

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM



2023

第37卷 总第145期

東方電氣評論

DONG FANG DIAN QI PING LUN

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

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



东方电气评论

第三十七卷第一期

二〇二三年三月

公开 ISSN 1001-9006
发行 CN 51-1333/TM

第37卷第1期(总第145期) 国内邮发代号:62-187
出版日期:2023年03月25日 国内定价:8.00元



中国东方电气集团有限公司 主办
四川省动力工程学会



第37卷第1期 总第145期
(季刊, 1987年创刊)

東方電氣評論

目 次

编辑委员会

主任委员: 王为民

副主任委员: 董娜 杨永

委员: 马擎天 王晓亮 王 愚 王建录 王拯元
方 宇 邓仲勇 乐劲松 石清华 光海杰
刘世洪 刘泰生 张启德 张国荣 邹 杰
何 维 陈文学 陈杰富 杨武勇 杨要武
杨华春 闵泽生 吴建东 赵永智 赵世全
侯小全 贺建华 钟 杰 郭 延 唐洪驹
谢光有 曾明富 赖成毅 潘乾刚 霍锁善

秘书长: 杨永

主管: 中国东方电气集团有限公司

主办: 中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会

主编: 王为民

副主编: 董娜 杨永

本期责任编辑: 王为民

英文编辑: 王为民

编辑出版: 《东方电气评论》编辑部

地址: 成都市高新西区西芯大道18号

邮编: 611731

电话: 028-87898263

传真: 028-87898267

电子信箱: dfdqpl@dongfang.com

印刷单位: 成都金恒信印务有限公司

国内发行: 四川省报刊发行局

国外发行: 中国出版对外贸易总公司北京782信箱

基础研究

多功率器件模块热耦合效应下热阻网络模型研究.....王多平 李琼 唐健等(1)
一种基于特征提取的实时故障程度诊断系统及方法.....何文辉 杨嘉伟 唐健等(4)
基于危险工况的煤电机组仿真研究.....周运红 桑梓 刘丝丝等(8)
拒绝服务攻击对汽轮机运行的危害研究.....张愉菲 刘丝丝 杨斌等(14)
多种含氢燃气预混燃烧NO生成机理...陈钧 王杜佳 杨章宁等(20)

汽轮机

汽轮机筒形汽缸长期运行变形研究.....章艳 陈贝贝 刘伟鹏等(28)
离心压缩机不同结构排汽蜗壳性能分析...王娟丽 王鑫 陶功新等(31)
调节级单通道与全周数值方法对比研究...白昆仑 平艳 钟主海等(35)
燃气—蒸汽联合循环机组的噪声现状与控制措施...胥波 董溢华(40)
玉米倒角刀具的设计特点及在大型发电设备制造中的应用.....谢龙飞 刘祥 张斌等(44)

核能发电

重大核能设备供货项目集团两级管控经验探讨.....李建勇(48)
核岛设备换热管内壁缺陷涡流检测定量方法...程怒涛 杨涛 代勤龙等(53)

燃煤发电

扩大钢管D51一次冷弯成型范围的理论计算与工艺试验.....蒋志海 杨军 刘洪伟(57)
大型变压器零起升压方法在孤网启动中的研究与应用.....刘星(63)
沿海空气中316不锈钢的高温腐蚀行为.....于明明 董猛(67)
煤粉锅炉进一步降低NOx排放研究.....庄原发 杜文韬 银登国等(73)

风能发电

一种以风机叶片运行轨迹计算净空距离的方法.....李玉霞 宁琨 曾一鸣等(78)
风电电控系统产品数字化车间建设探索与实践.....王君 李华银 张伟等(81)
简讯.....(76)(88)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*q*A4*88*zh*p¥8.00*750*18*2023-01

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



2023-03-25 Vol.37 No.1
(Quarterly, since 1987)

CONTENTS

BASIC RESEARCH

Research on Thermal Resistance Network Model Under Thermal Coupling Effect of Multi-power Device Module..... WANG Duoping, LI Qiong, TANG Jian, et al(1)
A Real-time Fault Degree Diagnosis System and Method Based on Feature Extraction HE Wenhui, YANG Jiawei, TANG Jian, et al(4)
Simulation Research of Coal-fired Power Generating Units Based on Dangerous Conditions ZHOU Yunhong, SANG Zi, LIU Sisi, et al(8)
Research on the Harm of Denial of Service Attack on Steam Turbine Operation ZHANG Yufei, LIU Sisi, YANG Bo, et al(14)
NO Formation Mechanisms in Combustion of Several Hydrogen-containing Gases CHEN Jun, WANG Dujia, YANG Zhangning, et al(20)

TURBINE

Research on Deformation of Steam Turbine Cylindrical Casing During Long-time Running ZHANG Yan, CHEN Beibei, LIU Weipeng, et al(28)
Analysis of Different Exhaust Volute Structures of Centrifugal Compressor WANG Juanli, WANG Xin, TAO Gongxin, et al(31)
Comparative Study of Single-channel Model and Complete-cycle Model Numerical Simulation Based on Control Stage ... BAI Kunlun, PING Yan, ZHONG Zhuhai, et al(35)
Noise Status and Control Measures of Gas-steam Combined Cycle Units XU Bo, DONG Yihua(40)
Corn Chamfering Tool Design Characteristics and Application in the Manufacture of Large Power Generation Equipment XIE Longfei, LIU Xiang, ZHANG Bin, et al(44)

NUCLEAR POWER

Discussion on the Two-level Management Experience of Major Nuclear Energy Equipment Supply Projects LI Jianyong(48)
Quantitative Eddy Current Testing Method for Inner Wall Defects of Heat Exchange Tubes of Nuclear Power Equipment CHENG Nutao, YANG Tao, DAI Qinlong, et al(53)

THERMAL POWER/COAL-FIRED POWER

Theoretical Calculation and Process Test of Expanding the Forming Range of One-time Cold Bending of Tube D51 JIANG Zhihai, YANG Jun, LIU Hongwei(57)
Study and Application of Transformer Soft Charging Methods During Island Grid Energization LIU Xing(63)
High Temperature Corrosion Behavior of 316 Stainless Steel in Coastal Air YU Mingming, DONG Meng(67)
Study on Less NOx Emission of Pulverized Coal Boiler ZHUANG Yuanfa, DU Wentao, YIN Dengguo, et al(73)

WIND POWER

A Method for Calculating The Clearance Distance Based on The Running Trajectory of the Wind Turbine Blade LI Yuxia, NING Kun, ZENG Yiming, et al(78)
Exploration and Practice of Digital Workshop Construction of Wind Power Electronic Control System Products..... WANG Jun, LI Huayin, ZHANG Wei, et al(81)
NEWS IN BRIEF.....(76)(88)

EDITORIAL BOARD

Chairman: WANG Weimin

Vice Chairmen: DONG Na, YANG Yong

Members: MA Qingtian, WANG Xiaoliang, WANG Yu, WANG Jianlu, WANG Zheng yuan, FANG Yu, DENG Zhongyong, LE Jinsong, SHI Qinghua, GUANG Haijie, LIU Shihong, LIU Taisheng, ZHANG Qide, ZHANG Guorong, ZOU Jie, HE Wei, CHEN Wenxue, CHEN Jiefu, YANG Wuyong, YANG Yaowu, YANG Huachun, MIN Zesheng, WU Jiandong, ZHAO Yongzhi, ZHAO Shiquan, HOU Xiaoquan, HE Jianhua, ZHONG Jie, GUO Yan, TANG Hongju, XIE Guangyou, ZENG Mingfu, LAI Chengyi, PAN Qiangang, HUO Suoshan

Chief Secretary: YANG Yong

Sponsor: Dongfang Electric Corporation

Chief Editor: WANG Weimin

Vice Chief Editors: DONG Na, YANG Yong

Executive Editor: WANG Weimin

English Editor: WANG Weimin

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 Fax: 028-87898267

E-mail: dfdqpl@dongfang.com

Overseas Distribution by:

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

多功率器件模块热耦合效应下热阻网络模型研究

王多平 李琼 唐健 肖文静 刘静波

东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731

摘要：在使用 IGBT 等功率器件模块的电能变换装置中，通常需要利用热阻网络来预测功率器件的温度或者构建电能变换装置的电热仿真模型来进行动态电热联合仿真。多功率器件工作时，各个热源互相影响，需要考虑热耦合效应。基于线性叠加原理，建立了多功率器件模块热耦合效应下外热阻的热阻矩阵表示方法和外热阻网络模型，并采用有限元热模拟方法进行了仿真。根据仿真结果对热阻矩阵进行了计算。

关键词：多功率器件；热耦合；热阻矩阵；热阻网络

中图分类号：TN3

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2023）01-0001-03

Research on Thermal Resistance Network Model Under Thermal Coupling Effect of Multi-power Device Module

WANG Duoping, LI Qiong, TANG Jian, XIAO Wenjing, LIU Jingbo

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

Abstract: In a power conversion device using power device modules such as IGBTs, it is usually necessary to use a thermal resistance network to predict the temperature of the power device or build an electrothermal simulation model of the power conversion device to perform dynamic electrothermal co-simulation. When multi-power devices work, each heat source affects each other, and the thermal coupling effect needs to be considered. Based on the principle of linear superposition, the thermal resistance matrix representation method and the external thermal resistance network model of the external thermal resistance under the thermal coupling effect of the multi-power device module are established, and the simulation is carried out by the finite element thermal simulation method. The thermal resistance matrix is calculated based on the simulation results.

key words: multi-power device; thermal coupling; thermal resistance matrix; thermal resistance network

在使用IGBT等功率器件模块的电能变换装置中，为了保证装置热设计的可靠性，通常需要利用热阻网络来预测功率器件模块在实际工作下的温度或者构建电能变换装置的电热仿真模型来进行动态电热联合仿真。安装在散热器上的功率器件模块的总热阻中包含内热阻（结到底壳的热阻）和外热阻（底壳到环境的热阻）。当多个功率器件模块安装散热器上时，通过功率器件

模块与散热器的接触层，多个功率器件模块之间存在耦合热传递作用，即热耦合效应^[1]，热耦合效应在热阻网络上可以通过功率器件模块底壳到环境的耦合热阻来表现。若是仅仅只考虑功率器件模块底壳到环境的自热阻，这会减小外热阻网络模型的精确度。因此，为了建立更加精确的热阻网络模型，须考虑多个功率器件模块之间的热耦合效应并在计算中考虑耦合热阻的影响。

收稿日期：2022-10-17

作者简介：王多平（1987—），男，2012年毕业于华中科技大学电力电子与电力传动专业，硕士研究生，工程师。现在东方电气集团科学技术研究院公司工作，研究方向为智慧能源、电力电子功率变换及控制等领域。

1 热阻定义

根据现有的电子传热标准 (SEMI 标准和 JEDEC 标准), 热阻是电子组件中最常用也是最重要的评价指标^[1]。

热阻指的是当有热量在物体上传输时, 在物体两端温度差与热源的功率之间的比值。单位为开尔文每瓦特 (K/W) 或摄氏度每瓦特 (°C/W), 即:

$$R = \frac{T_2 - T_1}{P} \quad (1)$$

式(1)中, T_1 为一端的温度, T_2 为物体另一端的温度, P 为发热源功率。

根据式(1), 可计算单功率器件外热阻 R_{ca} , 即:

$$R_{ca} = \frac{T_c - T_{air}}{P} \quad (2)$$

式(2)中, T_c 为功率器件底壳温度, T_{air} 为环境温度, P 为功率器件功耗。

根据式(2), 单功率器件的外热阻网络模型如图 1 所示。

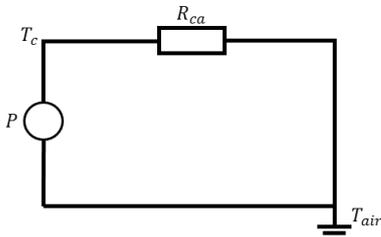


图 1 单功率器件外热阻网络模型

2 热阻网络

当多个功率器件模块同时安装于散热器上时, 通过功率器件模块与散热器的接触层, 其互相之间存在耦合热传递作用。上述热阻计算方法并未考虑多个功率器件模块耦合热传递作用下的热耦合影响^[3], 这导致计算值比实际稳态温度值偏低。

根据线性叠加原理^[4], 考虑热耦合效应的功率器件外热阻矩阵和计算方法可用式(3)表示。

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{T_{11} - T_{air}}{P_1} & \frac{T_{12} - T_{air}}{P_2} & \cdots & \frac{T_{1n} - T_{air}}{P_n} \\ \frac{T_{21} - T_{air}}{P_1} & \frac{T_{22} - T_{air}}{P_2} & \cdots & \frac{T_{2n} - T_{air}}{P_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{T_{n1} - T_{air}}{P_1} & \frac{T_{n2} - T_{air}}{P_2} & \cdots & \frac{T_{nn} - T_{air}}{P_n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, $T_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, n)$ 表示仅对第 j 个功率器件模块施加为 $P_j(j = 1, 2, \dots, n)$ 的热功耗并加热到热平衡时, 第 i 个功率器件模块的底壳稳态温度; T_{air} 表示环境温度; $R_{ii}(i = 1, 2, \dots, n)$ 表示自热阻, 其为仅对第 i 个功率器件模块施加热功耗时, 计算得到的第 i 个功率器件模块底壳到空气的热阻; $R_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, n$ 且 $i \neq j)$ 表示耦合热阻, 其为仅对第 j 个功率器件模块施加热功耗时, 计算得到的第 i 个功率器件模块底壳到空气的热阻。

由式(3), 热耦合效应下第 i 个功率器件的外热阻网络模型如图 2 所示

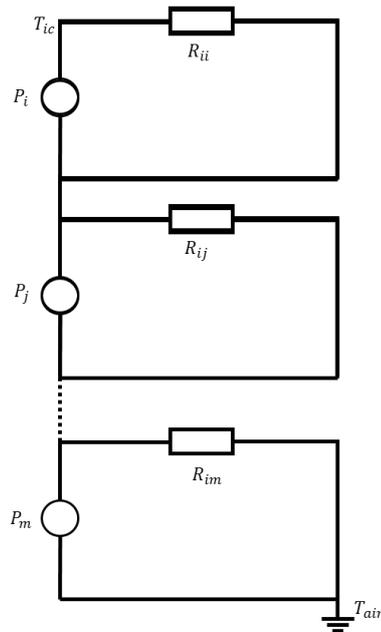


图 2 热耦合下功率器件的外热阻网络模型

图 2 中, T_{ic} 为第 i 个功率器件模块的底壳温度。若 $i = 1$, 则 $j = 2$ 且 $m = n$; 若 $i = n$, 则 $j = 1$ 且 $m = n - 1$; 若 $i \neq 1$ 且 $i \neq n$, 则 $j = 1, m = n$ 且 $m \neq i$ 。

3 有限元仿真

根据上述分析, 为计算热阻矩阵中热阻值, 采用有限元仿真模拟的方法进行了建模仿真。

以电驱动器装置为例, 由于主要关注功率器

件模块热特性，在建模时对装置进行了相应简化，简化后的有限元仿真模型如图3所示。

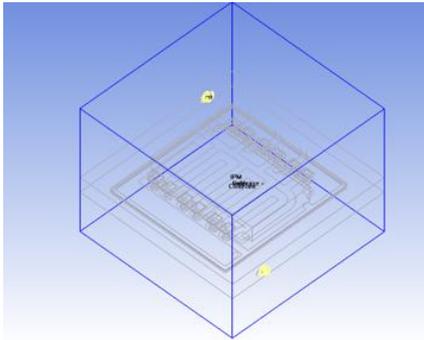


图3 电驱动器有限元仿真模型

图3的散热器模型主要由水冷散热器，6个IGBT功率器件构成，水冷散热器流量设置为3 L/min，每个IGBT热源设置为200 W，环境温度为23℃。首先，仅将1号IGBT设为热源进行仿真，得到6个IGBT底壳温升曲线；然后仅将2号IGBT设为热源进行仿真；依此类推，六次仿真结果如图4所示。

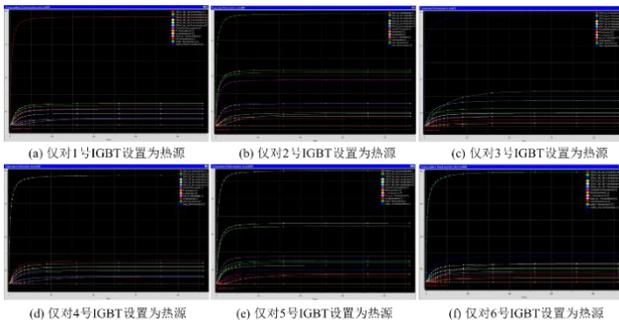


图4 分别给定IGBT热源下底壳温升曲线

根据图4仿真结果和热阻矩阵计算公式(3)，可计算到IGBT功率器件模块的外热阻矩阵值。

$$\begin{matrix}
 \begin{matrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} & R_{26} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} & R_{35} & R_{36} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} & R_{45} & R_{46} \\ R_{51} & R_{52} & R_{53} & R_{54} & R_{55} & R_{56} \\ R_{61} & R_{62} & R_{63} & R_{64} & R_{65} & R_{66} \end{matrix} \\
 = \begin{bmatrix} 0.08 & 0.0125 & 0.0038 & 0.0175 & 0.0075 & 0.005 \\ 0.014 & 0.078 & 0.013 & 0.0075 & 0.0225 & 0.005 \\ 0.0038 & 0.0163 & 0.0834 & 0.0025 & 0.01 & 0.02 \\ 0.0163 & 0.005 & 0.0025 & 0.0808 & 0.0138 & 0.0038 \\ 0.0075 & 0.0175 & 0.0063 & 0.015 & 0.0825 & 0.0125 \\ 0.0038 & 0.0085 & 0.0185 & 0.0038 & 0.0183 & 0.084 \end{bmatrix}
 \end{matrix} \quad (4)$$

式(4)中，热阻矩阵每行分别代表1-6号功率器件的自热阻和耦合热阻。计算结果表明，1号

功率器件的自热阻为0.08℃/W，4号功率器件对其热性能影响最大，耦合热阻为0.0175℃/W；2号功率器件的自热阻为0.078℃/W，5号功率器件对其热性能影响最大，耦合热阻为0.0225℃/W；3号功率器件的自热阻为0.0834℃/W，6号功率器件对其热性能影响最大，耦合热阻为0.02℃/W；4号功率器件的自热阻为0.0808℃/W，1号功率器件对其热性能影响最大，耦合热阻为0.0163℃/W；5号功率器件的自热阻为0.0825℃/W，2号功率器件对其热性能影响最大，耦合热阻为0.0175℃/W；6号功率器件的自热阻为0.084℃/W，3号功率器件对其热性能影响最大，耦合热阻为0.0185℃/W。

4 结语

多功率器件工作时，各个热源互相影响，需要考虑热耦合效应。基于线性叠加原理，建立了多功率器件模块热耦合效应下外热阻的热阻矩阵表示方法和外热阻网络模型，并采用有限元热模拟方法进行了仿真，根据仿真结果和热阻矩阵计算公式计算了热阻矩阵值。

通过热阻矩阵网络能更好地表示多功率器件模块的散热能力及其之间的热耦合作用，优化了传统热阻表示方法，可以提高多功率器件模块温度预测和动态电热联合仿真结果的精度，对使用多功率器件模块的电能变换等装置的热可靠性设计有重要的意义。

参考文献:

- [1] Rosten H I, Lasance C. DELPHI: The Development of Libraries of Physical Models of Electronic Components for an Integrated Design Environment[M]. Springer US, 1995, 138-147
- [2] 曹玉生, 刘军, 施法中. 利用热阻网络拓扑关系对多芯片组件热分析技术的研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(3):527-530
- [3] S. Sridhar. Evaluation of a thermal design tool for electronics-a three chip MCM as a case study[C]. 1995 Proceedings. 45th Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, NV, USA, 1995:876-878
- [4] 邱宝军, 何小琦. 多芯片组件热阻计算研究[J]. 电子元件与材料. 2005, 24(11): 56-58

一种基于特征提取的实时故障程度诊断及方法

何文辉¹ 杨嘉伟¹ 唐健¹ 田军¹ 刘雄²

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618025

摘要: 本文提出了基于特征提取的实时故障程度诊断及方法, 它包括被诊断设备、实时故障程度诊断系统, 实时故障程度诊断系统由运行数据采集模块、初始特征模块、故障程度诊断模块、滚动特征提取模块、实时特征模块、历史运行数据库、故障预测模块、故障诊断及运维建议模块组成。该诊断系统能根据初始特征实时诊断故障程度和故障发展趋势, 采用实时特征和历史运行数据得到故障预测信息, 根据故障程度、故障发展趋势和故障预测信息做出正常运行、带故障持续运行、带故障减负荷运行、持续观察、尽快维修、立即停机维修等运维建议, 带故障运行时给出安全运行范围避免发生不可逆故障。

关键词: 特征提取; 实时故障程度诊断; 故障预测

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0004-04

A Real-time Fault Degree Diagnosis System and Method Based on Feature Extraction

HE Wenhui¹, YANG Jiawei¹, TANG Jian¹, TIAN Jun¹, LIU Xiong²

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

2. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., 618025, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: A real-time fault degree diagnosis system and method based on feature extraction is proposed, which includes the equipment to be diagnosed, a real-time fault degree diagnosis system, and the real-time fault degree diagnosis system consists of an operation data acquisition module, an initial feature module, a fault degree diagnosis module, rolling feature extraction module, real-time feature module, historical operation database, fault prediction module, fault diagnosis and operation and maintenance suggestion module. The diagnosis system can diagnose the fault degree and fault development trend in real time according to the initial characteristics, obtain fault prediction information by using real-time characteristics and historical operation data, and make normal operation, continuous operation with fault, and fault prediction according to the fault degree, fault development trend and fault prediction information. Operation and maintenance suggestions such as fault-reducing operation, continuous observation, maintenance as soon as possible, and immediate shutdown for maintenance, etc., when running with faults, give a safe operating range to avoid irreversible failures.

Key words: feature extraction; real-time fault level diagnosis; failure prediction

随着科学技术的发展, 现代社会生产设备复杂程度越来越高、生产系统越来越庞大。若生产系统中某些关键生产设备发生严重故障导致设备停机、生产流水线暂停会导致高昂的损失。严重故障一般

是由众多微小故障逐步发展而来的。当众多微小故障逐步发展严重故障并突破设备运行的临界条件时, 发生严重故障, 设备运行失效^[1]。比如设备中冷却系统的冷却性能、绝缘材料的绝缘性能、机械

收稿日期: 2022-10-17

作者简介: 何文辉 (1989—), 男, 2014年毕业于北京交通大学电气工程专业, 硕士, 工程师。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司, 主要从事智慧能源、电能变换等方面研究工作。

结构的疲劳程度等都是随着设备长期运行渐进式发展的，当这些性能偏离设计指标就发生了故障。现有技术中还没有能够准确、可靠、实时地实现对设备故障程度诊断和故障发展趋势判断，根据故障程度、故障发展趋势和故障预测信息给出运维建议。

1 实时故障程度诊断系统

为了解决现有技术存在的上述问题，提出一种基于特征提取的实时故障程度诊断及方法。根据初始特征实时诊断故障程度和故障发展趋势，采用实时特征和历史运行数据得到故障预测信息，根据故障程度、故障发展趋势和故障预测信息做出正常运行、带故障持续运行、带故障减负荷运行、持续观察、尽快维修、立即停机维修等运维建议，带故障运行时给出安全运行范围避免发生不可逆故障。

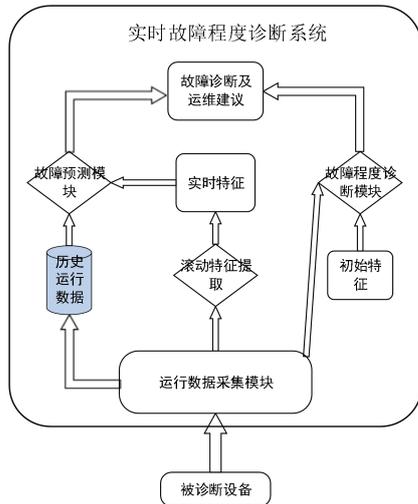


图1 一种基于特征提取的实时故障程度诊断及方法系统框图

如图1所示，一种基于特征提取的实时故障程度诊断系统，包括被诊断设备、实时故障程度诊断系统，实时故障程度诊断系统由运行数据采集模块、初始特征模块、故障程度诊断模块、滚动特征提取模块、实时特征模块、历史运行数据库、故障预测模块、故障诊断及运维建议模块组成，运行数据采集模块用于对被诊断设备相关参数进行实时采集，初始特征模块是被诊断设备出厂时正常运行的特征模型，故障程度诊断模块采用初始特征模块计算值与实时运行被监控参数的差异诊断被诊断设备是否发生故障并给出故障程度，滚动特征提取

模块采用运行数据采集模块采集的实时运行数据滚动提取设备的实时特征，实时特征模块用于故障预测，历史运行数据库用于存储被诊断设备历史运行数据，故障预测模块采用历史运行数据和实时特征模块得到故障预测信息，故障诊断及运维建议模块综合利用故障程度、故障发展趋势和故障预测信息给出运维建议。

2 实时故障程度诊断方法

运行数据采集模块实时采集被诊断设备的被监控参数和其他相关参数，其中被监控参数若超过一定范围则被诊断设备发生故障，其他相关参数在机理上与被监控参数存在因果关系，在被监控设备稳定特征下将其他相关参数输入特征模型所得被监控参数预测值与被监控参数测量值接近（平均相对偏差率不超过1%）。初始特征模块是采用被诊断设备出厂时正常运行数据基于机器学习技术提取的特征模块。初始特征模块计算值为将运行数据采集模块实时采集的其他相关参数输入初始特征模块所得计算值。故障程度基于被监控参数偏差率大小做出判断^[2]。被监控参数偏差率计算式如下(1)：

$$\text{被监控参数偏差率} = \frac{|\text{初始特征模块计算值} - \text{被监控参数测量值}|}{\text{初始特征模块计算值}} \times 100\% \quad (1)$$

可根据具体的被监控设备和被监控参数设置相应的故障程度与被监控参数偏差率对应关系，示例对应关系如下表1所示：

表1 故障程度与被监控参数偏差率对应关系表

编号	被监控参数偏差率	故障程度
1	偏差率 ≤ 2%	正常运行误差
2	2% < 偏差率 ≤ 10%	轻度故障
3	10% < 偏差率 ≤ 30%	中度故障
4	30% < 偏差率	严重故障

一种基于特征提取的实时故障程度诊断系统所确定的实时故障程度诊断方法包括以下步骤：

- (1) 采用被诊断设备出厂正常运行数据提取初始特征模块；
- (2) 采用运行数据采集模块实时采集被诊断设备的被监控参数和其他相关参数；
- (3) 将数据采集模块实时采集的其他相关参

数输入初始特征模块得到初始特征模块计算值；

4) 计算被监控参数偏差率，并根据故障程度与被监控参数偏差率对应关系得到故障程度。

3 故障预测方法

3.1 故障预测步骤

故障预测信息即故障预测模块得到的安全运行工况信息。故障预测模块将历史运行数据库中典型工况参数输入实时特征模块得到各种工况被监测参数预测值，当预测值大于（或小于，因具体设备具体被监测量而定判断逻辑）报警值时则该工况可能导致设备可能发生不可逆故障，当预测值在正常运行范围内则该工况是安全运行工况。

一种基于特征提取的实时故障程度诊断系统所确定的故障预测方法包括以下步骤：

(1) 采用运行数据采集模块实时采集被诊断设备的被监控参数和其他相关参数；

(2) 将数据采集模块实时采集的数据实时存入历史运行数据库；

(3) 采用数据采集模块实时采集的数据滚动提取设备的实时特征；

(4) 故障预测模块将历史运行数据库中典型工况参数输入实时特征模块得到各种工况被监测参数预测值；

(5) 根据被监测参数预测值与报警值比较，确定安全运行工况范围。

故障发展趋势可用一段时间被监控参数短时平均偏差率（短时指数分钟）的变化率来量化即故障变化率，计算式如下（2）：

$$\text{故障变化率} = \frac{\overline{\text{被监控参数偏差率}_2} - \overline{\text{被监控参数偏差率}_1}}{\Delta T} \quad (2)$$

其中， $\overline{\text{被监控参数偏差率}_1}$ 为 T_1 时刻的被监控参数短时平均偏差率， $\overline{\text{被监控参数偏差率}_2}$ 为 T_2 时刻的被监控参数短时平均偏差率， $\Delta T = T_2 - T_1$ 。故障变化率示例参数如“0.1%/天”、“1%/天”、“5%/天”、“1%/小时”等。

运维建议可从故障程度、故障发展趋势和故障预测信息对应关系表中得到。可根据具体的被监控设备和被监控参数设置相应的对应关系，示例对应关系如下表2所示：

表 2 故障程度、故障发展趋势和故障预测信息对应关系表

	故障变化率				
	$\leq 0.1\%/天$	$0.1\%/天 < \text{变化率} \leq 1\%/天$	$1\%/天 < \text{变化率} \leq 5\%/天$	$5\%/天 < \text{变化率} \leq 1\%/小时$	$1\%/小时 < \text{变化率}$
偏差率 $\leq 2\%$	正常运行	正常运行	正常运行、持续观察	正常运行、持续观察	正常运行、持续观察
2% < 偏差率 $\leq 10\%$	带故障持续运行	带故障持续运行、持续观察	带故障减负荷运行、尽快维修	带故障减负荷运行、尽快维修	立即停机维修
10% < 偏差率 $\leq 30\%$	带故障减负荷运行、持续观察	带故障减负荷运行、尽快维修	带故障减负荷运行、尽快维修	立即停机维修	立即停机维修
30% < 偏差率	立即停机维修	立即停机维修	立即停机维修	立即停机维修	立即停机维修

3.2 故障预测效果

根据本文提供的诊断系统及方法，可以实现以下技术效果：

1、基于特征提取的实时故障程度诊断系统及方法，给被诊断设备设置实时故障程度诊断系统，实时故障程度诊断系统由运行数据采集模块、初始特征模块、故障程度诊断模块、滚动特征提取模块、实时特征模块、历史运行数据库、故障预测模块、故障诊断及运维建议模块组成，运行数据采集模块用于对被诊断设备相关参数进行实时采集，初始特征模块是被诊断设备出厂时正常运行的特征模型，故障程度诊断模块采用初始特征模块计算值与实时运行被监控参数的差异实现诊断被诊断设备是否发生故障并给出故障程度，滚动特征提取模块采用运行数据采集模块采集的实时运行数据滚动提取设备的实时特征，故障预测模块采用历史运行数据和实时特征模块得到了故障预测信息，故障诊断及运维建议模块综合利用故障程度、故障发展趋势和故障预测信息给出了运维建议。一旦设备运行出现异常，运维人员能够根据运维建议采取相应措施，避免发生不可逆故障。

2、实时利用初始模块计算值与被监控参数测量值得到被监控参数偏差率，进而实现实时了解被监控设备故障程度。

3、故障预测模块将历史运行数据库中典型工况参数输入实时特征模块得到各种工况被监测参数预测值，实现故障信息预测。

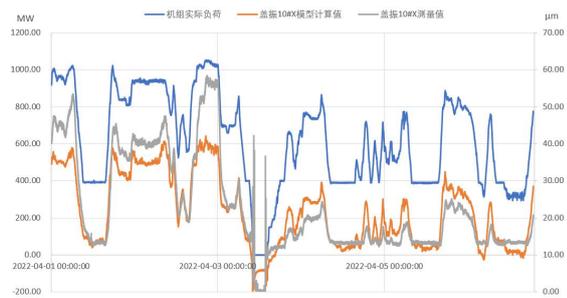
4、采用一段时间被监控参数短时平均偏差率（短时指数分钟）的变化率来量化即故障变化率，实现对故障发展趋势发展量化。

5、根据故障程度、故障发展趋势和故障预测信息，给出运维建议。

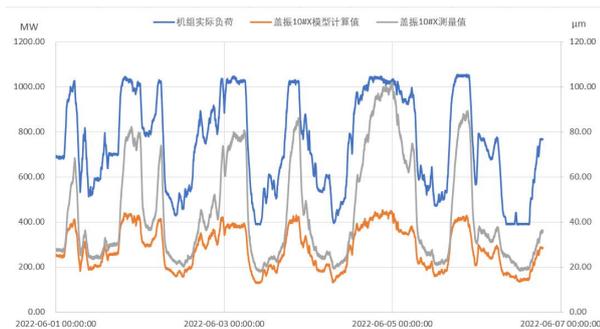
4 实验验证



(a) 2021年8月



(b) 2022年4月



(c) 2022年6月

图2 不同时间盖振10#X测量值与模型计算值对比

本文所提出的诊断方法用于某电厂主机状态诊断项目。2022年6月发电机诊断软件发出报警——“盖振10#Y通频幅值超过标准报警值”。由于该电厂主机已经投运近十年，出厂正常运行数据无法获取，断软件采用发电机振动数据比较稳定且各工况均在额定工作范围内的数据（2021年6月）作

为正常运行数据提取盖振10#Y通频幅值初始特征。采用盖振10#Y通频幅值初始特征模型实时计算得到盖振10#Y模型计算值，并用模型计算值实时监控对比测量值，诊断测量值是否发生异常。利用盖振10#Y通频幅值初始特征模型分别计算出不同时间的模型计算值，如图2所示，从图中可以看出2021年8月和2022年4月测量值与模型计算值变化趋势一致、幅值基本一致、高负荷时候测量值偏离较大，2022年6月测量值与模型计算值变化趋势一致、幅值整体大于计算值、高负荷时候测量值远大于模型计算值。统计不同时间盖振10#X测量值与模型计算值如表3所示，可得盖振10#X测量值较模型计算值偏差率从2021年8月的9.74%（轻度故障）逐步增长到2022年6月的57.55%（严重故障）。

表3 不同时间盖振10#X测量值与模型计算值统计

日期	模型计算平均值	测量值平均值	最小偏差	最大偏差	平均偏差	平均偏差率
2021年8月	29.26	32.11	0.1	12.5	2.85	9.74%
2022年4月	27.55	31.76	0.3	41.5	4.21	15.28%
2022年6月	28.15	44.35	1.2	59.8	16.20	57.55%

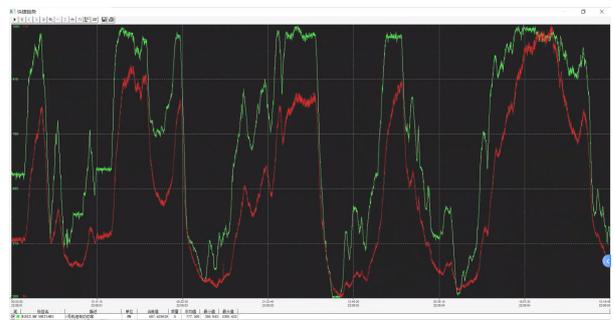


图3 发电机盖振10#X通频幅值与负荷变化关系图

经专家分析发电机盖振10#X通频幅值与负荷变化关系如图3所示，得出盖振幅值增减随负荷增减变化，时间上滞后。根据以往经验，依据上述征兆分析，发电机转子很可能存在较大的不平衡热矢量。经现场排查无转子一点接地报警、励磁电流误差稳定、转子匝探无报警等也基本可以排除转子匝间短路，故发热不均的可能性不大；较大可能是发电机转子散热不均，如转子风孔异物堵塞、局部通风不畅等。

（下转第30页）

基于危险工况的煤电机组仿真研究

周运红^{1,2} 桑梓^{1,2} 刘丝丝^{1,2} 杨波^{1,2} 梁魁西³ 完备³ 潘杜³

1. 能源装备工控网络安全四川省重点实验室, 成都 611731; 2. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731;

3. 芜湖发电有限责任公司, 安徽 芜湖 241000

摘要: 煤电机组作为燃煤电厂的核心设备, 由控制保护系统保证机组正常工况下的控制调节和异常工况下的保护动作, 随着技术的发展以及电厂机组信息数据入网的要求, 控制保护系统遭受网络安全攻击的次数日益频繁, 如不及时有效处理往往使得机组处于危险工况进而造成主设备损坏等安全事故发生。因此根据煤电机组危险工况的触发条件, 提出危险工况触发边界条件, 通过改变控制保护逻辑实现危险工况的触发。本文通过搭建煤电机组半实物仿真平台对煤电机组的3种危险工况进行仿真研究, 确认其边界条件, 对煤电机组控制保护系统安全防护提供有效参考。

关键词: 煤电机组; 危险工况; 控制保护逻辑; 半实物仿真平台

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0008-06

Simulation Research of Coal-fired Power Generating Units Based on Dangerous Conditions

ZHOU Yunhong^{1,2}, SANG Zi^{1,2}, LIU Sisi^{1,2}, YANG Bo^{1,2}, LIANG Kuixi³, WAN Bei³, PAN Du³

(1. Energy equipment Cyber security Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;

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

3. Wuhu Power Generation Co., Ltd., 241000, Wuhu, Anhui, China)

Abstract: As the core equipment of a coal-fired power plant, the control and protection system of the motor unit ensures the control and adjustment of the unit under normal working conditions and the protection action under abnormal working conditions. The number of network security attacks is becoming more and more frequent. If it is not dealt with in a timely and effective manner, it will often put the unit in a dangerous working condition and cause safety accidents such as damage to the main equipment. Therefore, according to the triggering conditions of the dangerous working conditions of coal-fired power units, the triggering boundary conditions of dangerous working conditions are proposed, and the triggering of dangerous working conditions can be realized by changing the control protection logic. In this paper, by building a semi-physical simulation platform for coal-fired power units, the simulation research of three dangerous working conditions of coal-fired power units is carried out, and the boundary conditions are confirmed to provide an effective reference for the safety protection of the control and protection system of coal-fired power units.

Key words: coal-fired power unit; dangerous working condition; control protection logic; hardware-in-the-loop simulation platform.

