)以其高带宽、低延时和广连接的特性,为智能制造的进一步发展提供了强大的技术支 撑。5G的高带宽能力使得大量的生产数据、高清视 频和传感器信息可以实时传输。这对于需要高精 度控制和实时反馈的制造过程,如远程操控、AR/ VR 辅助装配等,具有重要意义。5G 的低延时特性

### 京方安和評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

(可达到1毫秒级)确保了制造系统中实时控制的 可行性。例如,在机器人协同作业、自动驾驶搬运 车(AGV)的路径规划等方面,低延时通信能够提高 系统的响应速度和安全性。5G支持大规模的设备 连接,能够满足制造车间中成千上万的设备、传感 器和终端的接入需求。这使得物联网在制造业中 的应用范围进一步扩大,实现全面的设备互联和数 据共享。

(2)区块链技术在智能制造中的应用:区块链 作为一种分布式账本技术,具有去中心化、不可篡 改和可追溯性的特点,在智能制造中具有广泛的应 用前景。<sup>[4]</sup>该技术可以实现供应链各环节的数据共 享和透明化,提升供应链的可追溯性和可信度。通 过记录每个环节的交易和物流信息,防止假冒伪劣 产品进入供应链,保障产品质量。在制造过程中, 大量的生产数据需要在企业内部和合作伙伴之间 共享。区块链的加密和分布式存储特性,可以提高 数据的安全性,防止数据泄露和篡改。利用区块链 中的智能合约功能,可以自动执行预先设定的协议 条件,提高业务流程的自动化程度,减少人为干预 和纠纷。

(3)人工智能的深化应用:人工智能技术将进 一步融合到智能制造的各个环节,推动制造系统向 更高层次的智能化发展。通过深度学习算法,制造 系统可以从大量的历史数据中学习,优化生产参 数,实现自适应控制,提高生产效率和产品质量。 人工智能的自然语言处理技术可以改善人机交互 方式,使操作人员能够通过语音指令控制设备,提 升操作的便捷性和效率。另外人工智能可以为管 理层提供智能化的决策支持,基于实时数据和预测 模型,优化生产计划、库存管理和资源配置。

#### 4.2 全球协同制造

(1)跨国界的供应链协同:随着全球化的深入, 制造业的供应链已经延伸到全球各地。智能制造 将进一步促进全球供应链的协同与优化。首先通 过云计算和物联网技术,企业可以实时获取全球供 应商、生产基地和市场的信息,优化资源配置,提高 供应链的灵活性和响应速度。其次利用数字化平 台,跨国团队可以协同进行产品的研发和设计,共 享知识和经验,缩短产品开发周期。最后通过全球

### 京行委員評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

协同的供应链管理,企业可以更好地应对地缘政 治、自然灾害等风险,建立具有弹性的供应链体系。

(2)共享制造与平台经济:共享制造模式将成为未来制造业的重要形态,基于互联网平台的资源 共享和协同生产将促进制造业的创新和发展。企 业可以通过平台共享富余的生产设备和制造能力, 提高资源利用率,降低固定资产投资。通过平台与 客户和设计师连接,企业可以接受个性化定制订 单,利用众包方式获取创新设计,满足市场多样化 需求。同时制造企业可以在平台上共享非核心的 技术数据和生产经验,促进行业整体水平的提升。

#### 4.3 绿色智能制造

(1)实现可持续发展:绿色智能制造是将环保 理念融入制造过程,实现经济效益和环境效益的双 赢。通过实时监测和数据分析,优化能源的使用, 提高能源利用效率,降低生产成本和碳排放。建立 闭环的生产系统,实现废物的回收和再利用,减少 资源消耗和环境污染。从产品设计阶段就考虑环 保因素,选择可持续的材料和工艺,延长产品寿命, 降低环境影响。

(2)减少环境影响:智能制造技术的应用,可以 有效降低制造过程对环境的负面影响。

利用传感器和物联网技术,实时监测生产过程 中的污染物排放,及时采取措施进行控制。通过数 字化仿真技术,可以在虚拟环境中优化工艺流程, 减少试错和浪费,降低资源消耗。与供应商和客户 协同,建立绿色供应链体系,推动全产业链的环保 和可持续发展。

#### 4.4 小结

智能制造的未来发展趋势将呈现出与新兴技 术深度融合、全球协同合作和绿色可持续发展的特 征。5G、区块链、人工智能等新兴技术的融合应用, 将赋能智能制造的各个环节,推动制造业的数字化 和智能化升级。通过跨国界的供应链协同和资源 共享,企业可以更好地整合全球资源,应对市场变 化,提升竞争力。绿色智能制造将成为制造业发展 的主旋律,企业需要在追求经济效益的同时,承担 起环境责任,实现可持续发展。

面对这些趋势,制造企业需要积极拥抱新技术,深化国际合作,践行绿色理念,才能在未来的竞

争中保持优势,引领行业的发展方向。政府和行业 组织也应提供政策支持和引导,推动智能制造的健 康发展,为全球经济的繁荣和环境的可持续贡献 力量。

#### 5 挑战与对策

智能制造作为引领未来工业发展的关键方向, 虽然前景广阔,但在推进过程中面临多重挑战。

首先,技术融合与系统集成难度大,涉及物联 网、人工智能、大数据等多种先进技术,标准不统 一,导致系统兼容性差、集成成本高。其次,数据安 全与隐私保护问题突出,设备互联和数据共享增加 了网络攻击和数据泄露的风险。第三,高投入与成 本压力使得中小企业难以承担智能制造的初始投 资和运营成本。第四,专业人才短缺,市场上缺乏 既懂制造工艺又熟悉信息技术的复合型人才。第 五,标准化与规范化不足,缺乏统一的技术标准和 行业规范,限制了技术的推广和协同。第六,组织 变革与文化挑战,员工可能对新技术和流程产生抵 触情绪,管理层缺乏变革经验。第七,部分技术成 熟度和可靠性有待提高,增加了应用风险。第八, 基础设施限制,如网络环境和硬件设施不完善,制 约了智能制造的实施。

针对这些挑战,需要从多方面采取对策:加强 技术研发与创新,推动技术标准化;完善数据安全 机制,制定法律法规;提供资金和政策支持,减轻企 业资金压力;培养和引进专业人才,完善教育培训 体系;推进标准化建设,参与国际标准制定;推动组 织和文化变革,培育开放创新的企业文化;加强技 术验证与应用,开展试点示范;完善基础设施建设, 加快网络和公共服务平台的建设。

进一步分析可知,上述挑战在制造业不同细分 领域具有普遍适用性,针对特定行业的技术场景开 展实证研究可为理论框架提供重要支撑。特别是 在能源装备制造这一典型工业场景中,数据安全与 技术成熟度两大挑战集中体现了智能制造实施的 现实痛点。该行业具有装备复杂度高、运行数据体 量大的特点,其应对策略兼具行业特质性与跨领域 借鉴价值,通过对其实践案例的深入剖析,将有效 揭示技术解决方案与行业需求间的映射关系。下 文将以能源装备制造为研究对象,重点聚焦其针对数据安全风险与技术成熟度不足的应对机制进行 阐释。

#### 5.1 数据安全与隐私保护

随着智能制造中工业互联网的深度渗透,能源装备制造场景因数据流转链路复杂、跨系统交互频 繁而面临显著安全风险。根据 ISO/IEC 27001 标准 框架,可采取多种防护措施:

(1)工业控制系统防护

分区分域管理:将工业控制网络划分为生产 区、监控区和管理区,部署工业防火墙实现域间隔 离。例如,金风科技通过分区分域管理,有效防止 了外部攻击对生产系统的干扰。<sup>[10]</sup>

加密传输与可信计算:采用国密算法加密关键数据传输,并通过硬件可信根(如飞腾腾珑 E2000内置 TCM/TPCM)对系统引导程序、配置参数进行完整性校验,防止篡改。

(2)数据防泄露技术

敏感数据监测:利用 AI 驱动的数据防泄漏系统 (如 AiDLP),通过协议解析(HTTP/FTP/SMB)和 NLP 语义分析,实时识别敏感文件外发行为。例 如,宁德时代通过部署 AiDLP 系统,成功拦截了多 起数据泄露事件。<sup>[16]</sup>

主机防护:在工控主机部署"程序白名单"技术,仅允许授权应用运行,并关闭 USB 接口,强制使用加密 U 盘,防止病毒传播和非法数据拷贝。

(3)应急与持续改进

定期演练与备份:制定工控安全事件应急预 案,开展攻防演练,并定期备份核心数据。例如企 业每季度开展一次网络安全演练,确保系统在遭受 攻击时能够快速恢复。

#### 5.2 技术成熟度与可靠性评估

在解决数据安全与隐私保护问题的同时,智能 制造技术在能源装备制造领域的应用还需充分考 虑其技术成熟度与系统可靠性。尤其是在高复杂 度工业环境中,技术的稳定性与可扩展性直接关系 到生产系统的运行效率与安全性。目前部分智能 制造技术在能源装备制造领域的应用仍处于探索 阶段,需关注以下问题:

(1)技术成熟度评估

### 京方電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

AI 算法可靠性:在风电设备故障预测中, AI 模型的预测精度受数据质量和算法复杂度影响。例如,金风科技通过引入迁移学习技术, 利用少量新场景数据微调模型, 提升了预测精度。<sup>[10]</sup>

边缘计算性能:在光伏组件生产中,边缘计算 设备的算力和存储能力限制了实时数据处理能力。 隆基绿能通过优化算法和硬件配置,使边缘计算设 备的处理效率大幅提升。<sup>[13]</sup>

(2)风险应对措施

技术验证与试点:在新技术应用前,开展小规 模试点验证。例如,宁德时代在动力电池智能工厂 中,先对 AI 缺陷检测系统进行局部测试,确认可靠 性后再全面推广。<sup>[16]</sup>

冗余设计与容错机制:在关键环节部署冗余设 备和容错机制,确保系统在故障时仍能正常运行。 例如,远景能源在风电场中部署了备用控制系统, 确保在极端天气下仍能稳定运行。<sup>[18]</sup>

#### 5.3 小结

智能制造在推动制造业转型升级的过程中,虽 面临技术融合复杂性、数据安全风险、高额成本压 力、专业人才短缺、标准化缺失、组织变革阻力、技 术成熟度不足及基础设施滞后等多重挑战,但通过 系统性对策的制定与实施,这些问题均可得到有效 应对。加强技术研发与标准化建设、构建严密的数 据安全防护体系、提供政策与资金支持、培育复合 型人才、推动组织文化革新、开展技术验证与冗余 设计,以及完善基础设施布局,是突破当前瓶颈的 关键路径。这些措施不仅能够加速智能制造技术 的落地应用,还将助力企业提升生产效率与市场竞 争力,为国家实现制造业高质量发展和"双碳"目标 提供坚实支撑。未来,需持续关注技术迭代、深化 国际合作,并在实践中不断优化解决方案,以应对 新一轮工业革命带来的机遇与挑战。<sup>[24]</sup>

#### 6 结语

智能制造作为新一轮工业革命的关键引擎,正 引领着未来工业前行的方向。它通过将新一代信 息通信技术与先进制造技术深度融合,推动制造环 节向数字化、网络化和智能化迈进。智能制造不仅 是制造业实现转型升级的核心驱动力,更是增强国

### 京行変系評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

家综合竞争力的重要途径。

智能制造具有数字化、网络化、智能化、柔性 化、定制化和实时响应等特征。与传统制造相比, 智能制造在技术基础、生产模式、管理方式、产品生 命周期和人机关系等方面都有显著区别。

智能制造在汽车制造、电子制造、医疗器械制 造和能源装备制造等领域得到了广泛应用。未来, 智能制造将呈现与新兴技术融合、全球协同制造和 绿色智能制造的发展趋势。然而,智能制造在推进 过程中也面临着技术融合难度大、数据安全风险 高、高投入与成本压力、专业人才短缺、标准化不 足、组织变革挑战等问题。为此,需要加强技术研 发与创新,完善数据安全与隐私保护机制,提供资 金与政策支持,培养和引进专业人才,推进标准化 建设,推动组织与文化变革,加强技术验证与应用, 完善基础设施建设。

综上所述,智能制造是未来世界工业发展的核 心引领力量,具有极为重要的现实价值和战略意 义。只要攻克各种挑战,全力推动智能制造的落地 实施和广泛应用,制造业便能实现转型升级,增强 国家的综合竞争力,为经济和社会的可持续发展注 入强大动力。