燃煤发电在中国能源结构中一直占据主导地位, 而煤电机组作为燃煤发电业务的核心设备, 承

担着将化学能高效率转化为电能的作用。煤电机组的控制保护系统一方面承担着维持煤电机组正常

收稿日期: 2023-01-05

基金项目: 煤电单元机组网络安全一体化保护系统研发和示范; 项目编号: GK KY21001。

作者简介: 周运红 (1994—), 男, 2021 年毕业于西安交通大学控制科学与工程专业, 博士, 工程师。现任东方电气集团科学技术研究院有限公司工控网络安全实验室研究员, 主要研究方向为能源装备工控网络安全技术研究。

运行的功能，另一方面在机组运行过程中出现异常情况时能及时触发保护动作停机，防止异常情况演变成危险工况而损害主设备和设施，确保煤电机组安全。煤电机组包括锅炉、汽轮机、发电机等主要设备及辅机设备，在运行过程中，一旦其保护系统遭受网络安全攻击未能及时动作，往往会使得系统处于异常工况，如果无法及时启动应急保护动作将导致系统处于危险工况中，进而导致整个发电系统的产生不可逆的损坏，对国家生产建设造成破坏^[1]。

煤电机组炉膛压力与炉内燃烧稳定性息息相关，其决定了进入炉膛的风量与流出炉膛的烟气量的平衡关系。炉膛负压是否在规定的范围内关系到锅炉的稳定安全经济的运行，超出这个范围会使得炉膛处于危险工况中，甚至会造成炸膛等危险事故^[2-3]。

现代大型锅炉的热负荷大、参数高，使得高温受热面的管壁温度接近钢材最高许用温度。由于锅炉中过热器和再热器长期工作在高温烟气的严酷环境中，一旦控制参数变化导致运行参数超限，而保护系统未及时动作，会导致锅炉处于超温爆管的危险工况中，甚至发生严重的安全事故^[4]。某电厂屏式过热器由于短时超温过热，造成炉管超温爆管危险工况，从爆破口冲出的高温高压汽流造成附近管排吹蚀，形成二次或三次爆口，整个机组被迫停炉进行检修^[5]。

汽轮发电机是高速旋转设备，机组转速一旦超过允许的范围，可能会发生设备损坏的严重事故。为了防止机组超速产生的严重后果，汽轮机须设计超速保护装置来保护机组的安全，防止汽轮发电机出现超速飞车的危险工况^[6-8]。

本文针对煤电机组危险工况进行仿真研究，首先对煤电机组三大主设备及其控制保护系统进行介绍，其次针对煤电机组中危险工况炉膛负压超限、超温爆管、汽机超速等危险工况进行分析，提出边界条件，最后通过搭建基于 RT-LAB 模型的半实物仿真平台对三种危险工况进行模拟，验证所提边界条件导致煤电机组危险工况的有效性。

1 煤电机组介绍

燃煤发电机组由锅炉、汽轮机、发电机等主设备以及辅助设备组成，锅炉将化学能转换成热能输出到汽轮机，而汽轮机依靠蒸汽推动转子转动将热能转换成机械能，转子在发电机中带着磁场转动，将机械能转换成电能从定子输出到电网，完成一个完整的燃煤发电过程如图 1 所示^[9]。



图 1 燃煤发电过程

1.1 锅炉

锅炉主要由燃烧系统，汽水系统，风烟系统以及制粉系统组成，制粉系统通过原煤斗、给煤机将原煤送入磨煤机中磨制成粉，送入煤粉仓中等待燃烧；风烟系统通过一次风机、送风机、引风机来克服气流在流通过程中产生的各项阻力，提供燃烧所需的预热空气，以及保持炉膛出口一定的负压等；燃烧系统使得燃料燃烧释放出热量，产生高温火焰和烟气；汽水系统通过换热设备将高温火焰和烟气的热量传递给锅炉内的工质，最后产生足够数量和具有一定质量的过热蒸汽，供汽轮机使用^[10]。锅炉系统简易示意图如图 2 所示。

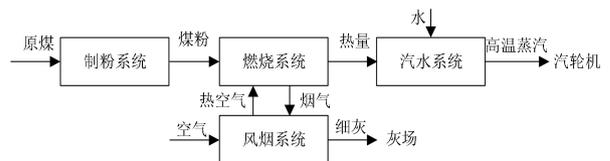


图 2 锅炉系统结构图

锅炉结构复杂，管道设备繁多，一旦出现如超温爆管、炉膛负压超限等危险工况将会导致锅炉设备损坏，甚至导致安全事故。

1.2 汽轮机

汽轮机主要拓扑结构如图 3 所示，汽轮机系统的主要结构可按照高中低压缸、阀门、调节阀、电液转换器、油动机、蒸汽容积箱、转子这几个部分来划分。锅炉产生的过热蒸汽为汽轮机提供原始动力，汽轮机动力上的变化转化为其功率变化并与给定值进行比较后，经控制调节器计算得到阀门开度信号；然后电液转换器将此信号转换放大后控制油

动机，再由油动机提供的动力反过来控制阀门大小，即通过调节汽轮机的进汽量来达到控制汽轮机输出功率的目的^[11-13]。

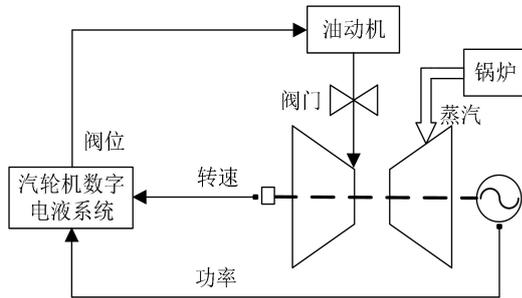


图3 汽轮机简易控制图

汽轮机正常运行时应保持恒定转速，一旦出现转速超过最大允许值，发生超速的危险工况，将可能直接导致飞车等严重的安全事故。

1.3 发电机

发电机通过汽轮机拖动转子转动，转子通入直流励磁产生恒定磁场，随转子旋转形成机械旋转磁场，定子绕组切割转子旋转磁场产生感应电动势，将机械能转化成电能^[14]。

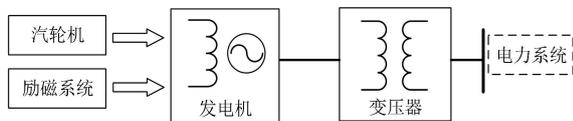


图4 发电机简易控制图

发电机转子和汽轮机直接相连，一旦出现汽轮机出现超速的危险工况也将直接影响到发电机，严重将造成发电机损毁，发生重大的安全事故。

2 危险工况研究

由于危险工况是可能产生设备受损、人员伤害、财产损失或环境破坏的一种工况。通过篡改控制保护逻辑，往往能使得煤电机组进入危险工况，导致设备损坏或者安全事故^[15]。本文主要研究锅炉炉膛负压超限、锅炉超温爆管以及汽机超速飞车作为煤电机组较为常见且较难快速恢复的危险工况，通过修改控制保护逻辑研究危险工况触发的边界条件，为控制保护系统防护提供有效方案^[14]。

2.1 炉膛负压超限

炉膛负压控制作为锅炉燃烧回路控制三大环

节之一，是衡量送风量与引风量是否平衡的一个重要指标。维持炉膛负压稳定对于锅炉的安全生产至关重要，如果炉膛压力大于大气压力，造成炉膛负压超限危险工况，则炉膛内部烟气就会溢出，甚至会导致炉膛炸膛，严重影响锅炉及其相关设备和运行人员的人身安全^[16]。

锅炉炉膛负压控制又称引风系统自动控制，是通过调节引风机动叶，使锅炉的炉膛负压处于一定的范围之内，以保证锅炉设备的安全运行，一般炉膛压力维持在较外界大气压力低 20~50 Pa 左右。锅炉的引风系统控制如图 5 所示。



图5 锅炉引风系统控制流程图

送风机将空气通过空气预热器预热后送到炉膛，提供燃煤所需的氧气。燃烧产生的高温烟气依次通过锅炉各受热面、脱硝、除尘设备等通过引风机排放到大气中。在实际生产中，当锅炉负荷发生变化时，进入炉膛的燃料量和送风量也随即改变，产生的烟气量也会发生变化，如果引风量调节不及时就会造成炉膛负压的波动，产生安全隐患。所以为了安全生产，锅炉增负荷时先调节引风量，后调节送风量和给煤量；锅炉减负荷时先调节给煤量和送风量，后调节引风量。因此一旦关闭引风机，将使得炉膛内负压压强快速增加超过锅炉保护动作限定值，而保护系统未动作，将使得锅炉处于炉膛负压超限危险工况，炉膛内压强继续增加，随时有炸膛的风险。

2.2 超温爆管

过热器是锅炉各受热面中工作温度最高的部位，因而高温是过热器管失效的最主要因素。高温引起的管子缺陷包括胀粗、弯曲变形、蠕变、组织劣化、高温氧化腐蚀等，进而造成管子材料的高温强度、抗蠕变性能下降，最终导致爆管^[17-18]。锅炉高温蒸汽流通示意图如图 6 所示。

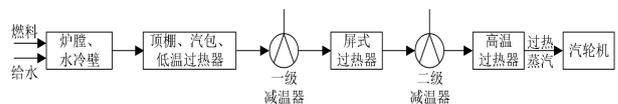


图6 锅炉蒸汽流通示意图

因此通过减少给水量作为边界条件，使得过热蒸汽吸收过多热量而超过限定温度，而保护系统未动作，将使得锅炉处于危险工况，将使得高温过热器管道爆裂。

2.3 超速飞车

在发电机并网时，由于电网电压稳定，使得汽轮机转速能维持在一定范围内。当发电机突然解列时，汽轮发电机失去负荷而使得转速快速上升，当转速超过 103 %额定转速时触发 103 %超速保护，保护触发汽轮机进汽调节阀关闭，中断汽轮机进汽，直到转速恢复到额定转速。如果保护失效，转速继续上升，超过 110 %额定转速时触发 110 %超速保护动作，保护触发机组停机。如果保护失效转速继续上升，将会导致汽机发生设备损坏甚至飞车危险工况，出现汽轮机各缸体开裂、叶片脱落甩飞，甚至转子飞出缸体，辅助设备损毁等严重安全事故^[19]。汽轮发电机转速控制系统结构如图 7 所示。

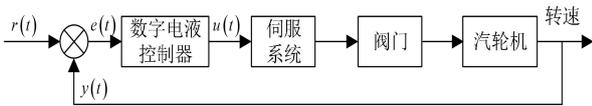


图 7 汽轮发电机转速控制结构

汽轮发电机转子动力学方程如下 (1) 所示：

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_f - M_G \quad (1)$$

其中： J —转子的转动惯量； ω —转子的角速度； M_T —蒸汽主动力矩； M_f —机械损耗阻力矩(忽略不计)； M_G —电磁阻力矩。

因此可知当汽轮发电机正常运行时突然强制解列，保护系统未动作，蒸汽未能及时切断，将会导致汽轮机超速发生飞车的危险工况。

3 仿真实验验证

为了验证所提边界条件触发危险工况的有效性，搭建了基于 RT-LAB 仿真模型与真实工业控制器的半实物仿真平台。该实验平台包括锅炉模型、汽轮机模型、发电机模型，采用艾默生、国电智深等常见控制器厂商设备搭建煤机组控制保护系统，搭建的半实物仿真平台如图 8 所示：

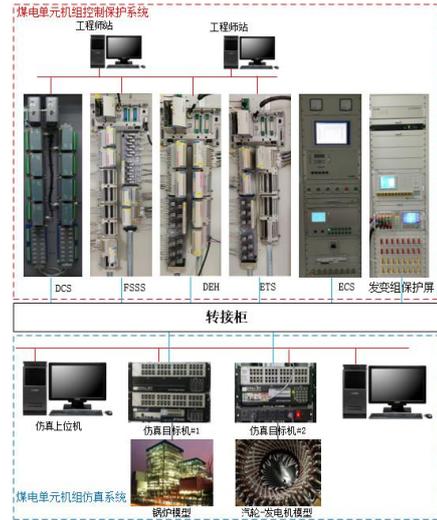


图 8 煤机组半实物仿真平台

煤机组半实物仿真实验平台相关参数如表 1 所示。

表 1 煤机组半实物仿真实验平台参数表

参数	数值	单位
炉膛负压 THA	-0.1	kPa
主蒸汽温度 THA	571	℃
主蒸汽流量 THA	1702.5	t/h
主蒸汽压力 THA	25.11	MPa
额定转速	3000	r/min
额定功率	600	MW
额定主蒸汽压力	24.2	MPa
额定主蒸汽温度	566	℃
额定电压	22	kV
额定电流	17.5	kA
功率因数	0.9	/

3.1 满负荷运行工况

煤机组满负荷正常运转时各变量参数状态如图 9 和图 10 所示，锅炉输出高温蒸汽，汽轮机转速为 3 000 r/min,而发电机输出有功功率 600 MW,各设备输出指标在允许范围以内。

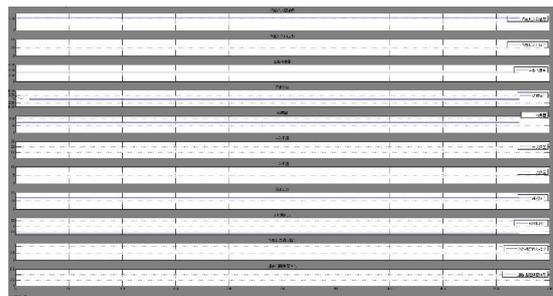


图 9 满负荷运行时锅炉相关运行状态参数



图 10 满负荷运行时汽轮发电机相关运行状态参数

3.2 危险工况

3.2.1 炉膛负压超限

为了触发炉膛负压超限危险工况，需使得炉膛负压对应保护条件失效后，在 t1 时刻强制关闭引风机，炉膛内的压力快速上升；在 t2 时刻，当炉膛负压大于 3 300 Pa 即判定为炉膛负压超限危险工况，导致锅炉炸膛损坏，蒸汽外泄使得输入到汽轮机的蒸汽温度压力流量等参数逐步减少。锅炉运行结果如图 11 所示。

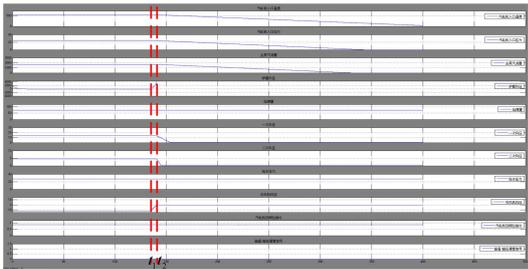


图 11 保护失效后关闭引风机锅炉运行结果

当炉膛负压保护仍有效时，在 t1 时刻关闭引风机，即触发锅炉 MFT 保护动作，使得锅炉各辅助设备即刻停机，进而使得各设备参数持续下降到冷态。锅炉运行结果如图 12 所示。

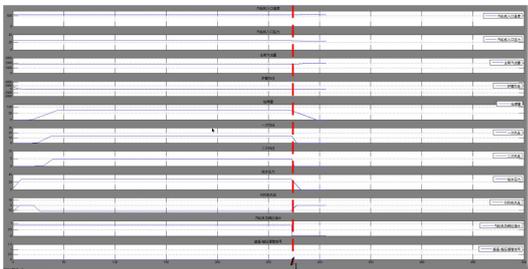


图 12 保护有效时关闭引风机锅炉运行结果

3.2.2 超温爆管

为了触发锅炉超温爆管危险工况，需使得水冷壁顶棚出口集温箱温度高保护、一级过热器一级减温器前温度高高保护、主蒸汽温度高高保护等保护条

件失效后，通过调节给水泵满负荷运行转速由 4 140 rpm 改变到 2 820 rpm，减少给水量，使得产生的蒸汽量减少而燃烧产生的热量不变，导致主蒸汽吸收更多的热量升高温度，最后超过主蒸汽温度限定值 700 °C 即认为超温爆管。锅炉运行结果如图 13 及图 14 所示。在 t1 时刻减少给水量后，蒸汽流量缓慢下降，主蒸汽温度缓慢上升，一段时间后，在 t2 时刻锅炉主蒸汽温度超过 700 °C 触发超温爆管危险工况，导致管道内蒸汽与外界接触，主蒸汽压力、流量、温度快速下降。



图 13 保护失效后减少给水锅炉运行结果 1

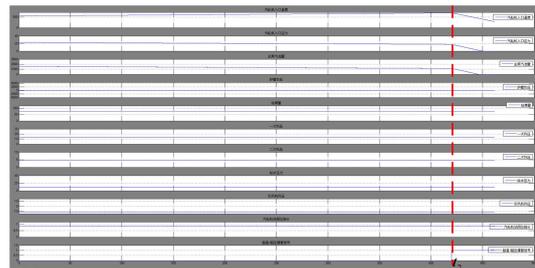


图 14 保护失效后减少给水锅炉运行结果 2

当锅炉保护仍有效时，在 t1 时刻，降低给水流量使得主蒸汽温度缓慢上升，在此过程中即会触发低温过热器一级减温器前温度高高等保护导致锅炉 MFT 保护动作，使得锅炉各辅助设备即刻停机，进而使得各设备参数持续下降到冷态。锅炉运行结果如图 15 所示。



图 15 保护有效时减少给水锅炉运行结果

3.2.3 超速飞车

为了触发汽轮机超速飞车危险工况，需使得汽轮机在无保护的情况下强制解列，触发转子转速快速上升，超过 103 %超速保护和 110 %超速保护的限定值，转速超过 4 000 rpm 即认为汽轮机发生超速飞车危险工况，由于汽轮机转子与发电机转子紧密连接，该危险工况将导致汽轮机与发电机转子飞出，严重损坏汽轮机及发电机设备，甚至造成人员安全事故。汽轮发电机运行结果如图 16 所示。在 t1 时刻钳制 DEH 阀位输出后，强制发电机从电网解列，有功功率输出、无功功率输出、以及机端电流即刻下降为 0，机端电压由励磁系统支持经过波动后幅值稳定，而转子转速快速上升，在 t2 时刻，转子转速达到 4 000 rpm 即触发超速飞车工况，同时励磁系统由于 V/F 限制导致励磁系统关闭，机端电压缓慢下降。



图 16 保护失效后强制解列汽轮发电机运行结果

当汽轮发电机保护仍有效时，在 t1 时刻钳制 DEH 阀位输出指令，强制发电机从电网解列后，汽轮发电机转速快速上升，触发汽轮机 ETS 超速保护和发变组保护系统，关闭阀门和励磁系统，使得汽轮机转速和机端电压下降。汽轮发电机运行结果如图所示。

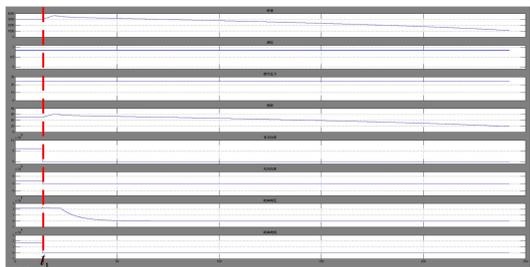


图 17 保护有效时强制解列汽轮发电机运行结果

4 结语

本文针对常规煤电机组的危险工况进行研究，通过更改控制保护逻辑使得系统处于危险工况而

造成设备损坏及安全事故，提出 3 种危险工况的触发方法，通过搭建煤电机组半实物仿真平台对所提方法进行验证和分析，确定危险工况触发边界条件。实验结果表明，在保护系统失效的条件下，所提方法能触发危险工况并损坏设备进而造成严重后果。

参考文献

- [1] 田磊. 600 MW 火力发电机组协调系统优化及合理调节研究[J]. 应用能源技术, 2021, 285(9):48-50
- [2] 伍建洲. 锅炉蒸汽侧超温爆管原因分析与防治措施综述[J]. 浙江电力, 2018, 37(6):68-71
- [3] 郭可伟, 马春江, 丁勇能. 某电站锅炉前屏过热器爆管原因分析[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2019, 24(1):16-20+43
- [4] 李嘉琦. 炉膛压力控制器动作的原因分析及预防对策[J]. 机械管理开发, 2022, 37(10): 322-323+326
- [5] 孙灵芳, 宫远洋. 火电机组锅炉炉膛负压优化策略研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(2):170-174
- [6] 曾建华, 赵悦涵, 蔡佐君等. 某型汽轮机超速脱扣试验浅析[J]. 机电设备, 2020, 37(2):28-30
- [7] 李倩. 650MW 核电机组汽轮机超速保护系统性能及重要变更改造分析[J]. 仪器仪表用户, 2021, 28(4):40-43+55
- [8] 谢昌亚, 陈凯亮, 杨赵辉等. 某 630 MW 通流改造机组甩负荷试验超速原因分析及处理[J]. 化工机械, 2022, 49(3):544-550
- [9] 樊泉桂. 锅炉原理[M]. 中国电力出版社, 2008
- [10] 黄树红. 汽轮机原理[M]. 中国电力出版社, 2008
- [11] 王志新, 罗文广. 电机控制技术[M]. 机械工业出版社, 2020
- [12] 周运红, 桑梓, 刘丝丝. 应用于汽轮发电机的自抗扰控制器设计[J]. 东方电气评论, 2022, 36(2):16-20
- [13] 詹锦皓, 李维波, 高佳俊等. 基于串级前馈 PID 协调控制的汽轮发电机组建模方法[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(S1):149-156
- [14] 马晓君, 邢景伟. 磨煤机危险工况分析及预防措施[J]. 河南科技, 2018(11):26-28
- [15] 袁晓舒, 张愉菲, 杨波, 等. 基于虚假数据注入的发电厂汽轮机网络安全攻击研究[J]. 东方电气评论, 2021, 35(3):17-24
- [16] 樊春年, 杨振元. 锅炉炉膛负压的无模型自适应控制研究[J]. 工业炉, 2018, 40(4):21-24
- [17] 赵林松, 赵彦芬, 张路. 某电厂锅炉高温过热器爆管原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2019, 55(3):214-217
- [18] 缪斌. 电站锅炉过热器管爆管实例分析[J]. 特种设备安全技术, 2019(1):1-2
- [19] 姜全越, 董霞威, 刘瑞刚. 一起超速未飞车事故给我们的启示[C]// 中国农业机械工业协会风力机械分会. 第六届中国风电后市场交流合作大会论文集. 2019.6

拒绝服务攻击对汽轮机运行的危害研究

张愉菲^{1,2,3} 刘丝丝^{1,2} 杨波^{1,2} 袁晓舒^{1,2} 丁晓汉⁴ 邱煜民⁴ 梁魁西⁴

1. 能源装备工控网络安全四川省重点实验室, 成都 611731; 2. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731;

3. 电子科技大学, 成都 611731; 4. 芜湖发电有限责任公司, 安徽 芜湖 241000

摘要: 拒绝服务攻击由于其危害程度高、防御难度大等特点, 一直以来都是网络空间安全领域重点关注的对象。然而, 工控领域的拒绝服务攻击是否能够直接对能源装备造成影响目前在国内的研究尚处于起步阶段。本文选取汽轮机及其控制系统为研究对象, 搭建了网络安全仿真实验环境, 针对拒绝服务攻击能否对汽轮机运行产生危害进行了分析、验证并提出了建议。

关键词: 拒绝服务; 汽轮机; 能源装备; 工控安全

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0014-06

Research on the Harm of Denial of Service Attack on Steam Turbine Operation

ZHANG Yufei^{1,2,3}, LIU Sisi^{1,2}, YANG Bo^{1,2}, YUAN Xiaoshu^{1,2}, DING Xiaohan⁴, QIU Yumin⁴, LIANG Kuixi⁴

(1. Energy equipment Cyber security Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;

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

3. University of Electronic Science and Technology of China, 611730, Chengdu, China

4. Wuhu Power Generation Co., Ltd., 241000, Wuhu, Anhui, China)

Abstract: Denial of service attacks have always been a focus of attention in the field of cyberspace security due to their high levels of harm and difficulty in defense. However, whether denial of service attacks in the industrial control field can directly affect energy equipment is still in its infancy in China. This paper selects the steam turbine and its control system as the research object, builds a cyberspace security simulation environment, and then analyzes and verifies whether the denial of service attack can cause harm to the steam turbine operation, and some suggestions are put forward.

Key words: denial of service; steam turbine; energy equipment; cyberspace security of industrial control system

拒绝服务攻击 (Denial of service, 简称 DoS) 是一种使目标网络或系统无法给合法用户提供正常服务的攻击手段, 由于其危害程度高、防御难度大等特点, 一直以来都是网络空间安全领域重点关注的对象。常见的拒绝服务攻击方式包括 TCP-SYN flood 攻击、Land 攻击、Teardrop 攻击、Smurf 攻击、Fraggle 攻击等^[1-5]。

近年来, 针对工控领域的网络安全攻击事件频发, 也引起了工业界和学术界的广泛关注^[6]。为进一步了解拒绝服务攻击可以对真实设备造成的影响, 本文以汽轮机控制系统为攻击对象, 使用 OVATION 控制系统等搭建了汽轮机网络安全仿真实验环境, 针对拒绝服务攻击可能对汽轮机运行造成的危害进行了初步的研究并提出了建议。

收稿日期: 2023-01-30

项目基金: 煤电单元机组网络安全一体化保护系统研发和示范; 项目编号: GK KY21001。

作者简介: 张愉菲 (1994—), 女, 2020 年毕业于电子科技大学计算机技术专业, 硕士, 电子科技大学电子信息专业工程博士在读。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司能源装备工控网络安全工程实验室从事工控网络安全脆弱性研究工作。

1 研究背景

国内工控领域拒绝服务相关的研究认为^[7-16], 拒绝服务攻击的对象广泛, 难以防范。控制台、服务器、路由器、交换机、工业接口网关等都可以成为被攻击的目标。而工业终端的处理能力通常较低, 主要用于满足生产需求。大量的报文会完全占用设备的处理能力, 使得设备充满了虚假数据, 正常生产数据无法被处理。

攻击者实施拒绝服务攻击可以造成量测数据缺失, 防御者虽然可以快速感知到系统异常, 但由于控制中心既无法获得系统的量测信息, 也无法下达控制指令给受控系统, 因此在发生拒绝服务攻击时防御者没有更好的办法来保证系统的安全。例如在智能电网中, DoS 攻击可以使得控制中心与远程终端的通信处于不可用状态, 信息无法正常地接收和送达, 无法进行正常的预测矫正, 导致对智能电网的安全性和经济性进行错误的分析和判断, 进而危害系统安全经济运行。

现有研究表明^[17], 针对 DCS 控制系统进行拒绝服务攻击可以导致工程师站组态软件下装失败, 但是进一步危害并未进行探讨。目前, 尚未见到有关拒绝服务攻击可能对汽轮机运行产生危害方面的研究。

2 汽轮机控制系统拒绝服务攻击危害

2.1 汽轮机控制保护系统

汽轮机控制保护系统主要由以下三大部分构成:

①汽轮机数字电液控制系统(Digital Electric Hydraulic Control, DEH), 主要实现汽轮机的主要参数控制及部分实验和保护功能; ②汽轮机危急遮断系统(Emergency Trip System, ETS)是汽轮机的主要保护系统, 当汽轮机运行出现异常, 为了防止汽轮机损坏或危害其它设备运行, ETS 能够使汽轮机跳闸, 关闭所有进汽门使汽轮机停机; ③汽轮机安全监视系统(Turbine Supervisory Instrumentation, TSI), 汽轮机在运行过程中需要随时监视它的运行参数, 保证在设计范围之内, 该功能由 TSI 完成。

本次拒绝服务攻击的对象为汽轮机数字电液控制系统, 以下简称 DEH。一套完整的 DEH 系统

主要由控制器、IO 模件、人机接口 (Human Machine Interface, 简称 HMI)、传感器和执行器几大部分组成。

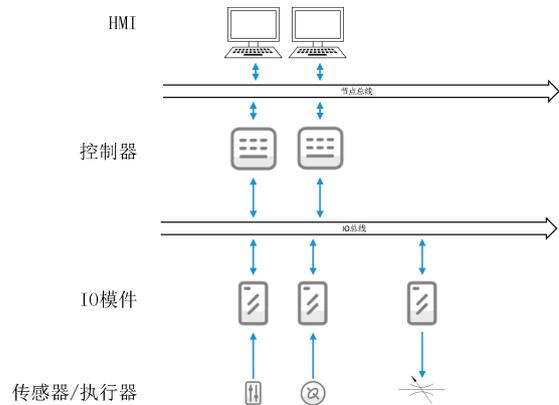


图1 DEH系统构成

- 人机接口 HMI 用于控制系统和操作人员之间的交互, 如数据监视、组态修改等;
- 控制器主要用于控制逻辑执行和信号处理;
- IO 模件用于接收和输出电信号;
- 传感器用于将被测量的物理量, 如距离、温度、压力等转换为电信号;
- 执行器用于接收 IO 模件发出的电信号, 并执行相应的动作。

由图 1 所示, 完整的 DEH 系统包含两套通信系统, HMI 与控制器之间通常使用以太网进行数据传输, 控制器与 IO 模件之间采用总线通信方式。现有研究聚焦于拒绝服务攻击对以太网层面造成的影响, 危害止步于对控制系统本身的分析。在本文中采取对比实验的方式, 探索针对以太网的拒绝服务攻击对汽轮机实际运行的影响, 以及是否能够通过以太网进一步造成总线层面的拒绝服务, 进而对汽轮机运行造成更大的危害。

2.2 以太网拒绝服务攻击

2.2.1 攻击原理

本文首先选用经典的 SYN Flood 攻击分析以太网拒绝服务攻击对汽轮机运行的影响。SYN Flood 攻击是典型的 TCP/IP 协议拒绝服务攻击之一, 它利用 TCP 协议三次握手设计的缺陷, 发送大量伪造的 TCP 连接请求, 最终将导致被攻击方资源耗尽 (CPU 满负荷或内存不足), 停止响应正常的 TCP

连接请求。三次握手过程如图 2 所示，主要包含三个步骤：客户端向服务器发送 SYN 标志报文请求建立连接，服务器回复 SYN-ACK 报文建立起半连接状态，客户端答复 ACK 确认报文完成连接建立。

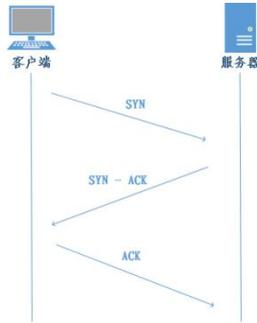


图 2 三次握手

攻击原理如图 3 所示，攻击者伪造大量的虚假 IP 地址向服务器发送 SYN 请求报文，服务器建立起半连接状态等待响应，但无法收到 ACK 答复，最终服务器资源被这些半连接状态耗尽，无法响应正常客户端发来的 SYN 请求。

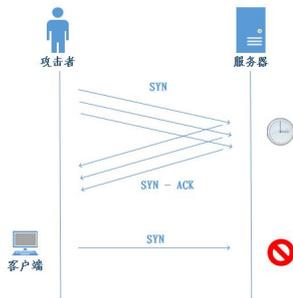


图 3 SYN FLOOD 攻击

2.2.2 危害分析

对 DEH 系统发起 SYN FLOOD 攻击，由于系统资源耗尽，无法提供 TCP 连接服务，所有基于 TCP 协议运行的通信连接将中断，操作人员无法通过 HMI 下达相应的控制命令。在 OCR400 控制器当中，基于 TCP 协议实现的服务主要包括：配置下装，逻辑下装，控制器重启、点编辑、telnet 服务、ftp 服务。在遭受 SYN FLOOD 攻击之后，以上服务功能将全部失效。

由于 SYN FLOOD 攻击只阻断了 DEH 系统的 TCP 协议的通信，依赖其他协议如 UDP 的通信应当不受干扰，并且控制器和 IO 模块之间的总线通

讯也不会被打断。SYN FLOOD 攻击将不会直接危害到汽轮机的正常运行。

2.3 总线拒绝服务攻击

2.3.1 攻击原理

针对总线的拒绝服务攻击需要利用私有协议漏洞来完成。私有协议是工业控制系统厂商自定的协议标准，只适用于本企业生产的设备产品。工业私有协议具备封闭性和专用性的特点。封闭性特指协议规范不对外开放。专用性则是和原厂设备相绑定，用于实现特定的功能。由于私有协议的特殊性，往往核心的控制功能都通过私有协议通信来实现，因此，对私有协议进行拒绝服务攻击，不仅可以影响控制系统的正常运行，甚至能够影响下层通讯。

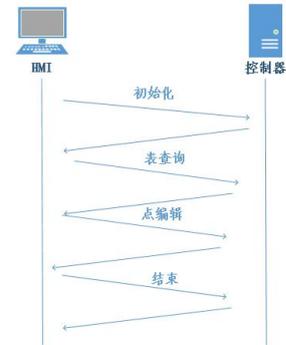


图 4 私有协议交互过程

以 OCR400 控制器的某项控制功能为例，私有协议通信过程如图 4 所示，通过解析数据包文件，可以将通信过程划分为四个阶段：初始化、表查询、点编辑和结束。其中，点编辑报文交互次数最多，报文格式如表 1 所示：

表 1 私有协议报文格式

报头	数据长度	RP C 标识号	命令类型	...	点数量	点 ID 及数据	点 ID 及数据	点 ID 及数据	...
----	------	----------	------	-----	-----	----------	----------	----------	-----

通过对 OCR400 的私有协议通信过程及报文格式进行分析，我们找到了私有协议通信当中存在的拒绝服务攻击漏洞，并在第四节的实验中，对其危害进行了验证。

2.3.2 危害分析

针对私有协议的拒绝服务攻击首先会导致协

议解析程序运行异常，由于通过私有协议传输的都是核心控制指令和数据，相应的协议解析程序必然与最关键的控制与运算功能紧密关联，一旦攻击生效，所有依赖于私有协议进行数据传递的监视控制功能将全部失效，HMI 和控制器之间的通讯将发生部分中断，仅保留系统自带的基础通讯服务。操作人员通过 ping 服务可以观察到控制器依旧在线，但是无法通过 HMI 对控制器进行控制和实时数据监视。

此外，控制器作为操作人员和执行机构的“中间媒介”，它不仅与上层 HMI 有数据交互，同时承担着与下层 IO 模件之间的通讯任务，因此在私有协议遭受攻击后，极有可能会影响到控制器和下层 IO 模件之间的通讯。根据以上分析，在攻击成功之后可能会造成总线通讯异常，IO 模件因检测到故障将无法进行信号传递，只能保持固定的值，若此时汽轮机的转速异常，传感器采集的信号可能无法反馈到控制器当中触发相应的控制保护功能，或者控制器即使接收到异常信号也无法将动作指令传递给执行机构，如图 5 所示。

据以上分析，对私有协议发起拒绝服务攻击将直接危害到汽轮机的稳定运行。

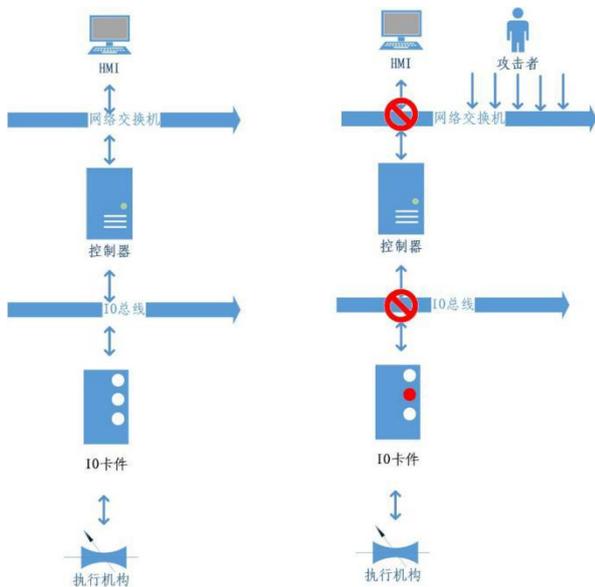


图 5 私有协议拒绝服务攻击危害

3 汽轮机控制系统拒绝服务攻击验证实验

3.1 实验方案

实验平台设计如图 6 所示，采用半实物仿真系

统。其中，控制系统采用真实的 Ovation 控制系统，控制器型号为 OCR400，而汽轮机等发电设备则使用仿真系统进行模拟。使用 HMI 下装控制组态逻辑，控制系统使用硬接线接入到仿真平台当中，模拟真实的发电运行场景。在正常运行工况下，攻击者分别对控制系统发起 SYN FLOOD 攻击和私有协议拒绝服务攻击。之后通过仿真平台观测 DEH 受到攻击后对汽轮机运行可能造成的危害，记录上述实验过程中，HMI 监视控制画面、控制器信号灯及仿真平台中的汽轮机转速等数据的变化。本次实验除 DEH 自带的保护功能外，未接入其他保护系统或其他有保护功能的组件。

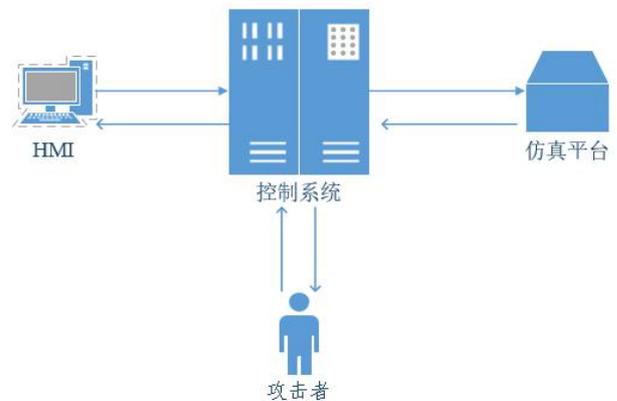


图 6 实验平台示意图

3.2 实验结果

3.2.1 以太网服务攻击实验

如图 7 所示为正常运行工况下的仿真实验平台的监视曲线图，四个坐标轴从上到下依次代表：汽轮机实际转速、总阀位指令、汽轮机转速量测值与汽轮机输出功率。在发起攻击之前，各项数据大约为：实际转速 3 000 r/min，总阀位指令 90%，转速量测值 3 000 r/min，输出功率 1 000 MW。

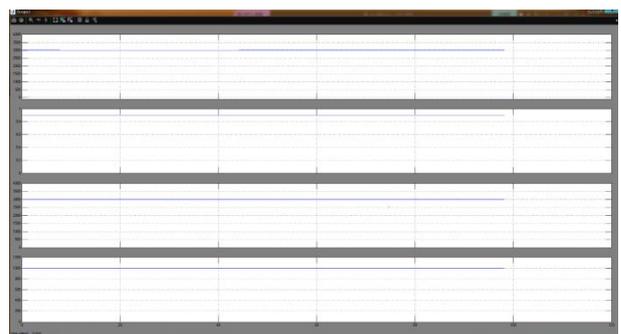


图 7 正常运行工况下仿真曲线图

在发起 SYN FLOOD 攻击后，通过仿真平台可以看到曲线未发生明显变化，汽轮机运行并未受到影响。此时为展示实验效果，于满功率状态下，在仿真平台上执行甩负荷操作，可以看到汽轮机转速的实际值和量测值曲线都是先迅速上升，在上升较短的一段时间后因触发 DEH 自身的超速保护，转速开始缓慢下降。甩负荷后功率曲线突变为 0，超速保护触发后总阀位指令突变为 0，上述曲线趋势说明 DEH 此时可以正常执行控制保护功能，如图 8 所示：

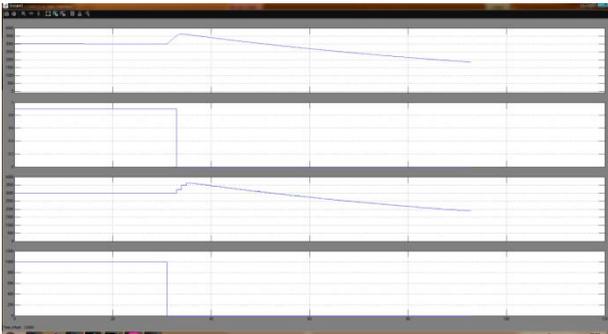


图 8 SYN FLOOD 攻击后甩负荷仿真曲线

图 9 所示为 SYN FLOOD 攻击前，正常运行工况下截取 HMI 的监视控制画面。左上角显示汽轮机转速准确值为 2 998.5 r/min，右上角输出功率为 999.7 MW，总阀位指令 90 %。其余数据如高压主汽阀进汽压力等均正常刷新。



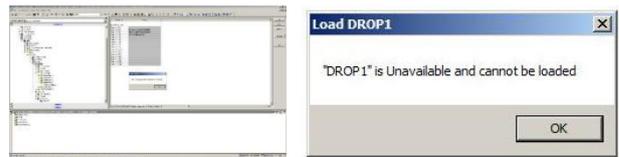
图 9 SYN FLOOD 攻击前控制画面

在发起 SYN FLOOD 攻击后，控制画面显示一切正常。执行甩负荷动作，如图 10 所示，可以监视到转速上升到 3 125.5 r/min，功率下降到 0.4 MW，总阀位指令下降为 0，汽轮机显示已跳闸等。与仿真曲线图反馈的信息保持一致。由于与数据监视相关的报文均通过 UDP 协议传递，因此该现象符合预期，监视功能并未受到影响。



图 10 SYN FLOOD 攻击后甩负荷控制画面

在 OCR400 控制器中，涉及到文件传输的指令基于 TCP 协议进行可靠传输，因此使用工程师站组态软件发起逻辑下装操作，可观察到 SYN FLOOD 攻击后的现象。如图 11 所示，组态软件出现报错信息，显示 DROP1（即 OCR400 控制器）无法联络，不能执行逻辑下装。除此以外，在攻击生效后可以观测到控制器指示灯亮红灯报警。



(a) (b)

图 11 组态软件画面

3.2.2 总线拒绝服务攻击实验

正常运行工况下的数据在上节中已经给出，本节直接描述攻击后的现象。

发起私有协议拒绝服务攻击后观察 HMI 监视控制画面，如图 12、图 13 所示，画面可见明显异常：①大量的状态内容丢失不显示，如阀门开关信息、并网信息、挂闸信息等；②无法执行控制操作，点击控制按钮无响应；③数据冻结，无法正常刷新，在右上角数据显示区出现报错符号。



图 12 私有协议拒绝服务攻击后监视控制画面



图 13 监视控制画面局部放大图

观察仿真曲线图 14, 在私有协议拒绝服务攻击生效之后, 在满功率状态下通过仿真系统执行甩负荷动作, 可以看到汽轮机实际转速超过 4 000 r/min, 总阀位指令数据保持 90%, 汽轮机转速量测值保持 3 000 r/min, 功率突变为 0。对上述数据进行初步分析: 由于当前实验环境未接入其他超速保护系统, 实际转速超过 4 000 r/min 之后仍未下降, 阀位保持在 90%左右, 说明 OCR400 控制器自身的保护功能没有生效。此外, 在汽轮机超速后量测值始终保持不变, 此时观察 DEH 系统的运行指示灯, 发现除了控制器亮红灯外, 下方所有 IO 模块的红灯也全部亮起, 证明 IO 模块与控制器的总线通讯出现了异常, 卡件进入数据保持状态。面向私有协议发起的攻击最终造成了总线层面的拒绝服务。



图 14 私有协议拒绝服务攻击后仿真曲线

4 结语

SYN FLOOD 拒绝服务攻击能够阻断 OCR400 控制器的 TCP 通讯, 所有依赖于 TCP 协议的服务功能, 如逻辑下装等都无法正常使用。而没有运行在 TCP 协议之上的其他功能则不受影响, 例如 OCR400 的数据监视功能大部分是通过 UDP 协议传输, 监视画面依旧能够正常显示。除此之外, 控制器内部的逻辑运行和下层总线通讯并未受到干扰, 数据的采集、运算和输出功能都正常。可见, 传统的以太网拒绝服务攻击只能够对控制器和 HMI 之间的上层通讯造成影响, 而无法直接危害到

汽轮机的正常运行。

针对私有协议发起的拒绝服务攻击, 与 SYN FLOOD 相比, 首先能够使 HMI 与控制系统之间的监视控制功能形成更大范围的瘫痪。更重要的是, 它还会造成下层总线通讯的故障, 导致控制器无法接收传感器反馈的信号, 也不能给执行机构下发指令, 影响了 DEH 的反馈调节功能, 可能对汽轮机的运行直接造成危害。

通过本次实验可以看出, 如果汽轮机控制系统的上层通讯和下层通讯之间并未做好隔离, 这种设计方式会导致上层通讯在遭受网络攻击后引起连锁反应, 造成更为严重的后果, 控制系统在设计中应充分考虑这一点, 将危害隔离在一个更小的范围。

此外, 本文中所设计的实验是基于一个非完备的半实物仿真实验环境, 仅为对拒绝服务攻击是否能够对汽轮机运行造成危害进行探索。在实际的电厂环境中, 控保系统的运行机理更为复杂, 仿真平台搭建的完备程度会直接影响最终的攻击效果, 这将是未来工作中将要进一步解决的问题。

参考文献

- [1] 殷勤. 防御拒绝服务攻击的网络安全机制研究[D]. 上海交通大学
- [2] 徐恪, 徐明伟, 吴建平. 分布式拒绝服务攻击研究综述[J]. 小型微型计算机系统, 2004(3):337-346
- [3] 吴华光, 甘燕玲. TCP SYN Flood 攻击的原理与防范[J]. 南方金属, 2005(1):19-22
- [4] 高学强, 王玉晶, 杜文超等. 一种检测和防御 TearDrop 攻击的新算法[J]. 无线电工程, 2005,35(11):19-21
- [5] 徐永红, 张琨, 杨云等. Smurf 攻击及其对策研究[J]. 南京理工大学学报, 2002, 26(5):512-516
- [6] 吴同. 乌克兰电网被黑, 能源网络安全几何[J]. 保密工作, 2016(5):54-55
- [7] 张晓娟, 曹靖怡, 缪思薇等. 电力工控系统攻击渗透技术综述[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(3):49-59
- [8] 徐飞阳, 薛安成, 常乃超等. 电力系统自动发电控制网络攻击与防御研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 45(3):12
- [9] 李雪, 李雯婷, 杜大军等. 拒绝服务攻击下基于 UKF 的智能电网动态状态估计研究[J]. 自动化学报, 2019, 45(1):120-131
- [10] 李俊, 郭娴, 孙军. 基于扩展 Kalman 滤波的工业控制系统 DDoS 攻击检测[J]. 电子技术应用, 2016, 42(4):73-77
- [11] 任红波. 工业控制协议安全分析和测试评估[J]. 电信网络技术,

(下转第 34 页)

多种含氢燃气燃烧 NO 生成机理

陈钧¹ 王杜佳^{2,3} 杨章宁^{2,3} 范卫东¹

1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 成都 611731;

3. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

摘要: 针对低 NO_x 排放的多气种燃烧器研发需求, 利用详细化学反应机理开展了数值模拟工作, 深入探究了 H₂、H₂/CO、H₂/CH₄, 以及 H₂/NH₃ 预混火焰中 NO 的生成机理。计算结果表明: H₂ 火焰中 NO 的生成机理包括 NNH 机理及热力型机理, 后者起主导作用; 添加 CO 强化 O 的生成从而加剧热力型 NO 的生成; H₂/CH₄ 火焰中 NO 的生成机理与 CH₄ 火焰相似, 包括火焰内的快速型机理和火焰后的热力型机理, H₂ 占比的改变引起 NO 排放浓度的变化量不超过 15 ppm; H₂/NH₃ 火焰中 NO 主要来源于 NH₃ 的氧化, 贫燃条件下, H₂/NH₃ 火焰尾部 NO 排放浓度比 H₂ 火焰高两个数量级, NO 的生成对 H+O₂=O+OH 反应高度敏感, 该反应的强化引起 NO 生成加剧。

关键词: NO; 机理研究; 含氢燃气; 多气种燃烧器; NH₃

中图分类号: TK91; X511

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0020-08

NO Formation Mechanisms in Combustion of Several Hydrogen-containing Gases

CHEN Jun¹, WANG Dujia^{2,3}, YANG Zhangning^{2,3}, FAN Weidong¹

(1. Shanghai Jiao Tong University School of Mechanical Engineering, 200240, Shanghai, China;

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

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

Abstract: Due to the demand on the research and development of low-NO_x multi-gas burner, comprehensive numerical work with a detailed kinetic model was conducted on the NO formation mechanisms in the premixed flames of H₂, H₂/CO, H₂/CH₄, and H₂/NH₃. Calculation results indicated: The NO formation mechanism in H₂ flame includes the NNH mechanism and the thermal mechanism, and the latter is predominant; CO addition in the H₂ flame enhances the thermal NO mechanism; The NO formation mechanism in H₂/CH₄ flame is similar to that in CH₄ flame, including the prompt mechanism and the thermal mechanism, and the change of the outlet NO mole fraction is less than 15ppm at various H₂ blending ratios; NO in the H₂/NH₃ flame mainly comes from NH₃, with the outlet mole fraction two orders of magnitude larger than that in the H₂ flame under the fuel lean condition, and the NO formation is most positively sensitive to the H+O₂=O+OH reaction.