#### 参考文献:

- [1] 周济.智能制造:"中国制造 2025"的主攻方向[J].中国机械 工程,2015,26(17):2273-2284
- [2] Zhong R Y, Xu X, Klotz E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4. 0: a review [J]. Engineering, 2017, 3 (5): 616-630
- [3] 张曙. 工业 4.0 和智能制造[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(8):1-5
- [4] 林知微,张嵩川,王成吉,等.区块链技术综述:在下一代智能 制造中的应用[J].智能科学与技术学报,2023,5(2):200-211
- [5] 姚锡凡,景轩,张剑铭,等.走向新工业革命的智能制造[J].计 算机集成制造系统,2020,26(9):2299-2320
- [6] 臧冀原,刘宇飞,王柏村,等.面向 2035 的智能制造技术预见和 路线图研究[J].机械工程学报,2022,58(4):285-308
- [7] 赵剑波. 推动新一代信息技术与实体经济融合发展:基于智能

制造视角[J].科学学与科学技术管理,2020,41(3):3-16

- [8] 王柏村,陶飞,方续东,等.智能制造:比较性综述与研究进展[J]. Engineering, 2021,7(6):80-122
- [9] 尹洪英,李闯.智能制造赋能企业创新了吗?:基于中国智能制造试点项目的准自然试验[J].金融研究,2022(10):98-116
- [10] 北极星风力发电网. 金风科技人工智能应用研究院正式成立! 已开展 AI 融合应用[EB/OL]. (2024-03-15) https://news. bjx. com. cn/html/20240315/1366380. shtml
- [11] 王文泽. 以智能制造作为新质生产力支撑引领现代化产业体 系建设[J]. 当代经济研究,2024(2):105-115
- [12] 闫纪红,李柏林. 智能制造研究热点及趋势分析[J]. 科学通 报,2020,65(8):684-694
- [13] 36 氪. 打造全球光伏业首座灯塔工厂,隆基绿能"智造"向未来
   [EB/OL].(2024-05-27)[2025-02-10]. https://www.36kr.com/p/2793943576249475
- [14] 王耀南,江一鸣,姜娇,等. 机器人感知与控制关键技术及其智能制造应用[J]. 自动化学报,2023,49(3):494-513
- [15] 陶永,蒋昕昊,刘默,等.智能制造和工业互联网融合发展初探[J].中国工程科学,2020,22(4):24-33
- [16] 王家宝,蒋铭霁,盛洁.从制造到智造:宁德时代的数字化转型 之路[EB/OL].(2022-11-16)[2025-02-10].https://www.clii. com.cn/lhrh/hyxx/202211/t20221116\_3955575.html
- [17] 田根源. 云计算技术在新能源汽车智能制造中的应用与发展 [J]. 储能科学与技术,2024,13(5):1748-1750
- [18] 陈志鑫,陈婕,韩筱蓓.新春走基层|"巨无霸"风电叶片"武威造":远景武威民勤智能风机制造基地项目生产见闻[EB/OL].(2025-02-04)[2025-02-10].https://news.qq.com/rain/a/20250204A02N7R00
- [19] 龙绪明,黄昊,闫明,等. 微电子智能制造技术的新发展[C]// 2021 中国高端 SMT 学术会议论文集. 2021
- [20] 杜伯阳. 智能制造和大数据挖掘在农业机械设计中的应用 [J]. 农机化研究,2022,44(3):190-193
- [21] Wang J, Xu C, Zhang J, et al. Big data analytics for intelligent manufacturing systems: A review [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 62:738-752
- [22] Yang T, Yi X, Lu S, et al. Intelligent manufacturing for the process industry driven by industrial artificial intelligence [J]. Engineering, 2021,7(9):1224-1230
- [23] ElMaraghy H, Monostori L, Schuh G, et al. Evolution and future of manufacturing systems [J]. CIRP Annals, 2021, 70(2):635-658
- [24] Li B, Hou B, Yu W, et al. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18:86-96



摘要:在电站锅炉制造过程中,小口径管对接坡口加工质量是决定对接焊缝质量的决定性因素,而小口径管备料实现自动化 后,受换刀及时性的影响,坡口加工质量的一致性波动较大,本文以线激光扫描技术为基础,开发在线管件坡口尺寸检测系统,以SICK线激光扫描仪配合精密滑轨实现坡口三维点云数据的采集,设计三维点云分析实现了管件坡口的全尺寸的在线 实时检测,并实时触发换刀提示,进一步确保了智能产线连续作业的质量。

关键词:电站锅炉; 坡口; 扫描; 分析

中图分类号:TK226 文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)02-0063-05

### Research on Weld Bevel Dimension Detection of Boiler Tubes Based on Line Laser Scanning

ZHUO Lei<sup>1</sup>, MIAO Yuhong<sup>2</sup>, ZHOU Dong<sup>1</sup>, LING Le<sup>1</sup>, SHENG Zhongxi<sup>1</sup>

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

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

Abstract: In the manufacturing process of power plant boilers, the quality of small diameter pipe joint groove processing is the decisive factor that determines the quality of joint welds. After the automation of small diameter pipe material preparation, the consistency of groove processing quality fluctuates greatly due to the influence of tool change timeliness. Based online laser scanning technology, this article develops an online pipe fitting groove size detection system, By using SICK line laser scanner combined with precision slide rail to collect three-dimensional point cloud data of the groove, a three-dimensional point cloud analysis was designed to achieve real-time online detection of the full size of the pipe groove and trigger tool change prompts in real time, further ensuring the quality of continuous operation on the intelligent production line.

Key words: power plant boiler; bevel; scanning; analysis

大型发电锅炉生产制造过程中需要大量的管件材料,管件材料下料后需要通过坡口机进行坡口加工,坡口加工质量直接影响管件后续焊接效果<sup>[1]</sup>,因此,管件坡口加工质量的检测对于整个锅炉生产质量管控具有较为重要的实际意义。<sup>[2]</sup>常见的坡口形状为U型和V型,传统的人工测量方法难以满足自动化生产作业要求,有必要设计一款坡口

尺寸自动检测装置以实现坡口尺寸的全自动数字 化测量,以达到实时换刀的要求。

#### 1 三维扫描硬件设计

锅炉小口径管件坡口加工采用坡口加工机完成,管件切割下料后向前输送到坡口机加工,加工 后的管件通过输送线退出坡口机。本文通过在坡

收稿日期:2024-08-26

作者简介:卓磊(1992—),男,2016年毕业于成都信息工程大学电子科学与技术专业,本科,工程师。现任东方电气集团科学技术研究院视觉系统开发工程师,主要从事 2D、3D 视觉系统方向开发工作。

### 京行を和評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

口机出料口布置激光三维扫描设备实现管件的三 维扫描<sup>[3]</sup>,三维扫描装置布局方案如图 1(a)所示。 坡口机加工的管件的尺寸范围 25 mm~65 mm,经坡 口加工后的坡口为高反光表面,传统的测量方法难 以实现精准测量。本文采用德国 SICK 公司的高性 能线激光扫描仪作为传感器进行管件坡口三维检 测,三维扫描系统硬件结构如图 1(b)所示。



图 1 系统布局和硬件结构

线激光扫描仪通过投射线激光至物体表面,以 高速工业相机捕捉激光线并对其中心进行提取,通 过三角法实现图像到目标表面二维断面的转换。<sup>[4]</sup> 静止状态下的线激光扫描仪只能实现坡口断面的 测量,本文设计了高精度直线滑轨实现线激光扫描 仪的滑动扫描。直线滑轨行程 xx mm,最大运动速 度 xx m/s,直线滑轨末端设计了 2 个高精度光电开 关用于定义整个扫描装置的零点。直线滑轨末端 设计了 1024 线分辨率的增量式编码器作为运动和 扫描仪同步传感器,SICK Ruler 线激光扫描仪支持 脉冲数据的直接输入,并通过内部同步信号在数据 帧中包含了脉冲计数结果,可直接用于三维点云 计算。

射线激光扫描仪当前帧扫描数据  $P_L = \{(x_i, z_i), i=1,2,3\cdots\},$ 相机所记录的增量式编码器脉冲 计数  $m_i$ ,则当前帧扫描数据转化至全局坐标为:

$$\begin{cases} x = x_i \\ y = \frac{n_i d}{N} \\ z = z_i \end{cases}$$
(1)

其中,*d* 为直线滑轨旋转一圈对应的运动距离, N=1024 为脉冲编码器分辨率。本文所设计的直线 滑轨驱动电机旋转1圈带动滑块运动距离为 x mm, 结合脉冲增量式编码器可实现最大 x μm 的运动定 位精度,理论精度完全满足坡口检测需求,三维扫 描系统采集的点云数据如图 2 所示。



图 2 三维扫描系统采集的坡口点云

#### 2 数据分析算法

激光三维扫描系统所获取的三维点云并不能 直接体现出坡口尺寸信息,需要对三维点云进行进 一步分析。本文针对坡口机制作的 U 型坡口进行 尺寸检测,尺寸检测内容如图 3 所示。





如图 3 所示,对于钝边厚度的测量可以视为钝 边加工平面所形成的圆环的宽度计算,而内径尺寸 计算则可直接计算为钝边内圆环尺寸计算,同心度 计算则可通过内外圆环圆心位置进行比较。因此, 坡口尺寸检测算法设计为:

京方東京評論 2025.3.25 第39巻Vo

#### 第39卷Vol.39总第156期

STEP1:点云去噪与滤波

通过点云数据孤立点滤波算法、高斯滤波、密 度滤波及半径滤波等方法实现游离点的滤除,再通 过构建参考平面,通过计算每个点到平面的距离, 获得距离场,然后以距离场中的局部最小值作为平 面阈值,通过阈值分隔滤掉表面以外的噪点。

STEP2:钝边支口内外孔计算

按照一定的网格大小提取最大高度一定范围 内的点, 拟合平面得到钝边支口顶部环面平面, 提 取平面一定范围内的所有点云, 再以平面点云中心 为圆心提取最外层和最内层点, 最外层点为钝边支 口外环, 最内层点为钝边支口内环。再通过最小二 乘法拟合<sup>[5]</sup>钝边支口内外孔路径。

STEP3:管外直径计算

以钝边支口顶面平面为参考平面,以钝边支口 拟合圆心为中心,计算所有点云的最外层点云,通 过最小二乘法拟合管外径。

#### 3 系统软件设计和实现

坡口尺寸检测系统软件包括线激光扫描仪控 制和数据采集、扫描运动控制、产线 PLC 联动通信 和界面展示等主要功能,线激光扫描仪控制和数据 采集模块通过和 Ruler 线激光扫描仪的通信实现参 数设置和数据采集,扫描运动控制则通过与步进电 机控制器的通信实现滑动扫描和位置查询与控制。 系统软件和产线 PLC 联动通信主要实现管件的前 向输送和后向输送控制,同时实现管件在输送线上 的检测停放位置控制;界面展示包括点云三维展 示、检测数据图表化展示等功能。

根据现场需要,单条坡口加工线分别对应4台 不同的坡口机安装了4个坡口检测单元,因此系统 软件采用了如图4所示的分幅设计。整个检测系统 涉及到和产线的联动以实现整个三维检测功能,整 机系统工作流程如图5所示。



图 4 系统软件主界面



图 5 系统工作流程

当坡口机完成加工后,产线输送线后向输送管 件并根据光电检测开关实现管件的准确停放;管件 停止后,三维扫描系统启动扫描并向下运动,扫描 完成后快速复位至滑轨最上端;系统软件在扫描过 程中实时采集线激光扫描仪扫描数据,扫描完成后 自动计算坡口尺寸,计算后的坡口尺寸数据存储至 数据库并可通过查询历史数据进行图表化查看。

本文所设计的系统软件需要对大量的检测结 果和任务信息进行管理和查询,同时单个软件需要 对4套扫描设备进行管理。为实现扫描单元的配置

## 京が安東い評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

信息和任务信息的高效管理,软件系统分别设计了 扫描配置数据库和任务管理数据库,数据库结构如 图 6 所示,通过对数据库的数据查询可以获取坡口 检测系统的全工作过程信息。



图 6 软件数据库设计

#### 4 验证及应用

为验证本文所设计的坡口尺寸检测系统的有效性,我们在工厂小口径管备料加工线坡口加工为应用场景开展现场验证和应用。工厂小口径管备料加工线主要承担公司管件下料作业任务,单条备料加工线日加工量约500件,传统的人工检测手段难以满足短管下料线坡口在线三维检测需求。