Key words: NO; mechanism research; H₂-containing gas; multi-gas burner; NH₃

我国工业领域存在大量可燃废气, 包括高炉煤气、焦炉煤气、POX 气等, 将其投入锅炉进行燃烧再利用能够大幅提高能源利用效率^[1,2]。H₂ 广泛存在于各种工业可燃废气中, 但是不同种类的燃气中 H₂ 的占比不尽相同, 且含有的其他可燃气体组分也

不同。高炉煤气中含有少量 H₂, 但含有大量 CO; 焦炉煤气和 POX 气都含有 H₂ 和 CH₄, 但二者中的主要成分却相反。在实际应用场合, 气源往往并不单一, 存在多种燃气混合燃烧, 并且配比不断调整的需求。这就需要能够实现多种燃气混合燃烧, 且

收稿日期: 2023-02-08

作者简介: 陈钧 (1996—), 男, 上海交通大学机械与动力工程学院动力工程及工程热物理专业, 博士, 在读, 主要从事清洁低碳燃烧相关研究工作。

能够灵活调节燃气配比的燃烧器。然而，当前我国在多气种燃烧器方面的研究很少，尤其是低 NO_x 排放的多气种燃烧器，几乎没有成熟的技术和产品。

同时，为了快速实现碳减排，燃用零碳燃料 NH₃ 是一种切实可行的方法^[3]。但是，NH₃ 的燃烧特性差，将 NH₃ 和 H₂ 混合燃烧能够显著改善其燃烧特性，且 H₂ 可来源于 NH₃ 自身的分解，因此，燃用 H₂/NH₃ 混合燃气被认为是一种极具潜力的降碳途径^[4-6]。然而，含 NH₃ 燃气的燃烧却面临高 NO_x 排放的挑战^[7]。

考虑到日趋严格的 NO_x 排放要求，要想实现多种含氢燃气燃烧超低 NO_x 排放，必须深入研究其生成机理^[8]。在燃气燃烧产生的高温条件下，NO 是最主要的 NO_x 组分^[9]，因此，有必要充分探究多种含氢燃气火焰中 NO 的生成机理。

1 研究方法 with 内容

本研究采用数值模拟的方法，物理模型选用的是 Chemkin 的层流预混火焰模型。选择该模型的原因在于其能够反映燃料本身的燃烧及 NO 生成特性，同时，在实际燃烧器运行时，尤其是在高负荷状态下，燃气和助燃空气在着火燃烧之前能够充分混合，使得燃烧实际上发生在接近预混的状态下。

详细化学反应机理选择的是 Glarborg 等人发布的 H₂、CO、CH₄ 和 NH₃ 燃烧及相关氮化学机理^[10]。该机理包含 151 个组分和 1 397 个反应，既涵盖了四种燃气组分的氧化机理，也包括了 NO 生成相关的热力型、快速型、N₂O 和 NNH 等子机理。

考虑到 H₂ 自身特殊的扩散特性，计算过程中考虑了热扩散^[11]。计算域长度为 5 cm，以保证入口和出口满足零梯度条件。

火焰的基本参数汇总于表 1，初始温度均为 20 °C，压力为 1 atm。基于计算结果，本文首先分析了 H₂ 火焰中 NO 的生成机理，然后依次分析了 H₂/CO、H₂/CH₄，以及 H₂/NH₃ 三种混合燃气火焰中 NO 的生成机理，并探究了燃气中 H₂ 占比（体积分数）的影响。

表 1 火焰基本参数汇总

燃气组成	H ₂ 占比 %	当量比	初始温度 °C	压力 atm
H ₂	100			
H ₂ /CO	10~100	0.7~1.3	20	1
H ₂ /CH ₄	0~100			
H ₂ /NH ₃	0~100			

2 H₂ 燃烧 NO 生成机理

图 1 展示了 H₂/空气预混火焰的 NO 排放浓度及火焰内最高温度。整体上看，当量比是决定 NO 排放水平的关键参数，NO 排放峰值出现在当量比 1.0 附近，空气过量或不足都会引起 NO 排放的显著降低。火焰内部最高温度的变化趋势与 NO 排放数据不尽相同，峰值出现在富燃料一侧，当量比 1.1 附近。在贫燃一侧，NO 排放浓度变化趋势与最高温度相同，体现了二者之间的密切关联；但是富燃条件下，随着当量比的增大，火焰内部始终维持高温水平，而 NO 排放浓度却显著下降。这表明温度并不是影响 H₂ 火焰 NO 排放的决定性因素，在贫燃和富燃条件下 NO 的生成机理应当存在着差异。

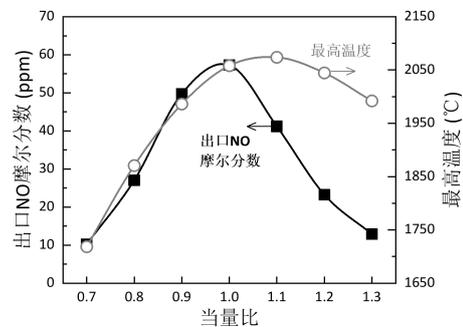


图 1 不同当量比的 H₂ 预混火焰的 NO 排放浓度和最高温度

为此，进一步针对当量比 0.8 和 1.2 的两种火焰开展了 NO 产率分析，以探究不同当量比的 H₂/空气预混火焰中 NO 的生成机理，结果如图 2 所示。通过对比可以看出，贫燃和富燃条件下 NO 生成机理大致相同，均存在两种主要的 NO 生成路径，分别处于火焰主反应区内部和火焰尾部高温区。

在火焰主反应区内部 NNH 机理主导了 NO 的生成。NNH 几乎完全来源于 H 与 N₂ 的结合，这主要得益于 H₂ 燃烧过程中生成的大量 H。尽管大部分 NNH 又将在 H 和 O₂ 等组分的作用下发生脱氢反

应，再次转化为 N_2 ，但是主反应区内 O 的存在使得少量 NNH 被氧化生成 NO 。得益于主反应区内活跃的燃烧反应， NNH 路径具有高反应速率峰值，但是，火焰厚度小，不足 2 mm ，限制了 NO 的生成量。

而在火焰后部， NO 的生成主要来源于热力型机理。火焰后部宽范围的高温区保证了启动步 $N_2+O=N+NO$ 反应的进行，生成 NO 的同时，也产生高活性的 N ，后者很容易被 OH 氧化，再次引起 NO 的生成。相比于前述 NNH 路径，热力型路径反应速率峰值有所降低，但是，宽泛的高温反应区却保证了高 NO 生成量。

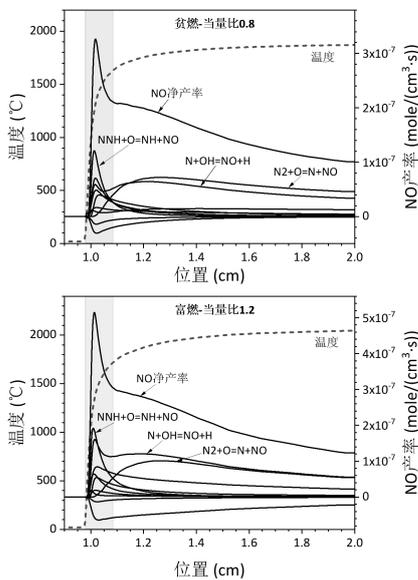


图2 当量比 0.8 和 1.2 的 H_2 预混火焰中 NO 产率分析

图3进一步展示了两种机理关键基元反应的反应速率随当量比的变化情况。 NNH 机理开启于 N_2 向 NNH 的转化，同时需要高浓度 O 的存在以保障 NO 的生成，因此对 H 和 O 浓度都具有很强的依赖性。图3a展示了 NNH 生成反应及其向 NO 转化反应的反应速率峰值随当量比的变化情况。随着当量比增加， NNH 的生成速率单调增大。这主要归因于 H 生成的强化，随着当量比增加，火焰内部 H 浓度峰值近似呈线性增加，高浓度 H 的存在保障了 NNH 的大量生成。但是，在富燃条件下， O 的生成受到抑制， O 浓度在当量比超过 0.9 之后便开始降低，因此， NNH 向 NO 的转化受到抑制。综合上述两方面的影响，在当量比超过 1.1 之后， NO 生成反应的速率峰值开始下降。

热力型 NO 则来源于 O 对 N_2 的攻击，以及后续 N 的氧化。图3b展示了这两步基元反应的反应速率随当量比的变化情况。从图中可以看出，在 N 生成反应的反应速率峰值处，两个基元反应的反应速率接近，表明 N 向 NO 的转化非常迅速， N 一旦生成便马上被氧化成 NO 。随着当量比增大，两个基元反应的反应速率均先增后降，峰值出现在当量比 1.0 附近，这与图1所示 NO 排放浓度的变化趋势一致。在贫燃条件下，随着当量比增大，火焰逐渐接近当量比 1.0 状态，火焰尾部温度持续增加，引起热力型 NO 生成加剧；而在富燃条件下，随着当量比增大， O_2 供给量的减少使得火焰尾部 O 浓度迅速降低，导致热力型 NO 的生成受到显著抑制。由于热力型机理所含基元反应的反应速率在量级上与 NNH 机理相同，但其所处火焰后部高温区的范围却远比后者所处火焰内主反应区宽泛，因此，热力型机理主导了 H_2 火焰中 NO 的总产量。

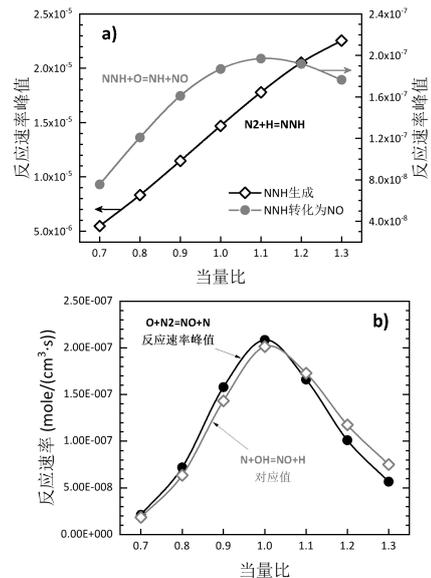


图3 两种机理关键基元反应的反应速率随当量比的变化情况: a) $N_2+H=NNH$ 和 $NNH+O=NH+NO$ 反应速率峰值; b) $O+N_2=NO+N$ 反应速率峰值及当地 $N+OH=NO+H$ 反应速率

3 含氢燃气燃烧 NO 生成特性

3.1 H_2/CO 混合燃气

H_2/CO 混合燃气存在于高炉煤气和合成气 [12,13]，不同 H_2 占比及当量比的 H_2/CO 预混火焰基本排放规律如图4所示。 H_2 占比 0%，即燃气中仅含 CO 的情况下，火焰传播速度极低，以致无法获得收敛的计算结果，这体现了 CO 单独燃烧的困难

性。因此，图4仅展示了H₂占比10%以上的火焰的计算结果。从图中可以看出，向H₂预混火焰中引入CO会引起NO排放单调增加，不同当量比条件下趋势一致。NO排放浓度随H₂占比的变化具有很强的非线性特征，从H₂预混火焰向H₂/CO预混火焰转变时，NO排放出现显著提升，随后持续增加，并且斜率同样有所增大。

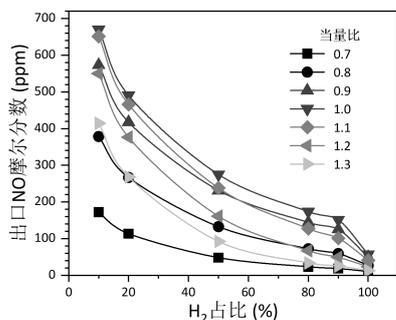


图4 当量比不同的H₂/CO预混火焰的NO排放浓度随H₂占比变化情况

鉴于不同当量比条件下H₂占比对NO排放的影响规律相同的结果，进一步以当量比1.0火焰为例，并挑选50% H₂占比，详细分析了火焰中NO的产率，结果如图5所示。H₂/CO预混火焰中NO的生成机理与H₂预混火焰相似，也包括火焰内部主反应区的NNH机理和火焰后部高温区的热力型机理。不同于图3所示的H₂预混火焰，H₂占比50%的H₂/CO火焰中热力型机理关键基元反应的反应速率峰值显著高于NNH机理对应的数值，几乎是后者的两倍。因此，在H₂/CO火焰中，热力型机理同样是NO的主要来源，并且相比于H₂火焰，热力型机理占比更高。

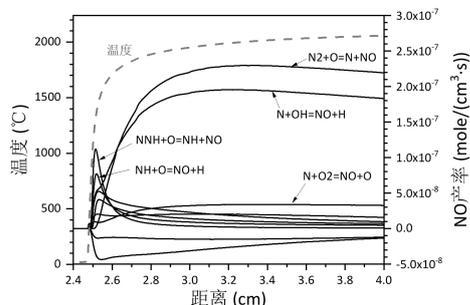


图5 当量比1.0, H₂占比50%的火焰中NO的产率分析

图6展示了当量比1.0火焰中NNH机理和热力型机理关键基元反应的反应速率峰值随H₂占比的变化情况。H₂占比对NNH机理的影响是单调的，

不论是NNH的生成还是其向NO的转化均随着H₂占比的减小而减弱。NNH机理存在的前提在于大量H₂的存在以保证足够的H供应，强化H和空气中N₂的结合，从而引发后续NO的生成。当H₂占比减小时，H₂供给量减少引起H的生成减弱，NNH机理的启动步受到限制，从而抑制了后续NO的生成。相比而言，H₂占比对热力型机理的关键基元反应的影响则较为复杂，经典的热力型机理包含的启动步，O+N₂=NO+N，及N+O₂=NO+O在H₂占比减少时都得到强化，但是扩展的热力型机理引入的N+OH=NO+H的基元反应则受到一定程度的抑制。尽管热力型机理包含的三个关键基元反应对H₂占比变化的响应不同，但是总的来说热力型机理随着H₂占比的减小是得到强化的。考虑到O/H自由基池在两种机理中都具有重要作用，进一步分析H₂占比对O/H自由基池的影响能够深入揭示NO两种生成机理对H₂占比改变的响应机制。

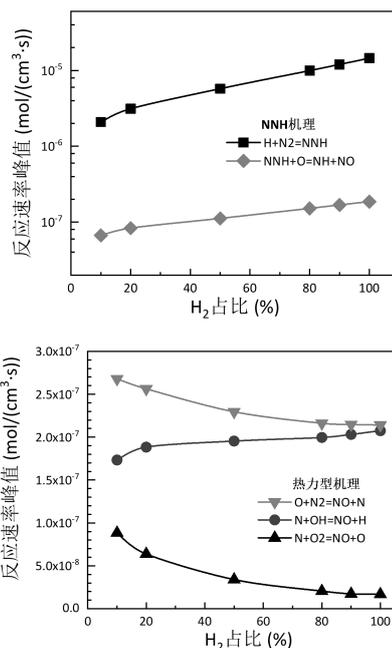


图6 当量比1.0条件下火焰中NNH机理和热力型机理关键基元反应的反应速率峰值随H₂占比的变化情况

图7展示了H₂占比不同的火焰中H、OH和O的浓度峰值。总的来说，随着H₂占比的减小，O/H自由基池总强度是降低的，对应着三种自由基最高浓度的总和逐渐减小。这主要是因为H₂的反应活性显著强于CO，随着H₂占比的减小，火焰内部的燃烧反应强度减弱。具体而言，H和OH浓度的变化趋势一致，随着H₂占比的减小，峰值呈现单调

下降的趋势。O 浓度的变化趋势相反，随着 H₂ 占比的减小反而逐渐增大。

O/H 自由基池强度和结构随 H₂ 占比变化发生显著改变的原因在于 H₂ 和 CO 燃烧特性的显著差异及二者在氧化过程中承担角色的显著不同。在 H₂ 火焰中，燃烧过程经过 O+H₂=OH+H, H+O₂=O+OH, H₂+OH=H₂O+H, 等一系列链分支和链传递反应实现。CO 的加入并不直接参与链分支过程，而是通过 CO+OH=CO₂+H 反应改变 O/H 自由基池的发展方向。CO 本身和 O₂ 之间的基元反应非常微弱，CO 的氧化基本都靠其与 OH 之间的反应进行，该反应在氧化 CO 的同时将 OH 转化为 H，后者和 O₂ 结合形成链分支，并返还 OH 继续参与 CO 向 CO₂ 的氧化。因此，尽管 CO 的氧化过程不直接产生 O，但是通过上述分析可知，实际上 CO 经由 OH 和 H 之间的相互转化实现氧化的同时，通过 H+O₂=O+OH 反应间接引起 O 的净生成。然而，CO 氧化的前提在于 H₂ 氧化过程中形成的 O/H 自由基池，尤其是 OH 自由基的生成，当 H₂ 占比减小时，H₂ 氧化过程整体强度的减弱使得 O/H 自由基池总强度减弱，强化的 CO 氧化过程无法改变 O/H 自由基池总强度的变化趋势，但能调整 O/H 自由基池的组成，使得 O 浓度反而增加，体现了整体氧化性的增强。这对热力型 NO 的生成具有至关重要的作用，对应着图 6 所示热力型机理启动步 O+N₂=NO+N 的反应速率随 H₂ 占比减小而增大的趋势。但是 OH 浓度的降低使得后续 N+OH=NO+H 反应反而受到微弱的抑制。然而，N 向 NO 的转化存在另外一条路径，即 N 和 O₂ 的反应，随着 H₂ 占比的降低，整体燃烧强度下降的另一个表现在于火焰尾部未燃尽 O₂ 量的增加。残余的较高浓度的 O₂ 强化了 N 经由 N+O₂=NO+O 向 NO 转化的过程。

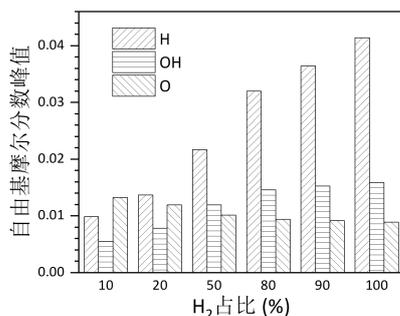


图 7 当量比 1.0 条件下火焰中 O/H 自由基池主要组分摩尔分数峰值随 H₂ 占比的变化情况

3.2 H₂/CH₄ 混合燃气

H₂/CH₄ 混合燃气不仅常出现在焦炉煤气等可燃工业废气中^[14]，并且作为一种有效降低天然气燃烧设备碳排放的方法而备受关注^[15]。图 8 展示了不同当量比及不 H₂ 占比条件下，H₂/CH₄ 预混火焰后部 NO 的排放浓度。总体上看，H₂ 占比对 NO 排放浓度的影响并不显著，在 H₂ 占比 0~100 % 范围内，除了富燃程度较大的情况（当量比≥1.2），不同 H₂ 占比条件下，火焰尾部 NO 排放浓度变化幅度不超过 15 ppm。为了更清晰地表明 H₂ 占比对 NO 排放的影响，图 8 也按 H₂ 占比重新整理了 NO 排放数据。尽管总体上看 H₂ 占比的影响不明显，但是贫燃和富燃条件下 NO 排放浓度随 H₂ 占比增大的变化趋势上仍然存在显著差异。在贫燃火焰中，NO 排在 H₂ 占比不超过 80 % 时基本不受影响，继续增大 H₂ 占比，NO 排放有一个明显的跃升。而在富燃火焰中，随着 H₂ 占比的增大，NO 排放先缓慢减小，然后在 H₂ 占比接近 100 % 时再次跃升，这种变化趋势在高当量比条件下变得更加显著。总的来说，在 H₂ 占比不高于 80 % 时，随着 H₂ 占比的增加，NO 排放存在减小的趋势，这在富燃火焰得以表现出来，但在贫燃火焰中受到某种抑制，未能表现，整体呈现 NO 排放基本稳定的结果。在 H₂ 占比接近 100 % 时，NO 排放显著增加，这在贫燃和富燃火焰中都是一致的。

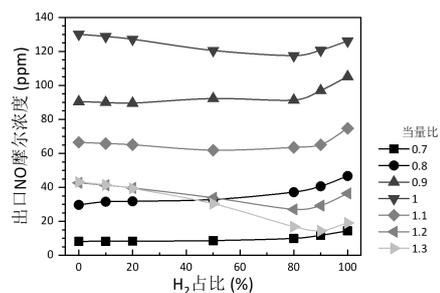
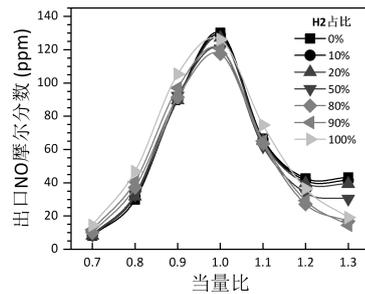


图 8 不同当量比和 H₂ 占比的 H₂/CH₄ 预混火焰的 NO 排放浓度

图9展示了H₂占比50%条件下,当量比0.8和1.2两种火焰中NO的产率分布。从图中可以看出,不论是富燃还是贫燃火焰,H₂/CH₄火焰中NO产率分布大致上与CH₄火焰一致,火焰内部NO的生成由快速型机理主导,火焰后部高温区内NO的生成由热力型机理主导,后者在富燃火焰中大大减弱。尽管H₂占比高达50%,NNH机理仍然没有得到体现,其原因在于CH₄氧化过程中对H自由基的强烈吸收作用引起H自由基浓度降低,从而抑制NNH的生成。图10进一步挑出了不同NO生成机理包含的关键基元反应,研究H₂占比的影响。

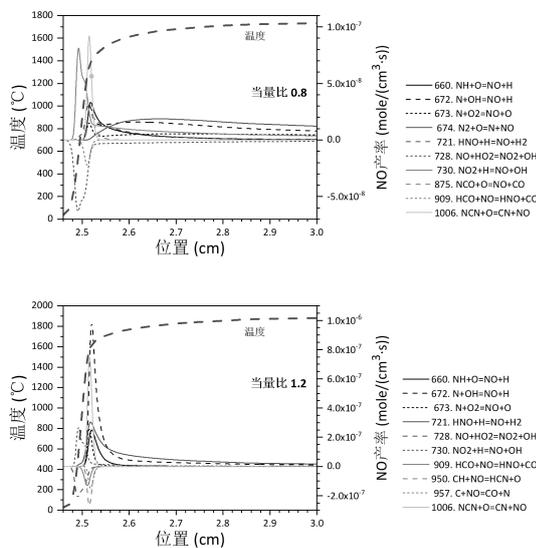


图9 H₂占比50%,当量比0.8和1.2的H₂/CH₄预混火焰中NO的产率分析

贫燃火焰中快速型机理和热力型机理都存在,分别由NCN+O=NO+CN及N₂+O=NO+N两个反应代替,前者峰值高但分布范围有限,后者峰值低但分布范围宽泛。图10统计了两个基元反应速率峰值的变化情况,可以看出随着H₂占比的增加,快速型机理的反应强度在H₂占比不超过80%时变化很小,随后发生快速下降,这显然是因为燃料中CH₄占比减小导致的。尽管如此,考虑到H₂的高反应活性,随着H₂占比的提高,火焰内反应区厚度将减小,故即使H₂占比不高时快速型机理的反应强度没有明显变化,但NO生成总量受到反应区厚度的限制必然有减小的趋势。但是,随着H₂占比增大,火焰后部高温区内热力型机理反应强度是增大的,这就导致快速型机理受抑制而引起的NO排放降低的趋势受到阻遏。在H₂占比接近100%时,燃

烧过程趋于H₂燃烧主导,对应地,NO生成机理过渡到热力型为主,因此,NO排放整体呈现增长趋势。

而在富燃火焰中,由于整体氧气不足,热力型NO的生成受到抑制,H₂/CH₄火焰在H₂占比不高时趋于由快速型机理主导,故随着H₂占比的增加,NO排放呈现下降趋势。而当H₂占比接近100%时,火焰又趋向于纯H₂火焰,快速型机理受到CH₄供给量锐减的影响而大幅减弱,燃烧产生的高温条件强化了热力型NO的生成,从而引起NO排放的回升。

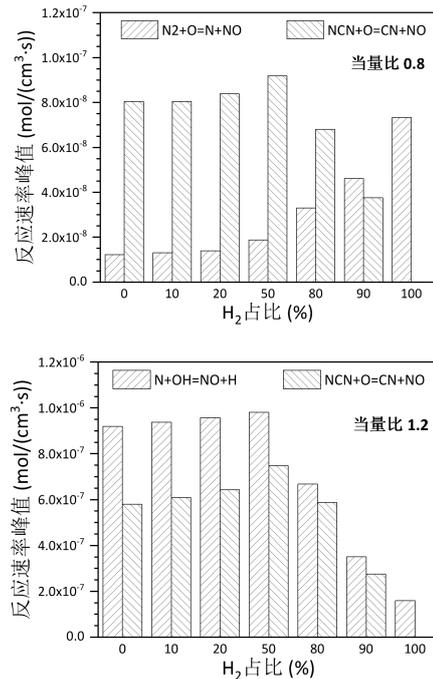


图10 当量比0.8和1.2的H₂/CH₄预混火焰中快速性机理和热力型机理关键基元反应的反应速率峰值随H₂占比的变化情况

3.3 H₂/NH₃混合燃气

NH₃是一种完全零碳的替代燃料,在实现碳减排的过程中起着重要的作用^[16],而将NH₃和H₂混合,能够有效改善NH₃的燃烧特性,让NH₃作为燃料的实际应用成为可能^[17]。图11展示了不同当量比和H₂占比的H₂/NH₃预混火焰的NO排放情况。从图中可以看出,掺入NH₃之后,NO排放浓度存在数量级上的提升,尤其是在贫燃条件下,NH₃火焰或H₂/NH₃火焰NO排放浓度比H₂火焰高两个数量级。H₂占比对NO排放存在显著影响,不同当量比条件下趋势基本相同,随着H₂占比的增加,NO排放浓度先增加后降低,峰值出现在H₂占比80%附近,这与文献报道的实验研究结果一致^[18]。

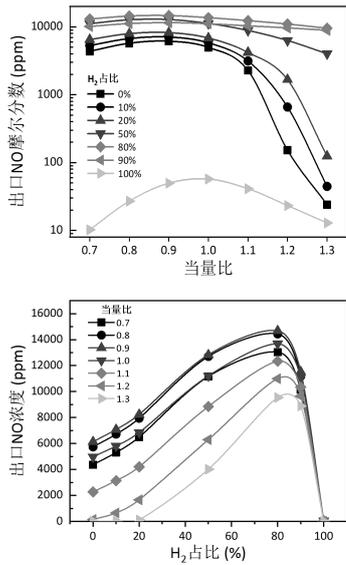


图 11 不同当量比和 H₂ 占比的 H₂/NH₃ 预混火焰的 NO 排放浓度

鉴于 H₂ 占比对 NO 排放的影响与当量比的弱相关性, 进一步针对当量比 1.0 的情形分析了 NH₃ 火焰及 H₂ 占比 80% 的 H₂/NH₃ 火焰中 NO 及相关含氮组分的产率, 根据分析结果梳理了 NO 生成和转化的主要路径。结果表明 NH₃ 火焰和 H₂/NH₃ 火焰中 NO 生成和转化的主要路径基本相同, 如图 12 所示。不同于前述火焰, 含 NH₃ 火焰中的 NO 主要来源于燃料中含有的 NH₃ 本身, 而非空气中的 N₂。NH₃ 在自由基池的作用下逐级脱氢, 氧化性自由基 OH 和 O, 以及 O₂ 分子的作用使得 NH_x (x=0, 1, 2) 自由基向 NO 转化, 同时, 生成的 NO 又会与 NH_x 结合, 被还原成 N₂, NO 的净生成量取决于这两种转化路径的综合结果。H₂ 占比的改变不会影响上述路径的基本形式, 但是会改变相关基元反应的反应速率, 以及各转化路径的占比。

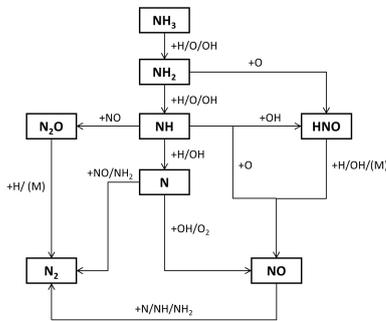


图 12 当量比 1.0 条件下, H₂ 占比 0% 和 80% 的 H₂/NH₃ 火焰中 NO 的主要生成和转化路径

图 13 展示了两种火焰中 NO 的敏感性分析结

果, 不论是 NH₃ 火焰还是 H₂/NH₃ 火焰, 对 NO 生成影响最大的都是 H+O₂=O+OH 这个链分支反应, 这体现了自由基池在 NH₃ 向 NO 转化过程中的重要作用。如前所述, 自由基池不仅负责完成 NH₃ 的脱氢, 即 NH_x 的生成, 而且主导 NO 的生成, 自由基池的强化自然有利于 NO 的生成, 但是 NH_x 的生成同样得到强化, 则会反过来增强 NO 的还原。图 13 展示的结果表明, 在两种火焰中 H+O₂=O+OH 都具有正的敏感性系数, 表明自由基池强化的净结果是加剧 NO 的生成。因此, 图 14 进一步比较了当量比 1.0, H₂ 占比不同的 H₂/NH₃ 火焰中该反应的反应速率峰值, 从图中可以看出, 随着 H₂ 占比的增大, 反应速率峰值近似呈指数型增长, 尤其是在 H₂ 占比低于 80% 的情况下。这就表明, 向 NH₃ 火焰中加入 H₂ 将显著强化 H+O₂=O+OH 反应及相应的自由基池, 从而大幅加剧 NO 的生成, 引起 NO 排放的增加。但由于 H₂/NH₃ 火焰中 NO 主要来源于燃料中的 NH₃, 当 H₂ 占比超过 80% 之后, 随着 H₂ 占比的增大, NH₃ 的供给量降低, 对应着 NO 生成所需的氮源减小, 因此, 当 H₂ 占比从 80% 增大到 100% 时, NO 排放浓度快速降低。

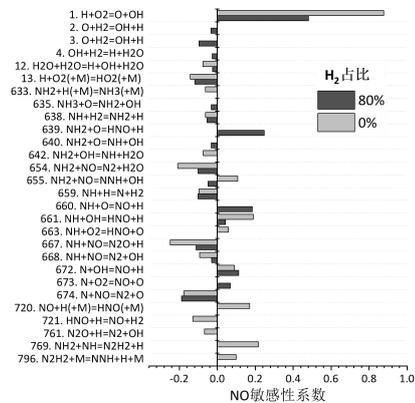


图 13 当量比 1.0 条件下, H₂ 占比 0% 和 80% 的 H₂/NH₃ 火焰中 NO 的敏感性分析

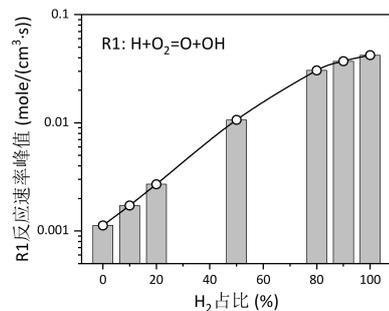


图 14 当量比 1.0 的 H₂/NH₃ 火焰中 H+O₂=O+OH 的反应速率峰值随 H₂ 占比的变化情况

4 结语

本文计算了 H_2 、 H_2/CO 、 H_2/CH_4 及 H_2/NH_3 四种预混火焰, 获得了 NO 排放的基本规律, 并通过产率分析、敏感性分析及自由基池分析明确了 NO 的生成机理, 以及 H_2 占比的影响机制。

H_2 预混火焰中 NO 的生成存在火焰内部的 NNH 机理和火焰后部高温区的热力型机理, 后者主导了 NO 的生成。 CO 的加入不改变 NO 的生成机理, 但其氧化反应强化了 O 的生成, 从而加剧了热力型 NO 的生成, 导致 NO 排放增加。

H_2/CH_4 火焰中 NO 的生成机理基本与 CH_4 火焰一致, 包括火焰内部的快速性机理和火焰后部的热力型机理, H_2 占比对 NO 排放的影响相对较小。

H_2/NH_3 火焰中 NO 的生成主要来源于燃料中含有的 NH_3 本身, NO 排放浓度比 H_2 火焰高两个数量级。 NO 的生成与火焰中自由基池密切相关, H_2 占比的增加显著增强 $H+O_2=O+OH$ 反应及相应的自由基池, 从而加剧 NO 的生成。而当 H_2 占比超过 80% 之后, NH_3 供给量的减小引发 NO 排放浓度急速下降。

参考文献

- [1] 王一坤, 雷小苗, 邓磊等. 可燃废气利用技术研究进展(I):高炉煤气、转炉煤气和焦炉煤气[J]. 热力发电, 2014, 43(7): 1-9+14
- [2] 王一坤, 陈国辉, 雷小苗等. 可燃废气利用技术研究进展(II): 填埋气、火炬气、伴生天然气和煤矿瓦斯 [J]. 热力发电, 2014, 43(8): 1-13+8
- [3] CESARO Z, IVES M, NAYAK-LUKE R, et al. Ammonia to power: Forecasting the levelized cost of electricity from green ammonia in large-scale power plants [J]. Applied Energy, 2021, 282: 116009
- [4] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1): 109-33
- [5] BENÉS M, POZO G, ABÍÁN M, et al. Experimental study of the pyrolysis of NH_3 under flow reactor conditions [J]. Energy & Fuels, 2021, 35(9): 7193-200
- [6] HAN X, WANG Z, COSTA M, et al. Experimental and kinetic

modeling study of laminar burning velocities of NH_3 /air, NH_3/H_2 /air, NH_3/CO /air and NH_3/CH_4 /air premixed flames [J]. Combustion and Flame, 2019, 206: 214-26

- [7] FRANCO M C, ROCHA R C, COSTA M, et al. Characteristics of NH_3/H_2 /air flames in a combustor fired by a swirl and bluff-body stabilized burner [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5129-38
- [8] 石祥, 罗光前, 戴方钦等. 低 NO_x 及高效燃气燃烧技术研究; proceedings of the 第十一届全国能源与热工学术年会, 中国安徽马鞍山, F, 2021 [C]
- [9] 吴雪晴. 新型低 NO_x 燃气燃烧器的数值模拟与实验研究 [D]; 长沙理工大学, 2015
- [10] GLARBORG P, MILLER J A, RUSCIC B, et al. Modeling nitrogen chemistry in combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 67: 31-68
- [11] HAN X, LUBRANO LAVADERA M, KONNOV A A. An experimental and kinetic modeling study on the laminar burning velocity of NH_3+N_2O +air flames [J]. Combustion and Flame, 2021, 228: 13-28
- [12] ZHOU S, YANG W, TAN H, et al. Experimental and kinetic modeling study on NH_3 /syngas/air and NH_3 /bio-syngas/air premixed laminar flames at elevated temperature [J]. Combustion and Flame, 2021, 233: 111594
- [13] 王新东, 朱廷钰, 李玉然. 高炉煤气脱硫技术研究进展 [J/OL]. 过程工程学报: 1-10 [2023-02-23]
- [14] 李志强, 王华, 李孔斋. 焦炉煤气制氢技术研究进展 [J/OL]. 洁净煤技术: 1-20 [2023-02-23]
- [15] 时浩, 吕杨, 谭更彬. 天然气管道掺氢输送可行性探究 [J]. 天然气与石油, 2022, 40(4): 23-31
- [16] CARDOSO J S, SILVA V, ROCHA R C, et al. Ammonia as an energy vector: Current and future prospects for low-carbon fuel applications in internal combustion engines [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296: 126562
- [17] VALERA-MEDINA A, PUGH D G, MARSH P, et al. Preliminary study on lean premixed combustion of ammonia-hydrogen for swirling gas turbine combustors [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(38): 24495-503
- [18] ZHU X, KHATEEB A A, GUIBERTI T F, et al. NO and OH^* emission characteristics of very-lean to stoichiometric ammonia-hydrogen-air swirl flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5155-62

汽轮机筒形汽缸长期运行变形研究

章艳 陈贝贝 刘伟鹏 刘晋宾 赵春芳

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 筒形缸具有结构对称性好, 温度场、应力场均匀、热应力小、安全可靠高等优点, 被广泛应用于高参数大容量的汽轮机组。随着大量筒形缸检修周期的到来, 选取典型机组结合机组运行数据模拟汽缸由初始运行至一个大修期结束返厂拆解检修过程, 提取各运行阶段汽缸中分面变形数据, 并将汽缸拆解后自由状态下变形值与实测数据对比, 验证分析的准确性。就红套环初始过盈量、汽缸材质、运行时内外壁温差对汽缸长时运行后变形影响进行对比分析, 提出汽轮机筒形汽缸长时变形控制建议。

关键词: 筒形缸; 高温蠕变; 长时运行; 拆解; 检修; 变形

中图分类号: TK26

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0028-03

Research on Deformation of Steam Turbine Cylindrical Casing During Long-time Running

ZHANG Yan, CHEN Beibei, LIU Weipeng, LIU Jinbing, ZHAO Chunfang

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

Abstract: The cylindrical cylinder has the advantages of good structural symmetry, uniform temperature field and stress field, small thermal stress, high safety and reliability, and is widely used in high parameter and large capacity steam turbine units. With the arrival of large-number of cylindrical casing maintenance period, select a typical unit to simulate the cylinder deformation process from initial operation to the end of an maintenance period ,also include after disassembly and overhaul. Extract the cylinder split deformation data at each operation stage, and compare the deformation value with the measured data to verify the accuracy of the analysis. The influence of initial interference of fastening ring, cylinder material, temperature difference between inner and outer walls during operation on the deformation of cylinder after long-time running is analyzed and compared, and the suggestions for long-time deformation control of steam turbine cylindrical casing are put forward.

Keyword: cylindrical casing; high temperature creep; long-time running; disassembly; overhaul; deformation

随着汽轮机容量和进气参数不断提高, 汽缸的几何尺寸也不断增大, 机组启动、停机和变工况时, 汽缸法兰内外壁温差过大, 从而产生很大的热应力, 直接影响机组的安全可靠性。红套环筒形缸具有结构对称性好, 温度场、应力场均匀、热应力小、安全可靠高等优点, 被广泛应用于高参数汽轮机组^[1]。东方汽轮机有限公司首个高压筒形汽缸结构应用于华润电力焦作 660 MW 超超临界燃煤发电

组工程项目, 并于 2014 年 12 月投入运行, 其#1 机于 2019 年 4 月返厂检修, 为公司首台返厂检修筒形汽缸。后续安源、荏平等项目筒形汽缸也相继进行了检修。本文通过选取典型机组筒形汽缸由投运到长时运行停机拆解后这个过程的数值仿真, 结合筒形汽缸拆解前后汽缸、红套环测量数据进行分析, 研究汽缸长时运行后变形的规律, 并对汽缸变形控制影响因素进行分析。

收稿日期: 2022-12-24

作者简介: 章艳 (1983—), 女, 2006 年毕业于哈尔滨工程大学工程力学专业, 高级工程师。现在东方电气集团东方汽轮机有限公司主要从事汽轮机结构可靠性分析工作。

1 筒形汽缸结构综述

某典型超超临界机组高压进气参数为 25 MPa, 600 °C, 其高压内缸采用紧凑圆筒形汽缸结构, 汽缸采用下进气方式; 前轴封处布置有一个红套环结构, 进气腔室后通流位置布置有 6 个红套环结构; 进气腔室位置采用法兰结构, 两边各布置有 3 颗中分面螺栓。各红套环根据机组密封性要求与汽缸间为过盈装配。筒形缸外壁布置有隔热罩结构。高压内外缸间夹层无挡汽板结构 (图 1)。

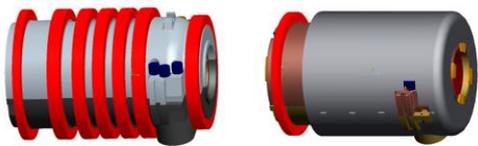


图 1 红套环筒形汽缸三维结构图

2 筒形缸数值仿真分析

本次计算采用大型结构分析软件 ABAQUS。分析模型包含了复杂的接触关系有红套环与内缸的过盈接触、内缸上下半中分面接触、紧固螺栓与法兰的接触。

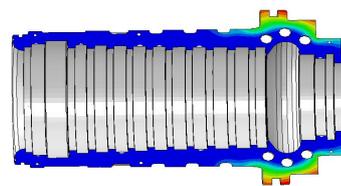
通过建立三维非线性接触有限元模型^[2], 进行红套环筒形内缸由初始安装到长时稳定运行后弹塑性及高温蠕变分析, 再到红套环拆解后汽缸及红套环弹塑性变形分析, 并与实测数据进行对比。最后根据变形情况对筒形缸变形影响因素进行分析, 优化改进长期运行性后汽缸变形问题。

根据机组现场实际运行温度测点数据, 高压筒形内缸内外壁温差较大, 一般为 100~150 °C 左右。机组返厂检修拆解红套环以及中分面螺栓后, 对自由状态时汽缸上下半中分面各位置张口量进行测量: 最大张口量位于汽缸内壁高压进气腔室位置, 张口量值随着通流级次递减, 高压排汽位置张口量为进气腔室 26 %。汽缸厂内拆解如图 2 所示。

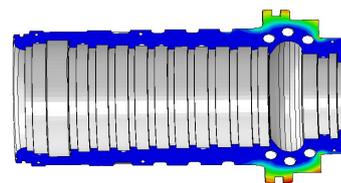


图 2 筒形汽缸返厂检修拆解

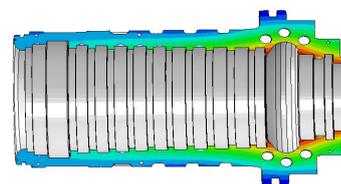
温差 150 °C 时汽缸由初始投运到长时运行以及最终停机拆解后中分面的张口量分布云图如图 3 所示。初始稳定运行工况下, 汽缸内壁均无张口, 仅螺栓外侧法兰存在外张口; 长时高温运行, 汽缸、红套环、螺栓发生高温蠕变以及高应力区塑性变形, 4 万小时后汽缸内壁均无张口, 仅螺栓外侧法兰存在外张口; 汽缸停机拆解后, 汽缸水平中分面将产生较大的变形, 最大张口量位于进气腔室附近, 为实测最大张口量的 96 %, 数值仿真结果较好的吻合了实测数据。



(a) 初始稳定



(b) 长时运行



(b) 停机拆解

图 3 汽缸中分面张口量分布云图

为了研究温差对汽缸变形的影响, 对汽缸在内外壁温差为 100 °C、50 °C 条件下由初始运行至长期运行停机拆解后汽缸水平中分面的变形进行分析。不同温差条件下, 汽缸中分面最大张口量对比如表 1 所示 (表中数值均为归一化结果)。从表中可以看出, 内外壁温差由 150 °C 减小为 50 °C 时, 停机拆解后中分面变形最大值将由 1 减小为 0.26。机组运行过程中内外壁温差是影响汽缸的变形的重要因素。

表 1 不同温差条件下汽缸中分面最大张口量对比

汽缸内外壁温差(°C)	初始稳定运行	停机拆解红套环及螺栓后
50 °C	0.02	0.26
100 °C	0.06	0.69
150 °C	0.1	1

除温差影响外，红套环与汽缸间初始安装过盈量大小，汽缸材质抗高温蠕变性能差异也会对汽缸长时运行后变形大小产生影响。各分析条件下，汽缸沿通流各级次位置变形分析结果如图4所示（表中数值为归一化结果）。综合考虑中分面汽密性需求，将红套环初始过盈量减小15%后，计算分析得汽缸长时运行拆解后中分面最大张口量减小4.6%，即红套环过盈量对汽缸变形影响较小。将汽缸由原来的材料换成具有更高抗高温蠕变性能的镍基材料，计算分析得汽缸长时运行拆解后中分面最大张口量将减小13.2%，可以减小汽缸变形，但结合成本考虑总体收益不大。

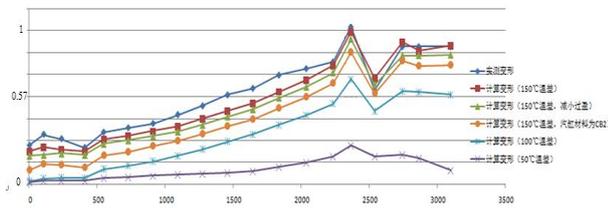


图4 仿真分析结果与实测数据对比

(上接第7页)

5 结语

提供的基于特征提取的实时故障程度诊断系统及方法，能够根据初始特征实时诊断故障程度和故障发展趋势，采用实时特征和历史运行数据得到故障预测信息，根据故障程度、故障发展趋势和故障预测信息做出正常运行、带故障持续运行、带故障减负荷运行、持续观察、尽快维修、立即停机维

3 结语

由上述计算分析可得出以下结论：

(1) 筒形汽缸长时运行拆解后自由状态下中分面变形数值仿真与实测数据较为相符，仿真结果能够较为准确的反映汽缸的真实变形。

(2) 筒形汽缸材料以及红套环初始过盈量的大小对汽缸长期运行后中分面变形影响较小。

(3) 筒形汽缸内外壁温差是导致汽缸水平中分面变形的主要原因，温差越大变形越大。因此减小筒形汽缸水平中分面变形的最有效措施为减小汽缸内外壁温差。

参考文献：

- [1] 中国动力工程协会. 火力发电设备技术手册:第2卷,汽轮机[M]. 北京:机械工业出版社,2007
- [2] 史进渊,杨宇,邓志成. 大功率电站汽轮机寿命预测与可靠性设计[M]. 北京:中国电力出版社,2011

修等运维建议，带故障运行时给出安全运行范围避免发生不可逆故障。

参考文献：

- [1] 郝达智. 基于时序理论的连锁故障模式搜索方法研究[D]. 华北电力大学硕士学位论文,2009
- [2] 王安东,孙福春,曹志伟等. 一种水内冷电机定子线棒股线堵塞程度确定系统及方法:中国,CN109520563B[P]. 2021-05-28

欢迎投稿，欢迎订阅！

离心压缩机不同结构排汽蜗壳性能分析

王娟丽 王鑫 陶功新 赵海峰 钱禹龙

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 排汽室的性能对离心压缩机经济性影响很大, 目前离心压缩机普遍使用切向排汽蜗壳, 其排汽蜗壳流场稳定, 气动性能较好。排汽蜗壳设计时不仅需要考虑气动性能如总压损失系数、静压恢复系数的高低, 同时需要考虑结构紧凑性。本文针对某单级离心压缩机, 给出了切向排汽蜗壳设计原理, 使用大型3D数值分析软件CFX, 对比分析了4种不同结构的排汽蜗壳, 得出蜗壳外径一定的条件下, 并不是无叶扩压器越长性能越好; 无叶扩压器与排汽蜗壳完全相切时性能最佳。

关键词: 切向排汽蜗壳; 3D数值分析; 总压损失系数; 静压恢复系数

中图分类号: TK26

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0031-04

Analysis of Different Exhaust Volute Structures of Centrifugal Compressor

WANG Juanli, WANG Xin, TAO Gongxin, ZHAO Haifeng, QIAN Yulong

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

Abstract: The performance of the exhaust volute has great influence on the economy of the centrifugal compressor. At present, the tangential exhaust volute is widely used in the centrifugal compressor. The design of exhaust volute not only needs to consider the aerodynamic performance such as the total pressure loss coefficient and the static pressure recovery coefficient, but also needs to consider the compact structure. In this paper, the design principle of tangential exhaust volute is given, and four kinds of volute with different structures are compared and analyzed by using the 3D numerical analysis software CFX. When the outer diameter of the volute is certain, the best performance is not obtained when the vaneless diffuser is the longest, but when the vaneless diffuser is completely tangent to the exhaust volute.

Key words: Tangential exhaust volute; 3D numerical calculation; total pressure loss coefficient; static pressure recovery coefficient

排汽室是旋转机械通流设计的关键部件, 其气动性能直接影响旋转机械经济性^[1,3]。离心压缩机排汽蜗壳主要作用是收集叶轮或者扩压器出口的气体。通常, 蜗壳是离心压缩机中效率最低的通流元件之一, 因此蜗壳设计的基本要求是:

- (1) 总压损失小, 静压恢复高。
- (2) 满足对蜗壳出口管道流速提出的设计要求。

本文首先给出了排汽蜗壳设计原理, 然后以某单级离心压缩机排汽蜗壳为例, 以无叶扩压器到排汽蜗壳出口为计算模型, 使用 3D 数值分析软件 CFX, 对比分析了 4 种不同排汽蜗壳结构的气动性

能。

1 排汽蜗壳设计原理

排汽蜗壳设计需考虑的性能参数有总压损失系数, 静压恢复系数, 其计算公式:

$$\text{总压损失系数: } P_{\text{loss}} = \frac{P_1^* - P_2^*}{P_1^*} \quad (1)$$

$$\text{静压恢复系数: } \xi = \frac{P_2 - P_1}{P_1^* - P_1} = \frac{P_2 - P_1}{\rho_1 \frac{v_1^2}{2}} \quad (2)$$

收稿日期: 2022-12-14

作者简介: 王娟丽 (1987—), 女, 2013年毕业于西安交通大学热能工程专业, 硕士, 高级工程师。现在东方电气集团东方汽轮机有限公司, 主要从事产品研发工作。

其中 p_1 蜗壳入口静压, p_2 蜗壳出口静压, p_1^* 蜗壳入口总压, p_2^* 蜗壳出口总压, ρ_1 蜗壳入口密度, v_1 蜗壳入口速度。

整个排汽腔室截面积从最大截面到零截面是一个渐变过程。图1给出排汽蜗壳二维平面图。

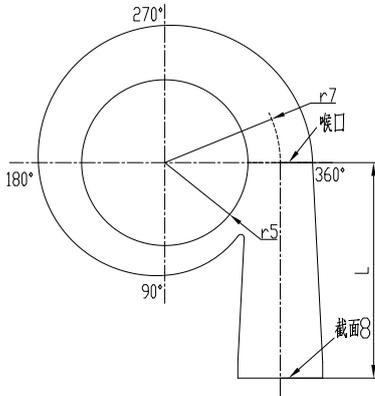


图1 排汽蜗壳二维平面图

蜗壳内基本流动规律, 等环量、连续的流动。

下标 5 表示扩压器出口, 下标 7 表示蜗壳喉部截面。

$$\text{连续方程 } 2\pi r_5 b_5 c_{m5} = A_7 c_7 \quad (3)$$

$$\text{动量方程 } r_5 c_{u5} = r_7 c_7 \quad (4)$$

360°截面面积, 即喉部面积

$$A_7 = 2\pi r_7 b_7 / \tan \alpha_5 \quad (5)$$

蜗壳其他截面面积与圆周角 φ 呈线性关系。即

$$\frac{A_\varphi}{\varphi} = \frac{A_7}{360^\circ} \quad (6)$$

排汽蜗壳只收集切向速度, 子午流速在蜗壳中消失, 为静压恢复的一部分。

因此蜗壳截面面积设计中, 只需要知道扩压器出口宽度、气流角度、出口半径, 利用公式 (5) 即可求得蜗壳最大截面半径, 利用公式 (6) 可得其他截面半径。

截面 7-8 的设计, 为了减少分离损失, 一般采用控制流道当量扩张角 θ_{eq} , 通常希望 $\theta_{eq} \leq 6^\circ$ 。

$$\tan \frac{\theta_{eq}}{2} = \frac{A_8 - A_7}{L\sqrt{\pi}} \quad (7)$$

2 不同排汽蜗壳结构对比

2.1 计算边界

以某单级离心压缩机为例, 分析不同排汽蜗壳

结构气动性能的影响, 排汽蜗壳截面设计按照前述原理进行设计。计算边界如表 1。

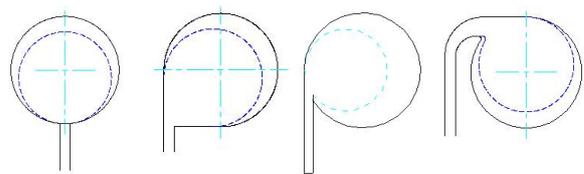
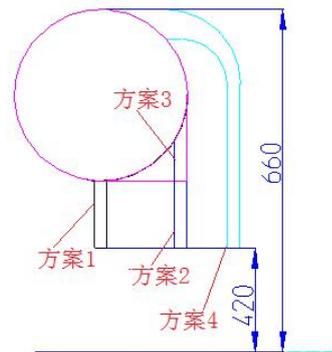
表1 计算边界

参数	单位	数值
入口切向夹角	°	68.3
入口总压	kPa	380
入口温度	°C	240
出口质量流量	kg/s	4.31

2.2 计算模型

本次设计的离心压缩机半径较大, 为保证气动性能基础上, 应尽可能使得结构更加紧凑, 需减小扩压器、排汽蜗壳外径。考虑到无叶扩压器与排汽蜗壳的总压损失系数、静压恢复系数相同数量级, 并且通常情况下排汽蜗壳的静压恢复系数更高, 总压损失系数更小。因此可减小扩压器外径, 通过选择更优的排汽蜗壳来补偿扩压器缩短带来的损失。

计算中保证蜗壳外径相等, 计算模型为无叶扩压器+排汽蜗壳, 计算模型入口为无叶扩压器入口, 蜗壳截面半径完全相等。方案 4 扩压器与蜗壳外径处连接, 此方案无叶扩压器外径是叶轮外径的 1.5 倍, 扩压器长度最长。方案 2、方案 3 的扩压器与蜗壳完全相切, 方案 1 扩压器在蜗壳内径连接, 对比下面 4 种蜗壳方案, 方案 1~4 的无叶扩压器由短到长。如图 2 所示。



方案1

方案2

方案3

方案4

图2 不同结构排汽蜗壳

2.3 计算结果分析

表 2 可见方案 3 性能最好，总压损失最小，静压恢复系数最大，方案 2 次之。方案 4 性能最差，总压损失系数最大，静压恢复系数最小。

表2计算结果

方案	总压损失系数%	静压恢复系数%
方案 1	2.17	64.5
方案 2	2.35	65.4
方案 3	1.94	67.4
方案 4	2.47	57.1

图 3 可见方案 4 在蜗舌到出口的一段排气管中有较多低速脱流团。图 4、图 5 截面流线图可以看出，不同的方案流线分布不同，方案 3、2 气流经过扩压器流入蜗壳截面，形成一个大漩涡，截面流线分布均匀，流场稳定。方案 1 最大截面流线可以看出，气流冲入腔室后，形成两个涡，气流分布较均匀。方案 4 最大截面气流进入腔室，形成两个涡，两个涡互相影响，气流分布不均匀，流场不稳定。

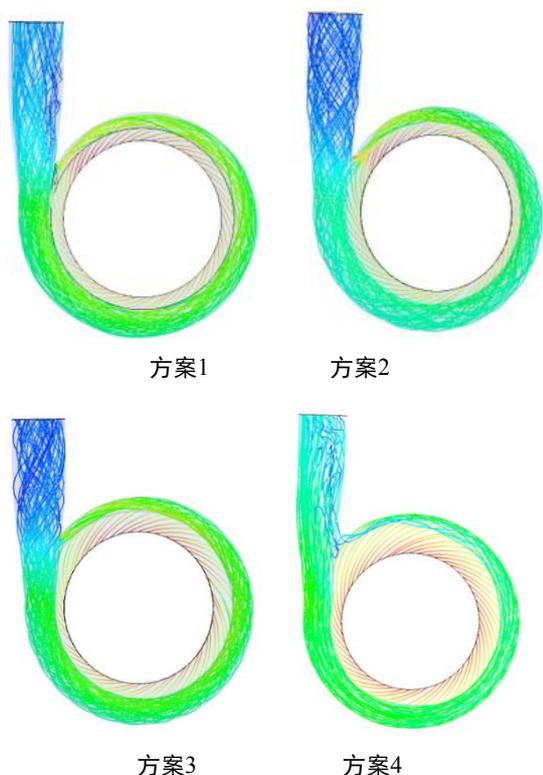


图3 三维流线图

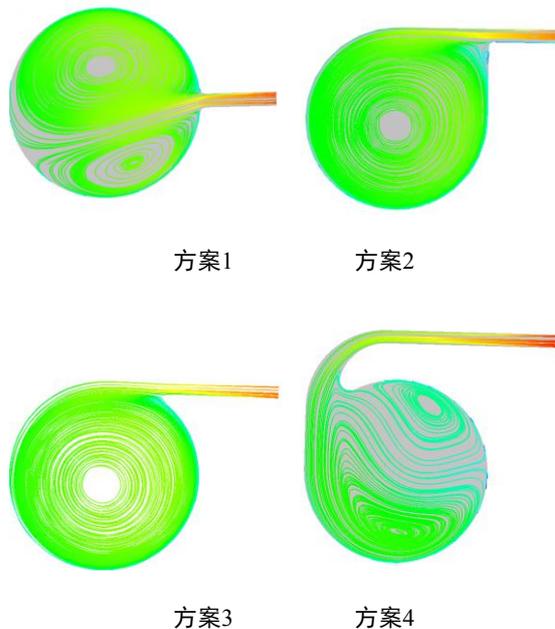


图4 最大截面流线图

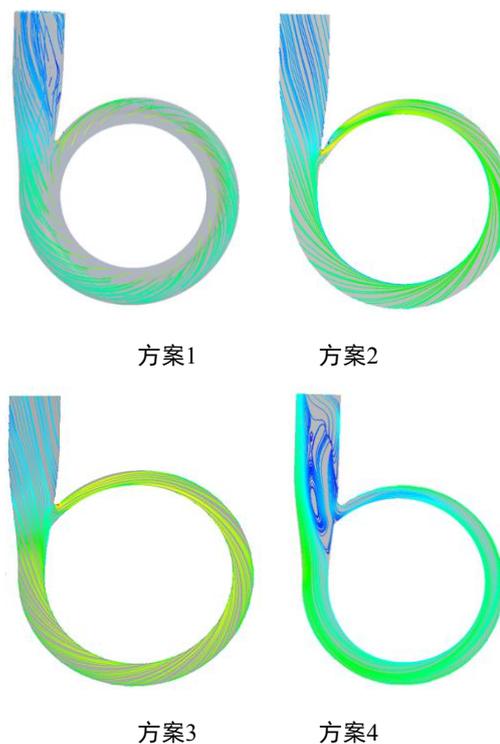


图5 最大截面流线图

3 结语

离心压缩机排汽蜗壳设计时，蜗壳截面设计符合基本流动规律，连续的等环量流动，最大截面面积只与扩压器出口宽度，半径，排汽角有关。对比分析了 4 种常见的排汽蜗壳结构，得出如下结论：

(1) 扩压器与蜗壳外径连接(方案4), 虽然无叶扩压器最长, 但其总压损失最大, 静压恢复系数最小, 性能最差。可见并不是无叶扩压器越长性能越好。

(2) 方案3性能最好, 总压损失最小, 静压恢复系数最大。方案2次之。即扩压器与蜗壳完全相切时, 流场稳定, 性能佳。

(3) 排汽蜗壳外径相等的情况下, 4种方案总压损失相近, 静压恢复系数也没有突变, 因此以后设计时根据结构需要进行选择, 可以相应地牺牲扩压器长度。

(上接第19页)

2017(2):86-94

- [12] 王勇, 高志远, 刘金永等. 电力控制系统信息安全实验平台设计[J]. 自动化博览, 2018, 35(S2):84-87
- [13] 刘焜, 田决, 王稼舟等. 信息物理融合系统综合安全威胁与防御研究[J]. 自动化学报, 2019, 045:5-24
- [14] 汤奕, 陈倩, 李梦雅等. 电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17):59-69

集团要闻

东方电气集团与四川大学共建“联合创新研究院”

2023年3月14日, 东方电气集团与四川大学共建“联合创新研究院”签约暨揭牌仪式在四川大学举行。东方电气集团党组书记、董事长俞培根, 党组副书记、董事宋致远, 四川大学党委书记甘霖, 校长、党委副书记汪劲松共同为“东方电气集团—四川大学联合创新研究院”揭牌, 并见证合作协议签约。

俞培根对东方电气集团-四川大学联合创新研究院的成立表示祝贺。他指出, 双方共同建设联合创新研究院, 是全面贯彻落实党的二十大精神和全国两会精神、全面落实习近平总书记系列重要指示批示精神的具体举措, 是推动双方创新链产业链资金链人才链深度融合、加速科技成果向现实生产力转化、提升创新体系整体效能的务实行动, 希望双方以联合创新研究院为平台, 进一步深化产学研合作, 加快关键核心技术攻关, 发挥创新主体作用, 完善系统创新机制, 加强人才培养和引进, 为我国建设世界重要人才中心和创新高地贡献力量。

甘霖对东方电气集团长期以来对四川大学的支持表示感谢。他指出, 东方电气集团和四川大学都是中央部署在四川的“国家队”, 加强校企合作, 服务国家重大战略, 促进地方高质量发展, 是双方义不容辞的责任和使命。希望双方以共建联合创新研究院为契机, 深化校企合作, 共同开展重大科技攻关, 联合培养一流科技人才, 建设示范性校企创新联合体, 打造国家战略科技力量, 助力国家高水平科技自立自强。

张彦军简要介绍了东方电气集团与四川大学前期合作情况, 汇报了筹建联合创新研究院、遴选科研合作课题、深化高层次人才合作等方面工作推进情况和未来合作展望。东方电气集团总经理助理、股份公司副总裁王为民, 双方相关单位负责人参加活动。

阔步新征程, 昂首向未来。东方电气集团将与四川大学一起, 以联合创新研究院成立为契机, 进一步开放合作, 携手打造世界一流的人才中心和科技创新高地, 为我国实现高水平科技自立自强、如期全面建成社会主义现代化强国贡献应有力量。

(来源: 东方电气网)

参考文献

- [1] 王娟丽, 尹明艳, 钱禹龙等. 基于遗传算法的某350 MW机组低压排汽缸自动优化[J]. 东方电气评论, 2019, 33(2):18-21
- [2] 江生科, 彭英杰. 大型汽轮机低压排汽缸气动分析研究[J]. 东方汽轮机, 2014(2):1-4+10
- [3] Liu Meng, Chen Yang, Zhong Zhuhai et al. Numerical Tests on the Effect Factors of the Last Stage Blade for Low Pressure Exhaust Hood Simulation[C]. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2017, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines: GT2017-63964
- [15] 张传远, 杨夏祎, 梁薇等. 电力工控系统攻击威胁分析技术研究[J]. 电气应用, 2019, 38(2):85-90+107
- [16] 王轶楠, 林彦君, 李焕, 林志赞, 徐文渊, 杨强, 颜钢锋等. DoS攻击下电力网络控制系统脆弱性分析及防御[J]. 控制与决策, 2017, 32(3):411-418
- [17] 王超莹, 陈智, 张道, 刘朝晖, 刘明明. 核电厂安全级DCS拒绝服务攻击及防御策略研究[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(11):25-28+38

调节级单通道与全周数值方法对比研究

白昆仑 平艳 钟主海 范立华

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文以某350 MW亚临界机组为研究对象, 采用单通道和全周两种数值模拟方法, 分析了调节级在VWO、THA和75%THA工况下的性能。结果表明: 由于单通道模型未考虑部分进汽、进汽室等影响因素, 对调节级内复杂流场的模拟不准确, 所得损失明显较低, 进而导致效率明显高于全周计算结果。此外, 单通道和全周计算得到的调节级动叶域内的损失差异较静叶域内更大, 导致单通道计算得到的压力反动度明显低于全周计算结果, 以压力反动度为输入参数, 计算得到的调节级轴向推力值差异也较大。实际工程中, 评估调节级推力时, 建议以全周计算得到的压力反动度为输入参数。

关键词: 调节级; 压力反动度; 效率; 轴向推力

中图分类号: TK26

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2023)01-0035-05

Comparative Study of Single-channel Model and Complete-cycle Model Numerical Simulation Based on Control Stage

BAI Kunlun, PING Yan, ZHONG Zhuhai, FAN Lihua

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

Abstract: Based on a 350MW subcritical steam turbine, the performance of control stage at VWO, THA and 75%THA conditions are investigated by using single-channel model and complete-cycle model numerical simulation. The results show that, because the single-channel model simulation ignores the influence of partial admission and steam admission, it can not simulate the flow distribution in control stage accurately, so the loss of control stage calculated is lower than that calculated by using complete-cycle model, which leads higher efficiency. Furthermore, the difference of loss in blade calculated by using single-channel model and complete-cycle model is much higher than that in vane, so the pressure reaction calculated by using single-channel model is lower than that calculated by using complete-cycle model, which affects the calculated values of axial thrust significantly. The pressure reaction calculated by using complete-cycle model is suggested to use in calculating axial thrust of control stage in engineering.

Key words: control stage; pressure reaction; efficiency; axial thrust

在向世界庄重承诺实现“碳达峰”和“碳中和”的目标后, 中国作为全球火电装机规模最大的国家, 推进煤电清洁、高效、灵活和高质量发展, 已成为势在必行的选择。

喷嘴调节具有一次调频能力强、调节灵活性高等优点, 广泛应用于各功率等级火电机组^[1]。调节级焓降一般为高压缸压力级焓降的两倍左右, 调节级效率直接影响高压缸整缸效率, 调节级压力反动度是计算机组轴向推力的重要参数, 因此, 调节级

效率和压力反动度对评估机组的经济性和安全性至关重要^[2]。

调节级内汽流压力和温度高, 比容小, 导致叶片高度短, 为保证变工况运行时的安全性, 调节级叶栅轴宽较大, 导致叶片根、顶部二次流严重。此外, 调节级通常为部分进汽设计, 级内汽流的均匀性和稳定性差^[3], 给准确计算调节级效率和压力反动度带来一定的难度。

采用商业 CFD 软件进行数值模拟是分析调节

收稿日期: 2022-05-12

作者简介: 白昆仑 (1989—), 男, 2014年毕业于西安交通大学能源与动力工程学院动力工程专业, 硕士, 工程师。现在东方电气集团东方汽轮机有限公司产品研发中心工作, 主要从事气动研发和气动试验工作。

级性能的重要手段^[4]，通常有单通道模拟和全周模拟两种方式。单通道模拟网格数少、易收敛，对计算机资源要求低，可用于快速对比调节级性能优劣和初步验证通流能力。全周模拟考虑了部分进汽对调节级的影响，与实际情况更接近，准确性高，可用于详细分析调节级内的复杂流动特性。

在实际工程中，调节级设计一般依赖于基于单通道模型的 CFD 计算结果，并根据经验，对效率进行修正。部分机组投运后，实测轴承推力与设计值有一定的偏差，这与调节级压力反动度评估不准确导致推力计算值与实际值存在偏差有一定的关系。

本文以某 350 MW 亚临界机组调节级为研究对象，采用商业 CFD 软件 CFX，分析对比了单通道和全周两种模拟方法得到的调节级效率和压力反动度，并评估了压力反动度差异对调节级轴向推力计算值的影响，为后续调节级的研发和工程应用提供有益参考。

1 调节级参数

调节级动叶为整圈设计，静叶为部分进汽设计，有四个进汽扇区(I、II、III、IV)，分别对应四个进汽调节阀(GV1、GV2、GV3、GV4)，排列方式如图 1 所示，其中 I、II 和 III 号进汽扇区的叶片支数相等，IV 号进汽扇区的叶片支数略少于其它三个进汽扇区。实际运行中，VWO 工况时为四阀点，也就是四个调节阀全部开启，THA 工况时为三阀点，GV1、GV2 和 GV3 开启，75%THA 工况时为两阀点，GV1 和 GV2 开启。单阀进汽时，非对称汽流会导致较大的汽流激振力，影响调节级乃至整个机组运行的安全性，因此，实际机组中一般不会有单阀进汽的工况。

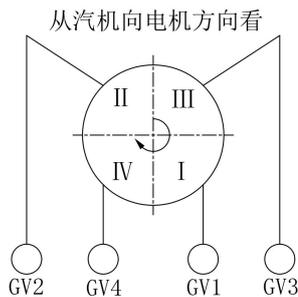


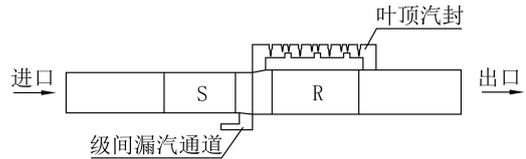
图1 调节级喷嘴布置示意图

2 计算方法

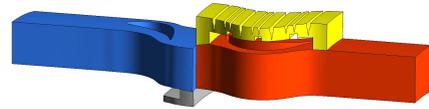
2.1 计算模型

(a) 单通道模型

图 2 为单通道模型计算域示意图，包括静叶、动叶、级间漏汽通道、叶顶汽封和进、出口延长段。其中，动、静交界面设置为 Stage，也就是静叶出口参数平均后传递给下游，作为动叶入口的参数。



(a) 二维示意图

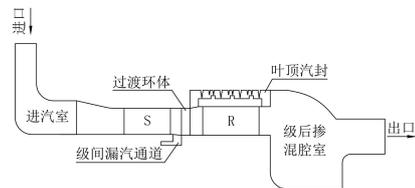


(b) 三维图

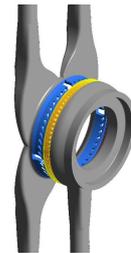
图2 单通道计算域示意图

(b) 全周模型

图 3 为全周模型计算域示意图，除静叶、动叶、级间漏汽通道、叶顶汽封外，还包括进汽室和级后掺混腔室，其中静叶分为四个弧段，布置方式与实际机组完全相同，如图 4 所示。此外，为保证计算的收敛性，在动、静叶之间增加过渡环体。过渡环体设置为静止域，其与动叶域的交界面设置为 Frozen Rotor，其余交界面设置为 None，这种设置方式考虑了交界面数据传递时参数沿周向分布的不均匀性，与实际情况更相符。



(a) 二维示意图



(b) 三维图

图3 全周计算域示意图



图4 全周模型静叶周向分布示意图

2.2 网格划分

单通道和全周计算时, 网格划分方式相同。其中, 静叶域和动叶域网格划分采用 NUMECA 中的 AutoGrid 模块, 为结构化网格。进汽室、级后掺混腔室、级间漏汽通道、叶顶汽封和过渡环体网格划分采用 ANSYS Workbench 中的 Mesh 模块, 为非结构化网格。

2.3 数值方法

本次分析使用 ANSYS CFX19.0 进行定常计算, 湍流模型采用 SST 剪切输运模型, 离散格式选择高精度格式, 壁面设置为绝热无滑移光滑壁面, 计算工质使用 CFX 内嵌的高精度水蒸汽数据库——IAPWS97^[5]。

边界条件设置方式如下: 进口给定流量和总温, 出口给定平均静压, 级间漏汽出口给定流量。全周计算时, 进口流量和级间漏汽流量按机组实际情况给定, 单通道计算时, 进口流量和级间漏汽流量根据实际进汽扇区的静叶支数, 转换为单个周期性通道中的流量。在相同工况下, 单通道和全周计算时, 进口温度和出口平均静压相等。

3 结果分析与对比

3.1 效率对比

如图 5 所示为采用单通道和全周模型计算得到的各工况下调节级效率。单通道计算得到的效率较全周计算结果高 8.6%~14.4%。随着负荷降低, 单通道和全周计算得到的效率差异略有减小。

单通道计算得到的效率随着负荷的降低逐渐减小, 而全周计算得到的效率在 THA 工况时最高, VWO 和 75%THA 工况时效率略低, 这与实际调节级设计时, 一般保证 THA 工况效率最优更相符。

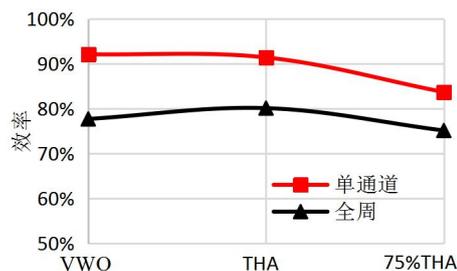


图5 效率对比

3.2 损失对比

如图 6 和图 7 所示为单通道和全周计算得到的各工况下调节级静叶域和动叶域的损失。单通道计算得到的静叶域和动叶域的损失均明显大于全周计算结果, 这导致两种模拟方式计算得到的效率差异较大。

单通道计算得到的静叶域损失随着负荷的降低基本保持不变, 动叶域损失随着负荷的降低逐渐增大, 75%THA 工况动叶域损失远大于 VWO 和 THA 工况, 达到两倍多。

全周计算得到静叶域和动叶域损失随着负荷的降低呈现先减小后增大的趋势, THA 工况损失最低, VWO 和 75%THA 工况损失略高于 THA 工况。

单通道计算得到的静叶域损失较全周计算结果低 4.9%~7.1%, 动叶域损失较全周计算结果低 13.9%~21.1%, 可见, 单通道和全周计算得到的动叶域损失差异较静叶域损失差异更大。

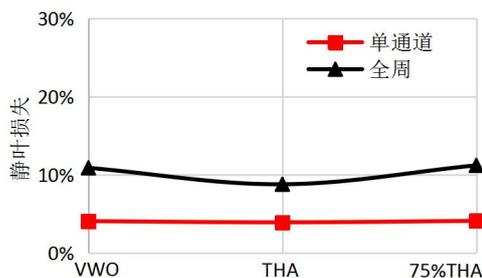


图6 静叶域损失对比

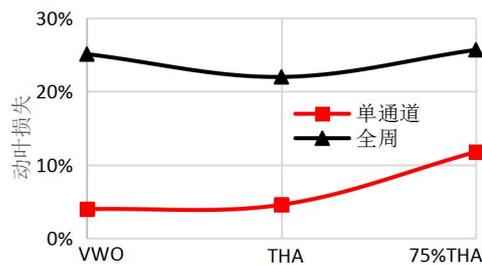
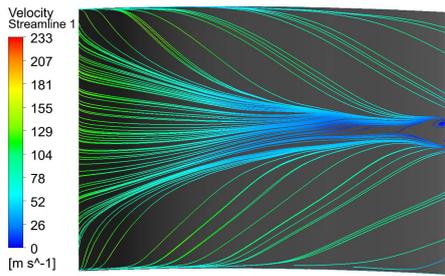


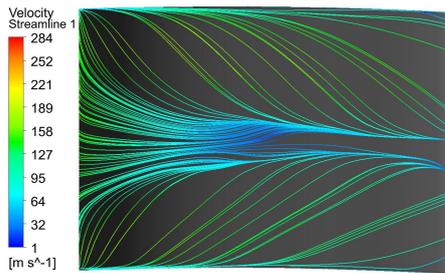
图7 动叶域损失对比

3.3 流场对比

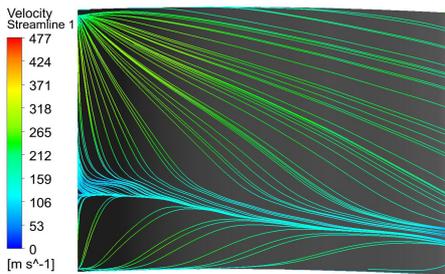
如图8所示为单通道模拟得到的各工况下动叶吸力表面极限流线图。随着负荷的降低，单通道计算中动叶域内的等效流量增大，流速增加，二次流影响区域逐渐增大，尤其是75%THA工况，动叶根顶部流线分布极不对称，动叶前缘便出现根、顶部流线的冲撞，造成较大的能量损失。因此，单通道计算得到的动叶域损失随着负荷的降低逐渐增大。



(a) VVO工况



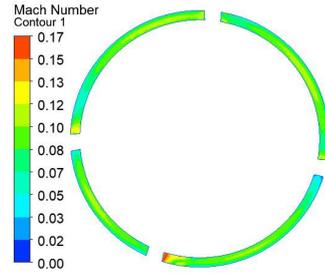
(b) THA工况



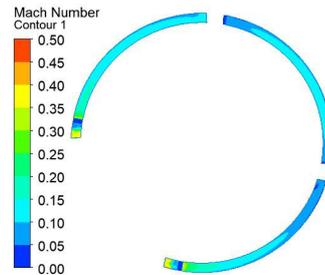
(c) 75%THA工况

图8 单通道模拟动叶吸力面极限流线

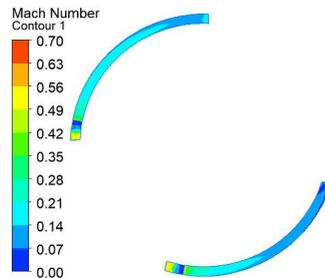
如图9所示为全周模拟得到的各工况下静叶进口马赫数分布云图。由于汽流在进汽室内的流动不均匀，静叶为部分进汽，且各部分进汽扇区的叶片数量不完全相等，导致静叶入口处汽流分布不均匀，尤其是在部分进汽扇区弧端处，进而造成静叶域内的损失增大。单通道计算中，计算域不包括进汽室，默认静叶入口汽流分布均匀，所以得到的静叶域损失低于全周计算结果。



(a) VVO工况



(b) THA工况



(c) 75%THA工况

图9 全周模拟静叶入口马赫数分布云图

如图10所示为全周模拟得到的各工况三维流线图。在计算工况下，从不同进汽管道进入的汽流，分别进入对应的静叶部分进汽扇区，随后进入整圈分布的动叶域内，从不同静叶部分进汽扇区流入的汽流，在动叶域内互相掺混，造成极大的能量损失，这显然是单通道模拟无法真实反映的，因此，单通道计算得到的动叶域损失远低于全周计算结果。

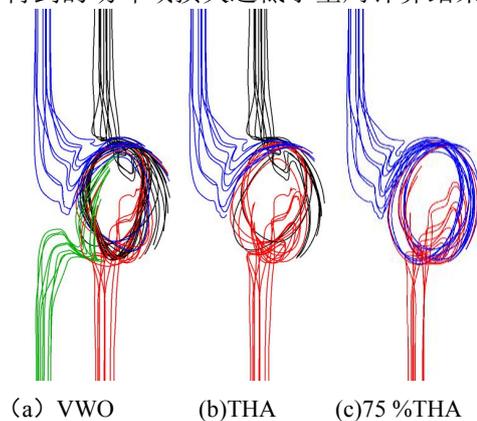


图10 全周模拟三维流线图

3.4 压力反动度对比

压力反动度的定义为:

$$\Omega = \frac{p_1 - p_2}{p_0 - p_2} \quad (1)$$

其中: Ω —压力反动度; p_0 —调节级入口静压; p_1 —调节级级间静压; p_2 —调节级出口静压。

表1为采用单通道和全周模型计算得到的各工况下调节级平均压力反动度,图11为采用单通道和全周模型计算得到的各工况下调节级压力反动度沿叶高的分布。

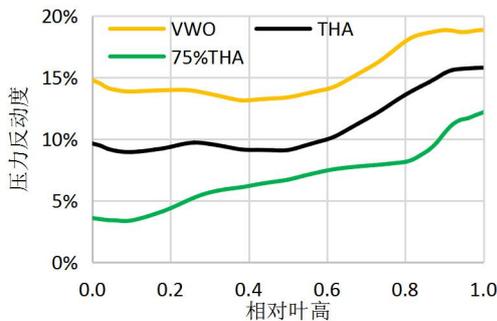
在单通道和全周计算中,压力反动度都随着负荷的降低而减小。由于单通道和全周计算得到的动叶域损失差异较静叶域更大,所以,单通道计算得到的压力反动度明显低于全周计算结果。随着负荷降低,两种方式计算得到的压力反动度差异越来越大。

表1 平均压力反动度

方法	工况	平均压力反动度 %
单通道	VWO	1.9
	THA	-5.9
	75%THA	-17.9
全周	VWO	15.4
	75%THA	6.8



(a) 单通道



(b) 全周

图11 压力反动度沿叶高分布

3.5 轴向推力对比

实际工程中,调节级轴向推力计算时,分为叶片、叶根轮毂和叶顶围带三部分,分别以平均压力反动度、根部压力反动度和顶部压力反动度作为输入参数,叶片部分轴向推力计算公式如下:

$$F = e \cdot \pi d L \cdot \bar{\Omega} \cdot (p_0 - p_2) \quad (2)$$

其中: F —轴向推力; e —部分进汽度; d —动叶中径; L —动叶叶高; $\bar{\Omega}$ —平均压力反动度。

图12为根据上述公式计算得到的叶片部分轴向推力。采用不同模型计算所得压力反动度的差异影响了叶片部分轴向推力的大小和方向,且由于单通道和全周计算得到的压力反动度差异随着负荷的降低而增大,计算得到的轴向推力差异也越来越大。叶根轮毂和叶顶围带部分的轴向推力计算方式与叶片部分类似,不再赘述。

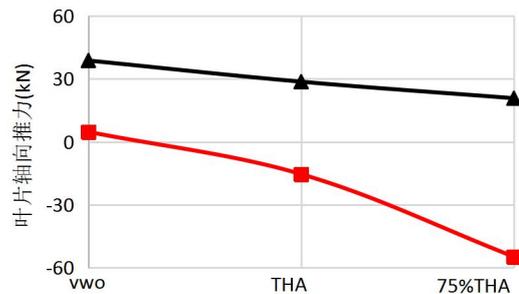


图12 各工况叶片轴向推力

3.6 机理分析

综合对比基于单通道模型和全周模型计算得到的调节级流场、损失、效率、压力反动度和轴向推力,并分析各参数之间互相影响的机理,可以发现,两种方法模拟得到的流场差异,导致了静、动叶域内损失的差异,进而导致效率和压力反动度的差异。而压力反动度的差异,又导致了轴向推力计算值的差异。

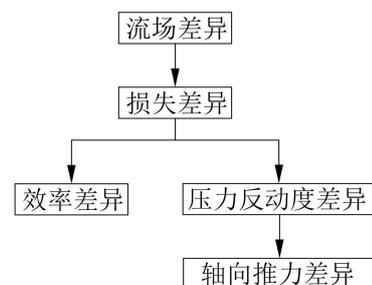


图13 影响机理示意图

(下转第47页)

燃气—蒸汽联合循环机组的噪声现状与控制措施

胥波 董溢华*

东方电气股份有限公司，成都 611731

摘要：燃气轮机联合循环发电作为一种清洁、高效的发电形式，在国内得到了长足的发展。由于相对于燃煤火电其无粉尘污染、排放环保，因此，燃气轮机联合循环电厂的选址一般处于负荷中心及人口相对稠密的居民区。为了保障电厂周边居民的生活，尽可能减少噪音污染成为燃机联合循环电厂必须解决的问题。本文从实际电厂运行期间噪音数据入手，揭示了联合循环电厂的噪音现状，并结合噪音的产生机理及工程实际经验提供了噪音控制的指导性措施。

关键词：燃气轮机联合循环；噪音控制措施

中图分类号：TK47

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2023）01-0040-04

Noise Status and Control Measures of Gas-steam Combined Cycle Units

XU Bo, DONG Yihua*

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

Summary: Gas turbine combined cycle power generation, as a clean and efficient form of power generation, has been greatly developed in China. Compared with coal-fired thermal power, it has no dust pollution and is environmentally friendly. Therefore, the site selection of gas turbine combined cycle power plants is generally located in load centers and relatively densely populated residential areas. In order to protect the lives of residents around the power plant, reducing noise pollution as much as possible has become a problem that must be solved in gas turbine combined cycle power plants. This article starts with the noise data during the actual power plant operation, reveals the noise status of the combined cycle power plant, and provides guidance measures for noise control in combination with the noise generation mechanism and engineering practical experience.