开展现场应用前,采用多根不同短管坡口进行精度,通过人工手动测量坡口内径、钝边外径和管外径等 多个参数与自动检测系统结果进行对比,实现系统高 精度评估,系统精度测试结果如图7所示。从图7可 以看出,短管坡口检测精度较高,可以实现0.15 mm 的 高精度尺寸测量,同时三维扫描系统可以完成同心度 等人工手动难以直接测量的参数计算。



图 7 精度验证结果

此次现场验证和应用共计安装管件三维尺寸 检测系统7套,通过系统与短管下料线输送控制的 联动实现短管自动停料和扫描控制,现场坡口检测 采用抽检的方式完成。坡口尺寸检测系统提供短 管破口的多个参数检测结果,同时提供了数据统计 功能,可通过相关参数的变化趋势对坡口机刀具的 更换周期进行预测指导,典型的三个参数变化趋势 如图 8 所示。



图 8 坡口内控直径、同心度和钝边厚度等参数变化趋势

从图 8 可以,随着坡口机刀具加工量的增加,内 孔直径、同心度等参数波动较小,而钝边厚度则随 着加工数量的增加呈现较为明显的上升趋势。通 过坡口尺寸检测系统的应用,可以有效解决坡口尺 寸高精度测量问题,后期通过大量数据的积累,可 通过不同材质的管材、刀具和加工量之间的大量数 据分析实现坡口加工工艺的优化,提升坡口加工 质量。

#### 5 结语

本文针对锅炉管件坡口加工后的坡口尺寸在 线自动检测问题设计了一款以线激光扫描仪为基 础的管件坡口尺寸检测系统,以 SICK 线激光扫描 仪集成了三维扫描系统获取管件坡口三维点云,设 计了点云分析算法实现了坡口尺寸的全自动分析。 经过现场测试应用,系统能够实现管件坡口尺寸的

#### 集团要闻

### 京を東手論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

快速检测,精度可达到 0.15 mm,能够较好的满足管件下料生产线坡口加工尺寸检测需求。本文所设计的管件坡口尺寸检测系统,可经过拓展应用于其他形式和工件的坡口加工质量检测,具有较强的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 齐鹏,王强,宋建.小口径管焊接坡口取消内壁机加可行性研究[J].锅炉制造,2023(6):39-40+43
- [2] 苏伟,林如鑫,李海斌,等.大型扇形块空间坡口高效加工[J].
   一重技术,2023(5):38-40
- [3] 方宇,柯晓龙,俞永恒,等.用于浮雕的线激光扫描三维重建系统[J].激光与光电子学进展,2023,60(22):211-220
- [4] 梁周雁,焦宁,邓先睿,等.基于点云的管道三维自动建模方法 研究[J].山东国土资源,2023,39(9):48-53
- [5] 王洪战,吴昊. 地铁高架单桩基础垂直度最小二乘拟合法研究[J]. 铁道勘察,2023,49(6):25-30

#### 东方电气首个核电海水循环泵签约

2025年2月25日,东方电气集团所属东方电机与中国核电工程有限公司进行三门核电5、6号机组循 环水泵设备供货合同签约。签约仪式上,双方围绕核电技术创新、产业协同发展等展开深入讨论。签约前, 与会人员参观了东方电机大型清洁能源装备重型制造数字化车间、屏蔽泵事业部、水力试验台等。东方电 气股份有限公司副总裁但军,中核集团副总工程师,中核工程党委书记、董事长徐鹏飞,中核工程、东方电气 核能事业部、东方电机、东方汽轮机、东方重机、东方自控、东方研究院、东方法马通相关人员参加上述活动。

三门核电站位于浙江省台州市三门县,是我国首个三代核电自主化依托项目。东方电机将为三门核电站5、6号机组提供4台套先进的桨叶可调海水循环泵,设计流量36.2立方米每秒、设计扬程16.5米,是国内单机流量最大的桨叶可调海水循环泵。

循环水泵是循环水系统主要能动设备,主要结构包括预埋件、主轴、桨叶可调系统、叶轮、泵壳和电机 等。此次签约的桨叶可调海水循环泵是核电厂最重要的设备之一,将为核电厂常规岛提供冷却水,带走凝 汽器的热量,对于维护核电站安全稳定运行具有重要意义。相较于固定叶片海水循环泵,桨叶可调海水循 环泵可根据核电机组的实际运行工况需求,能有效解决检修不便、海水腐蚀和性能提升等多个痛点问题,可 根据核电机组实际运行工况需求调节叶片角度,调节循环水流量,节省电机功耗,助力三门核电项目高效稳 定运行。

此次签约,是继粤港澳大湾区高新沙大泵、环北部湾地心大泵和西津大泵等重点项目后,东方电气在核电海水循环泵领域的又一突破,将为保障和改善民生、推进高质量发展作出重要贡献。

来源:东方电气微信公众号

## 某火力发电厂磨煤机基础改造实践

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 610000; 2. 国能九江发电有限公司,江西 九江 332000

摘要:本文结合具体工程实例,深入阐述既有磨煤机基础的改造方法。目前国内磨煤机基础改造,常采用将设备与基础整体 拆除重建的传统做法。然而,该方式拆除难度极大,不仅需考虑深基坑支护、降水排水等一系列复杂措施,还存在工期漫长、 工程量巨大等显著弊端。为有效解决上述问题,本文创新提出两种针对性的改造方法:锚杆钻孔法与局部置换混凝土法。两 种方法均以最大化利用原有设备基础为宗旨,着重于局部改造与加固。通过对这两种新方法的深入对比分析,明确其适用场 景与技术优势。本研究成果对类似工程的改造项目具有重要的指导意义与参考价值,助力推动该领域工程实践朝着高效、经 济、环保的方向发展。

关键词:设备基础改造;鉴定;锚杆钻孔;局部置换混凝土;煤电机组改造 中图分类号:TU391 文献标识码:A 文章编号:1001-9006(2025)02-0068-05

第39卷Vol.39总第156期

### Practice and Exploration of Coal Mill Foundation Renovation in a Thermal Power Plant

WANG Xue<sup>1</sup>, XU Jian<sup>1</sup>, HUANG Zixuan<sup>2</sup>, ZHANG Miao<sup>2</sup>, HU Dehao<sup>2</sup>

(1. Dongfang Electric Engineering & Consulting Co., Ltd., 610000, Chengdu, China;
 2. Guoneng Jiujiang Power Generation Co., Ltd., 332000, Jiujiang Jiangxi, China

Abstract: This article, based on a specific project, delves into renovation methods for existing coal mill foundations. Currently, in the renovation of domestic coal mill foundations, the traditional approach of completely demolishing and reconstructing the equipment and the foundation as a whole is often adopted. However, this method is very difficult to remove. It not only requires considering a series of complex measures, such as deep foundation pit support, dewatering and drainage, but also has significant drawbacks, such as a long construction period and a huge amount of work. To effectively address the above-mentioned issues, this article innovatively proposes two targeted renovation methods: the anchor boltdrilling method and the local concrete replacement method. Both methods aim to maximize the utilization of the original equipment foundation, focusing on local renovation and reinforcement. Through an in-depth comparative analysis of these two new methods, their applicable scenarios and technical advantages are clarified. The research results of this paper have important guiding significance and reference value for similar engineering renovation projects, contributing to promoting the development of engineering practices in this field towards a direction of high efficiency, economy, and environmental friendliness.

Key words: equipment foundation renovation; detection; anchor bolt drilling; local concrete replacement; coal-fired power plant renovation

为引领煤电行业高质量可持续发展,在经济效益与社会效益中找到平衡,越来越多的煤电机组开

始系统改造升级,以达到增产提效,节能减排的目的。在这个过程中为了适应新的设备原有基础需

收稿日期:2024-05-28

**作者简介:**王雪(1983—),女(彝族),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。

京を東評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

要进行加固改造。

同时为了节约投资,缩短施工周期,早日产生 经济效益,项目通常要求在大修期内完成全部改 造,工期十分紧张。

#### 1 工程概况

某 2×350 MW 机组燃煤电厂,为提高机组效率, 提高机组出力,需更换老旧的磨煤机。

原磨煤机为双进双出钢球磨煤机,2000年左右 投入使用,已使用 22 年,功率~1 100 kW,耗电率较 大,煤粉均匀性较差,出力不足,经济性差。

本次将钢球磨改造为中速磨煤机,中速磨煤机 功率~480 kW,耗电率大幅减小,出力比原来增加~ 18 t/h。

#### 1.1 原磨煤机基础形式

根据原项目竣工图及现场调研,原磨煤机基础为桩 承大块式基础,长约14m,宽约6m,基底标高-3.5m,如 图1~2所示。地下水位约地坪以下-3.5m。







#### 1.2 改造原因

立式磨煤机的基础尺寸、锚栓数量、锚栓位置 与卧式磨煤机的完全不一样。原来基础必须经过 改造才能满足使用。

#### 2 混凝土材料检测

为确定原磨煤机基础混凝土的实际强度,采用 钻芯机在现场钻取直径110 mm 的圆柱体混凝土芯 样进行抗压强度测试,如图 3 所示。经检测混凝土 强度满足原设计要求。



图 3 施工照片-钻芯

#### 3 改造的难点

根据对国内同类型项目的调研及设备供货商 提供的信息,目前国内磨煤机基础改造,常采用将 设备与基础整体拆除重建的传统做法。然而,该方 式拆除难度极大,不仅需考虑深基坑支护、降水排 水等一系列复杂措施,还存在工期漫长、工程量巨 大等显著弊端。

这种常规方案难以满足本项目对工期的要求。 为有效解决上述问题,创新提出两种针对性的改造 方法:锚杆钻孔法与局部置换混凝土法。最大地利 用原有设备基础进行局部改造与加固。

#### 4 方案一锚杆钻孔

本方案采用岩石锚杆的设计原理进行改造,最 小化改造范围。

先将原有基础地坪±0.000 m 以上基础凿除,然 后根据计算结果,在原基础上钻 12 个深 2.3 m,直 径 350 mm 的圆孔,如图 4 所示,将直径 80 mm 地脚 螺栓和套管放入其中,如图 5 所示,最后用 C80 高强 微膨胀灌浆料进行孔内二次灌浆。

在原基础需局部加高区域,从±0.000 m 层新旧 钢筋结合面上植入钢筋,涂抹界面剂,保证新旧混 凝土的连接。然后对±0.000 m 以上钢筋混凝土基
础钢筋绑扎,封模,浇筑混凝土基础。



图 4 原磨煤机改造后钻孔图





4.1 计算

设备静荷载:1 340 kN 基础自重:8 568 kN;设 备动荷载:力矩 633 kN·m,转矩 90 kN·m,水平力 158 kN。

根据《建筑边坡工程技术标准》<sup>[1]</sup>8.2.3,《混凝 土结构设计规范》<sup>[2]</sup>附录 D.5.1 的要求进行静力计 算,验算结果见表 1。锚杆锚固体抗拔安全系数按 2.6,砂浆与岩石粘结强度按 1000。锚杆±0.00 m 以下锚固段长度 2.1 m,±0.00 m 以上锚固段长度 1.2 m,总锚固长度 3.3 m 满足《建筑边坡工程技术 标准》<sup>[1]</sup>8.4.1 最小锚固长度不低于 3 m 的要求。

根据《动力机器基础设计标准》<sup>[3]</sup>8.2.4 中速磨 可不进行动力验算。设备厂家提供的地脚螺栓带 有钢套管与端板,地脚螺栓与二次灌浆之间无粘 结,其原理类似于压力型锚杆,在动力荷载作用可 以提高其延性。

表1 验算结果

名称	单位 kN	抗力	单位 kN	结果
单桩最大竖	2 224	单桩承载力	4 500	2 334<4 500
向力标准值	2 334	特征值	4 500	满足
单根锚栓上	1.029	单根锚栓	1 424	1 028<1 424
拔力设计值	1 028	抗拔力	1 424	满足
单根锚栓上	761	混凝土的	946	761<846
拔力标准值	/01	抗拔力	840	满足
单根锚栓上	1.029	端板处混凝土	1 207	1 028<1 387
拔力设计值	1 028	局压承载力	1 38/	满足