Key words: gas turbine combined cycle power generation; noise control measures

近年来，随着我国环保要求趋于严格以及电网对于调峰性能要求的不断提升，燃气-蒸汽联合循环电厂启停迅速、调峰能力强、清洁环保的天然优势进一步得到发挥。目前燃气轮机发电在我国电力市场中的比重在稳步提高。

然而，也必须客观地指出，在对环境的影响方面，燃机电厂有一个无法逃避的问题，即噪音的污染问题。由于目前燃机电厂大多建设在对环境噪声

要求较高的城市周边或者郊区。例如，地处北京东北三、四环之间的北京太阳宫燃气热电厂和西四环的郑常庄燃气热电厂周围便是城市居民区。同时由于其辅助系统相对简单，设备少，厂区面积紧凑，厂内设备距厂界较近，在不采取噪音抑制措施时，电厂界的噪声一般较大。在目前环保要求日趋严格的趋势下，燃气轮发电机组的噪声控制必须要引起重视。

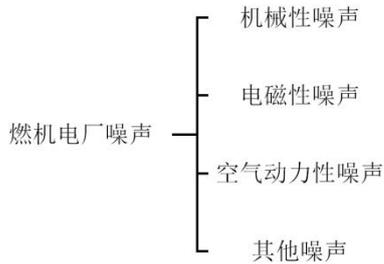
收稿日期：2022-08-10

作者简介：胥波（1982—），男，2008年毕业于清华大学动力工程及工程热物理专业，工学硕士，高级工程师。现任职于东方电气股份有限公司。

董溢华（1986—），男，2013年毕业于西安交通大学通信工程专业，硕士学历，中级工程师。现在东方电气股份有限公司，主要从事技术管理工作。邮箱 dongyh@dongfang.com。

1 燃气轮机组的噪声来源

根据燃机噪声产生的机理,其噪声可以分类如下:



按照燃气-蒸汽联合循环电厂的设备配备情况,其主要的噪声源如表 1 所示:

表 1 燃机电厂设备噪声水平

噪声源	噪声水平 dB(A)	备注
燃气轮机	~85-92	罩壳外 1 m
燃气轮机进气口	~85	距进气口 1m, 45°方向
蒸汽轮机	~92	距机组 1 m
发电机	~90	距机组 1 m
燃机辅机(润滑油泵、顶轴油泵、各种风机)	85-95	距设备 1 m
厂房屋顶风机	~85	风机轴线 1m, 45°方向
给水泵(高中压给水泵)	~90	距设备 1 m
循环水泵	85-90	距设备 1 m
凝结水泵	90	距设备 1 m
冷却塔	~90	距进风口 1 m
变压器	68-72	距变压器 1 m
增压机	~85	距离 1 m
空压机	85-90	距离 1 m

2 燃机噪声控制总体要求

目前,我国对于燃机电厂噪声控制的标准,主要包括:

GB3096-1993 《城市区域环境噪声标准》

GB12348-2008 《工业企业厂界噪声标准》

GBJ87-1985 《工业企业噪声控制设计规范》

GB12348-2008 《工业企业厂界环境噪声排放标准》

GB14098-93 《燃气轮机噪声》

为了达到环境评价中对于厂界噪声的要求,在燃机项目招投标过程中,大部分业主将噪声列为主机部分的性能保证项目,其要求可能如下:

在机组 75%~100%基本负荷时,噪声不大于如表 2 保证值:

表 2 某项目合同对于噪声要求(注:摘自某燃机联合循环项目性能保证章节)

序号	内容	单位	数值
1	在正常运行条件下,在燃气轮机和高中压缸罩壳水平距离 1 m,且应距运转平台面 1.2 m 高。日间和夜间均应进行测试。	dB(A)	80
2	在正常运行条件下,在燃机进风口外表面 1 m 处,日间和夜间均应进行测试。	dB(A)	85
3	燃机排气扩散段卖方设置全封闭隔音罩,全封闭隔音罩外 1 m,高 1.2 m 处	dB(A)	75

3 燃机主设备噪声控制

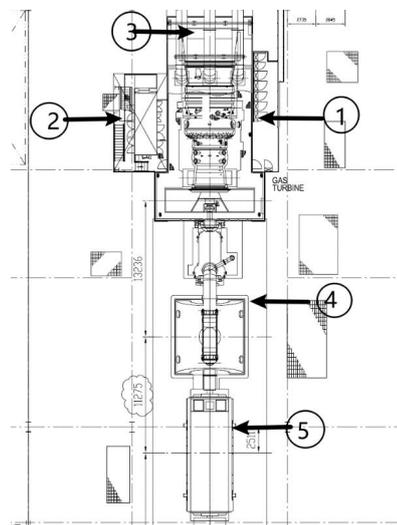
一般地按照噪声控制的原理区分,降低噪声的措施大致有如下 3 类:

(1) 声源控制措施:改造声源的物理结构,从源头切断或者抑制噪声的产生,这是根本途径。

(2) 传播路径的控制:就是改变噪声的传播路径,使噪声在传播路径中有效衰减。

(3) 接收者的防护措施:在声源和传播路径上无法采取有效措施时,可以考虑对接收者采取防护措施,如,佩戴耳塞,耳罩或者头盔等防护器具。

针对目前典型的燃机汽机单轴侧进气方案,其噪声的控制的重点如图 1 所示:



注:①燃机罩壳外;②燃机进气口;③燃机排气段;④汽机;⑤发电机

图 1 燃机部分重点位置

针对以上的典型位置,可以采用的措施如下:

3.1 燃机罩壳

控制目标:在正常运行条件下,在燃气轮机罩

壳水平距离 1 m，且应距运转平台面 1.2 m 高。噪音低于 80 dB(A)，日间和夜间均应进行测试。

目前现状：根据常山机组性能试验期间数据，其罩壳外噪声数据如图 2 所示。部分位置已经超过 80 分贝的限制。

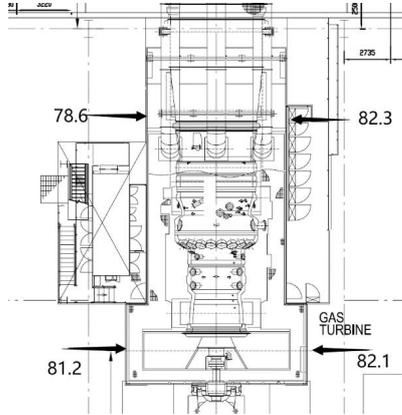


图 2 罩壳外噪声数据实测值

控制措施：一般来说，燃机电厂的厂房地面、屋顶、四周墙面均铺设了吸声系数较小的建筑材料，机组和辅助设备运行产生的噪声在厂房内通过反射、混合，将会形成复杂的混响声场。按照厂家惯例会在燃机本体周围布置罩壳，罩壳的材质为金属夹芯板，中间夹防火隔音棉。且罩壳内侧金属板上开有小孔。同时为了进一步增强罩壳的噪声控制的效果，对罩壳排风管和通风口等位置也要采取相应的措施。



图 3 排风管隔音

为了达到较好的隔声效果，在燃机罩壳设计需要注意以下几点：

(1) 隔声设计，选择合适的隔声材料和配套的消声器，使隔声罩能满足噪声控制的技术要求。

(2) 通风设计，燃气轮机内部高温燃烧产生了巨大的热量，增加隔声罩也必须考虑机组自身通风的要求，将机组产生的热量有效地排出罩壳外。

(3) 通风噪声控制，在通风进出口安装消声

器，从传播途径上削弱噪声量。

(4) 钢结构设计，隔声罩钢结构的力学性能必须满足设计要求。

需要注意的是：可以在基础连接之间增加弹簧减震器、橡胶减震器、软木、沥青毛毡等减振方法来减弱噪声的传播。如采用目前的罩壳设计仍无法达到业主对于此处的噪声要求，可以采用加厚夹芯板中隔音棉厚度等方法来提升隔音效果。

3.2 燃机进气口

控制目标：在正常运行条件下，在燃机进风口外表面 1 m 处，噪声值低于 85 dB(A)，日间和夜间均应进行测试。

控制措施：为有效进气，燃气轮机的进气口大多布置在室外。压气机和透平工作时产生的噪音将会透过燃气轮机的进气口向外传播。根据 AAF 英国总部声学研究部门的说明，燃机进气口的降噪方案可分为两个方面：

(1) 过滤器部分 - 即前端降噪方案（声学降噪百叶窗 - acoustic louvre）

(2) 进气道部分 - 即后端降噪方案（如消音器、内/外包消音棉等）

按照分贝等级分方案：

(1) 80 分贝上（消音器，消音棉）

(2) 75-80 分贝（加长消音器，增加消音棉厚度）

(3) 75 分贝以下（除了第 2 部分进气道措施外，在进气面增加声学降噪百叶窗）



图 4 M701F 燃气轮机进气道消音器外形图

燃机进气段管道布置在室外的部分也会向外扩散噪声，可以在该部分管道上用吸、隔声材料作吸、隔声捆扎，并进行防振处理。如采取了以上措施后，仍无法达到噪音的标准要求，则可考虑在燃机进气口前，不影响进气效率的合适位置处，布置隔声屏障，隔声屏障内敷设吸声系数较高的材料。

3.3 排气扩散段

燃机排气扩散段暴露在室外，也会向外辐射噪声，应在管道上用吸、隔声材料作吸、隔声包扎，但噪声要求高时，可修建砖混结构的小间或者隔音墙将其封闭。



图 5 正在施工的隔音罩

3.4 汽机

目前现状：目前汽机部分高中压缸有单独罩壳，而低压缸部分无罩壳，根据常山性能试验期间测得汽机部分噪声数据（如图 6），低压缸部分噪声无法满足噪声限值要求。如果有必要也可以通过增加罩壳的方法来降噪（如图 7）。

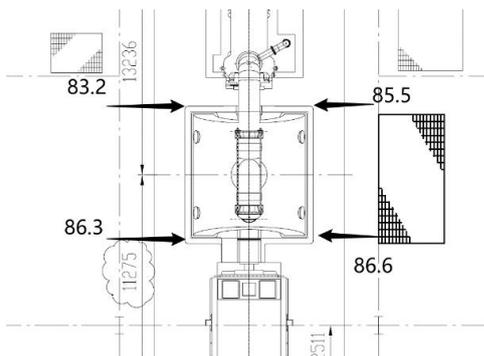


图 6 汽机噪声数据实测值



图 7 汽机罩壳

3.5 发电机

目前现状：发电机噪声来源主要是定转子之间的磁场脉动产生的电磁噪声，以及轴承旋转所产生的机械噪声。目前 M701F 联合循环机组配套的 300 MW 等级发电机，其噪音水平如下：

空冷机组：90 dB(A)

全氢冷机组：85 dB(A)

测试某在运转机组发电机部分的噪声数据如图 8，靠近低压缸侧超过 85 分贝的限制（可能由汽机低压缸噪声干扰所致）。

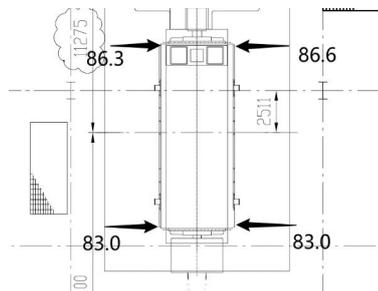


图 8 发电机噪声实测值

如业主对于发电机位置的要求低于该保证水平，则需要通过为发电机增设单独罩壳来限制其噪声传播。

4 结语

对燃气轮机组噪声的治理，应采用系统思维，综合分析机组噪声的产生机理、分布情况，结合系统运行状况，从声源控制及传播路径控制两方面入手，对机组的各类噪声采取相应的综合治理及控制措施，并对隔声设施的设计、安装施工高标准、严要求，才能进一步提升降噪的效果。

同时，为了进一步提升噪音控制的效果，除了对燃气轮机的重点噪声部位给予重点关注外，对机组主厂房也应该考虑整体噪声治理。基于工程时实践经验，建议可以重点考虑以下两点：

(1) 燃机厂房墙面对声波的反射作用而产生的混响将会使厂房的噪声上升一般为 3~5 dB 左右，为减弱混响效应可采取厂房顶部屋架吊设吸声体降低混响措施。

(2) 在燃机/汽机主厂房内的其他噪声源如给水泵、凝结水泵电动机及各泵用电动机等应采取相应的点源噪声治理措施。

参考文献：

- [1] 张毅. 铸造工艺(CAD)及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994
- [2] Huang S C, Huang Y M, Shieh S M. Vibration and stability of a rotating shaft containing a transverse crack [J], J Sound and Vibration, 1993, 162(3): 387-401
- [3] 周丽. 机械式挖掘机工作装置的优化与仿真 [D]. 沈阳东北大学, 2000

玉米倒角刀具的设计特点及在大型发电设备制造中的应用

谢龙飞 刘祥 张斌 吴攀 罗霞

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 为了改变目前大型核电汽轮机、火电汽轮机、重型燃气轮机静子零部件大尺寸倒角和斜面加工精度差、加工效率低的现状, 研制了玉米倒角刀具。本文重点介绍了玉米倒角铣刀和联接刀柄的结构及设计特点, 并成功将其用于加工过程, 很好保证了加工质量, 大幅提高了加工效率, 实现了技术先进、经济效益显著的既定目标。

关键词: 玉米倒角铣刀; 联接刀柄; 工件倒角; 加工精度; 加工效率

中国分类号: TK266

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0044-04

Corn Chamfering Tool Design Characteristics and Application in the Manufacture of Large Power Generation Equipment

XIE Longfei, LIU Xiang, ZHANG Bin, WU Pan, LUO Xia

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

Abstract: In order to change the present situation of large size chamfering and bevel machining precision and low efficiency of stator components of large nuclear power turbine, thermal turbine and heavy gas turbine, corn chamfering tool was developed. This paper mainly introduces the structure and design characteristics of corn chamfering milling cutter and connecting shank, and successfully use it in the processing process, which ensures the processing quality, greatly improves the processing efficiency, and achieves the established goal of advanced technology and remarkable economic benefits.

Key words: corn chamfering milling cutter; connecting shank; workpiece chamfering; machining precision; machining efficiency

300~1 000 MW 火电汽轮机、1 000~1 700 MW 核电汽轮机、50~500 MW 燃气轮机静子零部件加工工作量大, 加工质量要求高, 用来加工这类工件的镗铣类机床又多以进口设备为主, 小时费率一般都在 500 至 2 000 元左右。这类工件加工部位的特点之一是大尺寸斜面、倒角(后统称倒角)多, 由于这些加工部位多为汽道面和重要的焊接坡口, 其精度要求也较严。目前的加工方法不仅精度差, 而且耗时长, 如何提高这些部位的加工质量和效率

是亟待解决的现实问题。

1 加工部位尺寸

在这些大型核电汽轮机、火电汽轮机、重型燃气轮机的静子零部件中, 各种尺寸的倒角较多, 垂直、水平、倾斜方向均有, 倒角面长的超过 300 mm。按倒角的形状, 可将其分为三类: 一是圆管类的内、外圆倒角, 二是板状类的正、反向倒角, 三是过渡

收稿日期: 2023-02-13

作者简介: 谢龙飞(1963—), 男, 2004年毕业于电子科技大学计算机及其应用专业, 大专, 高级工程师。现在东方汽轮机有限公司重型二分厂焊接转子中心, 主要负责静子件工艺方案制定, 大型工装方案设计, 重要零部件工艺、工装审核, 加工中重大技术、质量问题处理, 新人培养等工作。

面的正、反向倒角。倒角角度主要有 14°、20°、35.5°、37.5°、39.5°、45°、52.5°、70°等。

2 加工现状

针对倒角部位，目前主要有两种加工方式：一是用尖刃直角铣刀走圆弧插补铣出梯状倒角，再由钳工打磨加工面至图示要求。这种加工方法总体缺点是加工效率低，加工精度波动大，特别是外观质量差。二是用平旋盘单刀镗削倒角，这种加工方法虽然可保证加工精度，但受加工位置、加工尺寸、加工部位的方向影响较大，其加工范围非常有限，只能正常加工其倒角总量的 30% 不到。主要有斜面上的倒角不能加工，狭小部位因平旋盘尺寸过大和加工直径超过平旋盘加工范围的倒角不能加工，非圆倒角不能加工。与铣削相比，平旋盘单刀切削，加工效率低，加工成本高。通过全面系统分析，研制成形铣刀用于加工是改变目前现状的最佳途径。

3 玉米倒角刀具的设计

为满足提高加工质量和加工效率的现实要求，并针对机床和工件加工部位的特点，研制了玉米倒角刀具。这种刀具由玉米倒角铣刀和过定位刀柄两部分组成。

3.1 玉米倒角铣刀

根据加工要求，研制了八种角度玉米倒角铣刀，图 1 是 52.5° 玉米倒角铣刀。研制时做了如下考虑：

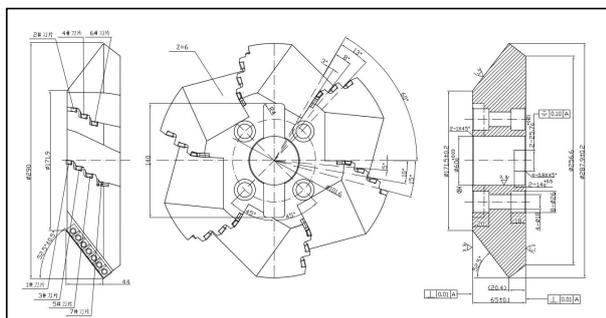


图 1 52.5° 玉米倒角铣刀

(1) 刀体按正反装设计，正装时加工外侧倒角，反装时加工内侧倒角。这种设计可减少刀体种类、数量，降低刀具成本。

(2) 无刀垫，刀片直接装在刀体上，这种设计

可很好保证刀片的安装精度和切削稳定性，确保多刀切削效果。

(3) 根据不同的加工角度，刀体按 4~6 个非等分螺旋槽设计，以减小周期性加工振动产生的条件。

(4) 相邻螺旋槽刀片轴向成错位对空布置，每个槽内相邻刀片周向成梯状错开 5°，工作时，多刀片逐一同时切削，最大程度减小切削合力和保证切削力大小的相对稳定，以减小加工振动，提高加工精度和效率。

(5) 目前，各种铣削刀片种类繁多，根据经验和被加工部位的工艺特性，折衷考虑尽可能降低加工中的切削力和避免大的加工振动产生，又兼顾刀片刃口强度等切削要求，选取图 2 所示正方形刀片，刀片前角 8°、后角 11°、刀尖 R0.8 mm。这种刀片经实用，切削效果极佳。

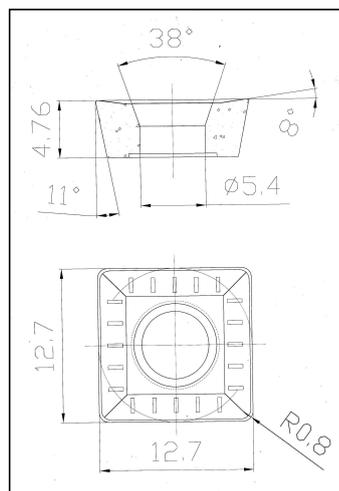


图 2 玉米倒角铣刀刀片

3.2 过定位刀柄

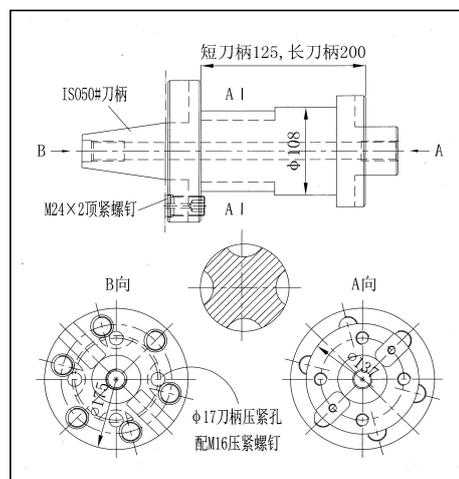


图 3 ISO50#过定位刀柄

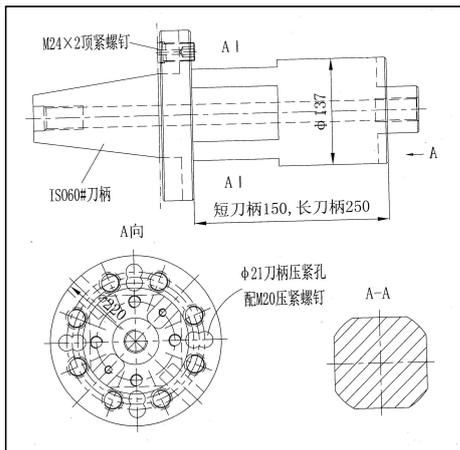


图4 ISO60#过定位刀柄

考虑到玉米倒角铣刀切削过程中总体呈现出的是切削力大和容易带来加工振动的特点，如沿用现有刀柄来安装玉米倒角铣刀，将会出现因切削负荷过重而损伤机床主轴和附件的刀柄安装锥孔精度，或因刀柄与锥孔的联接刚性不足带来加工振动，因此研制了图示3、图4两种过定位刀柄。这两种刀柄的总体结构完全一致，唯大小不同，加工中可择优选用。短刀柄 ISO50#杆长 125 mm，ISO60#杆长 150 mm；长刀柄 ISO50#杆长 200 mm，ISO60#杆长 250 mm。刀柄与机床或附件锥孔的安装方法：先将 M24×2 顶紧螺钉从锥柄端拧入刀柄，并将螺钉凸止口沉入螺孔凹止口。当机床或附件拉紧螺钉通过刀柄尾部螺孔拉紧刀柄后，先适度拧紧各 M24×2 顶紧螺钉，各项紧螺钉总顶紧力按刀柄拉紧力的 15% 选取，通常情况下，ISO50#和 ISO60#刀柄拉紧力分别约为 70~80 kN 和 175~200 kN。再按螺栓扭紧力矩标准把紧锥孔端面的四颗压紧螺钉，就此完成刀柄安装，简单方便。刀柄的主定位面是锥孔，辅助定位面是各项紧螺钉端面。由于切削中始终伴有加工振动，为防止顶紧螺钉在切削过程松动或松动后脱落飞出，顶紧螺钉选用 M24×2 细牙螺纹，顶紧端有大于螺孔外径的止口相配合。

4 加工应用

图5是在龙门铣主轴装 14°玉米倒角铣刀铣某核电汽轮机高中压汽缸背部抽汽管口内孔过渡倒角照片。图6是用圆柱玉米铣刀加工的倒角表面，图7是同一部位用玉米倒角铣刀所加工出的倒角表面，加工精度差异明显。就加工效率而言，同一部

位原加工方式需 4 小时，现只需半小时，而且还省去了钳工打磨工序。图8是镗床用万向铣头装 37.5°玉米倒角铣刀铣某重型燃机燃兼压缸燃烧器安装筒外侧焊接坡口照片，图9是反向装刀后准备加工同部位置内侧焊接坡口的照片。就加工效率而言，现铣削方式是原铣削方式的 4 倍，而且表面质量完全符合探伤和焊接要求。



图5 玉米倒角铣刀铣管口内孔倒角



图6 原铣削方式加工面粗糙度



图7 现铣削方式加工面粗糙度



图8 玉米倒角铣刀铣外侧焊接坡口接



图9 装玉米倒角铣刀铣内侧焊接坡口

5 结语

通过设计倒角刀具，并将其应用于核电、火电汽轮机和燃气轮机静子件的加工，彻底解决了原加工方法效率不高、质量不佳的问题。通过多台份的

加工实践表明该技术方案非常成功，其意义不仅在于解决了核电、火电汽轮机和燃气轮机静子件倒角面的加工困难，而且为其他类似倒角面的加工提供了思路、方法。

参考文献

- [1] 朱佳生. 透平机械制造工艺学[M]. 西安交通大学出版社. 2005
- [2] 王宛山. 机械制造手册[M]. 辽宁科学技术出版社. 2002
- [3] 谢龙飞. 660 MW 超超临界汽轮机低压外缸加工技术研究[J]. 东方汽轮机, 2018(12):36-40
- [4] 谢龙飞, 刘祥, 卞文等. 核电汽轮机静子零部件划线平台的设计特点及安装要领[J]. 东方汽轮机, 2019(12):48-52
- [5] 谢龙飞, 刘祥, 巩丽, 刘建. GE1600MW 核电汽轮机低压外缸加工技术研究[J]. 东方电气评论, 2020, 34(2): 55-60

(上接第 39 页)

4 结语

根据以上分析对比，可以得到以下结论：

- (1) 由于单通道模型忽略了部分进汽、进汽室等影响因素，对调节级内流场的模拟没有全周模型准确；
- (2) 单通道模型对流场模拟不准确，导致对损失的评估存在较大偏差，进而导致计算得到的调节级效率高于全周模型计算结果；
- (3) 单通道模型和全周模型计算得到的动叶域内的损失差异较静叶域内更大，导致单通道模型计算得到的调节级压力反动度明显低于全周模型计算结果；
- (4) 分别以单通道和全周模型计算得到的平均压力反动度为输入参数，计算得到的调节级叶片

部分轴向推力差异较大；

(5) 实际工程中，评估调节级推力时，建议以全周计算得到的压力反动度为输入参数。

参考文献

- [1] 黄树红. 汽轮机原理[M]. 北京. 中国电力出版社, 2008
- [2] 李清, 黄竹青, 王运民等. 汽轮机调节级变工况时焓降和反动度的计算[J]. 汽轮机技术, 2012,54(1):21-23+77
- [3] 屈焕成, 张荻, 谢永慧等. 汽轮机调节级非定常流动的数值模拟及汽流激振力研究[J]. 西安交通大学学报, 2011,45(11):39-44+57
- [4] 谢金伟, 王新军, 廖高良等. 汽轮机调节阀-调节级段三维流动与压力损失数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(20):3376-3383
- [5] 平艳, 张晓东, 钟主海. 汽轮机高压抽口气动分析及结构改进设计[J]. 东方汽轮机, 2021,(6):1-7

欢迎投稿，欢迎订阅！

重大核能设备供货项目集团两级管控 经验探讨

李建勇

东方电气股份有限公司，成都 611731

摘要：核能作为重要能源和动力源，其重大工程往往承载着国家战略，重要设备供货任务通常面临周期紧、要求高、风险多等挑战与考验，如何有效管控以实现保质按期交付是具有重要意义的难题。通过集团两级管控，强激励硬约束、多措并举、内外联动，保障了重大核能项目顺利执行，在机制建设、管控重点、党建引领等方面形成良好实践，相关经验值得总结探讨。

关键词：核能；重大设备供货项目；集团两级管控

中图分类号：TL

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2023）01-0048-05

Discussion on the Two-level Management Experience of Major Nuclear Energy Equipment Supply Projects

LI Jianyong

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

Abstract: As important energy and power, major nuclear projects often shoulder national strategy, important equipment supply tasks of which usually face tight cycles, high requirements, risks and other challenges. How to effectively manage and control the projects to achieve good quality and on time delivery is a difficult problem of great significance. Through unified control of the group, strong incentives and constraints, multiple measures taken simultaneously, and internal and external interaction, successful implementation has been guaranteed. Good practice has been formed with mechanism construction, control priorities and Party building. Relevant experience is worth summarizing and discussing.

Key words: nuclear; major equipment supply project; two-level management

随着我国核能“三步走”发展战略稳步推进^[1]，集团近年来承担了较多重大核能设备供货任务，相关单位按常规模式推进面临重大挑战。通过打造集团“头号工程”，在组织保障、考核激励、资源匹配、议事协调和联合监督等方面建立有效机制，聚焦项目管控要点，推动党建业务融合，实现了保质按期交付。

1 集团两级管控背景

A 项目是国家重大核能项目，可交付成果包括堆内构件、主泵、蒸汽发生器和后处理装置等重要

设备，相较于常规项目存在以下典型特点：**一是项目意义重大。**项目工程事关国家安全和发展战略，政治意义重大，用户层面组织各任务承接集团建立高层协调机制，部分任务甚至由党和国家高层领导挂帅督导，保质按期交付成为首要政治任务和政治责任。**二是项目要求特殊。**多数供货设备为新研制非标产品，种类多、批量小、交期集中、监管要求高，面临新材料、新技术、新工艺等多重挑战和“后墙不倒”的刚性进度要求，部分任务甚至边研发、边设计、边制造、边施工，不确定性多、相关方多、协调难度大。**三是子企业面临共性风险。**主要包括

收稿日期：2022-11-11

作者简介：李建勇（1990—），男，2021年毕业于四川大学工商管理专业，工商管理硕士，经济师。现在东方电气集团有限公司，主要从事重大专项管理工作。

首次研制过程中部分工艺验证和产品制造同步实施的技术风险，疫情影响下材料供应和外委外协不畅、人力和设备等瓶颈资源不足、交付期集中裕量缺乏的进度风险，以及部分单位新质量体系首次运行、多体系同时运行和引入新供方、新工艺、新装备和新监管方式等带来的质量风险。**四是子企业项目执行参差不齐。**任务承接单位在计划完成率、资源负荷、特殊质量体系熟悉程度、项目经验，以及质量、风险和分供方管控等方面高低不一，部分企业因交付拖期和质量问题引起用户较大抱怨。**五是子企业重视程度和管理机制不足。**任务承接单位存在认识不到位、重视程度不够、资源配置不充分、奖励约束机制不健全等问题。

企业战略分为公司、经营单元和职能三个层面，分别司职整体发展方向及产品线规划、获取市场竞争优势和创造独特专长，三者应该保持紧密协同^[2]。为自上而下贯彻落实上级领导对重大工程指示批示，加强集团核能产业尤其是重大项目战略协同，提升归口管理部门统筹能力，压实子企业主体责任，推进内部资源和经验共享，确保高质廉洁完成承接任务，集团对重大核能设备供货项目探索实行了两级管控。

2 项目管控机制

2.1 组织保障

领导小组机制依托科层制权威但又实现了对科层制的超越，具有资源整合、重塑问责、激励监督等治理功能^[3]。集团公司成立领导小组，集团主要领导任组长、产业分管领导和纪检监察领导任副组长，相关职能部门、责任企业主要负责人任成员。责任企业成立推进小组，企业主要负责人任组长，技术、采购、制造等业务部门负责人和专业骨干组成多个工作小组，包括技术服务组、材料保障组、生产攻关组、异常处置组等。同时，设立领导小组和推进小组办公室，负责日常联络和监督检查，前者设在集团产业归口职能部门，后者设在企业项目部或抽调核心成员成立的临时推进办。如图1所示，三层组织架构中成员项目分工与职能分工高度重

叠，领导小组负责重大决策和督导，推进小组负责资源调配和日常安排，工作小组负责细节策划和落地执行，合力保障项目执行中技术攻关、材料供应、生产组织和异常处置高效推进。

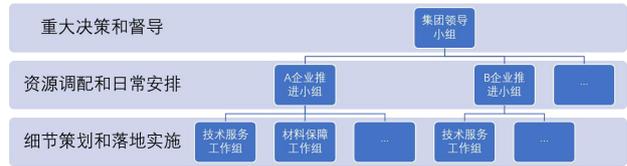


图1 项目领导小组架构示意

2.2 考核激励

组织的绩效是必须以其成员的个人绩效为基础的，激发、导向和保持是激励的主要组成部分^[4]。集团自上而下建立强激励、硬约束考核激励措施，层层压实责任，激发活力。集团公司与责任企业就已承担的核能重大任务签署保质按期完工责任状，并在企业经营班子任期契约中设置倾向于核能重大任务承接、完成等维度考核指标。领导小组办公室组织责任企业制定重大任务里程碑节点清单，会同集团治理部门选取设置企业经营班子年度经营绩效加减分考核项，会同集团组织部门设置任务执行突出贡献人员专项奖励。加减分考核实行过程监督、中期检查和年底确认，影响企业经营班子年度绩效；专项奖励配套实施细则，定期申报、及时兑现，经领导小组办公室编制申报和领导小组审批后发放。责任企业与中层干部签署高质量交付责任状，同步配套专项奖励补充奖励和提前完成特别奖励，对项目日常推进绩效实行周检查月考核，具体包括周重点工作和会议行动项按期完成率，以及技术攻关、许可取证、材料保供和生产制造等单项重点工作推进成效等。

2.3 资源匹配

项目资源管理包括识别、获取和管理所需资源以成功完成各个过程，资源分解结构用于获取和监督资源^[5]。通过提前开展技术准备和排产策划，优先配置资源和多渠道保障，促进任务资源匹配。如表1所示，责任企业提前开展项目履约策划，根据工艺方案建表梳理人力、场地、设备、工具和外协等资源负荷，详细评估需求数量和分布周期，挑选

经验丰富的项目经理、设计、工艺、焊接、加工和质检等人员组建项目团队，开展能力建设，调整产能布局，选用可靠供应商并配套材料预提专项资金，安排劳模技师牵头负责特殊工艺和首件试制。同时，积极利用外部资源，在法规和标准许可范围内，将制造能力受限工序和零部件粗加工等进行外委，采取外派陪产或租赁生产等方式，由生产、质检、技术和管理人员组成外派团队，实行强矩阵式管理。此外，还依托集成供货能力和资质在全集团内开展焊接、无损检测、加工等关键资源调配。

表 1 项目关键生产资源负荷评估示意

关键设备	项目加工策划																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
复合中心	H5支承板机加					H5导向组件精镗															H6堆芯板精镗										
镗床	H8支承板粗镗					H8异形板精镗															H8支承组件粗镗										
卧车	H5导向筒精镗															H6双联管精镗															
单柱立车	设备维修		H2吊篮筒体粗车																												
双柱立车	H2吊篮筒体精车					H8上支承粗车					H8下支承精车																				
热丝TIG焊	H8吊筒环焊		H5吊筒与支承板环缝焊接															H2压紧筒纵缝焊接													
埋弧焊	H3吊筒纵缝焊		-															H3吊筒纵缝焊													

2.4 议事协调

在内部，实行集团月督导、企业周推进、基层日结清的常态化工作模式，对议定事项层层分解，计划到天、责任到人并定期检查。集团层面每月召开领导小组会，聚焦工程重大要求、项目重难点问题和主要风险处置，检查上期决议事项完成情况，讨论项目进展、存在问题和下期计划，通报相关企业推进成效和重要经验。企业层面每周召开推进小组会，聚焦技术变更、材料供应、资源需求、意外事件处置和风险防范等，检查和布置当周重点工作。基层工作小组日常碰头协商解决具体问题，快速推动生产进程，如组织生产、项目、技术、质量和采购等负责人共同参加班前会，现场明确进度安排和重点事项，如按需召开不符合项联合处置会议，及时明确各自分工和目标。在外部，建立用户、设计方、监管方、分供方等重点单位联合办公渠道，快速解决制约项目推进、多方关联的重难点问题。联合用户开展专项监督检查，共同梳理明确项目进度和风险管控要点；搭建用户、设计院所、制造企业、关键材料供应商等多方参与的协调平台，推进重大问题快速决策；建立联合办公临时渠道，通过相关方现场驻点，促进生产问题快速处理和生产快

速恢复。

2.5 联合监督

集团层面构建业务监督、职能监督、执纪监督“三道防线”，及时发现问题、纠正偏差、督促落实，全方位监督促进重大项目廉洁优质。任务承接企业负主体责任，项目部发挥牵头作用，设计、采购、制造、质量等部门对照分解计划和会议安排持续细化措施、压减偏差、关闭问题。小组办公室全程参与任务关键节点，定期发布督导报告，聚焦要点通报、风险预警和工作建议，重点监督偏差和风险管控；治理部门开展企业经营绩效中相关指标检查考核，审计部门开展重点业务专项审计。集团纪检监察组协同用户集团纪检监察组、企业纪委开展专题监督、调查处理和问责谈话，聚焦问题整改、廉洁风险防范和推诿扯皮整治，重点监督政治站位和履职尽责。

3 项目管控要点

3.1 聚焦关键路径、重要差异和重点过程

一是**聚焦计划制定和偏差管控**。项目管理团队将项目特定数据，如活动、计划日期、持续时间、资源、依赖关系和制约因素作为输入，以创建项目进度模型，线路上总工作持续时间最长的线路为关键路径^[5-6]。如图 2 所示，通过拆解合同范围，创建工作分解结构，开展项目设计、采购、制造、交付、收尾等全生命期工作期量预测和依赖关系识别，同步复核资源匹配情况和影响情况，查找最薄弱环节并增加必要缓冲，完成项目网络计划编制和关键路径识别，最后细化周计划、日计划和专题计划；在计划执行过程中始终紧盯关键路径偏差，分级预警管控，关注动态调整和制约环节解除。二是**聚焦重要差异管控**。着重识别与参考项目间标准和材料选用、制造方案、监管要求等方面差异，对取证和非取证设备实行分级分类管理，对采购规范、质量计划、工艺流转卡等技术文件分类建账推进，根据不同原材料定制化程度、供应周期和供应商合作经验制定应急采购、框架采购等差异化采购方案，对首件首套实施专人带班和陪产服务，对研发焊材邀请

供应商现场指导和实训。三是**聚焦重点过程管控**。根据工艺策划，详细梳理技术评审、材料评定、模拟件制作、许可证申请、关键工艺和检查方法固化、首件鉴定、重要供方落实、长周期和风险材料采购、关键场地和工装保障等重点过程，制定专题方案和工作计划，清单式管控。

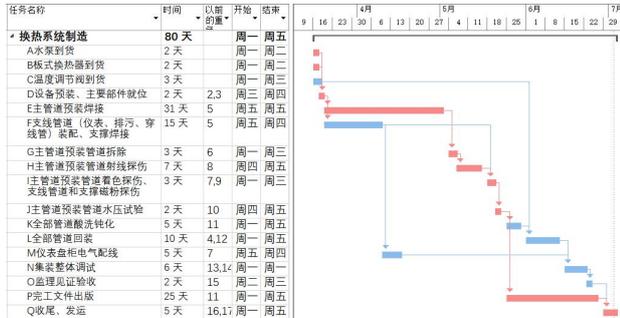


图2 项目网络计划和关键路径示意

3.2 加强风险防控、质量管理和经验反馈

一是建立完整项目风险清单并实施动态监管。

风险管理是为达到组织既定目标而对承担的各种风险进行管理的系统过程，包括策划、组织、领导、协调和控制等工作^[6]。如表2所示，通过全面梳理设备研制的技术、质量、进度、技能和管理等方面风险，按结构化思路完整准确描述，建立起项目全范围、全生命期、全流程风险防控清单，再以发生概率和影响程度乘积排序，分级细化管控目标、措施、预案和决策触发条件，明确行动项和责任人，定期检查更新，动态调整风险清单范围、排序和管控层级。对新项目周期和资源考虑充分裕量，对关键材料、关键工艺和关键资源制定兜底方案，必要时联合内外部相关人员开展沙盘推演和风险评审。

二是**持续加强核安全文化建设和体系保障**。通过举办质量讲坛、培训上岗、通报质量违章和主动预防情况、领导骨干做表率等方式提高项目团队核安全文化和遵守程序意识，减少违规操作导致的暂停返工风险；通过编制标准化作业流程，使用三段式沟通、明星自检等防人因失误工具，减少程序型、技能型人因失误；通过建立融合相关核质量体系要求的质保大纲、通用程序、专用程序和质量计划，加强现场重点部位巡检、抽检和产品首检，积极整改内外部质保监查发现问题，保障质量体系有效性。

三是**加强分供方管控**。以压实过程控制为手段提升外包质量，严格落实首检、过程监督、放行检验和交货检验，必要时开展质保体系延伸式覆盖管控；重点防范供应商违规分包和对技术文件理解执行不到位，加强关键外委工序技术固化、产前交底和陪产帮扶。

四是**做好经验反馈**。在长期生产实践和理论研究中形成的PDCA循环是建立质量管理体系和进行质量管理的基本方法^[6]。通过及时梳理总结研制过程中重难点和成功做法，分析典型事件根本原因和发展趋势，建立人力、期量、成本、风险等基础数据库，有助于在材料选型、焊接加工、质量检测、项目管理等方面开展改进提升，形成质量体系保证、质量过程控制、质量经验反馈的项目螺旋改善体系。

表2 项目风险防控清单示意

序号	项目阶段	项目节点	风险名称	风险描述	发生概率	影响程度	综合排序	管控目标	应对措施	当期行动项	责任单位
1	启动										
2	设计										
3	设计										
4	采购										
5	制造										
6	制造										
7	制造										
8	交付										
9	收尾										
10	...										

3.3 保持密切沟通和内外协同

及时向相关方提供项目信息，有助于引导相关方有效参与项目^[5]。如图3所示，在任务取证监管、材料研发、工艺开发、意外事件处置等重点工作中，通过建立沟通矩阵，详细梳理项目内外部干系人清单并制定差异化沟通策略，有助于达成困难共同克服、风险共同承担、余量共同分享的联合攻关目标。具体包括，加强与监管机关沟通，争取产品制造与模拟件制作开工，加快制造许可取证；加强与技术单位沟通，改善设计和工程制造匹配性，加快技术变更、不符合项等及时处置；加强与监理单位沟通，加快见证放行和问题处置；加强与关键供应商沟通，改善供应配套协作，提升生产连续性；加强与生产单位沟通，制作关键工序、关键控制要素可视化看板，改善操作和检查人员衔接配合，设置任务作战图和攻关团队战绩榜，创建创先争优浓厚氛围；加强与用户沟通，保持项目进展、重要变更、问题处置等信息透明，赢得信任和支持，同步调整用户预期，积极推进据实变更等。

干系人	职位	角色	支持类型 不知晓/抵制/中立/支持/领导等	影响力	沟通方式	其他	利益点	
							利益点	利益点
干系人1							保持满意	密切管理
干系人2								
干系人3								
干系人4							留意监督	持续关注
干系人5								

图3 项目干系人登记与评估矩阵示意

3.4 重视系统思维和方法创新

在设备研制过程中通常面临新技术、新材料和新工艺等挑战，需注重系统思维。分析技术和材料准备、资源投入、过程质量管控与项目进度的交互关系，平衡质量、进度和效益等多维目标。优先实施长周期、紧缺和科研材料采购，提前统筹内外部资源完成外委策划和合同签订，加强评定文件、不符合项、技术变更、工艺装备等先决条件清单式检查消缺，有助于保障生产连续性。同时，还应创新方式方法。技术方面，采用新材料，如卷焊筒体改为一体式锻件缩短制造周期；采用新工艺，如超声波消应力解决薄板焊接变形难题；采用新装备，如针对高精度大长径比内孔键槽开发专用设备。管理方面，采用新模式，如靠近用户租赁厂房制造大型薄壁箱体，解决长途运输难题；协调监管机关批复实施质保体系延伸式管控，应对不便取证特殊供方；采取通用性和指向性相结合方式编制，减少质量计划等大批量结构相似文件低意义差异化；建立文件、配套件、装焊、打磨等功能分区，批量投料集约化生产，提升筒体等相似零件制造效率；组建原材料证明、焊接记录、制造记录等专业化小团队，集中办公同步准备，加快完工文件等编制。

4 项目党建融合

重大项目涉及的单位多，聚集的党员和群众多，党建有利于实现党对重大项目的组织和全覆盖，有利于组织既有领导力又有执行力，有利于发挥党组织战斗堡垒作用和党员先锋模范作用^[7]。在任务推进过程中，党建工作实现了与急难险重业务的深度融合，始终发挥引领和保障作用。党组党委围绕“把方向、管大局、促落实”，牵头支撑组织保障、考核激励、资源匹配、进度管控、风险防范

和联合监督的工作机制。集团公司党组把重大核能项目高质量履约作为落实中央决策部署的具体行动，定期听取项目专题汇报；责任企业党政领导亲自挂帅，一线督战推进落实；各级党组织和党员以党员示范岗、党员攻坚队、劳动竞赛和创先争优主题实践活动等形式开展项目任务攻坚；主要领导赴重点单位现场检查，为一线攻坚队授旗并作动员鼓励，激发党员干部奋战热情。此外，项目团队还积极开展全链条党建共建，以“1+N”党建共建为载体联合业主、设计院所、监造和供应商业务部门所在支部开展创争联动党建活动，凝聚共同目标，发挥各方优势，联合推进技术攻关、资料 and 材料两料准备、问题处置和生产组织等方面瓶颈化解。

5 结语

通过建立集团两级管控机制，配套强激励硬约束管控措施，明确关键路径、风险防控、沟通协同和系统思维等项目管控要点，推进党建与业务深度融合，形成了组织保障、资源匹配、责任明确、重点清晰的项目管控效果，保障了核能重大项目的高质量执行，如A项目堆内构件提前交付、主泵关键里程碑100%按期完成、管控设备全部按期完工并一次性通过验收，其经验可供相关项目参考。

参考文献：

- [1] 李林蔚, 朱博, 刘秀. 核能在我国清洁低碳能源系统中的战略定位研究[J]. 产业与科技论坛, 2022,21(15):12-15
- [2] 王建民. 战略管理学第3版[M]. 北京大学出版社, 2013
- [3] 达尔罕. 领导小组机制的运行逻辑与优化建构[J]. 领导科学, 2022,(6):81-84
- [4] 陈维政, 余凯成, 黄培伦. 组织行为学高级教程[M]. 高等教育出版社, 2004
- [5] 项目管理协会. 项目管理知识体系指南[M]. Newtown Square: PA: Project Management Institute, 2017
- [6] 全国一级建造师资格考试用书编写委员会. 建设工程项目管理[M]. 中国建筑工业出版社, 2021
- [7] 肖剑忠, 张靖初. 重大工程项目党建的实践与启示——以杭州A重大工程项目党建为例[J]. 观察与思考, 2022(8):81-90

核岛设备换热管内壁缺陷涡流检测定量方法

程怒涛 杨涛 代勤龙 罗炜 任建明 周婷

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455

摘要: 结合核岛设备制造阶段换热管内壁可能产生的缺陷情况, 通过制作一系列轴向内壁切槽模拟试样, 采用线性拟合曲线的方式制作新的幅值-伤深曲线, 对比分析幅值-伤深曲线与相位-伤深曲线对换热管内壁缺陷伤深定量, 验证新拟合幅值-伤深曲线对内壁缺陷伤深定量的准确性

关键词: 换热管; 内壁刮痕; 幅值定量曲线

中图分类号: TL

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0053-04

Quantitative Eddy Current Testing Method for Inner Wall Defects of Heat Exchange Tubes of Nuclear Power Equipment

CHENG Nutao, YANG Tao, DAI Qinlong, LUO Wei, REN Jianming, ZHOU Ting

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

Abstract: Combined with the possible defects in the inner wall of heat exchange tube in the manufacturing stage of nuclear island equipment, a series of axial inner wall grooving simulation samples were made, and a new amplitude depth curve was made by using linear fitting curve. The quantitative analysis of the amplitude depth curve and phase depth curve on the inner wall defect depth of heat exchange tube was carried out to verify the effect of the new fitting amplitude depth curve on the inner wall defect depth. The accuracy of deep quantitative analysis.

Keywords: heat exchange tube; scratch on inner wal; amplitude quantitative curve

核岛设备蒸汽发生器、非能动余热排出热交换器换热管在制造阶段主要采用 BOBBIN (轴绕式) 探头进行涡流检测, 通过相位-伤深曲线直接对换热管缺陷伤深进行判定。对换热管内壁伤深定量, 采用标定管上人工标准通孔制定相位-伤深曲线, 不同伤深对应的涡流信号相位角范围为 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 实际工作中采用人工标准通孔制定的相位-伤深曲线对内壁伤深定量结果与实际测量结果存在偏差。笔者根据换热管制造过程中可能产生的内壁刮痕缺陷形态, 采用人工内壁切槽模拟内壁刮痕缺陷, 使用非线性拟合的方法制作 MRPC 和 X-probe 探头测量内壁刮痕伤深的幅值-伤深曲线。通过涡流定量一系列人工内壁槽, 并基于通用的伤深定量方法, 制作适

用 BOBBIN 探头对换热管内壁缺陷定量的幅值-伤深曲线。

1 涡流检测对象

结合核岛设备换热管在制造阶段可能产生刮痕的深度范围和形态, 选取 $\Phi 17.48 \times 1.01 \text{ mm}$ 和 $\Phi 19.05 \times 1.09 \text{ mm}$ 两种规格换热管制作一系列深度内壁轴向切槽, 采用不同深度和长度的切槽, 重点分析轴向切槽的深度和长度对涡流伤深定量的影响。制作换热管内壁切槽, 机加精度要求高, 难度较大, 实际机加深度与理论设计深度存在一定差异。对内壁切槽进行覆膜检测, 采用万能工具显微镜对覆膜深度进行测量, 可得到切槽的准确伤深。切槽

收稿日期: 2022-12-17

作者简介: 程怒涛 (1968—), 男, 毕业于西安交通大学电磁测量及仪表专业, 本科, 高级工程师。现在东方电气(广州)重型机器有限公司质量检验部主要从事压力容器的质检技术工作。

的具体参数见表 1。

表1 轴向内壁切槽实际数据与BOBBIN探头定量数据

换热管型号	编号	A 缺陷		B 缺陷		A 缺陷定量数据			B 缺陷定量数据		
		长×宽×深 mm	实际伤 深比%	长×宽×深 mm	实际伤 深比%	幅值	相位	定量伤 深比%	幅值	相位	定量伤 深比%
Φ19.05×1.09	1	20×1.0×0.05	4.95	40×1.0×0.05	7.52	0.71	4	10	0.99	4	10
	2	20×1.0×0.10	9.72	40×1.0×0.10	10.46	1.00	9	23	1.28	10	25
	3	20×1.0×0.20	17.25	40×1.0×0.20	18.44	3.29	9	23	3.37	10	25
	4	20×1.0×0.30	25.78	40×1.0×0.30	26.33	4.70	12	30	4.35	12	30
	5	20×1.0×0.40	38.90	40×1.0×0.40	33.03	7.62	20	50	7.69	21	53
	6	20×1.0×0.50	45.78	40×1.0×0.50	44.59	6.14	17	43	6.19	17	43
Φ17.48×1.01	7	20×1.0×0.05	4.75	40×1.0×0.05	4.46	0.81	8	20	0.54	8	20
	8	20×1.0×0.10	11.68	40×1.0×0.10	12.08	1.61	9	23	1.48	8	20
	9	20×1.0×0.20	24.26	40×1.0×0.20	19.70	2.88	10	25	2.88	10	25
	10	20×1.0×0.30	30.00	40×1.0×0.30	24.46	4.68	14	35	4.23	13	33
	11	20×1.0×0.40	38.61	40×1.0×0.40	39.41	5.83	18	45	5.54	18	45
	12	20×1.0×0.50	49.01	40×1.0×0.50	49.11	7.12	21	53	7.61	23	58

2 内壁切槽深度定量方法

2.1 通用定量分析方法

换热管内壁缺陷通用定量方法采用 BOBBIN 探头进行涡流定量检测，其相位-伤深曲线是通过将标定管穿孔信号调为 40°，然后经 (0°, 0%) 和 (40°, 100%) 两点线性得到，通用定量相位-伤深曲线见图 1，通过涡流信号相位值，在相位-伤深曲线上获取相应的伤深比。

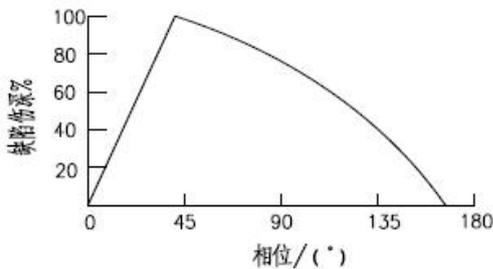


图1 通用的内伤相位-伤深曲线

通过通用内伤相位-伤深曲线，可将表 1 的人工内伤进行伤深定量，并将定量结果与实际伤深进行对比，将涡流定量伤深减去实际伤深，可得到涡流

检测定量伤深绝对偏差，从而对定量结果准确性进行初步判定。

$$\text{绝对偏差} = \text{涡流定量伤深} - \text{实际伤深}$$

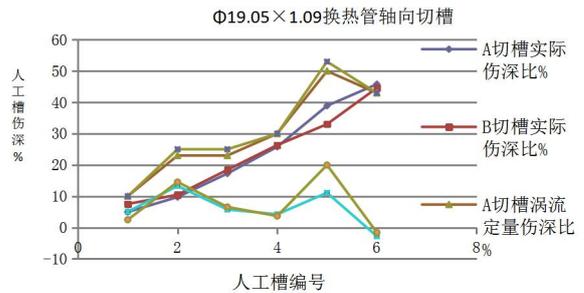


图2 通用定量伤深与实际伤深及偏差

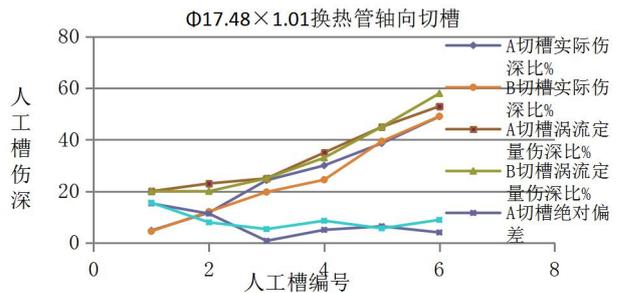


图3 通用定量伤深与实际伤深及偏差

对图 2 和图 3 分析发现, $\Phi 17.48 \times 1.01 \text{ mm}$ 和 $19.05 \times 1.09 \text{ mm}$ 两种规格换热管制作轴向长度 20 mm 和 40 mm 不同深度的切槽, 对同一深度不同轴向长度的槽, 其通用涡流定量伤深基本一致, 因此内壁缺陷的轴向长度不影响通用伤涡流深定量。通用定量伤深与实际伤深存在一定偏差, 随着槽深度的增加偏差成减小趋势。采用通用相位-伤深定量的伤深比切槽的实际测量伤深偏大

2.2 采用X-Probe和MRPC探头进行涡流检测

X-probe 探头为涡流阵列探头, 主要用于三代核

电项目换热管 ($\Phi 17.48 \times 1.01 \text{ mm}$) 涡流三维信号数据采集。MRPC 探头为涡流旋转探头, 主要用于二代加核电项目换热管 ($\Phi 19.05 \times 1.09 \text{ mm}$) 涡流三维信号数据采集。不同与 BOBBIN 探头, X-probe 和 MRPC 探头可通过三维信号直观体现换热管内、外壁形貌特征, 快速定位缺陷信号, 获取最大缺陷信号的幅值, 比 BOBBIN 探头分析数据更具有代表性和准确性, 但不能直观对伤深进行判定。表 2 为 X-probe 和 MRPC 探头对切槽进行涡流检测数据分析统计。

表2 轴向切槽数据结果

换热管规格	探头	编号	A 切槽			B 切槽		
			长*宽*深 mm	实际伤 深比%	幅值	长*宽*深 mm	实际伤 深比%	幅值
$\Phi 19.05 \times 1.09$	MRPC	1	20×1.0×0.05	4.95	4.8	40×1.0×0.05	7.52	5.56
		2	20×1.0×0.10	9.72	4.01	40×1.0×0.10	10.46	7.03
		3	20×1.0×0.20	17.25	4.31	40×1.0×0.20	18.44	11.74
		4	20×1.0×0.30	25.78	6.75	40×1.0×0.30	26.33	14.61
		5	20×1.0×0.40	38.90	9.79	40×1.0×0.40	33.03	15.57
		6	20×1.0×0.50	45.78	10.98	40×1.0×0.50	44.59	19.26
		7	20×1.0×0.05	4.75	0.99	40×1.0×0.05	4.46	2.1
		8	20×1.0×0.10	11.68	2.19	40×1.0×0.10	12.08	6.87
$\Phi 17.48 \times 1.01$	X-probe	9	20×1.0×0.20	24.26	3.13	40×1.0×0.20	19.70	12.57
		10	20×1.0×0.30	30.00	3.89	40×1.0×0.30	24.46	11.42
		11	20×1.0×0.40	38.61	5.07	40×1.0×0.40	39.41	4.71
		12	20×1.0×0.50	49.01	4.95	40×1.0×0.50	49.11	6.56

表 2 轴向切槽的实际伤深与幅值的对应关系, 结合表 1 BOBBIN 探头对切槽的定量幅值进行对比, 图 4 和图 5 为相同伤深轴向切槽对应不同探头定量得到的幅值, 对各切槽的伤深与幅值的关系, 可发现两种探头检测定量幅值与伤深均成线性关系。对比分析两种定量幅值曲线走势, BOBBIN 探头的定量幅值曲线明显更优。

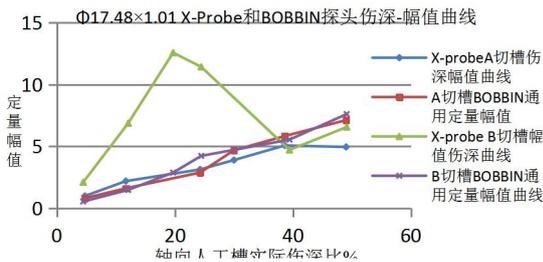


图4 $\Phi 17.48 \times 1.01 \text{ mm}$ X-probe与BOBBIN探头幅值曲线

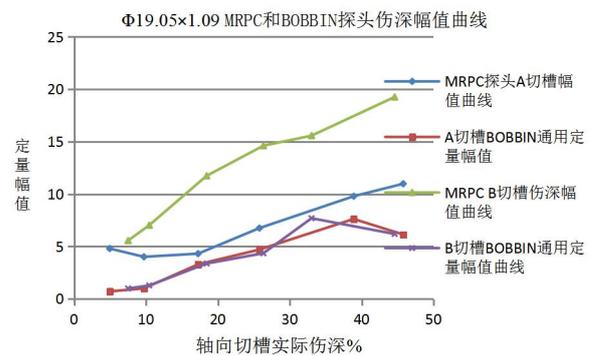


图5 $\Phi 19.05 \times 1.09 \text{ mm}$ MRPC与BOBBIN探头幅值曲线

2.3 X-Probe和MRPC幅值-伤深曲线定量分析

在实际内壁涡流检测中, X-Probe 和 MRPC 探头对缺陷幅值定量更具准确性, 可对缺陷最严重进行幅值定量。由于 X-Probe 和 MRPC 探头涡流信号

分析无法直观对缺陷伤深定量，结合不同的人工内壁伤深缺陷，根据表 2 涡流数据，通过对切槽幅值数据统计分析，制作适合换热管内壁缺陷 X-Probe 和 MRPC 幅值-伤深参考曲线，见图 6、7。

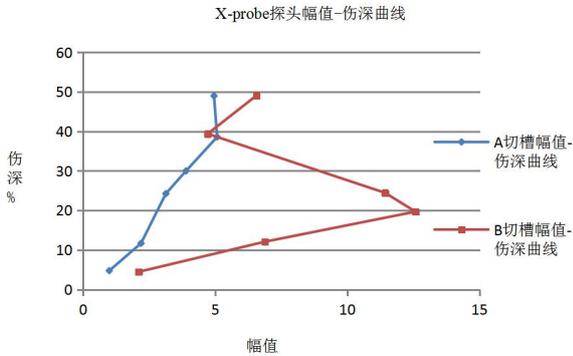


图6 X-probe探头幅值-伤深参考曲线

由图 6 可知，B 切槽 X-probe 幅值-伤深线性走势异常，基本不具有参考价值，出现此情况可能由于切槽机加异常，导致涡流信号幅值偏离理论数据，对此情况本次课题不做深入讨论。A 切槽 X-probe 幅值-伤深曲线走势符合线性关系，伤深随着幅值成正比关系，对于 X-Probe 探头检测内壁轴向缺陷具有参考作用。

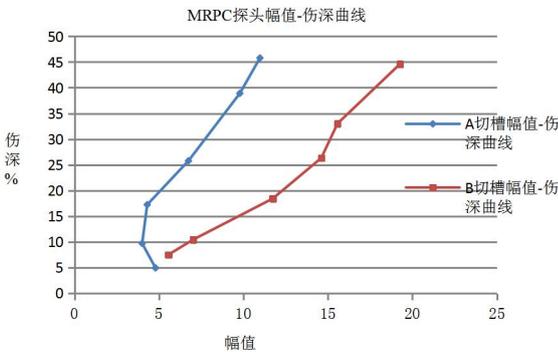


图7 MRPC探头幅值-伤深参考曲线

图 7 中 A、B 切槽 MRPC 探头幅值-伤深曲线成线性规律，随着幅值增大，相应伤深比也增大，对 MRPC 探头检测定量内壁轴向缺陷伤深具有参考作用。对比分析 A、B 切槽两条幅值-伤深曲线，同一伤深不同长度轴向切槽，其对应的幅值存在差异，切槽越长幅值响应越大，因此换热管内壁轴向方向缺陷的深度和长度会影响 MRPC 探头和 X-probe 探头涡流幅值-伤深定量。在实际涡流检测工作中，通

过内窥镜等检测方法进行辅助检测，可提高 MRPC 探头和 X-probe 探头涡流检测对缺陷伤深定量准确性。

2.4 BOBBIN探头幅值-判伤曲线定量分析

采用 BOBBIN 探头进行换热管内壁涡流检测，目前学术上认可的是使用相位-伤深曲线定量伤深，基于标定管通孔信号 40°和 0 点制作相位-伤深曲线。根据涡流检验的实际经验，相位-伤深法定量内壁缺陷存在偏差，在图 5、6 中相关数据已进行说明。使用 BOBBIN 探头对轴向切槽进行幅值定量，将新幅值与相应实际伤深重新拟合合成线性关系，图 8、9 为 BOBBIN 探头对应的新幅值-伤深曲线。

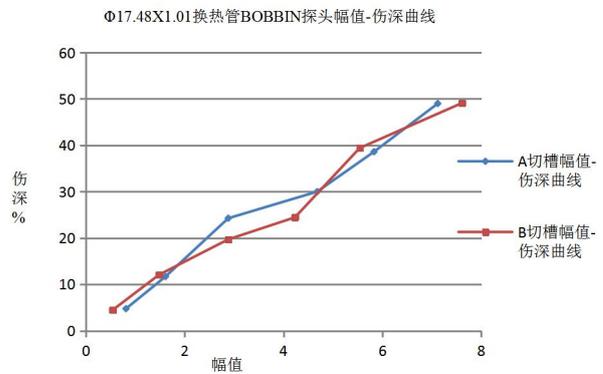


图8 Φ 17.48×1.01 mm换热管BOBBIN探头幅值-伤深曲线

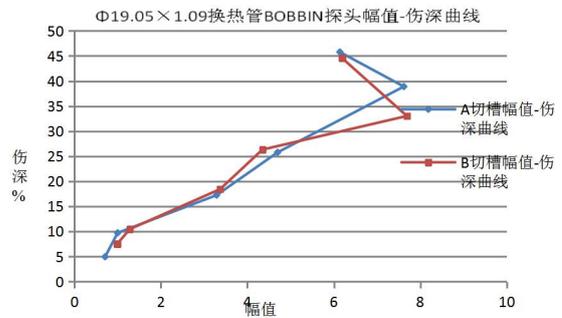


图9 Φ 19.05×1.09 mm换热管BOBBIN探头幅值-伤深曲线

对两种规格换热管分别拟合的幅值-伤深曲线，A、B 切槽的幅值曲线基本贴合，因此对于内壁轴向缺陷，缺陷的长度对 BOBBIN 探头定量幅值影响很小，基本可忽略，但 MRPC 和 X-probe 探头对幅值定量受轴向缺陷长度影响，这两者不同，说明旋转探头和阵列探头对缺陷长度信号响应更加敏感。BOBBIN 探头定量的幅值-伤深曲线，与通用的相位-伤深曲线走势基本一致。因此，对于内壁轴向缺陷，

(下转第 62 页)

扩大钢管 $D51$ 一次冷弯成型范围的理论计算与工艺试验

蒋志海 杨军 刘洪伟

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

摘要: 随着装机容量的不断饱和、国家生态环境治理力度加大, 火电市场不断萎缩, 各大锅炉制造企业不断转型, 进军新能源市场, 其中垃圾焚烧炉是东方锅炉主要的新产品之一。垃圾焚烧炉具有压力参数低、空间小、结构紧凑等特点, 与传统锅炉产品受热面的管子相比壁厚更薄、相对弯曲半径更小, 对弯管质量提出更高的要求。

关键词: 一次冷弯成型; 理论计算; 工艺试验; 圆度; 减薄

中图分类号: TK22

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0057-06

Theoretical Calculation and Process Test of Expanding the Forming Range of One-time Cold Bending of Tube $D51$

JIANG Zhihai, YANG Jun, LIU Hongwei

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

Abstract: With the continuous saturation of installed capacity and the strengthening of national ecological environment governance, the shrinking of thermal power market, and the continuous transformation of major boiler manufacturing enterprises to enter the new energy market, among which waste incinerator is one of the main new products of our company. Waste incinerator has the characteristics of low pressure parameters, small space and compact structure. Compared with the tubes on the heating surface of traditional boiler products, the wall thickness is thinner and the relative bending radius is smaller, which puts forward higher requirements for the quality of bends.

Key words: one-time cold bending; theoretical calculation; process test; roundness; reduction;

随着装机容量的不断饱和、国家生态环境治理力度加大, 火电市场不断萎缩, 各大锅炉制造企业不断转型, 进军新能源市场, 其中垃圾焚烧炉是东方锅炉主要的新产品之一。垃圾焚烧炉具有压力参数低、空间小、结构紧凑等特点, 与传统锅炉产品受热面的管子相比壁厚更薄、相对弯曲半径更小。目前东方锅炉对管径 ≤ 89 mm、相对弯曲半径 R_x (弯管半径 R /管子外径 D) ≥ 1.5 的弯头采用一次冷弯成型, 管径 ≤ 89 mm、相对弯曲半径 $0.5 < R_x < 1.5$ 的弯头采用预弯至 $R=1.5D$ 后热挤压成型。挤压弯头的成型质量差、生产效率低、制造成本高。如果

相对弯曲半径在 $1 \sim 1.5$ 之间($1 \leq R_x < 1.5$)的弯管能实现一次冷弯成型将大大降低垃圾焚烧炉的制造成本、缩短制造周期。本文以现有产品为依托进行扩大钢管 $D51$ 一次冷弯成型范围的研究, 通过工艺试验来验证理论计算方法, 积累实际操作经验。

1 理论计算

1.1 弯管原理

管子在弯曲变形时(如图1所示), 外侧壁受拉, 内侧壁受压。外侧壁在拉应力 α_1 的作用下造成管子壁厚减薄甚至可能拉裂; 内侧壁在压应力的作

收稿日期: 2022-06-01

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

用下使得管子内侧壁增厚,当薄壁管时容易造成失稳起皱。同时在拉应力合力 N_1 和压应力合力 N_2 的作用下使得管子的弯曲截面变椭圆,失稳时外侧内凹或内侧起皱。因此弯曲截面的不圆度、减薄量、内侧壁波浪等成为判断弯头质量的重要指标。

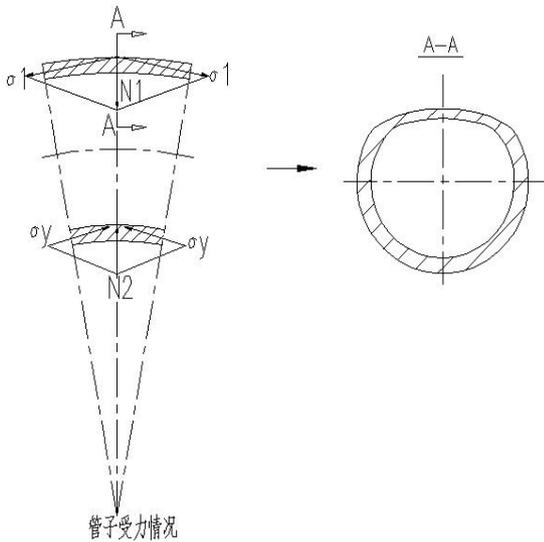


图1 弯曲过程中管子受力情况

1.2 最小相对弯曲半径的计算

弯曲半径的大小直接影响管子弯后截面的不圆度和壁厚减薄量。当弯曲半径小到某一极限值时,弯管过程被破坏—弯头外侧破裂或内侧失稳起皱。因此设计的管子弯曲半径不能小于最小相对弯曲半径。最小相对弯曲半径 $R_{x\min}$ 可按以下两个条件进行计算,计算结果取较大值。

(1) 按壁厚允许减薄量计算

$$R_{x\min} \geq \frac{K_S(1-b)}{b}$$

(2) 按内壁不起皱计算: $R_{x\min} \geq 6.5(1-9S_x)$

式中: $K_S=0.5(1-S_x)-a_y$

a_y —技术条件允许的不圆度, %;

S_x —相对壁厚, $S_x = \frac{S}{D}$

b —减薄率, %;

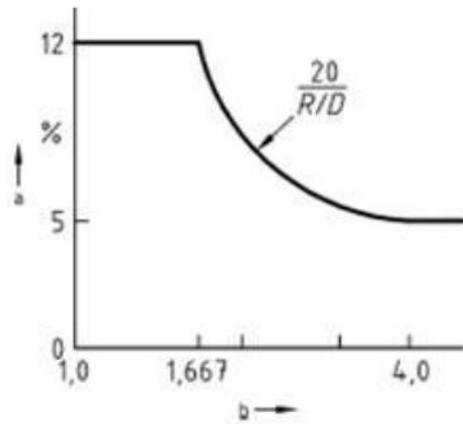
根据欧标水管锅炉第五部分锅炉压力部件的制造工艺与结构(EN12952.5)第7.3条可知,

$$\text{不圆度: } a_y = 2 \times \frac{(D_{\max} + D_{\min})}{(D_{\max} - D_{\min})} \times 100\%$$

式中:

a_y —不圆度, %;

D_{\max} —在管子弯曲顶点测得的最大外径,毫米;
 D_{\min} —在与 D_{\max} 相同的横截面上测得的最小外径,毫米;



注:图中 a 代表不圆度, b 代表比值 R_b/D_0

图2 一次弯曲过程中的不圆度范围

减薄量:对公称外径小于等于142毫米的管子弯曲后弯头上任一点的厚度不应小于下式给出的值:

$$e_{\text{ext}} = e_{\text{act}} \times \frac{\left(\frac{2R_b}{D_0} + 0.5\right)}{\left(\frac{2R_b}{D_0} + 1\right)}$$

式中:

e_{ext} —外圆弧面处所要求的最小厚度,毫米;

e_{act} —所提供的管子公称厚度减去供货商提供的最大厚度负偏差,毫米;

R_b —在管子中心线上测得的弯曲半径,毫米;

D_0 —管子的公称外径,毫米。

1.3 以管子 $D51 \times 5 R60$ 为例进行计算:

东方锅炉小口径管采购技术条件中允许壁厚偏差得出 e_{act} 最小值为4.5,再结合图2及上述公式可得:

$$K_S = 0.5(1 - S_x) - a_y = 0.331;$$

$$e_{\text{ext}} = e_{\text{act}} \times \frac{\left(\frac{2R_b}{D_0} + 0.5\right)}{\left(\frac{2R_b}{D_0} + 1\right)} = 3.829;$$

$$b = \frac{s - e_{\text{act}}}{s} = 0.234;$$

(1) 按壁厚允许减薄量计算:

$$R_{x\min} \geq \frac{K_s(1-b)}{b} = 1.084$$

(2) 按内壁不起皱计算:

$$R_{x\min} \geq 6.5(1-9S_x) = 0.765$$

取两者中较大值 $R_{x\min} \geq 1.084$, 则最小弯曲半径 $R=1.084 \times 51=55.3\text{mm}$, 故从理论计算值判断 $D51 R60$ 的弯管可一次冷弯成型。

1.4 以管子 $D51 \times 4 R60$ 为例进行计算:

东方锅炉小口径管采购技术条件中允许壁厚偏差为 $\pm 10\%$, e_{act} 最小值为 3.6, 根据图 2 可知不圆度取 12%, 则 $K_s=0.5(1-S_x)-a_y=0.341$;

$$e_{\text{ext}} = e_{\text{act}} \times \frac{\left(\frac{2R_b}{D_0} + 0.5\right)}{\left(\frac{2R_b}{D_0} + 1\right)} = 3.063; b = \frac{s - e_{\text{act}}}{s} = 0.234;$$

(1) 按壁厚允许减薄量计算:

$$R_{x\min} \geq \frac{K_s(1-b)}{b} = 1.116$$

(2) 按内壁不起皱计算:

$$R_{x\min} \geq 6.5(1-9S_x) = 1.912$$

取两者中较大值 $R_{x\min} \geq 1.912$, 则最小弯曲半径 $R=1.912 \times 51=97.5\text{mm}$, 故从理论计算值判断弯管 $D51 \times 4 R60$ 不能一次冷弯成型。

2 弯管实验

目前东方锅炉蛇形管车间的弯管设备有顶墩自动弯管线、单项墩弯管机、侧助推弯管机, 在顶墩夹不工作的情况下三者都等同于简单的侧助推弯管, 本次试验选择弯管条件最差的侧助推弯管机进行试验, 试验设备如图 3 所示。本试验根据实时库存情况选取了 3 种材质 (20G、12Cr1MoVG、SA-213T91)、两种规格 ($D51 \times 5$ 、 $D51 \times 4$) 的钢管

($D51 \times 5$ 20G、 $D51 \times 5$ 12Cr1MoVG、 $D51 \times 4$ 12Cr1MoVG、 $D51 \times 4$ SA-213T91 各 5 根共 20 根) 进行弯制, 20 根钢管依次编号为 001~020, 弯制前对弯头 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 处对应位置的钢管壁厚进行测量, 每个位置测量 4 个象限点, 由测量数据分析可知试验用管壁厚偏差均为 $-5\% \sim -10\%$ 。



图 3 侧助推弯管机及弯管模具



图 4 弯管实物图

现场调整弯管机的参数 (包括弯管速度、滑槽前进速度、滑槽夹紧力等) 后进行试弯, 粗略测量、分析比较发现空弯 180° 时滑槽的侧推量控制在 $30 \pm 10 \text{ mm}$ 的范围内弯头成型最佳, 最终钢管 20G $D51 \times 5$ 、12Cr1MoVG $D51 \times 5 R60$ 弯制成功, 钢管 12Cr1MoVG $D51 \times 4$ 、SA-213T91 $D51 \times 4 R60$ 弯制失败。钢管 12Cr1MoVG $D51 \times 4$ 弯制时主要表现为内侧壁失稳起皱, 钢管 SA-213T91 $D51 \times 4$ 弯制时主要表现为滑槽夹紧力大则弯头圆度超标、滑槽夹紧力减小则内侧壁失稳起皱, 弯管实物如图 4 所示。弯制成功的弯头编号为 001~010, 现场对弯头进行通球检查, 根据标准按实测内径计算通球直径为 $D29.13 \sim 29.35 \text{ mm}$, 按公称内径计算通球直径为 $D28.7 \text{ mm}$, 实际通球直径为 $D34.9 \sim 35.2 \text{ mm}$, 均满足标准 GB/T16507.6 中通球检查要求。弯头 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 处对应位置四象限的壁厚、管径测量值如表 1 所示。

表 1 弯后壁厚、管径测量值

钢管规格/材质		$D51 \times 5/20G$					$D51 \times 5/12Cr1MoVG$				
位置	编号	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010
0°	上	4.76	4.76	4.75	4.74	4.65	4.53	4.69	4.64	4.65	5.10
	弯后	4.77	4.77	4.71	4.80	4.70	4.62	4.51	4.60	4.60	5.03
	壁厚	4.77	4.76	4.72	4.77	4.80	4.57	4.63	4.63	4.58	5.05
	内	4.74	4.67	4.72	4.74	4.59	4.56	4.54	4.36	4.57	4.97

45°	大径	49.70	50.10	50.80	51.10	50.80	50.90	50.80	50.90	51.00	51.50	
	小径	48.70	49.90	50.50	50.10	49.90	50.80	50.80	50.70	50.90	50.80	
	弯后壁厚	上	4.77	4.68	4.79	4.74	4.83	4.52	4.73	4.63	4.67	5.12
		下	4.75	4.75	4.70	4.78	4.63	4.57	4.67	4.65	4.62	5.05
	内	7.70	7.58	7.30	7.12	7.11	7.19	7.54	7.25	7.15	8.05	
		外	4.09	4.09	4.09	4.12	4.24	3.74	3.74	3.65	3.68	4.27
90°	大径	48.50	48.50	48.60	48.80	48.50	48.10	48.60	48.80	48.60	48.80	
	小径	46.70	47.10	46.80	47.20	46.60	46.80	47.20	47.10	46.80	47.20	
	弯后壁厚	上	4.78	4.77	4.76	4.78	4.78	4.53	4.74	4.64	4.68	5.07
		下	4.72	4.73	4.72	4.70	4.57	4.57	4.69	4.63	4.70	5.07
	内	8.60	8.30	8.50	8.21	8.57	8.60	8.12	8.15	8.20	8.49	
		外	4.02	4.02	4.08	4.11	4.11	3.75	3.75	3.62	3.76	4.09
135°	大径	48.60	48.60	48.60	48.60	48.70	48.80	48.60	48.60	48.60	48.70	
	小径	47.60	48.20	47.80	48.20	47.20	47.30	47.80	47.60	47.30	47.50	
	弯后壁厚	上	4.81	4.75	4.70	4.69	4.75	4.54	4.71	4.64	4.64	5.11
		下	4.74	4.76	4.70	4.77	4.65	4.56	4.69	4.62	4.64	5.05
	内	7.79	7.69	7.95	7.48	8.21	7.58	7.80	7.61	7.60	8.24	
		外	4.03	4.04	4.07	4.25	4.20	3.60	3.82	3.65	3.78	4.18
180°	大径	48.70	48.80	48.50	48.60	48.50	48.60	48.20	48.50	48.30	48.50	
	小径	47.70	48.40	47.70	48.20	47.40	48.10	48.00	47.70	47.30	47.80	
	弯后壁厚	上	4.76	4.76	4.79	4.73	4.80	4.56	4.68	4.62	4.58	5.05
		下	4.73	4.72	4.79	4.82	4.76	4.57	4.63	4.64	4.52	5.10
	内	5.20	5.03	4.87	5.09	5.08	5.08	4.64	5.02	4.71	5.23	
		外	4.68	4.78	4.65	4.83	4.64	4.50	4.51	4.48	4.53	5.27
大径	47.60	48.20	47.60	47.60	47.60	47.70	47.70	47.60	47.80	47.70		
小径	55.10	55.30	55.10	55.20	55.20	55.80	55.30	55.70	55.50	55.60		

将弯头 20G $D51 \times 5 R60$ (编号 001、002) 和 12Cr1MoVG $D51 \times 5 R60$ (006、007) 按图 5(a) 剖开, 取一半进行热处理, 热处理曲线如图 6 所示, 对热处理前后弯头直段、0°、45°、90°、135°、180° 处的硬度、金相、力学性能等进行检测; 弯头 20GD51×5 R60 (编号 003、005) 和 12Cr1MoVG $D51 \times 5 R60$ (008、010) 整体热处理后, 003 和 008 号弯头按图 5(a) 剖开, 005 和 010 号弯头按图 5(b) 剖开, 分别对直段、0°、45°、90°、135°、180° 处的硬度、金相、壁厚、管径等进行检测; 弯头 004、009 作为备用, 暂不做任何处理, 某项检测数据出现异常时进行复验。剖切后试样实物如图 7 所示, 金相组织如图 8 所示。热处理前后硬度对比如图 9 所示, 力学性能对比如表 2 所示。

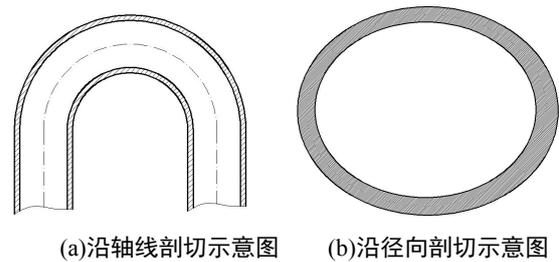
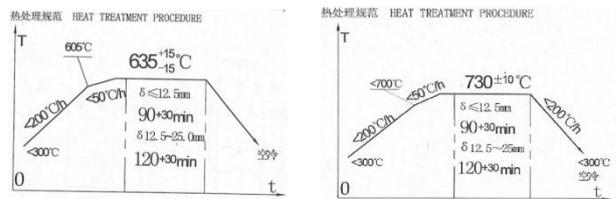


图 5 弯头剖切示意图



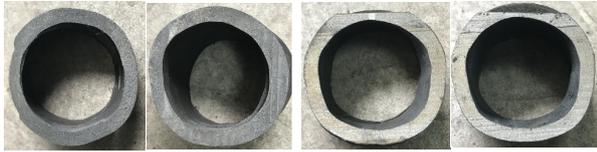
(a) 20G 热处理曲线

(b) 12Cr1MoVG 热处理曲线

图 6 热处理曲线

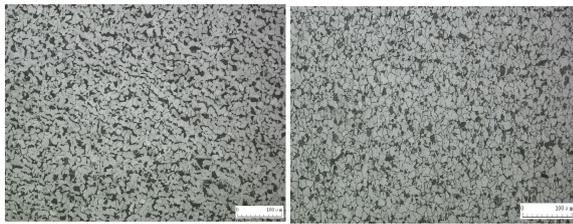


(a)20G(左)和 12Cr1MoVG(右)沿轴向剖切实物图

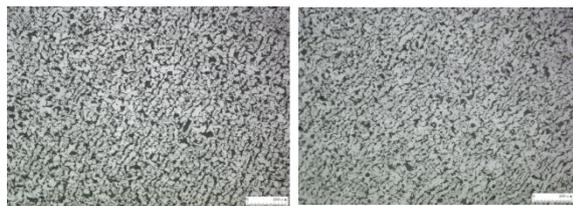


(b)20G(左)和 12Cr1MoVG(右)沿径向剖切实物图

图 7 弯头剖切后实物图



(a)20G(左)和 12Cr1MoVG(右)热处理前金相组织图 (铁素体+珠光体)



(b)20G(左)和 12Cr1MoVG(右)热处理后金相组织图 (铁素体+珠光体)

图 8 金相组织图

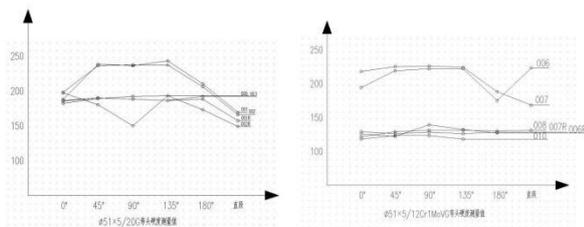


图 9 热处理前后硬度测量值

表 2 力学性能试验测量值

试样编号	材质	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	断后伸 长率%	冲击吸收 能量 J
001	20G	/	/	/	21/21/21
001R	20G	405	519	34	25/22/25
002	20G	/	/	/	18/19/18
002R	20G	380	498	30	25/22/24
003	20G	394	515	28	/
004	20G	358	528	32	/

006	12Cr1MoVG	/	/	/	30/33/33
006R	12Cr1MoVG	178	388	31	31/31/31
007	12Cr1MoVG	376	514	31	36/33/33
007R	12Cr1MoVG	189	389	31	31/31/32
008	12Cr1MoVG	/	/	/	/
010	12Cr1MoVG	/	/	/	/

注：004 为热处理前试样。

3 数据分析

3.1 外观质量检查

如图 4 所示，弯管 20 G $D51 \times 5$ 、12Cr1 MoVG $D51 \times 5$ R60 表面圆滑，未见起皱及裂纹等缺陷；钢管 12Cr1MoVG $D51 \times 4$ 、SA-213T91 $D51 \times 4$ R60 内侧表面失稳起皱。现场对表面无缺陷的弯头外侧进行 PT 检查结果显示无缺陷，故弯管 20G $D51 \times 5$ 、12Cr1MoVG $D51 \times 5$ R60 合格。

3.2 通球检查

弯头 $D51 \times 5$ R60 理论计算的通球直径为 $D28.7$ mm，实际通球直径为 $D34.9 \sim 35.2$ mm，均满足标准 GB/T16507.6 中通球检查要求。

3.3 圆度检查

由表 1 中测量值计算得出，所有弯头弯段不圆度 $< 5\%$ ，仅 180° 尾弯处出现反椭现象（不圆度为 $-14\% \sim 16\%$ ），经分析该变形为滑槽夹紧导致的预变形，可通过优化滑槽结构（即在对应位置增加过渡段）或者适当降低滑槽夹紧力解决。

3.4 弯头壁厚检查

(1) 以某项目为例按标准进行验证，该项目设计计算的最小壁厚 (δ_t) 20 G 为 2.02 mm、12Cr1MoVG 为 3.09 mm，001~005 号弯头外侧最小壁厚计算值为 2.15 mm，006~010 号弯头外侧最小壁厚计算值为 3.06 mm，实测壁厚如表 1 所示，所有弯头外侧最小壁厚实测值均满足标准 GB/T16507.5 的要求。

(2) 通过弯头 20G $D51 \times 5$ R60(编号 003、005) 和 12Cr1MoVG $D51 \times 5$ R60 (008、010) 解剖实物 (如图 7(a)所示) 和测量数据对比，弯头的壁厚和流通截面变化均匀，一次冷弯成型质量好。

3.5 弯头硬度检查

通过剖切取样对热处理前后弯头直段、0°、45°、90°、135°、180°处的硬度进行检测，数据如图9所示，20G硬度标准值为120~160 HB，12Cr1MoVG硬度标准值为135~195 HB。经分析可知，弯管20G D51×5 R60按图6(a)热处理曲线热处理后硬度值有所下降但仍高于标准规定的原材料硬度值，弯管12Cr1MoVG D51×5 R60按图6(b)热处理曲线热处理后硬度值均低于标准规定的原材料硬度值，晶粒度由7.5级变成4.5级，经查实由于热处理炉故障导致弯管12Cr1MoVG实际加热温度约为900℃（高于实验设置的热处理温度），实际制造过程中需通过调整热处理温度和保温时间使硬度值更接近于标准要求的原材料硬度值。

3.6 弯头力学性能检查

冲击试样加工尺寸为55×10×2.5 mm，20℃温度下的冲击功和拉伸试验结果如表2所示，20G热处理前后的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、冲击吸收能量均满足标准GB/T5310的要求；12Cr1MoVG热处理前的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、冲击吸收能量满足标准GB/T5310的要求，热处理后断后伸长率、冲击吸收能量满足标准GB/T5310的要求，屈服强度、抗拉强度稍低于标

准要求，经查实由于热处理炉故障导致弯管12Cr1MoVG实际加热温度约为900℃（高于实验设置的热处理温度），实际制造过程中需调整热处理温度和保温时间。

3.7 弯头金相检验

所有弯头试样宏、微观检验均未发现缺陷，组织为铁素体+珠光体，晶粒度为4.5级~8.5级。金相检验结果满足标准GB/T5310的要求（GB/T5310中要求晶粒度4~10级，显微显微组织要求为铁素体+珠光体）。

4 试验结论

通过以上数据分析可得以下结论：①本试验弯管成功的所有弯头除了超温导致弯管12Cr1MoVG D51×5 R60热处理后硬度、力学性能和尾弯反椭圆变形不满足标准要求外，其余检查检验结果均满足标准要求；而这两个问题可分别通过调整热处理温度和尾弯反椭圆处增加过渡段来解决，对弯管成功与否无直接影响，故本研究采用的理论计算方法可靠，可作为弯管能否采用一次冷弯成型的理论判断依据；②相对壁厚 $S_x \geq 0.1$ 、相对弯曲半径 $1.1 \leq R_x < 1.5$ 的钢管D51可采用一次冷弯成型。

（上接第56页）

BOBBIN探头幅值-伤深曲线可协助相位-伤深进行伤深定量，比较两种曲线的定量伤深，以判断定量伤深的准确性。对换热管内壁轴向刮痕缺陷，由于幅值-伤深曲线是基于实际不同深度切槽的涡流数据拟合而成，因此新的幅值-伤深曲线比相位-伤深曲线更适合进行伤深定量

3 结语

基于人工机加的系列内壁切槽，通过万能工具显微镜测量准确数据，采用三种曲线进行伤深定量分析，其中包括通用BOBBIN探头相位-伤深曲线，旋转探头和阵列探头幅值-伤深拟合曲线及BOBBIN探头幅值-伤深曲线。由于涡流检验的特性，对于不同缺陷的响应存在差异，本课题重点关注在

制造阶段对换热管内壁刮伤缺陷的定量分析，对此类缺陷采用新拟合的旋转探头和阵列探头幅值-伤深曲线及BOBBIN探头幅值-伤深曲线定量伤深具有更高的精确度。

由于人工机加槽的数量和模型参数设计有限，目前国内对换热管内壁切槽的机加精确度不高，对实验数据都有一定影响，理论上样本数据越多，机加精度越高，新拟合的幅值-伤深曲线就更具精度。因此，通过现有数量的不同深度切槽拟合的幅值-伤深曲线，其精确度还需要再研究。

参考文献

- [1] 徐可北, 周俊华. 涡流检测[M]. 北京:机械工业出版社, 2004
- [2] 曹刚, 柳祥梅. 涡流检测[J]. 换热器传热管穿孔缺陷的涡流检测信号. 无损检测, 2009.31(8):619-624

大型变压器零起升压方法在孤网启动中的研究与应用

刘星

东方电气集团国际合作有限公司，成都 611731

摘要: 在中、小型孤网系统中，电源往往是由许多分布式小型发电机组构成的，然而连接电源的电力变压器容量则可能较大，因此，在联网启动过程中，就会存在‘小马拉大车’的现象，这将对变压器的冲击启动和孤网系统稳定运行提出巨大挑战，如果方法选择不当，不仅无法完成联网过程，甚至会造成全部发电机组跳闸。本文通过研究电力变压器零起升压方法在孤网联网启动过程中的应用，探索适用于小型孤网系统联网启动的方法。

关键词: 孤网启动；零起升压

中图分类号：TM31

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2023）01-0063-04

Study and Application of Transformer Soft Charging Methods During Island Grid Energization

LIU Xing

(Dongfang Electric International Corporation, 611731, Chengdu, China)

Abstract: In some medium and small island grid systems, the power sources are composed by lots of distributed small generators, however, the capacity of the power transformer for connecting the island grid may be large, it will lead to a small generator being designed to energize a large transformer, just like ‘a small horse tracts a heavy truck’, and the result is that the energization of the transformer and grid stability will face a huge challenge. If the method of energization is not deployed properly, the complete energization process will fail, even the whole system may be blackout. In this article, a soft charging method for large transformers’ energization in the island grid system is proposed, which aims to explore a method suitable for smooth energization of island grid system.