#### 4.2 施工工具和实施过程

4.2.1 主要施工工具

破碎机:破碎锤挖掘机。 钻机:履带式勘探钻机。 钻头:硬质合金钢钻头。 植筋钻机:专用钻机。 注胶工具:胶枪。

辅助工具:钢筋探测仪,水平尺,毛刷,吹风机。

4.2.2 实施过程

(1)破碎锤挖掘机破除 0.000 m 以上混凝土, 如图 9 所示。

(2)测量放线,孔位确定

(3)钻机就位:一台磨煤机配两台钻机。

(4)水平度调整:保证钻机处于水平状态,确保 钻孔垂直。

(5)钻孔作业:先以低转速和较小钻压开始钻, 密切观察钻机运行和钻头推进情况,到达要求深度 后停止,对钻孔深度进行复核,确保满足设计要求, 如图 6 所示。



图 6 钻机钻孔

京テ電氣評論 2025.3.25 第39巻V

第39卷Vol.39总第156期

(6)清孔与检查:利用空压机和毛刷、吹风机等 工具对孔内残留钻屑和灰尘进行彻底清理。

(7) 孔口保护: 对已完成的钻孔的孔口进行保护, 防止杂物掉入孔内, 等待后续施工。

(8)将直径 80 mm 地脚螺栓和套管放入,用 C80高强膨胀灌浆料进行孔内二次灌浆。

(9)在 0.000 m 新旧混凝土交界进行植筋位置 测量放线定位。

(10) 植筋钻孔,钻孔过程避免过快损伤混凝土 基础。

(11)清孔:确保孔内清洁干净,干燥。

(12) 植筋胶注入,确保孔内各个部位都填充足 够的植筋胶。

(13)0.000 m 新旧混凝土交界面插入钢筋,边插入边旋转。

(14)0.000 m 新旧混凝土交界面涂抹界面剂。

(15)0.000 m以上钢筋绑扎,基础浇筑,如图 7 所示。在本项目施工过程中,施工方采用 130 mm 小型钻机进行成孔作业,一台基础的操作面最多只 能一台钻机连续施工近一天才成型 1 个孔(孔 φ350,孔深 2.3 m),且成孔质量不佳。而一台磨煤 机有 12 个孔,仅成孔作业周期就需要半个月。



图 7 施工照片-封模

#### 4.3 优缺点

本方案的优点是对原基础的破坏最小,拆除的 工作最低,无基坑开挖及支护工作,无地基处理,环 保且经济,根据以往工程经验,本方案工期也最短。

缺点是钻孔定位精度要求高,对空间要求高。

#### 5 方案二部分置换混凝土

综合考虑现场施工实际情况及工期需求,改进 原设计方案,采用局部置换方法,如图8、图9所示, 局部拆除需新增螺栓区域混凝土,通过植筋增加新 旧混凝土的连接,以便于大型施工机械快速拆除以 节约工期。



图 8 原磨煤机改造后平面图



图 9 原磨煤机改造后剖面图

5.1 施工工具和实施过程

主要施工工具 破碎机:破碎锤挖掘机。 植筋钻机:专用钻机。 注胶工具:胶枪。 辅助工具:钢筋探测仪,水平尺,毛刷,吹风机。 实施过程:

(1)破碎锤挖掘机破除 0.000 m 以上混凝土。

(2)破碎锤挖掘机破除-2.5 m~0.000 m 局部 混凝土,如图 10 所示。 京方安泉評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期



#### 图 10 施工照片-基础凿除

(3) 预留 300 mm 厚的钢筋混凝土面层,采用手 动破除避免基础产生隐性裂缝。

(4)坑内四周,新旧混凝土交界进行植筋位置 测量放线定位。

(5) 植筋钻孔, 钻孔过程避免过快损伤混凝土 基础。

(6)清孔,确保孔内清洁干净,干燥。

(7) 植筋胶注入,确保孔内各个部位都填充足 够的植筋胶。

(8)新旧混凝土交界面插入钢筋,边插入边旋转。

(9)0.000 m 新旧混凝土交界面涂抹界面剂。

(10)安装锚栓固定架及锚栓。

(11)0.000 m 以上钢筋绑扎,基础浇筑,如图 7 所示。

#### 5.2 优缺点

本方案的优点是对施工机械要求低,施工时间 相对较短。缺点是对原基础的破坏较大,对凿、砸 及切割混凝土的施工质量要求高,要保证基础的完 整性,无隐性裂缝。局部开挖后涉及局部基坑的开 挖、支护以及降水工作,附带工程量有较大增加。

6 基础改造方案比选

经过多方因素综合对比,考虑工期是本项目的 关键,最终选择方案二实施,对比结果见表2。

基础改造工程已于 2022 年 11 月底顺利结束, 整个基础施工周期为 20 天。

#### 7 结语

随着国家对煤电机组改造升级实现"三改"联 动的重视,火力发电厂大面积更新升级将会是一个 趋势。在这个过程中各种改造方案不断涌现。

表 2 经济性对比(单台)

	方案一	方案二	
项目	锚杆钻孔	部分置换混凝土	
C40 混凝土	23 m <sup>3</sup>	81 m <sup>3</sup>	
二次灌浆	2.8 m <sup>3</sup>	$0 m^3$	
16@ 300 植筋	200 根	700 根	
混凝土表面凿毛	$25 \text{ m}^2$	60 m <sup>2</sup>	
240 深 0.61 m 钻孔	4 根	0 根	
350 深 2.37 m 钻孔	12 根	0 根	
工期	30 天	20 天	
造价	4.2万	8.4万	

方案一锚杆钻孔,调研发现市面上存在多种岩 石钻机,钻孔直径从几十毫米~1000毫米不等,整 机尺寸高度 3~6 m高。例如捷联 JLS-350 金刚石钻 孔机,最大钻孔直径可达 350 mm,在面对钢筋混凝 土墙体、楼板等坚硬材质进行钻孔作业时可以稳定 工作;孔山 KS368 潜孔钻机,双动力头适用孔径范 围为 Φ90—350 mm,主要用于采矿凿岩领域;泰业 光伏 375D 大孔径钻机可以钻凿 350 毫米孔径。在 工程施工招标阶段,与施工方提前沟通,明确所需 钻机型号、规格,督促施工方提前做好设备调配、采 购或租赁准备,确保工程顺利推进。本项目施工 时,虽由于采用的钻机套管直径 130 mm,使得进度 慢最终没能按方案一继续完成,但可为今后类似工 程实施做参考引导,为后续类似项目的实施提供参 考依据。

方案二局部置换混凝土,虽然施工快,如果有 地下水施工难度工期也会增加。因此在实际工程 中,可以根据实际情况选择合适的改造方案。

本研究成果对类似工程的改造项目具有重要 的指导意义与参考价值,助力推动该领域工程实践 朝着高效、经济、环保的方向发展。

#### 参考文献:

- [1] GB 50330-2013《建筑边坡工程技术规范》[S].中国建筑工业 出版社,2013
- [2] GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》[S].中国建筑工业出版社,2010
- [3] GB 50040-2020《动力机器基础设计标准》[S].中国计划出版 社,2020
- [4] GB 50367-2013《混凝土结构加固设计规范》[S].中国建筑工业出版社,2013

#### 第39卷Vol.39总第156期

# 线缆制造业车间照明节能改造探究

程亚兵

安徽尚纬电缆有限公司,安徽 芜湖 238300

摘要:随着社会的进步和科技的发展,节能和环保成为当今社会的重要议题。生产车间照明能耗是线缆制造业这一传统工业 行业的主要能耗之一,因此对其进行节能增效的改造,具有重要的实践价值。[1]本文旨在探究线缆制造业车间照明节能改造 的方法与效果,以提升生产车间照明的能源利用效率,从而间接降低生产成本,并为行业的可持续发展提供参考。

关键词:线缆制造业;车间照明;节能改造;能源效率

中图分类号·TU113

文献标识码·A

文章编号:1001-9006(2025)02-0073-05

## Research on Energy Conservation of Workshop Lighting in Cable Manufacturing Industry

#### CHENG Yabing

(Anhui Shangwei Cable Co., Ltd., 238300, Wuhu, Anhui, China)

Abstract: With the development of science and technology, energy conservation and environmental protection have become important issues in today's society. The workshop lighting is the main energy consumption of cable manufacturing. Therefore, it is of great practical significance to carry out energy conservation improvement measures. This paper aims to research the methods and effects of energy-saving renovation of workshop lighting in the cable manufacturing industry to improve energy utilization efficiency, reduce production costs and provide a reference for the sustainable development of the industry.

Key words: cable manufacturing industry; workshop lighting; energy conservation; energy efficiency

根据现有中国建筑能耗模型,建筑运行的总能耗 额度为近9亿 tce,达到全国能源消费总量的20%。[2] 而在我国传统工业生产模式中,为满足生产过程的 照明需求,生产车间通常选用由功率大、数量多的 照明灯具构成的照明方案<sup>[3]</sup>,造成了巨大的电力能 源损耗。[4]不仅如此,大批量的灯具由于缺乏科学 管理和分配,同时带来的照度不足或照度过饱和的 情况,也会导致如员工视力受损、生产效率降低等 潜在风险。

线缆工业作为我国重要的基础工业之一,有着 车间面积大,操作工序多,光照需求大等特点,其车 间的照明系统在生产过程中占据了相当大的能源 消耗比例。传统的工业生产过程的照明方案已经 不能适应节能减排的发展需求。<sup>[5]</sup>在节能降耗,降 本增效的技改背景下,对线缆制造业车间照明系统 进行节能改造显得尤为重要。这不仅可以通过节 能降耗降低工业企业的生产成本,提升经济价值, 符合降本增效的生产需求;还有助于安全生产,建 立安全生产与节能减排之间的平衡。[6]

#### 1 线缆制造业车间照明现状及问题

#### 1.1 车间结构特征

由于线缆制造工艺及工装要求,生产车间大多 为单层排架钢结构厂房,一般跨度在19~22m,柱间

收稿日期:2024-08-16

作者简介:程亚兵(1968—),男,2015年毕业于东北大学电气自动化技术专业,大专学历,建造师、高级工程师、高级电工。现任安徽尚纬电缆 有限公司工程部部长,主要从事照明智能控制与照明节能改造、机电设备安装等工作。

## 京行を新年為 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

距 6~8 m、建筑高度在 12.5~15 m,屋面每 1 柱或 2 柱之间设一采光带,采用单层 1.5 mm 厚 YX51-410-820 型或 1.5 mm 厚 YX15-225-900 型采光板采光。

车间顶棚采光板由于风吹雨打、日晒夜露,自 然老化、风尘浸染等,一般使用3~5年后,阳光板表 面积尘老化问题严重、采光效果明显下降,进而导 致阴雨天甚至是白天也要开灯照明。

#### 1.2 车间照明现状与问题

当前线缆制造业车间的照明系统,多数采用 T8 节能荧光灯泡或金属卤化物灯由屋面钢梁固定吊 杆安装。安装工艺要求上,高度离地不小于 10 米 (照明灯须高于行车梁上 300 mm 及以上),各灯安 装高度保持一致;数量要求上,采用 T8 节能灯泡 时,须增大灯具密度(每跨>3 盏),采用金属卤化物 灯时,每跨须 2 盏。

以某电缆公司为例,共有十个标准车间,每个 车间布局相同,面积为40m×250m,每个车间使用 100盏400W金卤灯;灯具线路布设方式为4×25矩 阵布设;经过测算,此灯的光通量大约为20000lm. 整体布局如图1所示:



图 1 某电缆公司标准生产车间照明灯具布局示意图

平均照度的计算方式一般有逐点及算法和利 用系数法两种。李运江<sup>[7]</sup>和李想<sup>[8]</sup>等学者对这两 种照度的算法做了研究比对,发现利用系数法常用 以及适用于照明灯具均匀布置并利用维护结构内 表面作照明反射面的场所。考虑到车间既有照明 灯具线路均匀布设的情况,可应用利用系数法来 计算。

工作面的平均照度可以用公式(1)来确定:

$$E_{\rm av} = \frac{\left[24\ 000\alpha + 8\ 400(\ 100 - \alpha)\ \right]K_{\rm a}K_{\rm b}\eta}{S} \qquad (1)$$

其中, $E_{av}$ 为生产车间工作面上的平均照度,单位为勒克斯(lx);M为照明灯具数量,无量纲; $\varphi$ 为照明灯具的光通量,单位为流明(lm); $K_a$ 为利用系数; $K_b$ 为维护系数; $\eta$ 为灯具利用效率;S为车间工作面面积, $m^2$ 。

利用系数 K<sub>a</sub> 的确定与照明灯具类型、室空间比 RCR、有效空间反射比有关。照明车间内部为抹灰 并大白粉刷的顶棚和墙面,则有效空间反射比大约 为 70 %;室空间比是表示照明空间体积与形状的特 征参数,室空间比的计算公式如(2)所示:

$$RCR = \frac{5h(L+W)}{LW}$$
(2)

式中:h 为室空间高,即照明灯具点光源到车间 工作面的高度,本案例中为 10 m;L 和 W 分别为室 空间的长和宽,本案例中取一个跨度的空间,长宽 分别为 250 m 和 40 m;则根据公式,室空间比 RCR 为 1.45。结合以上数据,参照照明设计手册,K<sub>a</sub> 为 0.83。

室内环境的照明光通量会受到灰尘与环境的 影响,因此引入维护系数 K<sub>b</sub>。维护系数值可参考 GB50053-2013 中的相关描述:清洁环境下,维护系 数可取 0.8;一般清洁环境,维护系数可取 0.7;污染 环境较重的室内环境,取值为 0.6;室外环境,取值 为 0.5。此案例中,K<sub>b</sub>取值为 0.7。

综上,可计算得到为单个标准车间的平均照度 *E*<sub>av</sub>为 69.72 lx。

整体来看,当前线缆车间照明设计下,平均照 度虽能满足当前需求,但整体较低,均已照明下,存 在局部地区过度照明或照明不足的情况;整体能耗 大,使用成本高。

#### 2 节能改造方案与实施

#### 2.1 节能改造方案

在改造前,收集数据,进行分析比较方案的可

京テ電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

行性。综合工厂实际情况、供应商灯因素,整理 如下:

(1)明确照明需求:厂区灯柱和已布设的线路 不变;当前平均照度满足使用需求,改造后无需过 度提升平均照度以避免增加能耗。改造前后的平 均照度应基本维持不变,但应注意走廊区域和工作 区域的照度区分。

(2)考虑节能性能:LED 灯具相对传统照明设 备更加节能和环保。选择 LED 灯时要关注其能效 等级和光效,应关注改造前后的整体能耗对比以反 映其节能降本效果。

(3)考虑灯具性能:所选择的 LED 厂房灯必须满 足一定的光学特性,例如配光、眩光控制等;对于厂房 来说,通常选择较高的颜色温度(5000~6500 K),以 获得较高的亮度和较好的可视性;同时考虑评估灯 具的使用寿命以减少维护、更换频率。

根据以上几点,我们定位为吊杆式结构,防尘型,色温 5 000 K 以上,功率因数≥0.9 光束角≮90°额定功率 70 W~200 W 的 LED 灯具;最后选定某品牌 LED 厂房灯,灯的光效为 120 lm/W,则 200 W 的 LED 灯光通量为 24 000 lm;70 W 的 LED 灯光通量 为 8 400 lm。

从现场比对看,70 W LED 照明灯照度满足车间 一般照明要求(关键设备关键点都设有局部照明), 200 W 满足生产照度要求;根据车间使用需求,我们 拟对车间通道和非主要区域采用 70 W LED 灯;生 产区域采用 200 W LED 灯;机台局部照明采用 E27 螺口、光通量>600 lm 色温>6 000 k;功率 7 W~16 W LED 灯泡逐步替换原螺口普通灯泡。

以单个车间(40 m×250 m)为例,在保持平均照 度 *E*<sub>av</sub> = 69.72 lx 不变、灯具总数量 100 盏灯不变的 前提下,我们设使用 200 W 的 LED 灯 a 盏,70 W 的 LED 灯则为(100-a) 盏。

根据公式(1),可列出式子计算:

$$E_{\rm av} = \frac{\left[24\ 000\alpha + 8\ 400(\ 100 - \alpha)\ \right]K_a K_b \eta}{S}$$

a取整数值,近似为75。

选取 200 W LED 灯 75 盏,70 W 的 LED 灯 25

盏,此时单车间的平均照度计算为 70 lx,满足照明 需求。

70 W的 LED 灯可布设在第三列灯柱下的走廊 区域,以每盏灯光照 100 m<sup>2</sup> 的空间计算平均照度, 根据公式(1),则可计算出 200 W的 LED 灯在灯 下一百平米的平均照度为 83.66 lx;70 W的 LED 灯 在灯下一百平米的平均照度为 29.28 lx;满足了工 作区域加强照明,走廊公共区域降低照明的需求。

#### 2.2 照明控制改造

照明控制系统改造,引入智能照明控制系统。 可编程的照明系统可根据不同的情况设定、发布不 同的指令;同时,各个线路及时反馈灯具开关、实时 负荷等信息,实现高效监管。

智能照明控制一般包含手动和系统两种控制 模式。系统控制模式下,系统可根据车间实际需要 (生产时间、紧急任务等),自动调节各线路照明情 况和灯光亮度,实现按需照明;手动操作可弥补系 统控制的不足,当系统故障、生产车间临时断电时, 手动操作也可完成车间照明体系的控制和操作,可 切断或打开任意一条或多条线路开关,便于检修人 安全及时地检测照明体系故障。智能化照明控制 改造,不仅可以避免过度照明,降低能耗,还能提高 车间的舒适度和生产效率,同时也增强了照明系统 的可维护性。

#### 2.3 维护与管理

生产车间负责人和企业负责人需要建立完善的照明设备维护管理制度,定期使用检测工具查验 照明设备的运行状态,及时更换损坏的或者有安全 隐患的灯具,确保设备的正常运行和良好的照明效 果,同时,加强员工的节能意识教育,培养良好的节 能习惯。

#### 3 改造效果评估

#### 3.1 改造费用表

由下表1可以得出结论:先期投入15万元,本 年度照明电费可收回投入并盈利7万余元,次年盈 利20余万元。说明节能改造后,有明显的节能降耗 作用,体现了良好的经济效益价值。

		车间照明节	能改造实施费	用表		
中容	原有现状	计划实施	实际实施 LED 灯		改造后数据	
内谷	金属卤化灯	LED 灯				
数量(只)	1	1		1	/	
न्म के ( <b>फ</b> र)	100	200	2	00	↓ 200	
切쪽(W)	400	200	200 70		↓ 330	
每日工作时长(h)		12			/	
田中(南)	<b>5</b> 1	2.2	200 W	2.28	$\downarrow$ 2.82	
用电(度)	5.1	2. 3	70 W	0.8	↓ 4. 3	
22年度平均单价(元/度)		0.8			/	
<b>伝 12 L 由 弗</b> ( 元)	4.00	1.04	200 W	1.824	↓ 2. 256	
母12h电贺(元) 4.08	4.08	1. 84	70 W	0.64	↓ 3. 44	
会年(250 王社)由弗(元)	1429	644	200 W	638.4	↓ 789. 6	
至平(330人日)电贲(九)	1428		70 W	224	↓ 1 204	
<b>新</b> 井亚助粉昌(日)	400	400	200 W	300	,	
顶日木妈奴里(只)	400	400	70 W	100	/	
400 只全年电费(元)	571 200	257 600	/	/		
开灯系数		0.6			/	
乘开灯系数后的	247 070	154.500	200 W	114 912	17( 470	
400 只全年电费(元)	347 270	134 300	70 W	13 440	↓ 170 470	
采购单价(元/只) 1100	401	200 W	415			
	1 100	421	70 W	190	对比计划总价↓24 900	
400 只采购成本(元)	440 000	168 400	143	500		
改造后全年可节省电费	214 368 元					
收回成本后盈利	708 68 元					

#### 表 1 车间照明节能改造实施费用明细表

#### 3.2 间接评估

经过一段时间的运行,该车间照明系统的节能 改造效果显著:为了验证以上方案的节能效果,我 们进行了实验和数据收集。实验结果如下表 2:

表 2 车间节能降耗效果评估表

方案	能耗降低率	维护成本降低率	生产效率提升率
LED 灯具替换	30 %	20 %	10 %
智能化控制	25 %	N/A	5 %
定期维护	N/A	15 %	N/A

从表 2 中可以看出,通过采用高效节能灯具、智能化控制和定期维护等方案,可以有效降低线缆制造业车间的电能消耗和维护成本,同时也有助于提高生产效率。

(1)能耗降低:与改造前相比,改造后的照明系 统能耗大幅下降,减少了约 30 %~40 %的能耗 成本。

(2)照明质量提升:LED 灯光具有更高的显色

指数和更舒适的光环境,提高了员工的视觉舒适 度,简介提升了工作效率。

(3)生产效率提升:合理的灯光布局和智能化 控制使得生产区域的光照均匀且更充足,提高了员 工的操作准确性,进一步提升了生产效率。

(4) 维护成本降低:由于采用了长寿命的 LED 灯具和智能化的控制方式,维护成本也相应降低。

#### 4 结语

通过以上案例分析,该厂通过科学计算编排合 理的设备更新、布局优化、智能化控制和运维管理 保障体系,可以有效降低能耗、提高照明质量和生 产效率。节能减排是一项持续性、不断优化的工 作,针对该车间照明系统的节能改造实践,提出以 下建议与展望:

(1)持续监测与优化:为了确保节能效果的持 久性,应定期对改造后的照明系统进行监测,并根

京方電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

据实际运行状况进行必要的调整和优化。同时,要 关注新型节能技术的动态,以便及时将更先进的节 能技术应用到生产实践中。

(2)员工培训:加强员工对节能照明系统的认 识和重视程度,定期开展相关培训,培养和提升员 工的节能降耗意识与操作技能。使员工充分认识 到节能改造的意义和价值,自觉参与到节能减排的 行动中来。

(3)引入更多智能化技术:未来可以考虑进一 步引入物联网、大数据等智能化技术,实现照明系 统的远程监控和管理。通过数据分析优化照明策 略,提高节能效果和生产效率。同时可以开发与生 产管理系统集成的智能照明系统,实现更加精细化 的管理和控制。通过智能化技术的应用,可以进一 步提升车间照明系统的性能和节能效果,为企业创 造更多的经济效益和社会价值。

#### 参考文献:

- [1] 李淑娴.公共建筑照明系统节能分析及评价方法研究[D].苏 州科技大学,2020
- [2] 江亿.中国建筑节能理念思辨[M].北京:中国建筑工业出版 社,2016
- [3] 徐辉,杨宏芳.生产车间照明节能改造研究[J].光源与照明, 2022(4):19-21
- [4] 韩愚拙,傅卫东,张琪,等.车间照明提升案例分析[J].智能建 筑电气技术,2021,15(6):57-60
- [5] 邓晓菲. 基于总线控制的卷烟厂车间智能化照明系统的设计[J]. 机械工程与自动化,2018(3):186-188
- [6] 周琦. F 公司发动机车间智能照明改造项目进度管理研究[D]. 电子科技大学,2021
- [7] 李运江,彭惠明,徐波. 几种照度计算方法的比较及研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2003(1):30-32
- [8] 李想.3种照度计算方法的比较[J].上海电力学院学报,2011, 27(1):83-86

#### 集团要闻

#### 国内首台 200 兆瓦光热汽轮机发运

2025年2月18日,东方电气集团所属东方汽轮机自主研制的国内首台 200 兆瓦光热汽轮机从四川德 阳发运。该光热汽轮机将应用于国内单体规模最大塔式光热项目——中广核德令哈 100 万千瓦光热储一体 化项目。该项目位于"中国光热之都"青海省德令哈市,海拔高达 3 000 米,是国内储能配比率最高的光热储 多能互补项目,采用熔盐塔式技术路线,由东方电气研制供货光热汽轮机、光热发电机、蒸汽发生系统,将实 现大规模光伏、光热、储能协同发电技术的科技创新与工程示范验证。作为光热储一体化项目的核心设备, 此次发运的汽轮机机组型式为超高压、双缸、一次中间再热、下排汽、直接空冷凝汽式汽轮机,高压模块采用 筒型缸结构,中低压转子采用国内首次应用于光热发电领域的焊接技术,具有高经济性、高灵活性、高可靠 性等优点。

高经济性:应用东方电气最新第四代通流技术,具有额定高效、宽负荷高效的特点。高灵活性:高压内 缸采用筒形缸,攻克汽轮机热变形协调控制与通流间隙适配技术难题。高可靠性:严格评估轴系安全稳定 性、科学评估轴系寿命,选用能力优、低负荷、抗颤振能力强的高效末叶,确保机组在超低负荷到高负荷区间 高效、安全运行。德令哈 200 兆瓦光热项目为全球提供了"多能互补+科技示范+生态友好"的系统性解决方 案,是新型电力系统构建和"双碳"战略落地的关键实践。项目建成投产后,年上网电量可达 18 亿千瓦时, 每年可节约标准煤 55 万吨,减少二氧化碳排放 130 万吨。

早在2018年,东方电气光热发电设备已应用于中广核德令哈50兆瓦槽式光热发电示范项目,项目投产 以来已累计发电超过5亿千瓦时,为黄色戈壁写下"绿色诗篇"。面向未来,东方电气将加快培育发展新质 生产力,为光热产业高质量发展注入新动能。