Key words: island grid system energization; soft charging

电力变压器是输变电项目中最重要的设备，是连接高、低电压，形成电力系统的最重要一环，因此，变压器在投运过程中的安全、稳定是项目成败的关键。在常规输变电项目中，变压器冲击合闸一般选择在变压器的高压侧进行，同时用来检测变压器的机械强度、保护动作、绝缘接地等性能^[1-2]。

对于中、小型孤网系统，特别是首次联网启动时，由于没有外部高压电网，需要从变压器的低压侧进行冲击合闸，而低压侧电压较低，且电源往往是由许多分布式小型发电机组构成，在变压器冲击合闸时，产

生的励磁涌流将会导致发电机保护跳闸和连接于低压系统母线上的负荷设备低电压保护跳闸，从而导致系统稳定性被破坏。因此，孤网系统全部采用从低压侧冲击合闸启动变压器的难度较大，需要考虑采用零起升压的方式建立起高压电网，再根据标准要求，从高压侧依次实现对其它变压器的冲击合闸^[3]。

零起升压的方法在国内虽然有所应用，但多用于对超大型电力变压器冲击合闸试验前的检查，用以避免全电压一次加压对设备造成损坏，一般是采用应急柴油机单独对变压器进行零起升压的试验^[4-5]。国内

收稿日期：2022-09-28

作者简介: 刘星（1984—），男，2011年毕业于华北电力大学热能工程专业，硕士，中级工程师。现在东方电气集团国际合作有限公司，主要从事项目管理工作。

也有部分电站为了节约变压器冲击合闸试验时的倒闸操作，采用零起升压对变压器进行单独试验^[6-7]。但是，很少有在孤网系统中利用零起升压的方法来冲击启动变压器和电网，因此，可借鉴的参考资料较少。本文基于对零起升压的研究，在国外某海岛项目应用零起升压的方法实现了对大型电力变压器的联网启动，取得了良好的效果。

1 某项目孤网系统介绍

某项目位于印度洋海岛，项目要求在3个相邻的岛屿上分别新建3座132 kV/11kV的变电站，然后通过132 kV电缆把3个变电站连接起来，形成环网。3座变电站分别与现有3个发电站通过11 kV电缆连接。现有3个电站的装机容量分别为A岛10台大小为5~9 MW不等的柴油发电机组，总装机总容量约60 MW，B岛6台大小相等的9 MW柴油发电机组，装机总容量约50 MW，C岛装机容量约16

MW，新建的3个变电站中，A岛和B岛变电站的布置和配置相同，主变压器容量为2×95 MVA，C岛变电站的配置相对较小，变压器容量为2×8 MVA。系统单线图如图1示意如下：

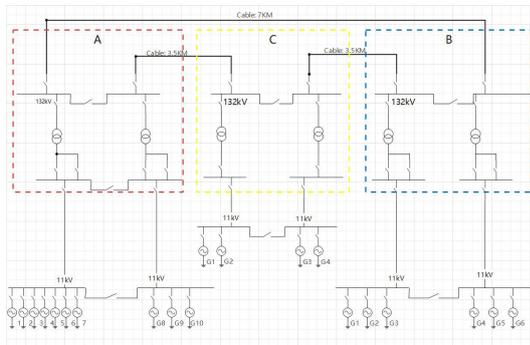


图1 孤网系统单线示意图

A、B发电站柴油机组容量配置如下表1所示：

表1 发电站柴油机组容量配置

名称	ID	P(MW)	Voltage(kV)
A 发电站	DG1	4	11
	DG2	3	11
	DG3	3	11
	DG4	3	11
	DG5	5	11
	DG6	6.5	11

B 发电站	DG7	6.5	11
	DG8	9	11
	DG9	9	11
	DG10	9	11
	DG1	9	11
	DG2	9	11
	DG3	9	11
	DG4	9	11
	DG5	9	11
	DG6	9	11

从表1的配置以及单线示意图可以看出，变压器的容量远大于任何一个单台柴油发电机组的容量，无法采用任何一个单台柴油发电机组对变压器进行冲击合闸。项目开始阶段，原计划从A发电站和B发电站分别采用4台9 MW的柴油发电机组并联运行来从低压侧分别对变压器进行冲击合闸，后经过模拟计算分析，发现在变压器的冲击启动过程中，系统最大电压降达到了正常电压的55%，如图2所示。虽然柴油发电机组本身可以承受这样的短时电压降，但是，电站内其他辅助设备是无法承受的，这必然导致辅助设备的失压报警和跳闸，而对于一个孤岛系统而言，所有辅助设备的跳机将最终导致发电机跳机，进而导致整个系统宕机，在项目调试过程中，由于分析不到位，确实发生了A岛发电站整体跳闸断电的事件。而如果从132 kV侧对变压器进行冲击合闸，系统最大电压降为正常电压的80%，如图3所示，在这种情况下，基本能够满足辅助设备对电压降的要求，而不会发生系统跳闸断电的情况。

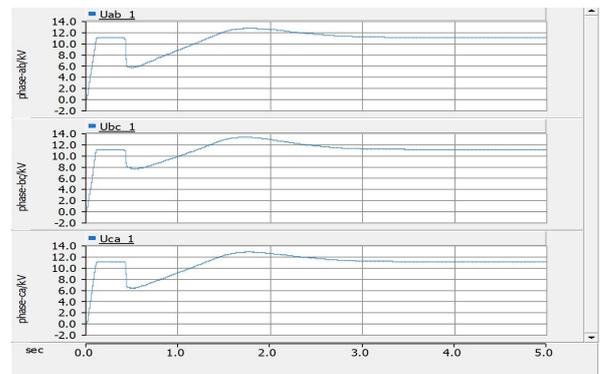


图2 软件模拟的变压器冲击时电压降曲线(11 kV 侧冲击)

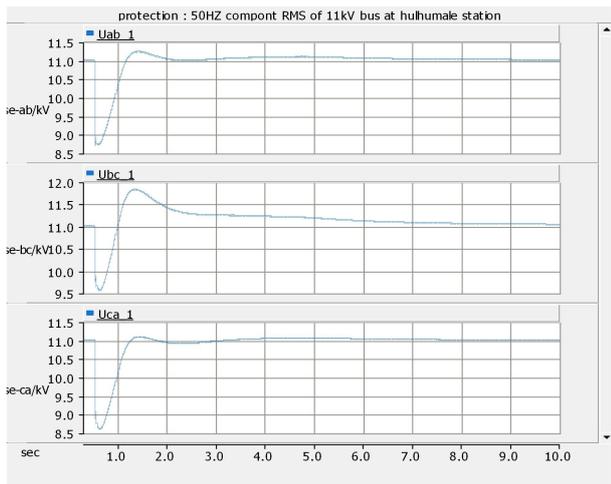


图3 软件模拟的变压器冲击时电压降曲线(132 kV 侧冲击)

2 零起升压联网启动方案

为了能够实现项目的正常联网,结合对已有电站项目的建设经验,提出了采用零起升压的解决方案。该方法的主要步骤如下:

(1) 将 B 发电站的 11 kV 母联开关断开,将全部负荷倒至其中一段 11 kV 母线,用另外一段空母线进行零起升压操作;

(2) 将其中一台柴油发电机组、11 kV 母线、132 kV 变压器组成的发变单元上的所有开关闭合,其他开关均断开;

(3) 变电站发出启动指令,传输到柴油发电机组控制系统后,柴油发电机组开始启动,电压缓慢上升,直至额定电压,达到零起升压的目的,变压器的电压也由 0 升至 132 kV;

(4) 零起升压完成后,由于柴油发电机不能长时间空负荷运行,需要尽快将 B 发电站的 11 kV 母联开关闭合,使柴油发电机组负荷上升并接入供电系统,分担供电任务, B 发电站的 11 kV 供电系统也逐步恢复到原计划供电状态;

(5) 132 kV 电压建立后,按顺序从 132 kV 侧完成对剩余 5 台变压器的冲击合闸。按照图 4 中的步骤 3、4、7、8 对变压器进行冲击合闸时, B 发电站至少保留 4 台柴油发电机组处于运行状态。在对其余 5 台变压器冲击合闸时,按照国标 GB 50150-2016 电气装置安装工程电气设备交接试验标准要求,对每台变压器进行 5 次冲击合闸试验后再进

入到下一操作步骤;

(6) 在完成图 4 中的步骤 6 后,再从 11 kV 侧进行 A 发电站与电网系统的并网操作。

通过零起升压方案来实现电网联网的顺序如下图所示:

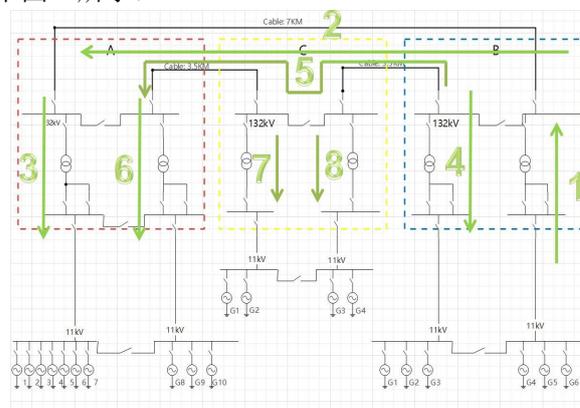


图4 零起升压的电网启动顺序示意图

通过零起升压来实现电网联网的方法提出后,经过与设计院、电科院、调试所等单位的专家讨论,又通过与柴油发电机组厂家的反复沟通论证,认为方案可行,并将该方案确定为最终的冲击启动方案。根据方案内容,进一步核算了零起升压需要的发电机容量,决定采用单台 9 MW 的柴油机作为启动电源,根据现场负荷端的重要程度和分布情况,最终选择从 B 发电站采用 1 台 9 MW 的柴油发电机组作为电源,完成本次变压器的冲击启动,同时,还需要对柴油发电机进行部分改造,以达到自动实现零起升压的全过程。最后,项目团队根据该方法,制定了详细的启动方案,准备了具体的操作程序和分解步骤,以及总体的实施计划,通过精心的准备和部署,最终实现了变压器零起升压和整个系统电网的启动、建立。

3 结果分析及总结

整个方案实施过程中, B 发电站和变电站的零起升压过程一次顺利完成,实施过程中,电压和电流建立过程平稳,发电站监控系统未监测到系统电压波动。

当 132 kV 电压建立后,对 A 变电站的变压器从 132 kV 高压侧对其进行冲击合闸时, 11 kV 系统电压如软件预测的一样,电压降为正常电压的 90

%，如图5所示，情况比软件预测的80%还要好一些。



图5. A变电站变压器冲击合闸时11kV侧的实际电压变化

首次联网启动时，图4中的步骤3完成后，立即从11kV侧对A发电站与电网系统进行了并网，并顺利完成，此时，132kV电压系统进入稳定运行，A发电站和B发电站处于联网运行的状态。当按照计划进入步骤4，对B变电站的变压器从132kV高压侧进行冲击合闸时，A发电站却发生了如前所述的系统跳闸事件，引起整个A发电站失电。后经过排查和分析，发现主要原因包括两方面：一是由于进行步骤4时，11kV系统的瞬时电压降低较大，而此时A发电站处于电网系统中，A发电站中的部分辅机电机首先报警跳闸；二是由于A变电站中的部分柴油发电机组使用年限较长，设备老旧，发电机的励磁响应能力差，无法快速响应电压变化，进而加剧了电压的降低，最后导致系统电压失稳，从而引发了全部发电机跳闸。

项目团队经过对事件原因的认真分析、讨论、总结，进一步对并网步骤和方案进行了优化调整，在首先完成对A和B变电站的所有4台变压器冲击合闸后，再对A发电站进行联网接入，避免变压器冲击合闸对A发电站内的电压系统造成冲击和影响，最终成功的实现了对所有6台变压器的冲击合闸。联网成功后，项目团队总结出了适用于本项目的并网冲击启动方案，后期形成了该项目的运行维护手册。

从本项目变压器零起升压在孤网系统中的成功研究和应用，我们可以得到如下的结论：

(1) 对于分布式的孤网项目，高压电网的建立和启动，特别是含有大容量变压器的系统中，首次建立电网时，由于没有外部高压网络，必须从低

压侧对变压器进行冲击合闸。如果采用通常的冲击启动方法，即通过小的分布式电源并列对大容量变压器进行冲击，由于分布式电源的容量相对于变压器是偏小的，启动过程中会产生较强的电磁涌流，引起低压侧电压大幅下降，对各项辅助系统用电设备造成较大影响，很可能引起设备的损坏或跳闸，进而影响到整个系统，最终无法实现并网启动任务，因此利用低压侧电源建立电压时应将该母线上的负荷断开或移至别的母线，避免变压器励磁涌流导致的负荷跳闸影响系统稳定性。

(2) 零起升压不仅能够作为大型电力变压器的试验检测方法，还能应用于孤网系统的启动和建立，该方法能够很好的解决变压器冲击时励磁涌流和电压降影响系统稳定性的问题，特别是对于小系统和大变压器这种‘小马拉大车’的情况。零起升压时系统电压从0开始逐步建立，未对变压器和系统产生冲击，不仅能够实现平稳启动，还有利于保护变压器和整个系统。

(3) 孤网系统的建立是一个复杂和全面的过程，要考虑到系统中的每一个设备和环节，特别是对于存在已有老旧电源的系统，不仅要考虑新建电网的参数和设计，还要考虑老旧电源的动态响应能力能否满足启动工况要求等问题，保证各项参数和性能都能够适应整个新电网系统的接入，防止发生设备跳闸、断电等事件。

参考文献

- [1] GB 50150-2016电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S]
- [2] 李鹏. 浅谈电力变压器安装及送电调试运行[J]. 科学之友, 2010(18):14-15
- [3] 刘岗楼, 梁荣学. 小型孤岛发电站大容量变压器冲击测试的应用[J]. 通信电源技术. 2016, 33(5):179-180
- [4] 吴锦华, 谷小博. 500 kV变电所零起升压试验方法的研究与应用[J]. 变压器, 2005(2):5-10
- [5] 董雪松, 孙翔. 1 000 kV变压器零起升压试验的电源方案研究[J]. 浙江电力, 2013,32(2):1-4
- [6] 王建成. 核电厂大型主变压器的零起升压试验[J]. 华东电力. 2003(4):56-57
- [7] 李宏强. 主变压器零起升压试验[J]. 电工技术. 2017/4(A):128-129+150

沿海空气中 316 不锈钢的高温腐蚀行为

于明明^{1,2} 董猛^{1,2}

1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001; 2. 机械工业高温、高压材料与焊接重点实验室, 四川 自贡 643001

摘要: 研究了预涂覆饱和 NaCl 溶液盐膜的 316 不锈钢在 600 °C 水蒸气中的高温腐蚀行为, 并通过模拟 520 °C 沿海工况对比实验, 计算出实际工况年腐蚀速率。结果表明: 316 不锈钢涂覆盐膜在 600 °C 水蒸气中的腐蚀动力学曲线呈近线性递增趋势, 在模拟工况中的腐蚀增重轻微; 涂覆盐膜表面腐蚀产物主要为 Fe₂O₃, 有少量的 NiFe₂O₄ 和 NiCr₂O₄ 尖晶石氧化物, 腐蚀产物剥落严重, 残留腐蚀产物疏松, 腐蚀层中可见贯穿性裂纹, 在腐蚀产物/基体界面处有明显裂纹, 而模拟沿海工况中的腐蚀产物相对致密。

关键词: 316; 沿海工况; 高温腐蚀; 寿命评估;

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0067-06

High Temperature Corrosion Behavior of 316 Stainless Steel in Coastal Air

YU Mingming^{1,2}, DONG Meng^{1,2}

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

2. Laboratory for Hi-temperature, Heat Resistant Material & Welding of China Machinery Industry Federation, 643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: The high temperature corrosion behavior of 316 stainless steel pre-coated with saturated NaCl solution salt film at 600 °C was studied, and the annual corrosion rate of coastal condition at 520 °C was calculated by simulation and comparative test. The results show that the corrosion kinetics curve of 316 stainless steel coating salt film in 600 °C water vapor shows a nearly linear increasing trend, and the corrosion weight gain is slight in the simulated condition; The main corrosion products on the surface of coated salt film are Fe₂O₃, with a small amount of NiFe₂O₄ and NiCr₂O₄ spinel oxides. The corrosion products peel off seriously, the residual corrosion products are loose, penetrating cracks can be seen in the corrosion layer, and there are obvious cracks at the corrosion product / matrix interface. The corrosion products in simulated coastal conditions are relatively dense.

Key words: 316; coastal conditions; high temperature corrosion; life assessment

316 奥氏体钢含有 2~3% 的 Mo, 在海水和其他介质中其耐蚀性比 304 好。在高温下具有良好的蠕变强度、冷变形和焊接性能。主要用于制造电站锅炉的过热器、再热器, 石油化工的热交换器部件等。

当热交换器服役环境为高盐、高湿的沿海地区, 换热管管内介质温度约 520 °C, 与管外高速流动的空气进行换热时, 316 换热管会遭受 NaCl 和水蒸气的协同作用导致快速腐蚀。目前国内 316 不锈钢耐腐蚀性能的研究工作主要采用暴露实验的方法, 也

有报道采用电化学方法研究高温环境的耐蚀性能, 但模拟高温海洋性大气环境下的耐腐蚀性能的研究工作不够深入^[1-3]。本文作者主要采用模拟沿海工况环境下的腐蚀测试方法获得材料的腐蚀速度, 同时在此基础上采用提高腐蚀温度并涂覆盐膜的加速实验, 对热交换器用 316 换热管进行了高温腐蚀研究。通过加速实验和模拟环境下腐蚀速度的加速比, 对样品进行腐蚀寿命评估并对腐蚀产物层进行了分析讨论。

收稿日期: 2022-12-22

作者简介: 于明明 (1982-), 女, 2004 年毕业于大连理工大学金属材料专业, 本科, 高级工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司主要从事锅炉压力容器及核能设备材料研发工作。

1 实验材料与方法

实验用材料为 316 不锈钢管,成分如表 1 所示。

表1 测试材料化学成分 (wt.%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	N
316	0.048	0.43	0.73	0.030	0.002	16.42	11.27	2.01	0.058	0.06

线切割取样后用 120-600# SiC 砂纸逐级打磨,在装有酒精的烧杯中进行超声波清洗除油,经去离子水清洗后吹干、称重、测量尺寸,置于干燥箱中备用。

1.1 加速腐蚀实验

将饱和 NaCl 溶液涂覆于试样表面,获得 2~4 mg/cm² 的盐膜。涂盐后将样品置于管式电炉中腐蚀,该设备带一台蒸汽发生装置。通过控制发生器的温度调节气氛中蒸汽的相对含量,本实验中水蒸气发生器温度为 94 °C,炉内水蒸气含量为 80 vol. %。为保障加速实验与模拟工况实验的腐蚀机理一致,实验温度选取为 600 °C,载气为空气,流量控制为 10 mL/min。腐蚀在常压下进行,实验装置如图 1 所示。

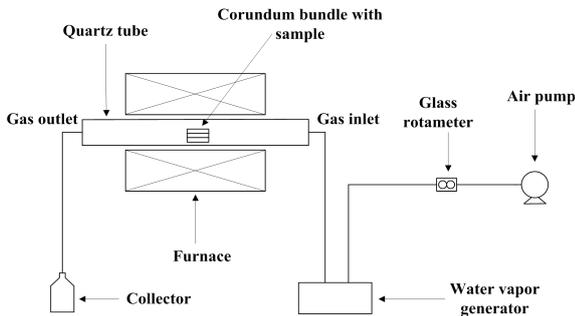


图1 加速实验装置

腐蚀时间分别设定为 100 h、250 h、500 h、750 h、1000 h、1250 h、1500 h,腐蚀到设定时间后收集盛放试样容器内的剥落氧化膜,并称重。分别称量带剥落腐蚀产物和不带剥落腐蚀产物样品的质量,绘制腐蚀动力学曲线。采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(带能谱分析仪)SEM/EDS 对不同腐蚀时间的腐蚀产物成分、结构和形貌进行分析。

1.2 模拟沿海大气高温腐蚀实验

实验时,将载有试样的刚玉管束放入管式炉的恒温区,炉子升温至 520 °C 后,通入 10 mL/min 的模拟气氛进行腐蚀。实验装置如图 2 所示。腐蚀时间分别为 100 h、250 h、500 h、750 h、1000 h、1250

h、1500 h、2000 h、2500 h、3000 h。采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(带能谱分析仪)SEM/EDS 对不同腐蚀时间的腐蚀产物成分、结构和形貌进行分析。

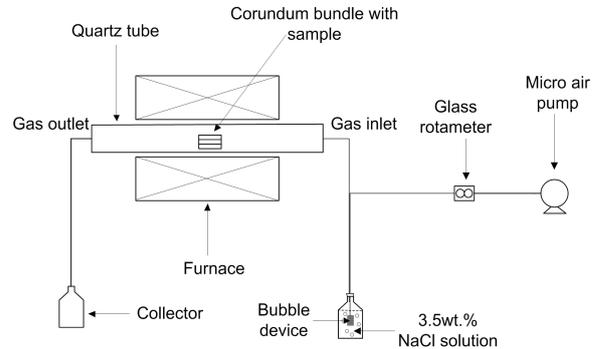


图2 模拟海洋气氛实验装置图

2 实验结果

图 3 (a) 为样品涂覆 NaCl 在 600 °C 水蒸气中的腐蚀动力学曲线。从图可见,不含剥落腐蚀产物的动力学曲线腐蚀 100 h 后样品出现失重。含剥落腐蚀产物的动力学曲线以近线性增重,腐蚀 1500 h 时,试样平均增重约 53 mg/cm²。图 3 (b) 为样品在 520 °C 模拟海洋大气环境中的腐蚀动力学曲线。从图可见,腐蚀前期曲线稍有波动,可能是天平称量过程中误差导致。腐蚀 3000 h 后,试样平均增重为 0.12 mg/cm²。

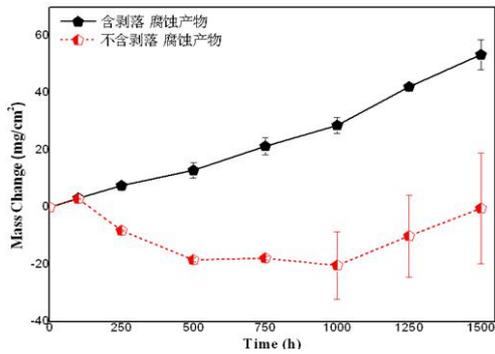
图 4 (a) 为样品涂覆 NaCl 在 600 °C 水蒸气中腐蚀不同时间的 XRD 图。XRD 分析表明,腐蚀 1500h 后,表面腐蚀产物主要为 Fe₂O₃。腐蚀过程中出现少量的 NiFe₂O₄ 和 NiCr₂O₄ 尖晶石氧化物,出现基体衍射峰应为腐蚀产物剥落而导致。图 4 (b) 为样品在 520 °C 模拟海洋大气环境中腐蚀 3000h 后的 XRD 谱图。分析表明,腐蚀 3000h 后,试样表面腐蚀物衍射峰微弱,主要为 Fe₂O₃ 和 Cr_{1.3}Fe_{0.7}O₃。

图 5 为样品涂覆 NaCl 在 600 °C 水蒸气中腐蚀 1500h 后的截面形貌及能谱图。从图可见,腐蚀产物层有明显剥落痕迹,腐蚀层中可见贯穿性裂纹,在腐蚀产物/基体界面处有明显裂纹。能谱分析表明,致密区域 1、2、3、5 均主要由 Fe、Cr、O 元素组成。区域 6 主要由 Cr、Fe、Ni、Mo 及 O 元素组成。

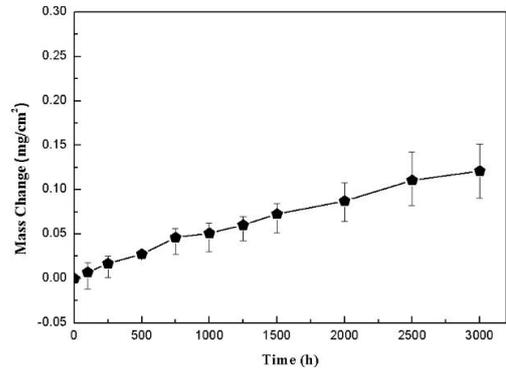
图 6 为样品在 520 °C 模拟海洋大气环境中腐蚀 3000 h 后的截面形貌及能谱图。从图可见,腐蚀 3000 h 后,腐蚀产物层厚度不均匀,试样表面局部

腐蚀产物膜较厚。外层腐蚀产物中可见裂纹。能谱分析表明，腐蚀产物层内层 Cr 含量较高而外层 Cr

含量低。

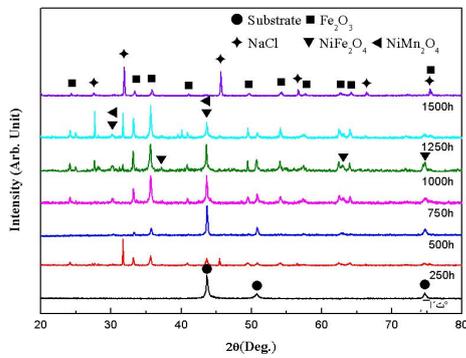


(a) 样品涂覆 NaCl 在 600 °C 水蒸气中的腐蚀动力学曲线

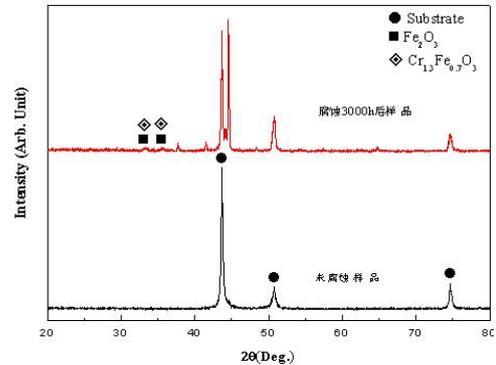


(b) 样品在 520 °C 模拟海洋大气环境中的腐蚀动力学曲线

图3 样品腐蚀动力学曲线

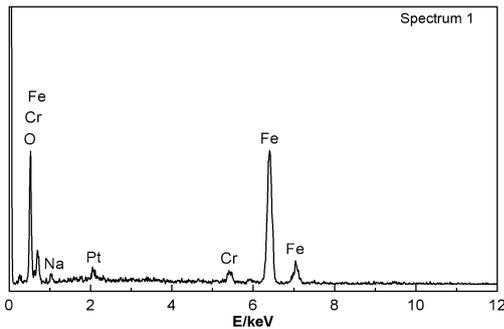
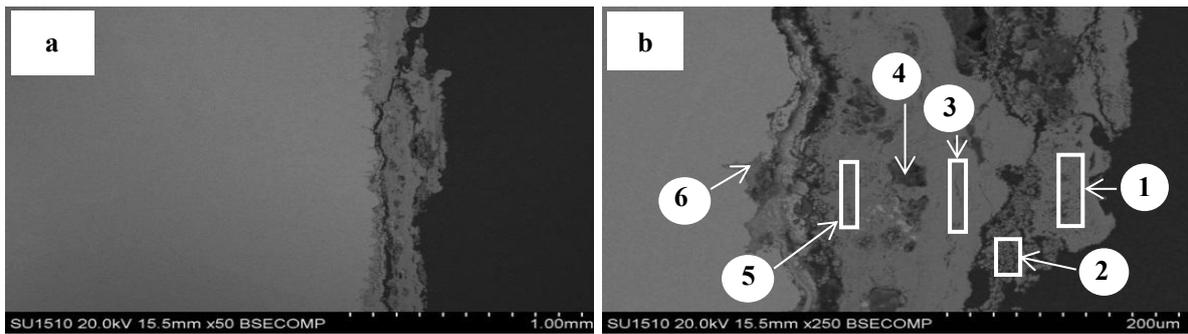


(a) NaCl 在 600 °C 水蒸气中腐蚀不同时间的 XRD 图

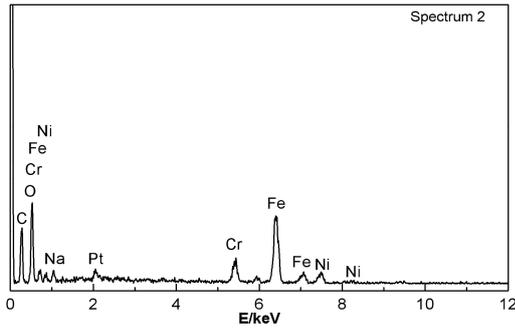


(b) 样品在 520 °C 模拟海洋大气环境中腐蚀 3 000 h 后的 XRD 谱图

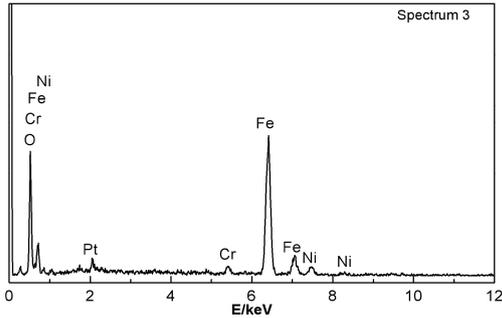
图4 样品腐蚀后的XRD图



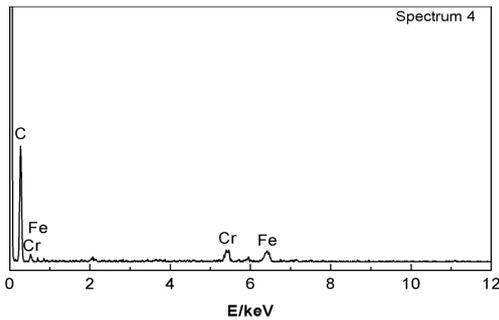
Element	Weight%	Atomic%
Fe K	64.01	38.39
O K	26.42	55.32
Cr K	2.96	1.91
Pt M	4.07	0.7
Na K	2.53	3.68
Totals	100.00	



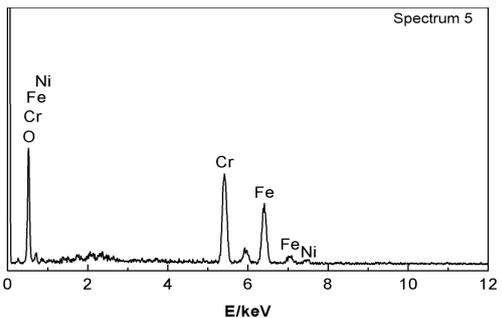
Element	Weight%	Atomic%
Fe K	28.77	10.61
O K	25.84	33.26
C K	28.93	49.61
Cr K	5.57	2.21
Ni K	5.9	2.07
Na K	2.17	1.94
Pt M	2.81	0.3
Totals	100.00	



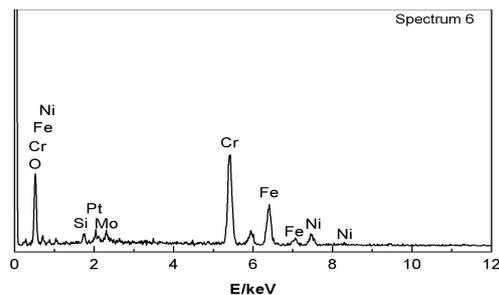
Element	Weight%	Atomic%
Fe K	63.09	40.05
O K	24.35	53.95
Ni K	6.26	3.78
Cr K	2.16	1.47
Pt M	4.14	0.75
Totals	100.00	



Element	Weight%	Atomic%
Cr K	9.22	2.55
Fe K	11.96	3.08
Totals	100.00	



Element	Weight%	Atomic%
Cr K	35.67	23.24
O K	25.04	53.03
Fe K	35.92	21.79
Ni K	3.36	1.94
Totals	100.00	



Element	Weight%	Atomic%
Cr K	37.12	26.32
O K	20.74	47.79
Fe K	23.86	15.75
Si K	1.6	2.09
Ni K	9.55	6
Pt M	3.61	0.68
Mo L	3.53	1.36
Totals	100.00	

图5 样品涂覆NaCl在600°C水蒸气中腐蚀1500h后的截面形貌及能谱图

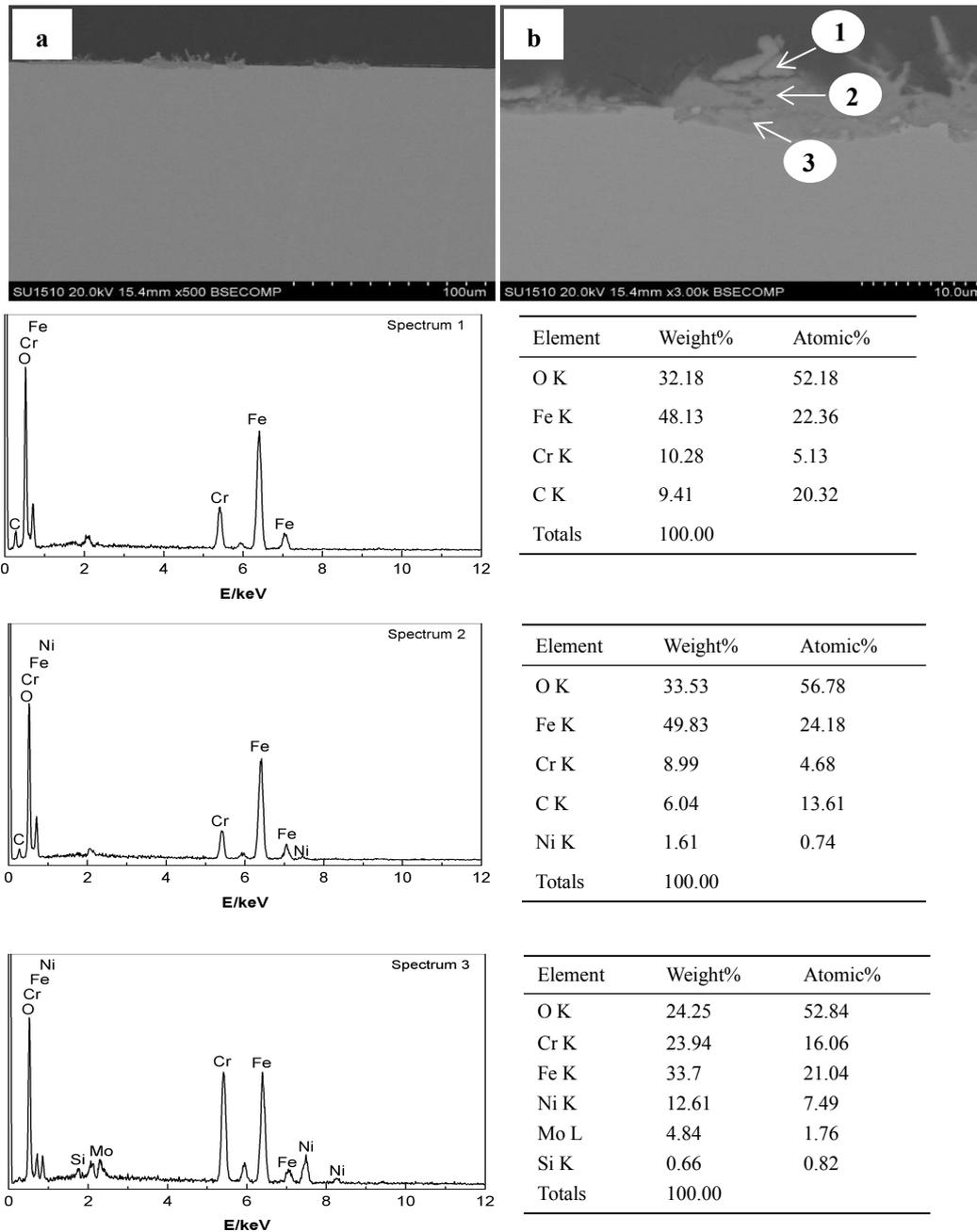


图6 样品在520°C模拟海洋大气环境中腐蚀3 000 h后的截面形貌及能谱图

3 讨论

3.1 腐蚀寿命评估

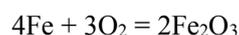
在涂覆盐膜腐蚀实验中，样品腐蚀产物剥落较严重，难于从残余腐蚀产物厚度评估其寿命。但在重量法测试的动力学数据中，通过收集剥落的腐蚀产物获得了动力学曲线，可对样品耐蚀性进行评估^[4]。在评估过程中进行如下合理简化：

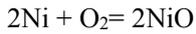
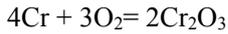
(1) 由于316不锈钢主要组成元素为Fe、Cr、Ni，其它元素含量3 wt.%以下，重量评估中考虑由

Fe (70.5 wt.)、Cr (17.5 wt.)、Ni (12 wt.) 腐蚀而导致样品增重。

(2) 腐蚀前涂覆的NaCl重量约2~4 mg/cm²，且腐蚀过程中NaCl覆层部分挥发，故计算材料腐蚀增重时，忽略NaCl覆层的重量。

(3) Fe、Cr、Ni元素腐蚀生成产物NiCr₂O₄是由两种氧化物固相反应生成的产物，腐蚀仅生成Fe₂O₃、Cr₂O₃和NiO。氧化时按照Fe (70.5 wt.)、Cr (17.5 wt.)、Ni (12 wt.)比例进行。





(4) 根据氧化增重反推消耗金属的量,再由金属消耗量,可以推出消耗金属的厚度。取生成氧化物的PBR值为2.1。

(5) 以模拟海洋大气环境中的腐蚀数据作为真实环境中的腐蚀数据。

表2为涂覆NaCl腐蚀1500h后从样品单位面积氧化增重计算获得金属腐蚀量、金属腐蚀厚度、计算得到的腐蚀层厚度以及实测腐蚀层厚度的数据。图7为以计算得到的腐蚀层厚度为纵坐标,实测腐蚀层厚度为横坐标绘制计算值和测量值的关系图,可以看出实验样品测量残留最厚腐蚀层厚度与计算值对应。皮尔森(Pearson)相关系数可量化两种实验的相关性,其值接近0的变量被称为无相关性,接近1或者-1被称为具有强相关性。本实验中皮尔森(Pearson)相关系数为0.93,具有较强的相关性。因此在模拟环境中当厚度不方便测量时,可以以重量法来反推氧化膜厚度具有很好的可靠性。

通过计算模拟海洋大气环境腐蚀后样品单位面积氧化增重,获得316不锈钢1年腐蚀厚度为1.05 μm,按金属材料耐蚀等级划分,属很耐蚀级别。

表2 涂覆NaCl腐蚀1500h样品理论计算氧化膜厚度与实测厚度表

	样品增重 mg/cm ²	腐蚀金属重量 mg/cm ²	腐蚀金属厚度 μm	计算腐蚀层厚度 μm	实测腐蚀层厚度 μm
1	28.702	68.99	85.92	180.43	100.3
2	30.999	74.52	92.8	194.88	110.5
3	46.863	112.64	140.27	294.57	376
4	53.375	128.31	159.78	335.54	321
5	65.356	157.11	195.65	410.87	403

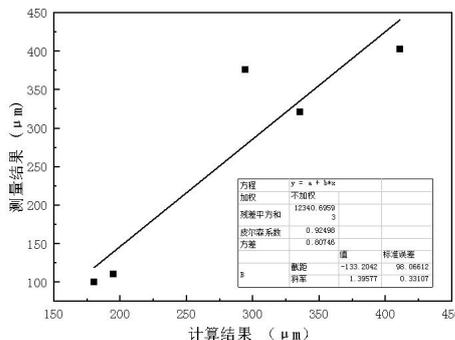


图7 由增重计算氧化膜厚度与实测氧化膜厚度的相关性图

3.2 腐蚀产物层

具有良好高温耐蚀性的金属或合金往往在高温下能够形成完整致密、且与基体结合良好的氧化膜^[5]。涂覆NaCl盐膜的样品在600℃的水蒸气环境中发生快速腐蚀。从动力学上看,总腐蚀增重曲线近似直线规律,不含剥落产物动力学曲线与含剥落产物动力学曲线发生偏离,表明表面腐蚀产物层粘附性较差。从截面形貌图中可看出腐蚀产物疏松多孔且分层,有大量裂纹和孔洞。

根据固态碱金属盐和水蒸气对不锈钢腐蚀的活性氧化理论,不同金属氯化物向氧化物转变所需的临界氧分压有显著差异,即不同金属氯化物在氧化膜中发生氧化的位置不同^[6]。Cr的氯化物向氧化物转变所需的氧分压较低,Fe的金属氯化物向氧化物的氧分压较高^[7],而由于Ni的氯化物的转变所需氧分压更高,绝大多数从合金表面逸出。因此,合金腐蚀层内层富Cr,外层富Fe。

腐蚀过程中,由于腐蚀层中两种应力的存在,腐蚀产物发生开裂和剥落。一方面,金属氯化物的生长引起氧化层中的拉应力,导致腐蚀产物膜破裂^[8]。另一方面,冷却中由于腐蚀产物与合金之间热膨胀系数不匹配,产生较大热应力,形成裂纹并最终导致腐蚀产物剥落^[9]。

模拟工况下的316不锈钢表面瞬间沉积的NaCl量较小,且炉内水蒸气含量较少,腐蚀性气氛量较少,材料腐蚀较轻微,活性氧化不明显。3000h后的腐蚀膜表层主要为Fe氧化物,内层为含Fe和Cr的氧化物。产物层比盐膜加速实验的腐蚀产物层致密。

4 结语

(1) 316不锈钢涂覆NaCl盐膜在600℃水蒸气中腐蚀后,腐蚀产物主要为Fe₂O₃,腐蚀过程中出现少量的NiFe₂O₄和NiCr₂O₄尖晶石氧化物。腐蚀产物开裂、剥落严重,腐蚀产物与基体界面处可以观察到明显裂纹。

(2) 316不锈钢在520℃模拟海洋大气环境中腐蚀3000h后的轻微增重,腐蚀产物不连续。较厚区域分层,外层Fe含量高内层Cr含量较高,外层有裂纹。

(下转第77页)

煤粉锅炉进一步降低 NO_x 排放研究

庄原发^{1,2} 杜文韬² 银登国² 陈倬² 李灵均^{1,2}

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

摘要: 目前煤粉锅炉 NO_x 的排放可以长期稳定控制在 50 mg/m³ 以内, 个别机组甚至将排放标准提高到了 30 mg/m³, 但是, 未见项目按照 NO_x 排放浓度 10 mg/m³ 进行设计。以陕西某电厂煤粉锅炉为例, 以 NO_x 排放浓度 10 mg/m³ 进行研究, 分析进一步降低 NO_x 排放的技术方案、运行安全性、稳定性和经济性。研究表明, 进一步降低 NO_x 排放后, 仅采用高效 SCR 系统方案所带来的投资成本增加, 与采用 SNCR 系统+SCR 系统方案新增投资成本相当; 两种方案运行成本均会上升, 但仅采用高效 SCR 系统方案的运行成本增加额显著低于采用 SNCR 系统+SCR 系统方案的运行成本增加额。仅采用高效 SCR 系统进一步降低 NO_x 排放经济性更优。

关键词: SCR; SNCR; NO_x 浓度; 煤粉锅炉

中图分类号: TK22

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0073-05

Study on Less NO_x Emission of Pulverized Coal Boiler

ZHUANG Yuanfa^{1,2}, DU Wentao², YIN Dengguo², CHEN Zhuo², LI Lingjun^{1,2}

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;

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

Abstract: At present, the NO_x emission of pulverized coal boiler can be stably controlled within 50mg/m³, and some units even keep the index less than 30mg/m³. However, no project was found with the NO_x emission less than 10mg/m³. Taking a pulverized coal boiler in Shaanxi as an example, this paper studied and analyzed the technical scheme, operation safety, stability and economy on NO_x emission within 10 mg/m³. The study shows that in order to achieve less NO_x emission, the increased cost with using the high-efficiency SCR system scheme is basically the same as that with using the SNCR system + SCR system scheme. Furthermore, the operation cost will also increase. The increased annual operating cost required by using the high-efficiency SCR system scheme is significantly lower than that required by using the SNCR system + SCR system scheme. So, using the high-efficiency SCR system for less NO_x emission is much more economical for the plant owner.