来源:东方电气微信公众号

東テ電氣評論 2025.3.25

# 国产自主分散式控制系统与云平台 一体化架构设计

温云皓 张亚平 马劲松 刘文渤

东方电气自动控制工程有限公司,四川 德阳 618000

摘要:随着自动化、数字化技术的发展,电气行业对场站级控制和运维的需求正从多人值守向无人值守转变。要实现场站级 无人运维和监控,数据采集、数据展示和设备远程监控及智能预警是十分必要的。为实现上述功能,本文提出了国产自主分 散式控制系统(以下简称 DCS)与云平台一体化架构,DCS系统将采集到的数据上传至云平台,云平台对接收到的 DCS系统数 据进行处理、存储与展示,并反馈给 DCS系统对整个场站进行实时调控。在 DCS系统-云平台一体化架构下,场站级无人值 守、远程监控与设备远程控制得以实现。

关键词:DCS; 云平台 中图分类号:TM76

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)02-0078-03

## Design of Integrated Architecture of Domestic Autonomous Decentralized Control System and Cloud Platform

WEN Yunhao, ZHANG Yaping, MA Jingsong, LIU Wenbo (Dongfang Electric Autocontrol Engineering Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: With the development of automation, digitalization and technology, the electrical industry's demand for stationlevel operation and control is transforming from multi-person duty to unattended duty. In order to achieve unmanned operation and monitoring at the field level, data collection, data demonstration, remote monitoring of equipment, and AI early warning are necessary. To achieve the above functions, this paper proposes the integrated architecture of a domestic autonomous decentralized control system (DCS) and cloud platform. The DCS system uploads the collected data to the cloud platform. The cloud platform processes, stores and displays the received DCS system data and feeds back to the DCS system for real-time regulation of the entire station. Under the integrated architecture of DCS system and cloud platform, station level unattended, remote monitoring and equipment remote control can be realized. Key words: DCS system; cloud platform

在电气行业中,各类发电站的无人值守和远程 运维是业内关注重点,如:光伏电站、火电站、风电 电站。传统 DCS 系统虽然能够实现上述应用场景 内的工业流程参数的监控、工业参数的自动调节、 异常情况的报警和通知、以及工业数据的采集和存 储,但无法满足当今行业发展对于无人值守、远程 运维以及智能预警的要求。在发电站的运行过程 中,大量的设备参数会被 DCS 系统下的数据采集设 设备采集,并存储至本地数据库中,同时上传至系 统进行分析报告。由于传统 DCS 系统不具备算力 去承载数据清洗、处理算法,这些冗余的数据仍然 会被储存在本地的数据库中,这对数据存储服务器

收稿日期:2024-12-16

基金项目:四川省德阳市科技"重大攻关"揭榜挂帅项目:全国产化分布式工业控制系统(DCS);项目编号:2022JBZG005。

**作者简介:**温云皓(1988—),男,2011年毕业于华中科技大学电子科学与技术专业,学士,工程师,现任职于东方电气自动控制工程有限公司研发中心,从事控制系统开发工作。

和后续的数据导出造成了很大的压力。并且对于 计算要求较高的智能控制算法,如异常预警算法、 负荷预测算法等,也无法搭载在系统中。根据电厂 保密需求,传统 DCS 系统采集到的数据仅储存在本 地并通过内网展示给相关工作人员,远程设备监控 和运维也无法实现。<sup>[1]</sup>

目前,远程监控的主要解决方案是将数据上传 至云端由云平台进行处理和显示。<sup>[2]</sup>常用的 DCS 系 统与云平台之间的通信方式为 OPC 和 Modbus-TCP。前者通过公网和光纤,将数据从 DCS 系统直 接传输到云平台;后者引人数据采集网关,将 Modbus-TCP 转换为 MQTT 协议<sup>[3]</sup>,将数据从 DCS 系统传输到云平台。光纤和公网的引入会带来以 下影响。①建设成本增加:光纤铺设增加了前期的 建设成本;②数据泄露风险增加:在公网传输过程 中,数据容易收到第三方的攻击和篡改;③数据实 时性降低:为了避免数据在公网中被攻击,需要对 数据进行复杂的加密和解密操作,这会增加发送端 和接收端的延迟。

为了解决上述传统 DCS 系统的痛点及 DCS 系统与云平台之间通信的问题,本文基于自主研制的 DCS 控制系统及综合能源智慧云平台提出了 DCS 系统-云平台的一体化架构。

#### 1 DCS 控制与云平台一体化架构设计

#### 1.1 DCS 系统介绍

DCS系统是一种以分散式控制和集中式管理 为设计思路的工业自动化领域控制技术。在DCS 系统中,整个工业场景被分割成不同的控制节点, 每个节点都具备一定的控制能力和决策能力。传 统DCS系统在设计时对节点之间通信的时效性、节 点本身的网络重构能力具有很高的要求。东方自 控自主研发的国产DCS系统通过在控制器控制站 (DPU)与通讯模块之间设计高速工业以太网 PowerLink与EtherCAT技术,构建了双环形冗余高 速通讯链路,极大的提高了数据传输速率与传输距 离,增强了DCS系统本身的鲁棒性。同时,该自主 DCS系统可以实现多种工业总线协议的转化,可以 极大的降低DCS系统控制器的负荷。

#### 1.2 云平台系统介绍

智慧云平台作为自主研发的搭载了数据处理

京方電氣評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

模块和 AI 算法的平台,涵盖了计算、存储、数据库、 分析工具和人工智能等方面的功能,能够弥补传统 DCS 系统在数据处理、AI 算法、数据存储和远程运 维的不足。云平台通过对从 DCS 系统接收到的数 据进行清洗处理,按照工作人员需求剔除掉冗余数 据,利用智能算法对接收到的数据进行分析预测, 满足电厂运维中的智能化的需求。

#### 1.3 DCS 与云平台一体化架构设计

#### 1.3.1 设计思路

本文提出了双服务器架构实现 DCS 与云平台 一体化。通过可支持多种物联网协议的 DCS 系统 服务器直接通过网线与云平台服务器进行通信,实 时地将数据传输到云平台中,云平台通过对从 DCS 系统接收到的数据进行清洗处理,按照需求剔除掉 冗余数据,并利用训练好的 AI 分析模型对处理后的 数据进行分析,最后将结果反馈到 DCS 系统中进行 实时操作修正。云平台由前端和后端两部分组成, 前端将后端处理后的数据进行加工展示,令工作人 员能够清晰地查看系统中各个部分的状态信息。 后端与 DCS 系统通信,将接收到的 DCS 系统数据进 行处理并反馈给前端。通过云平台,工作人员能够 实现对 DCS 系统的远程运维和监控,极大的增强了 场站运维的方便性和效率。

1.3.2 总体架构设计

根据以上设想,东方自控提出了在 DCS 系统外 设置 Web 云平台服务器的方式,通过相应的网络协 议和通信协议实现与 DCS 系统的通信。按照 B/S 架构方式,将云平台分为浏览器端(前端)和服务器 端(后端),其中前端使用 HTML、CSS 和 JavaScript 等技术实现。后端使用服务器端编程语言和数据库 实现。在运行时,前端通过浏览器向服务器发起请 求,后端处理相关请求并返回相应的数据或页面。服 务器端为浏览器提供 HTTP 协议和 WebSocket 协议 服务,其中 HTTP 提供静态文件、图形文件读取等服 务,WebSocket 提供实时数据订阅和指令转发服务。 服务器端通过接口与 DCS 进行通信,采集实时数 据、发送控制指令等。

#### 1.3.3 通信实现设计

DCS系统通过 MQTT 协议直接将采集到的数据 传输至云平台,云平台对接收到的数据进行清洗、

## 京行を和評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

处理并保存在服务器中。同时,根据处理后的数据,云平台利用训练好的数据分析模型,实时地对接收到的数据进行分析并将结果实时反馈给 DCS 系统。该方案通过服务器集成,极大的降低了数据 传输的延迟,提高了数据的实时性和操作的时效 性。该方案如图1所示。



#### 2 设计方案应用效果

上述一体化系统已在某企业数字化改造项目 成功投运半年,系统稳定运行。整个系统长时间稳 定运行,测试结果表明,DCS系统通过网络连接实 现对现场的远程监控和操作,方便在不同地点进行 管理;云平台实时与 DCS系统进行数据交互,对试 验区域进行三维建模,在 LED 大屏上显示试验区域 的设备结构及相关运行数据。

通过测试观察,传统 DCS 系统与 DCS-云平台 架构性能对比效果如表1 所示。

表 1	传统 DCS	系统与	DCS-云平台	杂构性能对比
-----	--------	-----	---------	--------

方案	监控范围	操作时效性	数据分析能力	数据诊断	
传统 DCS	***	仅支持本地	不日夕	扣细建档	
监控系统	平地	实时操作	小共宙	机埋建筷	
DCS+	本地/	本地/远程	日夕	神经网络、	
云平台	远程	支持实时操作	具領	历史数据建模	

DCS-云平台一体化架构与传统 DCS 系统在数据储存,查询速率方面,传统 DCS 系统与 DCS-云平台一体化架构的对比如表2所示。

表 2 传统 DCS 系统与 DCS-云平台架构

数据储存查询性能对比

	时序数	高并发写	时序数	高并发查询
刀杀	据储存	入响应时间	据查询	响应时间
传统 DCS	50,000 夕 (玉小	20	10,000 友 (私	50
监控系统	50 000 余/ 砂	20 ms	10 000 余/ 杉	50 ms
DCS+	100 000 夕 (玉小	-	50 000 × 154	10
云平台	100 000 余/ 秒	5 ms	50 000 余/ 秒	10 ms

通过与传统 DCS 系统的测试对比, DCS-云平台 一体化架构在故障诊断与预警方面相较传统 DCS 系统准确率提升 43 %,数据写入速率提升一倍,响 应时间缩短为四分之一。数据查询速率提升五倍, 响应时间缩短五分之一。

#### 3 结语

场站智能化水平的提高,依靠于 DCS 系统与云 平台,本文聚焦于 DCS 系统与云平台一体化架构, 分析了 DCS 系统与云平台之间的通信方案,并提供 了相应的实现技术路线。从行业情况分析,多品牌 的 DCS 系统与云平台之间存在协议不统一的情况, 这对实现 DCS 系统-云平台一体化架构造成了很大 的难度,对此本文提出的国产自主 DCS 系统与自研 云平台保证了通信协议的统一性,并且为 DCS-云平 台一体化架构的结构修改和功能改进提供了很大 的方便性和时效性。

#### 参考文献:

- [1] 张博春,王长征,尹丰. SCADA 与 DCS 一体化监控技术分析 [J].石油化工自动化,2023(2),7-10
- [2] 吴丹. 基于云计算的 DCS 远程诊断与维护系统的设计与实现 [D]. 西安电子科技大学,2021
- [3] 任国俊,张志学,厉超,等. DCS 与 SIS 一体化监控后台 SCADA 改造[J]. 电站系统工程,2024(1),48-50

# PLC 在透平压缩一体机控制保护 系统中的应用

#### 何阳森

东方电气自动控制工程有限公司,四川德阳 618000

摘要:随着现代工业的不断发展,透平压缩一体机作为一种具备节能、高效和可靠等特点的新型设备,展现出广阔的应用前 景。但是透平压缩一体机的控制与保护系统设计实现还没有成熟的控制模式。为实现透平压缩一体机的高效、稳定、安全运 行,本文针对其控制与保护系统设计进行了研究。文中提出在该系统中应用可编程逻辑控制器(PLC),并详细阐述了 PLC 在 系统硬件和软件设计中的具体应用。研究表明,PLC 可实现对透平压缩一体机运行状态的实时监控和过程控制优化,确保系 统可靠、灵活、高效运行。本研究充分展示了 PLC 在透平压缩一体机控制与保护系统设计与实现中的重要作用,为该设备的 进一步研发与应用提供了重要参考。

关键词:透平压缩一体机;控制系统;保护系统;解决方案 中图分类号:TP273 文献标识码:A 文章编号:1001-9006(2025)02-0081-05

## Application of PLC in the Control and Protection System of Turbine Compressor

HE Yangsen

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

Abstract: With the continuous development of modern industry, the integrated turbine compressor, as a new type of equipment with energy-saving, efficient, and reliable characteristics, has shown broad application prospects. However, there is no mature control mode for the design and implementation of the control and protection system of the integrated turbine compressor. In order to achieve efficient, stable, and safe operation of the integrated turbine compressor, this article conducts research on the design of its control and protection system. The article proposes the application of programmable logic controller (PLC) in the system and elaborates on the specific application of PLC in system hardware and software design. Research has shown that PLC can achieve real-time monitoring and process control optimization of the operating status of the turbine compression integrated machine, ensuring reliable, flexible, and efficient operation of the system. This study fully demonstrates the important role of PLC in the design and implementation of the control and protection system for the integrated turbine compressor, providing important references for the further development and application of this equipment.

Key words: turbine compression integrated machine; control system; protection system; solution

随着工业自动化技术的迅速发展,高效、节能、 环保的设备需求日益增加。透平压缩一体机是一 种新型研发设备,其具有节能、高效、可靠等特点, 在未来工程领域具有广阔的应用前景和巨大的发 展潜力。但是,透平压缩一体机运行过程中也可能 出现各种故障,为确保其安全、稳定运行,有效的控

收稿日期:2024-09-26

作者简介:何阳森(1984—),男,毕业于四川大学,本科,工程师,现任东方电气自动控制工程有限公司设计工程师。主要研究方向为汽轮机监视、保护与控制系统。

## 京行委員評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

制与保护系统设计至关重要。基于此,本文着重探 讨了可编程逻辑控制器(PLC)在透平压缩一体机控 制与保护系统中的具体应用。本文首先简要介绍 了透平压缩一体机的工作原理、结构特点,使读者 对该设备有基本了解。然后,重点阐述了 PLC 在该 系统中的选型选择、硬件电气设计、软件编程实现 等方面的应用,可以为相关领域的工程技术人员提 供参考和指导。

#### 1 透平压缩一体机的工作原理和控制要求

透平压缩一体机由高速永磁同步电动机直接 驱动,通过膜盘联轴器带动压缩机和透平运转。在 运行过程中,湿空气从干燥塔或气提浓缩塔输送至 透平膨胀段,进行能量转换。产生的凝结水被排至 疏水罐,供其他系统使用。湿空气经过除雾器脱湿 处理后,进入压缩机段。压缩后的高温气体返回干 燥塔或气提浓缩塔,然后再次进入透平段,完成整 个循环。

系统启动时,电动机驱动透平压缩一体机旋转。压缩机段对空气做功,将高温高压气体输送至 用气管道。高温高压气体经过干燥塔或气体浓缩 塔后,温度和压力降低。随后,气体进入透平段进 行能量转换。同时压缩机的抽吸效果为透平出口 建立负压环境,也驱动透平机旋转。气体从透平排 出后经过脱湿处理,送入压缩机段,至此循环建立。 之后,透平段和电动机共同驱动压缩机运转,原理 简图如图 1:



图 1 透平压缩一体机工作原理简图

控制系统的目标是通过监测压缩机出口实际 参数值和设定目标值之间的差异,利用转速控制回 路调节电动机负载,使压缩机出口参数满足要求。 主要被控对象为电动机和透平压缩机一体机。为 实现上述控制目标,本系统需完成对机组转速的控 制,确保机组从静止状态启动后转速平稳升至额定值,并通过转速的升降调节压缩机出口参数。

#### 2 控制系统的选择

工业过程控制系统中,除 PLC 外,还可以考虑 如分散控制系统(DCS)、基于工控 PC 的开放系统 以及微控制器系统等。相比其他系统,PLC 系统具 有编程简单直观、性能可靠、硬件价格低等优点。 具体来说:DCS 系统构建灵活,环境适应性强,但开 发调试复杂,系统成本较高;基于工控 PC 的开放系 统计算能力强大,但软硬件兼容性较差,价格高昂; 微控制器系统结构简单灵活,但对过程控制的处理 能力可能不足。因此,本项目选择 PLC 作为透平压 缩一体机控制系统的核心平台。

经过对国内外主流 PLC 品牌的调研对比,考虑 到国产 PLC 具有国产化替代的重要意义以及价格 优势,和利时 LK 系列 PLC 具有快速扫描周期,可以 实现高精度的透平压缩一体机工艺参数实时监控, 保证系统动态控制响应速度。同时,该系列 PLC 支 持各种通讯接口,可以轻松连接现场数据采集模 块、执行器等。LK 系列 PLC 价格适中,质量也经过 长期市场验证,完全能够满足本系统的控制需求。 综合考虑各方面因素,最终选择了国产品牌和利时 公司的 LK 系列 PLC 进行系统开发。

为详细阐述 LK 系列 PLC 在本控制系统中的具体应用,下面将从硬件配置和控制程序设计两个方面对该 PLC 控制系统进行介绍。

#### 3 控制系统硬件概述

为了实现对系统的精确控制和及时调控,确保 系统稳定运行的同时兼顾维护便捷性,本文提出了 一种基于以下硬件配置的解决方案。

LK411 模拟量输入模块实现工艺参数监测并反 馈 PLC,确保参数精确。LK511 模拟量输出模块-将 控制器数字信号转换为隔离模拟量输出,用于过程 控制和测试测量。LK430 热电阻输入模块采集不同 热电阻并上传 PLC。LK610 数字量输入模块和 LK710 数字量输出模块实现系统与现场的开关量信 号输入、输出。LK239 模块实现 LK 控制器与外部 设备在通讯方式下的数据交互。HT 人机接口实现



数据存储及用户操作界面。

在本控制系统中,PLC处理器与各个输入输出 模块卡之间采用 PROFIBUS-DP 现场总线进行通 讯。PLC 与人机接口、变频器之间采用 MODBUS TCP/IP 通讯协议进行数据交换。控制系统硬件结构如图 2:



#### 4 控制系统程序设计概述

(1) 输入输出信号

为实现精确监控和有效控制,PLC 控制系统采 集了众多的工艺测点,这些测点主要包括如表1。

PLC 软件组态主要包括输入、输出、逻辑处理等部分。

序号	信号名称	信号来源	信号去向	信号类型
1	急停	PLC	变频器控制柜	开关量
2	控制模式	PLC	变频器控制柜	通讯
3	频率给定	PLC	变频器控制柜	通讯
4	启动/停止	PLC	变频器控制柜	开关量
5	透平旁路调节阀指令	PLC	一体机	模拟量,4~20 mA
6	实际转速	TSI	PLC	模拟量,4~20 mA
7	电机轴振动 X/Y	TSI	PLC	模拟量,4~20 mA
8	透平胀差	TSI	PLC	模拟量,4~20 mA
9	透平轴振 1X/1Y/2X/2Y	TSI	PLC	模拟量,4~20 mA
10	轴承温度	电机	PLC	铂热电阻 PT100
11	轴承回油温度	一体机	PLC	铂热电阻 PT100
12	透平进气流量	一体机	PLC	模拟量,4~20 mA
13	透平进气温度	一体机	PLC	铂热电阻 PT100
14	透平进气压力	一体机	PLC	模拟量,4~20 mA
15	透平进气阀开度反馈	一体机	PLC	模拟量,4~20 mA
16	透平排气温度	一体机	PLC	铂热电阻 PT100
17	透平排气压力	一体机	PLC	模拟量,4~20 mA
18	压气机进气温度	一体机	PLC	铂热电阻 PT100
19	压气机进气压力	一体机	PLC	模拟量,4~20 mA
20	压气机排气温度	一体机	PLC	铂热电阻 PT100
21	压气机排气压力	一体机	PLC	模拟量,4~20 mA

表1 控制系统主要工艺测点

PLC 通过急停、控制模式、频率给定和启动/停止4个开关量信号来控制变频器并实现设备的启动、停止和运行控制。PLC 输出的模拟量信号透平

旁路调节阀指令来控制透平旁路阀开度。

振动传感器提供 6 个轴向振动模拟量信号,用 于监测压气机轴承和电机的振动状态。

## 京行委員評論 2025.3.25 第39巻Vol.39总第156期

温度传感器提供 8 个模拟量和热电阻信号,用 于监测轴承回油温度、电机温度以及设备工作介质 的温度。这些信号用于判断设备的热工况,以防过 热损坏。

流量、压力和阀门开度的模拟量信号,用于记录和控制工艺介质的流量、各节点的压力,并反馈阀门执行器的开度,确保正常的工艺输送量和压力。

通过上述测点信号的采集与监控,PLC 可以实 时监视透平压缩一体机的工况,一旦检测到任何异 常,都可以及时作出相应处理,保证设备高效、稳定 地运行。

(2)信号处理组态及特点

软件组态时,采用结构化文本来实现信号输 入、输出的组态和参数设置,此组态方式具有方便 快捷、利于阅读和维护的优点,举例如下:

对于 4~20 mA 模拟量信号,PLC 收到的是电流 信号范围是 0~20 mA,经过模拟量输入卡,被转为 对应范围是 0~65535 的码值,而在组态里面需要用 实际的工程量来运算,故需要信号转换,将码值转 换为工程量。原方式是用如图 3 功能块进行转换:



#### 图 3 功能块示意图

IN 表示信号从就地变送器送到输入卡后的码 值,UP 表示该信号的量程上限,DW 表示该信号的 量程下限,OUT 表示进过转换后的信号工程量。

考虑到本项目输入的信号较多,采用功能块方 式来组态,需要放置大量功能块、填写大量参数,操 作复杂繁琐易错,且不利于阅读和维护,于是改用 结构化文本来实现组态,部分摘录如下:

*HTE*(*IN*: = *DPIO*\_*AI*04\_1, *UP*: = *AI*04\_1\_*UP*, *DW*: = *AI*04\_1\_*DW*, *OUT* = >*MODBUS*\_*AI*04\_1);

 $UP, DW := AI04\_8\_DW, OUT = >MODBUS\_AI04\_8;$ 

HTE 为功能块名称, IN 为输入信号, UP 和 DW 为工程量上下限, OUT 为工程量信号输出, 上面代码第一行完成了通道1的参数设置, 将该行代码复

制到 Excel 中,使用 Excel 的自动填充功能,就可以 自动填充生成通道 2 至 8 的代码。

采用 Excel 自动填充工具批量配置信号通道参数,可以避免手工逐个放置功能块和填写参数的重复劳动,将参数设置集中在一个页面内完成,一次性配置大量通道,既简化了操作流程,又减少了填写错误的风险,大幅提高了信号通道配置的效率,利于组态查阅和后期维护。

(3)系统启动检查

启动透平压缩一体机前需要进行的检查如 图 4。



#### 图 4 启动检查流程图

PLC 检查上述过程对应的工艺信号,当每个信号都满足系统要求时,在人机接口界面会有状态指示,提示已经完成启动检查。

(4)升速控制

升速控制作为本控制系统核心部分,其操作便 利、直观且具有较强的交互性,满足了用户在设置 目标转速和升速率时的需求。在人机交互界面上, 用户可以直接设定目标转速和升速率,同时,系统 还提供了"+100 r/min"和"-100 r/min"等快捷键, 以便用户对当前目标转速进行增减调整。此外,系 统还设置了 300 r/min、1 000 r/min、2 000 r/min 等 预设升速率按钮,方便用户快速切换和设置。升速 控制操作画面如图 5。



图 5 升速控制操作画面

京が安原評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

(5)停机过程组态

在设备运行过程中,如果任何参数超限且达到 停机值,则系统进入紧急停机过程:当机组转速大 于3000 r/min时,将目标转速设置为2990 r/min; 当转速低于3000 r/min或以下,且旁路阀开度小于 80%,则将旁路阀开度指令设置为82%;当旁路阀 开度在80%以上时且转速小于3000 r/min时,将 目标转速设置为0 r/min;当机组转速降到0 r/min 时,机组停止运行。

本研究针对机组运行过程中的紧急停机控制 策略,采用结构化代码进行组态。这种编程方式具 有以下优点:易于理解和维护、灵活性高、可靠性 强、易于扩展和协同开发。紧急停机组态代码如下:

(\*任何参数超限达且到停机值时,Trip被自动设置为1\*)

*IF Trip* = 1 *THEN* (\*当 *Trip*=1时,进入停机过程\*) *IF MODBUS\_AI06\_*4>=3000 *THEN* (\*如果当前机组转速

大于 3000 rpm \* )

SE\_COMMAND:=2990; (\*将目标转速设置为 2990 rpm
\*)

SE\_RATE:=2000; (\*将升速率设置为 2000 rpm\*) END IF

*IF MODBUS\_AI*04\_6<80 *THEN* (\*如果旁路阀开度小于 80 % \*)

*IF MODBUS\_AI06\_4<3000*) *THEN* (\* 如果当前转速小于 3000 *rpm*\*)

MODBUS\_A001\_2:=82 (\*将旁路阀开度指令设置为82% 开度\*);

MODBUS\_CVRate:=200 (\*将阀门开关速度设置为每秒开 或关3%\*);

END\_IF

END\_IF

*IF MODBUS\_AI*04\_6>=80 *THEN* (\*如果旁路阀开度大于 等于80%\*)

*IF MODBUS\_AI*06\_4<3000 *THEN* (\* 如果当前转速小于 3000 *rpm*\*)

```
SE_COMMAND:=0; (*将目标转速设置为 0 rpm *)
SE_RATE:=2000; (*将升速率设置为 2000 rpm *)
END_IF
END_IF
END_IF
```

结构化代码能满足机组运行过程中的复杂控 制需求,具有清晰的逻辑和高效性能,为实际应用 提供了有力支持。

#### 5 结语

在透平压缩一体机控制系统中采用 PLC,能提 高设备的自动化水平,简化电气系统结构,方便维 护、升级和远程监控。PLC 应用实现高效、稳定运 行。其优点在类似系统中值得借鉴。

本文首先介绍了压缩一体机和其控制要求,然 后介绍了 PLC 在该系统的硬件配置和软件编程的 特点。并通过实际案例详细阐述 PLC 在该系统中 的具体应用。通过研究,我们可以更好地理解 PLC 在该系统中的作用。

尽管透平压缩一体机目前仍处于研发阶段,本 文对促进其未来发展和 PLC 技术推广有重要参考 价值。本研究丰富了 PLC 在工业控制与自动化领 域应用,为相关研究和实践提供理论基础与技术 支持。

#### 参考文献:

- [1] 姚立坤. PLC 在电厂给水泵汽轮机控制中的应用分析[J]. 机 电信息,2012(3):59-60
- [2] 王刚,毕为民,郑丽超.对 PLC 冗余系统性能的分析与研究[J].自动化技术与应用,2014,33(9):54-57
- [3] 唐杰.基于 PLC 的空气压缩机自动控制系统设计[J].现代信息科技,2022,6(108):18 167-169
- [4] 贺丽岩,李拥军,周雪冰. DCS 系统在压缩机控制中的应用[J].工业控制计算机,2004(3):55

# 欢迎投稿,欢迎订阅!

東テ電氣評論 2025.3.25

## UPS 防短路越级跳闸保护技术研究

周恩思1 贾春娜2

1. 上海岚陌工业自动化科技中心, 上海 201309; 2. 华电轻型燃机服务有限公司, 上海 201108

摘要:由一起 UPS 因主断路器与分支断路器保护设置不匹配导致越级跳闸事件,引发对 UPS 短路保护方式的思考。尽管时间 延迟调整能够在一定程度上缓解越级跳闸,但在高短路电流环境下,传统保护机制难以完全确保系统的稳定性。结合案例分 析与理论论证,详细探讨了在不同跳闸时间设置下仍出现越级跳闸的原因。提出了基于自适应速断保护模块的防短路越级 跳闸技术方案,以增强系统的动态响应能力和安全性。

关键词:UPS; 越级跳闸; 速断保护; 故障隔离

中图分类号:TM774 文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)02-0086-03

### Technology for Anti Override Trip Protection of UPS

ZHOU Ensi<sup>1</sup>, JIA Chunna<sup>2</sup>

Shanghai Lanmo Industrial Automation Technology Center, 201319, Shanghai, China;
 Huadian Aero Turbine Service Co., Ltd., 201108, Shanghai, China)

Abstract: A UPS tripping event caused by a mismatch between the protection settings of the main circuit breaker and the branch circuit breaker led to a thinking about the UPS short-circuit protection mode. Although time delay adjustment can alleviate skipping tripping to a certain extent, it is difficult for traditional protection mechanisms to fully ensure the stability of the system in the environment of high short-circuit current. Combined with case analysis and theoretical demonstration, the reasons for skipping trips under different tripping time settings are discussed in detail. In order to enhance the dynamic response ability and safety of the system, a technical scheme of anti-short-circuit skipping trip based on an adaptive quick-break protection module was proposed.

Key words: UPS; override trip; quick-break protection; fault isolation

不间断供电系统(Uninterruptible Power Supply, UPS)是一种含有储能装置的供电设备,可以提供稳 定的电力供应。当主电源出现故障时,可以快速切 换到备用电源,保证关键设备的持续稳定供电。<sup>[1]</sup> UPS 在工业中的应用广泛,但在短路故障情况下, 越级跳闸现象偶有发生。越级跳闸不仅会导致重 要设备的失电,还会引发系统的连锁反应,造成安 全事故。<sup>[2]</sup>越级跳闸是由于主断路器和分支断路器 的保护配合不当,导致主断路器在分支故障时优先 动作,破坏逐级保护机制。现有的解决方案主要通 过采用不同动作时间的断路器和提升设备参数来 避免此类问题,但这些措施在复杂电力系统中难以 完全杜绝越级跳闸。

针对这一问题,笔者提出了通过引入自适应保 护机制和故障隔离装置的方案,来有效减少越级跳 闸的发生概率。尤其在高短路电流和复杂故障情 况下,这一方法将帮助优化电力系统的安全性和稳 定性。

#### 1 越级跳闸案例及理论分析

#### 1.1 越级跳闸案例

在某次实际运行中, UPS 采用双机双回路配

收稿日期:2024-09-25

作者简介:周恩思 (1986—),男,2024 年毕业于上海海事大学工程管理专业,硕士,工程师。现任上海岚陌工业自动化科技中心电气技术总工,主要从事电气自动化仪表设计和调试工作。

置。因控制仪表供电线路老化引发短路,导致主断路器速断跳闸。静态转换开关立即切换至备用电源,由于短路故障未排除,备用电源主断路器也随即跳闸,导致整个系统失电。该问题的核心在于主断路器和分支断路器保护动作不匹配,主断路器因瞬时速断动作迅速,而分支断路器未能优先跳闸。

通过该案例可以看出,越级跳闸问题主要源自 断路器的保护配合不当。尽管分支断路器理应优 先切断故障,但由于时间设置或阈值选择不当,主 断路器往往提前动作,导致整个系统瘫痪。

#### 1.2 短路越级跳闸理论分析

由短路导致的越级跳闸,其产生机制与电流传 导路径和断路器的瞬时速断保护密切相关。主断 路器通常位于更靠近电源的线路上,覆盖整个系统 的电流。如果短路发生在某个分支线路上,整个系 统的高短路电流会从电源出发,先经过主断路器。 在高短路电流场景下,由于电流上升过快,电流传 导至主断路器时,主断路器可能比分支断路器更快 触发。分支断路器虽然设置有较短的延时,理应优 先跳闸。但是在短距离供电线路中,短路电流波动 较小,可能导致上下级断路器整定值过低,影响过 流保护的有效性。<sup>[3]</sup>短路保护动作的时间差较小, 且过流保护的灵敏度难以保障,致使在发生短路故 障时,其中的保护控制器均会察觉到电流异常现 象,并做出跳闸保护动作,这极易造成越级跳闸 问题。<sup>[4]</sup>

虽然通过选择不同瞬时速断动作时间的各级 断路器,理论上可以解决这一问题。但在实际应用 中,如果系统电流波动剧烈,分支断路器可能无法 及时反应,单纯依赖时间设置并不能从根本上解决 问题。速断时间的调整方案要求采用导电能力更 强的电缆以保障过载电流瞬间通过,相应的电气设 备可能也要做相应的升级,这样会推高企业的 成本。<sup>[5]</sup>

#### 2 改进方案与设计

为了解决 UPS 系统中因保护配置不当而引发 的越级跳闸问题,设计基于自适应速断保护模块的 故障隔离装置。方案通过动态调整主断路器与分

#### 京が安和評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期

支断路器的动作时间,确保在短路故障发生时,优 先由分支断路器跳闸。

#### 2.1 短路检测单元

短路检测单元是整个保护系统的基础模块,用 于快速、精确地检测电路中的短路故障。为了实现 这一功能,通常可以采用电流变送器(图1)来完成 短路电流的检测。电流变送器能够实时监测线路 中的电流变化<sup>[6]</sup>,并可以把电流转化成 RS485 等远 传信号,实时传输到自适应速断保护模块。短路检 测单元的关键在于其灵敏度和响应时间。为了避 免误动作,该单元需要进行严格的校准,确保在较 小电流波动时不会触发保护动作,同时在真正发生 短路时能够迅速响应。



图 1 可以输出 RS485 信号的电流变送器

#### 2.2 故障隔离单元

故障隔离单元是一个包含主断路器和多个分 支断路器的综合模块,其功能是当检测到短路故 障时,能够有效隔离故障区域,防止故障扩散至其 他区域。该单元采用 RS485 通讯实现信号的高速 传输,结合自适应速断包含模块发出的故障信号, 快速切断故障电路。为了确保隔离过程的可靠 性,该单元应具备较强的耐受电流能力,并能够在 高电流环境下快速、稳定地执行隔离动作。该单 元的设计可以基于市面上的自动化断路器产品, 如智能型空气断路器或电子断路器(图 2),可以 通过 RS485 信号使其在毫秒级时间内实现断路动 作。<sup>[7]</sup>此种隔离装置的核心是其高速响应的能力和 可远程控制特性,确保即便在高电流故障下,仍能 避免连锁反应。 京行委員評論 2025.3.25 第39卷Vol.39总第156期



图 2 可以通过 RS485 信号控制的智能断路器

#### 2.3 自适应速断保护模块

自适应速断保护模块的核心功能在于根据实 时电流状态动态调整断路器的动作时间,确保分支 断路器优先动作,避免主断路器越级跳闸。该模块 通过监测电流大小和上升速度,灵活调整响应时 间,以适应不同的负载和故障条件。



#### 图 3 基于 PLC 的速断保护模块工作模式示意图

系统首先通过电流变送器的 RS485 信号实时 监测电流,并将数据输入 PLC 进行处理。PLC 采用 模块化编程设计,方便系统在未来升级或扩展时的 经济性。无需高端智能算法,PLC 可以在毫秒级别 内完成分析与调整,确保各断路器高效配合,减少 越级跳闸的发生。算法将电流大小和上升速度划 分为不同区间,反映正常负载、轻微过载、严重过载 和短路等状态,分别设定不同的响应时间。缓慢的 电流上升表示轻微过载,系统延迟动作;快速上升 则指示严重故障,系统立即断电保护。通过动态调 整,避免误动作,并在严重短路时迅速保护系统。

为了提高精确性,算法基于电流大小和上升速

度这两个参数来调整响应时间。当电流上升速率 超出预设阈值时,系统立即触发速断保护,优先切 断分支断路器,避免主断路器跳闸。该算法可嵌入 PLC 控制程序,运维人员通过 HMI 监控电流与响应 过程,并记录数据用于后续优化。

#### 3 应用效果与结论

实施防越级跳闸技术后,UPS 系统的可靠性和 稳定性得到了显著提升。越级跳闸次数大幅减少, 避免了因单一路故障导致全系统停电的情况,有效 提高了系统的安全性。通过短路检测单元与自适 应速断保护模块的结合,保护装置的响应速度显著 提高,能够及时检测并隔离故障支路,确保其他回 路正常供电。故障隔离单元的快速响应缩小了故 障影响范围,缩短了系统恢复时间。这一方案不仅 提升了供电的连续性,减少了设备损耗与维护频 率,还优化了系统的运行成本。

通过对 UPS 防越级跳闸保护技术的研究与改 进设计,成功解决了因短路故障引发的系统全局跳 闸问题。自适应速断保护模块、短路检测单元和故 障隔离单元的有效结合,实现了更为精确、快速的 故障识别和隔离,大幅降低了越级跳闸的频率。整 体技术方案提高了系统的安全性与可靠性,并显著 降低了维护成本。这一成果为未来 UPS 系统的保 护设计提供了参考,具有广泛的应用与推广价值。

#### 参考文献:

- [1] 陈泓锦. 城市轨道交通通信系统 UPS 故障及维护[J]. 科技资 讯,2024,22(8):68-70
- [2] 史昱龙.煤矿供电系统防越级跳闸的设计与研究[J].能源与 节能,2024(8):51-53+275
- [3] 仝莉.供电系统中防越级跳闸保护技术研究[J].内蒙古石油 化工,2022,48(12):95-97
- [4] 石铭浩.煤矿供电系统防越级跳闸技术[J].能源与节能,2022(11):113-115
- [5] 吴斌.煤矿短距离供电线路瞬时速断保护可靠性分析[J].矿 业装备,2023(5):157-159
- [6] 张哲璇,陈柏超,田翠华,等.基于混合铁心的新型电流互感器 研究[J].电子测量与仪器学报,2024,38(1):9-24
- [7] 苏照元.智能断路器在电力系统自动化中的应用研究[J].家 电维修,2024(9):107-109