Key words: SCR;SNCR;NO_x concentration;pulverized coal boiler

氮氧化物(即 NO_x)是一种酸性气体污染物, 大量 NO_x 排放到空气中会对人类呼吸系统造成较大危害, 也会形成硝酸和硝酸盐细颗粒, 发生远距离传输^[1], 造成大气环境污染, 严重时甚至会形成酸雨, 影响周围动物、植物甚至是人类的生存。2020 年, 我国废气中 NO_x 排放量为 1019.7 万吨, 其中, 工业源废气中 NO_x 排放量为 417.5 万吨, 火力发电企

业 NO_x 排放量为 61.2 万吨, 占全国工业源 NO_x 排放量的 14.7%, 其中内蒙古、贵州、江苏和山东的火力发电企业 NO_x 排放量位居前四^[2]。

为了控制 NO_x 的排放, 我国出台了 GB13212-2011《火电厂大气污染物排放标准》, 其中规定燃煤锅炉 NO_x 特别排放限值为 100 mg/m³ (标干态, 6%O₂, 下同); 为了进一步降低 NO_x

收稿日期: 2022-09-30

作者简介: 庄原发(1985—), 男, 2009年毕业于清华大学环境工程专业, 本科, 中级工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 主要从事烟气污染物脱除、工业废水处理、工业固废资源化利用技术研发工作。

的排放，发改委联合环保部、能源局发布了《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020年）》，其中要求东部地区新建燃煤发电机组大气污染物排放浓度基本达到燃气轮机组排放限值（即NO_x排放浓度不高于50 mg/m³），各地随之颁布了相应的地方标准，全面开启氮氧化物超低排放改造；北京市后续出台了DB11/139-2015《锅炉大气污染物排放标准》，规定2017年4月1日后新建锅炉氮氧化物排放限值为30 mg/m³，该标准为我国目前针对燃煤锅炉最严格的排放标准。

经过2014年至2021年的技术发展，煤粉锅炉的NO_x排放已经可以长期、稳定控制在50 mg/m³以内，满足超低排放标准，个别机组甚至将排放标准提高到了30 mg/m³，但是，暂未发现有按照NO_x排放浓度10 mg/m³进行设计的项目，因此目前仍不断有实现进一步降低NO_x排放的研究和探索。

1 煤粉锅炉降低NO_x排放的方法

1.1 低氮燃烧技术

煤粉锅炉烟气中NO_x来自于煤的燃烧，其中约95%是NO，其余主要是NO₂。根据生成路径，NO_x可分为燃料型、快速型和热力型NO_x，其中燃料型NO_x占比通常可达70%，热力型次之，快速型NO_x通常占比不超过5%^[3]。目前，绝大部分煤粉锅炉均采用了低氮燃烧技术，如进行空气分级等，将锅炉原始NO_x排放控制在较为合理的水平。

1.2 SNCR脱硝技术

燃烧后实现NO_x减排主要是采用脱硝技术。在燃煤机组中，常用的脱硝技术一般为选择性催化还原（SCR）或选择性非催化还原（SNCR）以及这两种技术的联用。

SNCR脱硝技术，是将还原剂直接喷入锅炉烟气侧，在高温烟气环境下，还原剂NH₃与烟气中的NO_x发生还原反应，达到脱除NO_x的目的。SNCR不需要催化剂，需要的反应温度为850~1150℃，但是存在脱硝效率较低、氨耗量高、氨逃逸量大等缺点。

SNCR通常用在循环流化床锅炉中，利用烟气和还原剂在旋风分离器的长时间混合，最高能达到80%左右的脱硝效率。300 MW等级及以上大型煤

粉锅炉因还原剂进入炉膛后的混合效果有限，且烟温快速下降，SNCR系统应用较少，即使有应用，SNCR系统能实现的脱硝效率也很低。四川某电厂2×600 MW超临界W火焰锅炉，单台炉布置56只SNCR喷枪，SNCR设计脱硝效率为30%，实际最高能达到17%左右的脱硝效率。山西某电厂1~6号350 MW锅炉每台炉布置54只喷枪，7、8号锅炉每台炉布置72只喷枪，SNCR设计脱硝效率为30%~40%，实际脱硝效率在20%左右。数个项目投运效果表明，300 MW及以上煤粉炉SNCR喷枪布置的数量较多，但SNCR系统实际运行的脱硝效率一般不超过20%。

1.3 SCR脱硝技术

SCR脱硝技术是在反应器的入口烟道中喷入还原剂NH₃，在催化剂的作用下，NH₃与烟气中的NO_x发生还原反应生成无害的N₂和H₂O，达到脱除NO_x的目的，是一种能实现稳定高效脱硝的技术，脱硝效率最高可达95%以上。

在满足所需工作温度的前提下，目前国内先进的煤粉锅炉可以仅依靠SCR系统将NO_x排放控制在30 mg/m³以内，若进一步降低NO_x排放就只能进一步提高SCR催化剂的使用量，或者增加SNCR系统。

2 进一步降低NO_x排放的技术方案

本文以陕西某电厂燃煤机组为例，以NO_x排放浓度10 mg/m³为目标进行研究，分析进一步降低NO_x排放的技术方案及其运行安全性、稳定性和经济性。

该电厂配置2×660 MW煤粉锅炉，燃用本地烟煤，锅炉采用Π型布置，燃烧器采用对冲低氮旋流燃烧器，锅炉原始NO_x排放控制在200~250 mg/m³。采用尿素水解SCR脱硝系统，单台机组设置2个脱硝反应器，单个脱硝反应器中催化剂按3+1层设计，单层催化剂按7×15布置共105个催化剂模块。原SCR脱硝系统设计脱硝效率为88%，NO_x浓度从250 mg/m³降至30 mg/m³。

要满足进一步降低NO_x排放的要求，将NO_x排放控制在10 mg/m³以内，脱硝系统需达到96%的脱硝效率（按照脱硝入口250 mg/m³计算）。常用

的两种方案，一种是仅采用高效 SCR 系统方案，一种是采用 SNCR 系统+SCR 系统联用脱硝方案。

2.1 仅采用高效 SCR 系统方案

仅采用高效 SCR 系统时，SCR 脱硝效率按 96 % 设计，相对于现有 SCR 系统，需校核供氨能力、提高流场均匀性以及增加催化剂体积，以满足进一步降低 NO_x 排放的要求。

(1) 校核供氨能力

原系统单台机组理论氨耗量为 220 kg/h，电厂配置两台水解反应器，每台水解反应器出力按两台机组总氨耗量的 115 % 设计，即单台水解反应器出力 506 kg/h。按进一步降低 NO_x 排放至 10 mg/m³ 设计时，单台机组理论氨耗量为 244 kg/h，尿素水解反应器及产品气供气系统满足要求，无需调整。

(2) 提高流场均匀性

为了进一步提高 SCR 脱硝效率，需进一步提高 SCR 系统流场均匀性，可采用的措施有：在脱硝入口烟道增设大尺度混合器等调节装置，提高脱硝烟道内烟气流场均匀性；采用精细化喷氨格栅，增加喷氨格栅喷嘴数量，提高还原剂注射到脱硝烟道中的均匀性；提高精准喷氨系统配置，将分区进一步细化，将原单反应器四分区改为单反应器六分区，提升喷氨控制的精确性。

(3) 增加催化剂体积

SCR 脱硝系统提效，需增加催化剂体积。经核算，按进一步降低 NO_x 排放至 10 mg/m³ 设计时，催化剂体积量在原设计单台机组脱硝催化剂体积的基础上增加 62 %。

2.2 SNCR 系统+SCR 系统方案

采用 SNCR 系统+SCR 系统方案时，综合 SNCR 系统在其他项目中的实际运行效果，SNCR 脱硝效率按 15 % 设计，即实现 NO_x 浓度从 250 mg/m³ 降至 213 mg/m³，SCR 脱硝效率按 95.5 % 设计，即实现 NO_x 浓度从 213 mg/m³ 降至 10 mg/m³。

(1) SNCR 系统

SNCR 系统在炉膛折焰角附近区域设置 SNCR 喷枪，将尿素溶液浓度稀释后喷入炉膛。其中前后墙各布置 16 支，左右侧墙各布置 13 支，单台机组共布置 58 支喷枪。

(2) SCR 系统

同仅采用高效 SCR 系统方案一样，需校核原系统供氨能力、提高流场均匀性以及增加催化剂体积。经对比分析，同上述方案基本上一样，尿素水解器及产品气系统无需调整；需增加提高流场均匀性措施；催化剂体积需在原设计单台机组脱硝催化剂体积基础上增加 51 %。

3 进一步降低 NO_x 排放对机组运行的影响

3.1 对锅炉运行稳定性、安全性的影响

纯净的氨属于中性物质，当它以气氨形态进入炉内时，不会对锅炉受热面造成腐蚀。对于 SCR 系统，脱硝还原剂是以氨/空气混合气状态喷入脱硝烟道中，还原剂的加入对脱硝系统和下游空预器均不会造成腐蚀。但在脱硝系统内氨会和烟气中 SO₃ 反应生成硫酸氢铵（ABS），硫酸氢铵被烟气带入下游空预器，在空预器的低温段沉积，将会对空预器的受热元件产生堵塞和腐蚀，导致空预器区域烟气压力降增加，空预器换热性能降低。若能通过增设大尺度混合器、采用精细化喷氨格栅、提高精准喷氨系统配置提高脱硝流场的均匀性、减少氨逃逸，可尽量消除空预器堵塞问题，则提效后 SCR 系统对于锅炉运行不会带来稳定性和安全性的不利影响。

在 SNCR 系统正常运行情况下，尿素溶液喷入区域烟温约 850~1 150 °C，尿素溶液会迅速汽化、分解，汽化分解后的气体不会对锅炉受热面及锅炉下游设备造成腐蚀。但是，在事故状态下，如某支 SNCR 喷枪喷嘴发生局部堵塞，将可能造成喷射角度的偏移并带来未经充分雾化的尿素溶液冲刷水冷壁的问题，从而在一定程度上可能影响锅炉的稳定性和安全性。

因此，在系统正常运行的情况下，两种方案对锅炉稳定性、安全性均没有影响，但 SNCR 系统+SCR 系统方案由于尿素溶液喷枪数量多，增加了风险发生的可能性。若能有效确保 SNCR 系统设备的稳定性，则可认为两种方案对锅炉稳定性、安全性均几乎没有影响。

3.2 对锅炉效率的影响

SCR 系统对锅炉效率的影响主要有两方面，一是加入的氨/空气混合气和漏风会吸收烟气热量，二是 SCR 脱硝系统会增加锅炉的散热损失。该机组采

用尿素水解制氨方式，稀释风通过暖风器加热至 150 ℃后和水解产品气混合并喷入脱硝烟道，加入的氨/空气混合气和排烟温度相当，因此可认为加入的氨/空气混合气不会对锅炉效率造成不利影响。在漏风和散热损失方面，由于两种方案 SCR 系统烟道、反应器布置与原系统一致，因此可认为两种方案的 SCR 系统均不会额外增加对锅炉效率的不利影响。

采用 SNCR 系统，为了保证 SNCR 喷枪雾化液滴的穿透性，单支喷枪的出力不能太小，因此只能将尿素溶液稀释后喷入。由于向炉膛内喷入了大量的水，这些水最终以水蒸气形式随烟气排出，因此 SNCR 系统对锅炉效率会有一定影响。根据计算，SNCR 系统对锅炉效率的影响约为 - 0.20 %。

3.3 脱硝系统自身的可靠性

SNCR、SCR 系统经过多年的工程应用，系统十分成熟，其自身的可靠性已经很好，影响系统可靠性的设备都设有备用，因此无论是采用 SNCR+SCR 系统还是单独采用 SCR 系统，其脱硝系统的可靠性均很好。

4 进一步降低 NO_x 排放经济性分析

4.1 投资成本分析

(1) 仅采用高效 SCR 系统方案

提高 SCR 系统流场均匀性，需采用的措施有：在脱硝入口烟道增设大尺度混合器等调节装置；采用精细化喷氨格栅，将喷氨格栅喷嘴数量增加；提高精准喷氨系统配置，将分区进一步细化，将原单反应器四分区改为单反应器六分区。需增加的设备见表 1。

表 1 仅采用高效 SCR 系统方案需增加的设备清单(单台炉)

序号	项目名称	原方案	新方案	单位	数量	备注
1	喷氨格栅及静态混合器	常规	精细化喷氨格栅	套	1	重新更换
2	大尺度混合器	无	新增	套	1	新增
3	精准喷氨系统					
3.1	反应器出口 CEMS	每套含 4 分区	每套含 6 分区	套	2	重新更换
3.2	气动流量调节阀	8 只/套	12 只/套	套	1	增加 4 只
3.3	流量变送器	8 只/套	12 只/套	套	1	增加 4 只
4	脱硝催化剂	V m ³	1.62V m ³	套	1	体积增加 62 %

(2) SNCR 系统+SCR 系统方案

该方案 SCR 系统增加的部分同上述方案基本上一致，另外需增加一套 SNCR 系统，该方案增加的设备见表 2。

表 2 SNCR 系统+SCR 系统方案需增加的设备清单(单台炉)

序号	项目名称	原方案	新方案	单位	数量	备注
一	SNCR 系统					新增
1	尿素溶液供料泵	无	新增	台	2	公用
2	SNCR 喷枪	无	新增	只	58	
3	尿素阀门	无	新增	套	1	
4	压缩空气阀门	无	新增	套	1	
5	稀释水阀	无	新增	套	1	
6	管道及支架	无	新增	套	1	
7	控制系统	无	新增	套	1	
8	电气系统	无	新增	套	1	
9	稀释水箱	无	新增	个	1	公用
10	稀释水泵	无	新增	台	2	公用
二	SCR 系统					部分改造
1	喷氨格栅及静态混合器	常规	精细化喷氨格栅	套	1	重新更换
2	大尺度混合器	无	新增	套	1	新增
3	精准喷氨系统					
3.1	反应器出口 CEMS	每套含 4 分区	每套含 6 分区	套	2	
3.2	气动流量调节阀	8 只/套	12 只/套	套	1	增加 4 只
3.3	流量变送器	8 只/套	12 只/套	套	1	增加 4 只
4	脱硝催化剂	V m ³	1.51V m ³	套	1	体积增加 51 %

根据表 1 和表 2 的数据，假定仅采用高效 SCR 系统方案单台炉增加的投资成本为 1，则采用 SNCR 系统+SCR 系统方案新增投资成本为 0.955，比仅采用高效 SCR 系统方案仅略低数十万元。整体来看，两种方案对投资成本的影响差距不大。

4.2 运行经济性分析

将进一步降低 NO_x 排放的两种方案和原系统运行经济性进行对比，从除盐水、电、蒸汽、压缩空气、尿素、催化剂、煤耗（即对锅炉效率影响）等多个方面进行分析。

SCR 系统中除盐水主要用于尿素颗粒的溶解，对于 SNCR 系统，除盐水还用于将 50 %浓度尿素溶液进行稀释，因此 SNCR 系统大大增加了除盐水的消耗量。

SCR 脱硝系统中，长期运转的用电设备为 SCR 尿素溶液供料泵；SNCR 脱硝系统中，长期运转的

用电设备还有 SNCR 尿素溶液供料泵和稀释水泵。此外,增加流场优化措施和催化剂体积后,脱硝系统阻力将增加,由此将造成引风机电耗增加。

脱硝系统蒸汽主要用于耙式蒸汽吹灰器、暖风器、尿素水解器和尿素溶解加热,进一步降低 NO_x 排放对蒸汽的耗量影响不大。

压缩空气主要用于声波吹灰器,对于 SNCR 系统,压缩空气还需用于雾化尿素溶液。

在尿素消耗方面,在脱除同样数量 NO_x 的前提下,SNCR 技术所需的氨氮比远高于 SCR,因此导致脱硝尿素还原剂耗量成倍增加。

SNCR 系统对锅炉效率的影响为 - 0.20%,折算 SNCR 系统造成标煤耗量为 0.51 t/h。

按照年运行小时数 4 500 h 进行计算,将两种方案与原系统运行成本进行对比发现进一步降低 NO_x 排放后,运行成本均会上升:

(1) 仅采用高效 SCR 系统方案运行成本较原系统增加约 230 万元/(炉·年);

(2) 采用 SNCR 系统+SCR 系统方案运行成本较原系统增加约 790 万元/(炉·年)。

5 结语

(1) 通过增设大尺度混合器等调节装置、采用精细化喷氨格栅、细化精准喷氨分区、增加催化

(上接第 72 页)

(3) 通过计算模拟海洋大气环境腐蚀后样品单位面积氧化增重,获得 316 不锈钢 1 年腐蚀厚度为 1.05 μm。

参考文献

- [1] 何琨,王理. 316NG 不锈钢在高纯水环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(8): 631-634
- [2] Luo Q, Chen Y. The studies on the corrosion behaviors of 316NG and 304NG nitrogen-containing stainless steel made in China[J]. Procedia Engineering, 2012 (27):1560-1567
- [3] 舒茗,王丛林,陈勇,等. 316NG 和 321 不锈钢在模拟海洋大气氛围中的电化学点蚀性能研究[J]. 核动力工程, 2017, 38(6):

剂体积量可进一步提高 SCR 系统脱硝效率,可实现进一步降低 NO_x 排放的要求。

(2) 在正常运行情况下,仅采用高效 SCR 系统和采用 SNCR 系统+SCR 系统两种方案对锅炉稳定性、安全性均没有影响,但 SNCR 系统+SCR 系统方案由于喷枪数量多,增加了风险发生的可能性。

(3) 仅采用高效 SCR 系统方案和采用 SNCR 系统+SCR 系统方案,均需增加部分投资成本。整体来看,两种方案对投资成本的影响差距不大。

(4) 进一步降低 NO_x 排放后,运行成本均会上升,但仅采用高效 SCR 系统方案所需增加的运行成本显著低于采用 SNCR 系统+SCR 系统方案运行成本。对于用户而言,仅采用高效 SCR 系统进一步降低 NO_x 排放经济性更优。

参考文献:

- [1] 常艳文,赵海丽,丁志安. 第二次全国污染源普查安阳市环境空气中 NO_x 分析及治理对策研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(12): 42-43
- [2] 2020 年中国生态环境统计年报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2022
- [3] 卢旺. 燃煤锅炉低 NO_x 燃烧技术的分析[J]. 能源与节能, 2021, 12:137-13
- [4] 李美栓. 金属的高温腐蚀 [M]. 冶金工业出版社, 2001
- [5] 谢奕心. 超超临界机组用 Inconel740H 合金的高温氧化性能研究 [D]; 镇江:江苏大学, 2017
- [6] 马海涛. 高温氯盐环境中金属材料的腐蚀[D]; 大连:大连理工大学, 2003
- [7] Enestam S, Bankiewicz D, Tuiremo J, et al. Are NaCl and KCl equally corrosive on superheater materials of steam boilers [J]. Fuel, 2013, 104(104): 294-306
- [8] Jonsson T, Folkesson N, Halvarsson M, et al. Microstructural Investigation of the HCl-Induced Corrosion of the Austenitic Alloy 310S (52Fe26Cr19Ni) at 500 °C [J]. Oxidation of Metals, 2014, 81(5-6): 575-96
- [9] Israelsson N, Unocic K A, Hellström K, et al. A Microstructural and Kinetic Investigation of the KCl-Induced Corrosion of an FeCrAl Alloy at 600 °C [J]. Oxidation of Metals, 2015, 84(1-2): 105-27

一种以风机叶片运行轨迹计算净空距离的方法

李玉霞 宁琨 曾一鸣 王秉旭 杨鹤立 付斌 郭自强 许福霞

东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 在风力发电机组叶片叶尖具有形变位置分别安装一个卫星定位天线, 利用卫星导航定位技术和 RTK 差分修正技术, 实现定位叶片当前位置, 并达到 cm 级别。根据塔筒结构模型, 建立塔筒底部圆心为原点的三维坐标系建立, 利用球坐标计算方法, 完成叶片三维坐标到塔筒坐标的计算。根据点到直接原理, 建立叶尖位置到塔筒最近距离直线的动态方程。从而根据叶片定位数据, 获取实时叶片净空距离。实时叶片净空距离实时进入控制闭环, 一旦出现危险距离, 通过控制及时干预, 避免叶片扫塔, 从而提高叶片塔筒安全性。

关键词: 风力发电机组; 卫星定位; RTK 差分修正; 净空距离; 安全性

中图分类号: TK8

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0078-03

A Method for Calculating the Clearance Distance Based on the Running Trajectory of the Wind Turbine Blade

LI Yuxia, NING Kun, ZENG Yiming, WANG Bingxu, YANG Heli, FU Bin, GUO Ziqiang, XU Fuxia

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

Abstract: A satellite positioning antenna is installed at the deformation position of the wind turbine blade tip, and the current position of the blade is located by using the satellite navigation positioning technology and RTK differential correction technology, and reaches the cm level. According to the tower structure model, establish a three-dimensional coordinate system with the center of the tower bottom as the origin, and use the spherical coordinate calculation method to complete the calculation of the blade three-dimensional coordinates to the tower coordinates. According to the point-to-direct principle, the dynamic equation of the straight line from the blade tip position to the nearest distance from the tower drum is established. Thus, according to the blade positioning data, real-time blade clearance distance can be obtained. Real-time blade clearance distance enters the control loop in real time. Once there is a dangerous distance, the blade tower can be prevented from sweeping through the control in time to improve the safety of the blade tower barrel.

Key words: wind turbine; satellite positioning; RTK differential; correction clearance distance; safety

随着风力发电的大力发展, 大家在追求快速批量发展过程中, 风力发电机组的安全保障变得越来越重要。同时, 随着 2010 年前大力发展的风电场, 目前随着时间、机组性能、寿命都在缩减。风电机组扫塔、倒塔、叶片断裂等事故也是频繁出现。另外, 目前三北平原地区风力发电机组装机容量已趋于饱和状态, 现在风力发电机组安装正逐步向海上和山地区域发展, 从而推动了高塔筒、长叶片技术

发展。通过以卫星定位方式监测的叶片轨迹, 计算出任何时刻叶片和塔筒的净空距离。并集合风力发电机组的状态数据, 完成数据关联分析和数学建模, 在风力发电机组运行过程中, 可提前预知风力发电机组的叶片净空距离。将叶片净空距离反馈至风力发电机组控制系统, 通过闭环控制, 一旦叶片净空距离小于安全值, 通过控制并干预当前状态, 避免叶片扫塔, 保证叶片和塔筒的安全, 从而避免事故

收稿日期: 2022-05-19

作者简介: 李玉霞 (1989—), 女, 2013 年毕业于绵阳师范学院电气工程及其自动化专业, 工学学士, 工程师。现在东方电气风电股份有限公司从事智能技术开发工作。

发生。

1 研究现状

目前，风电行业叶片净空距离均采用监测系统直接测量获得，主要分为以下3种：

1、机舱安装激光雷达或毫米波雷达方案：通过在机舱底部安装激光或毫米波发射和接受装置，通过特定光束，一般为3束光。通过光反射原理，一旦反射距离发生改变，认为当前叶片到塔筒距离为当前光束到塔筒距离。该方案缺点：只有三个点位测量，数据误差大，无法实时感知当前叶片净空距离。同时，方案受气象天气影响较大，在多雾天气，数据基本不可用。

2、机舱安装摄像头方案：通过在机舱安装摄像头，拍摄叶片运行视频，通过机器学习的方法来推算当前叶片到塔筒的净空距离。该方案缺点：需要大量经验图片，容易漏选。摄像机摄像范围有限，只能拍摄固定区域的叶片情况。同时整套方案受外界天气影响较大，无法有效识别当前图像。另外，由于机器学习算法本身的缺陷，存在一定的误差和误报，无法精确预知当前叶片和塔筒净空距离。

3、塔筒相应高度安装雷达测距装置：通过在塔筒上安装导轨，导轨上测距装置根据机组当前偏航状态进行跟踪，并实时测量叶片净空距离。该方法安装复杂，同时安装过程可能会损坏塔筒，可能会带来新的安全隐患。同时该方案成本价格昂贵。

综合以上研究现状可知，风电行业内无任何一个系统可实时监测出当前三支叶片距离塔筒的位置，并无法区分当前是哪一支叶片最容易扫塔。通过在风力发电机组上部署叶片轨迹监测系统可实时定位每支叶片当前位置，并根据数学计算方法完成每支叶片实时净空距离计算，通过主控闭环控制，实时判断当前净空距离是否安全，一旦超过危险阈值，启动主控闭环控制避免叶片扫塔，保证机组安全。同时，同步存储风电机组状态数据，可为叶片设计降载和机组降载提供数据支撑。

2 叶片轨迹计算净空距离方法

2.1 叶片轨迹监测方法

分别在风力发电机组三支叶片叶尖具有形变

位置分别安装1个卫星定位传感器，用于实时定位当前叶片位置，实时提供三维坐标（即：经纬度、海拔）。由于直接卫星定位数据精度只能达到米级，风机叶片旋转线速度比较大，米级精度无法满足风电行业使用要求。定位信号在数据处理终端通过RTK差分修正，保证数据精度达到cm级别，从而保证测量精度，为机组安全保驾护航。具体硬件部署图请见图1。

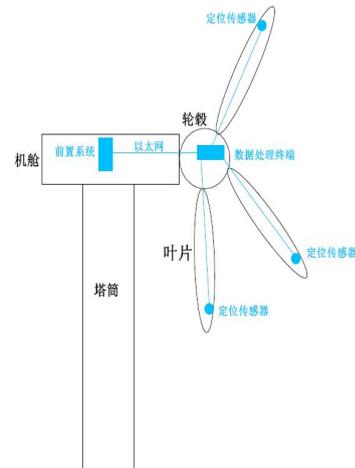


图1 硬件系统部署图

2.2 叶片净空距离计算方法

叶片净空距离计算方法主要依赖叶片轨迹监测的定位数据，并集合塔筒结构参数和风机所处位置的静态坐标等完成计算。计算步骤如下：

(1) 通过已有的风力发电机组叶片轨迹监测系统获取叶尖的GPS定位信息数据；

(2) 通过当前GPS定位信息，使用经纬度、海拔转换算法，计算出当前叶尖以地球球心为原点的三维坐标；

(3) 查询塔筒设计图纸，建立塔筒的结构模型，为一个锥形；

(4) 使用RTK技术测量出塔筒底部圆心的定位数据，并转换成平面坐标系中的三维坐标，并建立以塔筒底部圆心为原点的坐标系；

(5) 完成叶尖已有的三维坐标转换，最终获取以塔筒圆心为原点的坐标系统的叶尖三维坐标；

(6) 根据点到直线原理，并集合当前机组偏航角度和塔筒参数，计算出过轮毂到塔筒顶部圆最短点投影到塔筒底内点并平行过轮毂到塔筒顶部圆最短点动态直线方程；

(7) 点到直线最短距离为垂线，计算当前叶

尖点到当前直线的距离；

(8) 集合已经计算出的叶片净空距离和机组状态数据，完成数据建模，建立数学模型；

(9) 根据当前机组状态和数据模型，可预测叶片净空距离；

(10) 叶片净空距离实时闭环到主控系统中，根据机组状态和叶片净空距离，实时判断，一旦超过安全阈值，及时干预机组控制，保证叶片和塔筒安全。

净空距离计算步骤图如图 2，塔筒模型动态直线方程示意图如图 3。

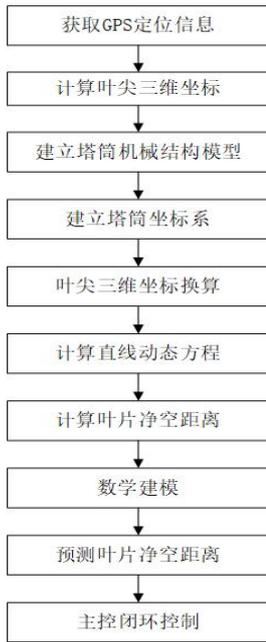


图 2 净空距离计算方法步骤图

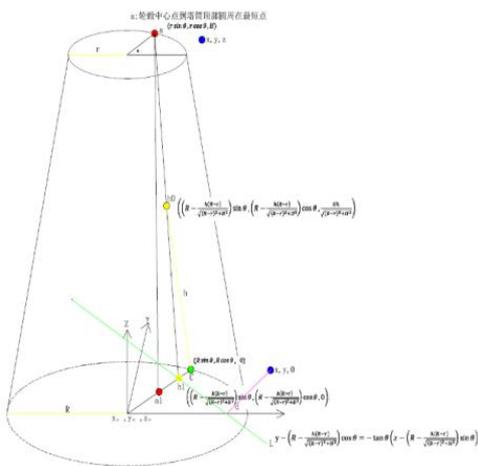


图 3 塔筒模型图

2.3 试验验证

为了验证该方法的可行性，搭建了最小试验系统，系统拓扑图如图 4。

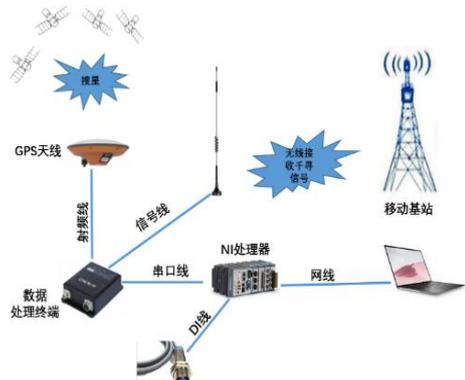


图 4 试验系统拓扑图

为了验证定位天线在叶片内旋转过程中的定位数据质量，通过绑在木条上进行旋转模拟叶片转动情况，并同时获取定位天线的运行轨迹。试验过程如图 5。



Time	Latitude	Longitude	Altitude	Speed	Direction	Accuracy
2023-03-21 14:28:00.000	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.001	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.002	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.003	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.004	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.005	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.006	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.007	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.008	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.009	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.010	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.011	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.012	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.013	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.014	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.015	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.016	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.017	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.018	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.019	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.020	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.021	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.022	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.023	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.024	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.025	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.026	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.027	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.028	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.029	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.030	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.031	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.032	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.033	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.034	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.035	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.036	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.037	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.038	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.039	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.040	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.041	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.042	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.043	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.044	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.045	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.046	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.047	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.048	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.049	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.050	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.051	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.052	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.053	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.054	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.055	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.056	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.057	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.058	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.059	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.060	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.061	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.062	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.063	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.064	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.065	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.066	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.067	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.068	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.069	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.070	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.071	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.072	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.073	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.074	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.075	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.076	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.077	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.078	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.079	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.080	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.081	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.082	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.083	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.084	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.085	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.086	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.087	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.088	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.089	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.090	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.091	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.092	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.093	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.094	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.095	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.096	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.097	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.098	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.099	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000
2023-03-21 14:28:00.100	30.0121	104.2121	100.000	0.000	0.000	0.000

图 5 叶片运行模拟试验

在风电场叶片内完成定位天线安装并完成数据搜集，利用计算方法完成叶片净空距离计算，最终计算结果同激光雷达测距误差在 cm 级别，满足计算方法预期要求如图 6。



图 6 叶片净空距离计算过程

(下转第 87 页)

风电电控系统产品数字化车间建设探索与实践

王君¹ 李华银¹ 张伟¹ 邓建清¹ 闫富乾² 石致远²

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

摘要: 针对当前风电电控系统产品降本压力大、生产周期短、质量要求高等一系列困难, 通过对产品结构特点和生产方式进行分析, 构建以产品交付为中心、动静结合、布局合理的数字化车间。首先实现了产品生产调试全生命周期的数字化管控; 其次实现了生产物料的 AGV 自动配送, 改善一线生产人员作业环境; 改进产品的生产工艺流程和生产组织方式, 提高产品的装配效率; 将传统纸质作业指导书升级为电子作业指导书, 改良文件传递和查阅方式, 提升作业交互体验感; 对产品生产进行全过程质量管控, 实现质量信息透明可追溯。最后探讨了电控系统产品数字化车间的自动化、数字化、精益化建设的发展问题及其与人的关系。

关键词: 风电; 电控; 数字化车间; 生产管控

中图分类号: TK8

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 01-0081-07

Exploration and Practice of Digital Workshop Construction of Wind Power Electronic Control System Products

WANG Jun¹, LI Huayin¹, ZHANG Wei¹, DENG Jianqing¹, YAN Fuqian², SHI Zhiyuan²

(1. Dongfang Electric Auto-control Engineering Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China;

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

Abstract: In view of a series of difficulties such as high cost reduction pressure, short production cycle and high quality requirements of wind power electronic control system products, through the analysis of product structure characteristics and production methods, a digital workshop centered on product delivery, combining dynamic and static and reasonable layout is constructed. Firstly, the digital control of the whole life cycle of product production and commissioning is realized; Secondly, the automatic distribution of production materials by AGV is realized, and the working environment of front-line production personnel is improved; Improve the production process and production organization of products, and improve the assembly efficiency of products; Upgrade traditional paper work instructions to electronic work instructions, improve the way of document transmission and review, and enhance the interactive experience of operation; Carry out quality control of the whole process of product production to achieve transparent and traceable quality information. Finally, the development of automation, digitalization and lean construction of the digital workshop of electronic control system products and its relationship with people are discussed.

Keywords: wind power; electronic control; digital workshop; production control

根据国家“30 碳达峰、60 碳中和”的战略目标, 2030 年风电、光伏发电累计装机要达到 12 亿千瓦以上, 以风、光为主的可再生能源电力电量要在“十

三五”规模上的基础上大幅度增加。但国家“平价上网”政策的实施使得风电设备的市场售价逐步逼近其边际成本, 赢利变得越来越困难。“提质增效,

收稿日期: 2022-11-29

作者简介: 王君 (1982—), 男, 2003 年毕业于成都工业学院机械制造及自动化专业, 本科, 工程师。现在东方电气自动控制工程有限公司, 主要从事机械结构设计分析和智能制造相关工作。

变革求存”的内在动力促使厂商积极探索先进生产方式。从传统制造到智能制造，既是国家层面建设制造强国的主攻方向，也是企业层面实现“降本、增效、提质”的根本诉求和出路^[1]。数字化车间作为制造企业落地智能制造的主战场，对“人、机、料、法、环、测”等进行全面管理，助力制造企业全面迈向高质量发展的中高端水平^[1]。目前，我司风电产线主要有主控系统、变桨控制系统、轮毂监控柜、变频柜等电控产品。综合考虑生产难度、市场需求等多种因素后，认为变桨控制系统产线完整，难度适中，标准化程度相对较高。同时，电控系统产品的生产工艺流程也高度相似，易进行复制应用，对其他电控产品线的数字化车间建设具有示范借鉴价值。为此，将变桨控制系统产品数字化车间的建设作为公司首个电控系统产品车间数字化转型升级的示范项目。

1 风电电控系统产品主要特点

风电电控系统产品安装在风机机舱和轮毂内部，因空间限制，产品结构较为紧凑。近年来风电市场的竞争激励，且越演越烈，设备价格屡创新低，迫使设备商在设计上不断优化产品配置，压缩结构空间，导致机械手臂难以胜任或者需高成本定制。

电控系统产品的生产主要分为电控柜装配、接线和调试成套。电控柜的装配是电控系统产品生产的重要环节，经过近几十年电气工业演变发展，大部分低压电气元件都采用标准导轨安装，适合手工操作。电气元件的电气接口在空间位置上各不相同，相互间通过软导线进行联接，单个柜内的导线数量繁多，为便于后续维护检修须理顺后有序捆扎。因此，当前技术条件下手工装配仍是较便捷、经济的生产方式。

电控系统产品生产是以系统集成装配为主，厂家一般不生产具体的柜体或电气元件。生产工作形式主要为元件采购、组装、成套调试。招标或比价采购是其控制产品成本、质量和维护供应链安全的基本手段，因此，同一功能的元件有多个可替代品牌，导致此类元件在不同配置下生产工艺会存在一定差异。

2 风电电控系统产品的主要生产现状

缺料是影响流水线正常工序流转和生产进度重要因素。在风电变桨系统产品的生产中，缺料原因变化繁多。比如2022年初，上海疫情期间就有大量由该地制造或在此中转的元器件无法到货，导致生产效率低下；部分进口件还会受国际环境影响出现缺货或断货，其中某品牌产品就因俄乌战争而出现断货。

设备价格低，但质量要求高。当前风电主机设备的价格虽然已降至2000元/kW以内，但业内5年的质保要求没变，而且风电机组安装在偏远地区，售后成本较高。若产品质量不过关，高昂售后成本会让利润削减，甚至严重亏损。因此，产品质量就是企业的生命线，生产过程中的质量管理和全过程质量可追溯就异常重要。

多品种小批量生产。目前，以我司风电变桨控制系统产品为例，从柜体结构来分主要有4个系列，分别是AP70C、AP110C、AP150C和AP300C，适应2~13MW风力发电机组。其中AP70C和AP110C适应于陆上机组，约占变桨柜项目总量的85%；AP150C和AP300C适应于海上机组，约占变桨柜项目总量的15%。从产品配置看，虽然现有变桨控制系统产品大的系列并不多，但因项目的个性化需要，同系列产品在不同项目间的配置差异约为15%。在批量上，一般单个风场的容量为50MW~200MW水平，如采用4MW及以上机组，控制系统产品的需求属于在10~50套之间的小批量生产。

生产计划变更频繁。部分项目计划在实际执行过程中，其交付紧急程度会发生变更，也存在临时的紧急插单，甚至有中途撤单的情况。项目变更给生产备料、生产调度、物料调拨与物料管理造成困难。

3 数字化车间建设实践

3.1 电控系统产品数字化车间的建设方案

3.1.1 以产品交付为中心

生产运营的中心目标就是如何调动企业资源组织生产，按期、保质向客户交付质量稳定的产品。

实际生产中面对的主要问题是生产周期短促、物料不足、质量管控。如图1所示，外层的职能部门围绕着生产部门提供服务，生产单位的各小组又围绕着生产交付目标的达成而工作。数字化车间的生产管理平台建设就应实现相关职能部门与生产单位高效联接，协助其完成产品交货目标。



图1 生产运营组织

虽然实际生产过程中会存在各种不利因素影响生产进度，但产品的交货期却是硬性目标。为此，在数字化车间管理平台的设计上就必须面对和适应因缺料而产生的缺料生产、补料生产、换料生产、借料生产、挪料生产等问题。为在可控条件下尽可能增加产线生产组织的灵活性、系统的柔性，而改变传统流水线一串到底的作业模式，并根据产品特点，细分生产流程，让部分工序能够在缺料或元件存在缺陷的条件下也能正常进行生产或限制性流转。

3.1.2 动静结合，合理布局

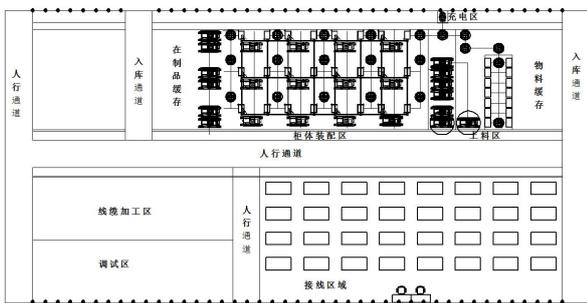


图2 变桨柜生产车间布局图

生产中，缺料和零部件故障都会严重影响“流水线”的正常运转，但变桨柜的装配不受元件装配顺序影响，可通过流水线的生产方式提高装配效率。为此，将上料区、装配区设计为“人静物动”的流水线作业区(如图2所示);将接线区、调试区设计为“物

静人动”的多功能作业区。这样，接线区不仅可完成接线作业，还具备等待补料功能。增强了生产线的柔性，提高了生产组织的灵活性。生产区域都通过编码予以标记和管理，将在制品与二维码地标的绑定以跟踪其流转轨迹，方便识别和查找。

变桨柜装配线具备单柜生产和多柜混线生产两种模式，可由车间调度员根据生产订单量和物料齐套情况自主选择。由于各项目缺料会打乱生产工艺流程，导致序间不平衡生产。为此，将柜体贴的元件标作为生产节拍的调节量，可根据实际情况进行调配，避免生产工艺的频繁变更。实际生产中也可按线别进行产出计件，以调动其生产主动性和积极性。该装配线上，柜体放置在小车上，通过推动小车在各工位间流转，相对于传动线而言经济实用，可兼容大部分同类型的电控柜生产作业。

3.1.3 以人为本，提升效率

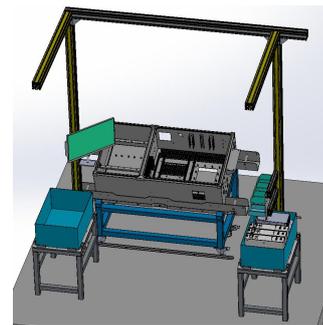


图4 工位布局图

在当前技术条件下，电控柜的装配仍将以手工生产为主。因此在系统设计中需坚持“以人为本”，按照工人操作习惯设计物料架的摆放位置和高度尺寸，23寸触屏一体机屏幕高矮远近可自由调节。电子作业指导书(ESOP)是操作工位数字化水平的重要体现。在操作界面和操作流程设计上简洁明了，符合工人的潜在操作习惯。ESOP集成了每个生产工序的文字说明、图像操作说明、工序物料BOM、过程检验记录、布局图查阅和AGV呼叫送料等功能，如图5所示。柜体装配物料在线前集中分拣后，再将料框、料架、柜体、地标成对绑定，AGV小车根据装配工位的呼叫请求配送物料，减轻工人搬运强度；系统还支持提前“呼料”减少装待料时间，提高配给效率。



图5 ESOP界面

3.1.4 生产全流程数字化管控

软件是工业之魂，是数字化车间建设中的重要组件，是实现电控系统产品从领料、装配直至终检的全过程数字化管控关键。该项目开发的生产管理软件(MMS)平台将与产品生产相关的技术、质量、制造三个部门联系起来，快速响应和服务于生产交付。其功能包含变桨柜生产制造与调试阶段的工单管理、生产执行管理、物料管理、人员管理、质量管理、过程管理、技术文件管理；支持标准化、结构化工艺文件和 ITP 计划的编制功能；支持产品质量信息的多维度查询与追溯，如图6所示。在整个流程中，MMS系统以生产工单为主线，将柜体生产装配过程中的信息数字化，实现在制品状态和生产过程信息的多维度查询，为后期的数据分析，产线精益化改进提供数据支持。

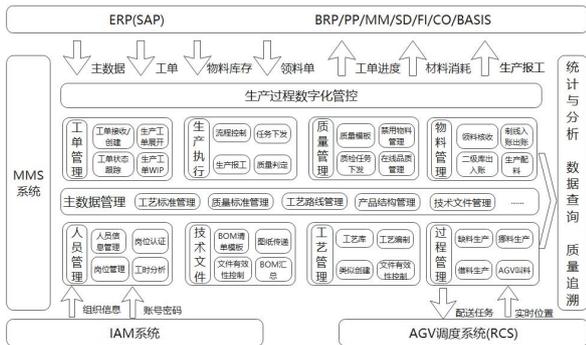


图6 MMS软件系统架构图

MMS软件采用前后端分离架构模式进行设计和管理，可支持无线、有线网络模式(如图7所示)。系统后端采用开源技术框架aps.net(C#)开发设计，前端采用Vue+element技术，服务器部署Linux操作系统，MySQL数据库，开源系统技术可控。系统采用.net core技术平台，前后端分离的B/S架构模式，前端采用最新的VUE+ELEMENT技术，全

面支持谷歌Chrome、360浏览器等多种浏览器操作；后端可进行横向负载均衡扩展，支持多平台操作，可满足同时超过200人在线操作，并具备一定的扩展空间。另外，数据前后端采用JWT认证机制，所有后台数据的获取均进行token口令验证，保障数据传输与获取的安全。



图6 MMS系统全流程图



图7 MMS软件网络架构图

3.1.5 优化BOM传递方案

BOM是将用图表示的产品组成改用数据表格的形式表示，贯穿产品的全生命周期。公司现有模式是由设计人员在PLM系统中搭建设计BOM(不支持清单导入)，完成技术审批后由工艺人员转化为制造BOM后再导入ERP(SAP)形成采购BOM，生产BOM等。整个BOM审批流程冗长，变更时效性较差，且不具备指定物料工序，设置物料替换等功能，其次导入ERP(SAP)后形成的生产BOM不具备层级结构，不满足工序配料要求。若在PLM或SAP软件上定制相应功能，则成本较高。由于在各项目设计过程中，设计人员都会用表格软件编制一份设计BOM清单用于技术评审或项目计划备料。MMS系统便以此为基础增设一条快捷BOM传递通道(如图8所示)，配合必要的审批流程确保出传递文件的有效性。该方案在不明显增加技术、工艺和调度人员工作量的情况下可快速响应生产需求。

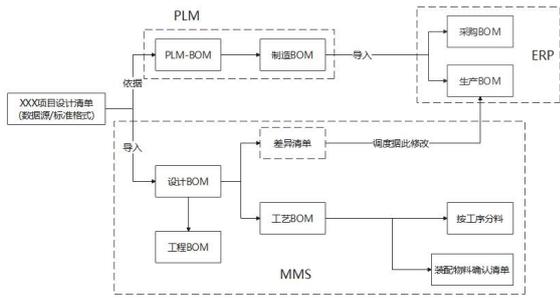


图8 BOM数据流向图

MMS系统定制了系列化产品标准BOM模板，通过不同的属性栏帮助MMS系统实现对物料功能属性的识别。针对具体项目，产品设计和工艺人员只需在对应物料属性栏进行标注，MMS系统便可自动生成该项目所需的BOM清单。同时，MMS系统可对原始设计BOM清单进行版本管理，数据汇总和分类输出，并指导PLM-BOM编制；当设计BOM升级换代时，生产调度人员可根据MMS系统提供BOM差异清单，修改ERP(SAP)系统中的项目生产BOM，及时进行生产变更领料、换料，不必等待PLM的BOM换代流程，降低产品设计时间，提高设计准确性，让技术文件的管理更加规范化，文件无纸化传递更及时，更快响应产品生产。

3.1.6 减少集成，相对独立

为保障数据的跨系统传递的及时性和一致性，减少接口定制，降低软件的开发成本，MMS系统只选择同ERP(SAP)和IAM两大系统进行集成，其中从ERP(SAP)系统获取一级库的物料主、库存、领料单，报工任务等数据，并在完成相应的生产任务后向其反馈结果信息；从IAM系统获取于统一用户认证权限，避免账号密码外泄风险，简化操作，避免人员在不同系统登录时因密码混淆而无法登录。

3.1.7 形式灵活，建设周期短

该数字化车间的建设方案形式灵活，功能全面，建设周期短，容易复制，便于生产线的异地快速建设，快速形成生产能力。系统采用B/S架构的技术路线可以实现跨平台的应用和操作，方便现场设备部署，只要保证整个作业区域内WiFi信号覆盖，强度不低于-60dBm即可满足使用要求，除装配线上人员需在特定区域内操作外，检验、接线，调试人员可通过移动设备上的客户端APP进行操作，不

受产线空间布局形式限制。

3.2 系统测试与验证

系统测试与验证是整个数字化车间建设的重要环节，整个测试工作分为硬件测试、软件测试、产线联调三个测试阶段，如图9所示。



图9 系统测试方案

AGV小车物料配送稳定性测试是硬件测试重点。产线所配置的AGV小车采用激光SLAM方式进行导航和定位。由于部分地面存在隆起变形，个别区域存在空鼓，开裂等现象，在首个90次模拟物料搬运测试中，故障率就达到8%，主要表现为运行轨迹偏离、车轮打滑、空转等现象。在后续的频繁运行测试中，故障率增至30%，地面伸缩缝区还出现压溃现象。在经过测试分析后确认导致这些问题的原因并验证了解决方案。

表1 AGV打滑测试分析处理表

问题	原因	处理方案	验证效果
车轮打滑	地面摩擦系数+ 车轮纹理	打毛地面提高 摩擦系数	处理区域运 行稳定
车轮空转	地面水平度超 差	打磨地面	处理区域运 行稳定
轨迹偏离	运行区域物体 变化超过30%	增设工位标识 固定参考	处理区域运 行稳定

软件测试主要分为模块测试、性能测试和可靠性测试。模块测试主要是对系统各子模块的功能进行测试，性能测试主要是对并发用户数、响应时间等指标进行测试，可靠性测试主要是对系统稳定性等指标进行测试，同时在软件测试过程中始终坚持以人为本，重视倾听使用者所反馈的意见，提升软件的操作的便捷性和防错性。

产线联调分为数据联调和实物联调，数据联调是指产线软硬件测试完成后，将整个系统通过虚拟订单等数据信息贯通测试，保证系统功能的衔接和稳定。而实物联调是指对产线进行试生产作业，通过实物联调优化工艺流程和作业内容，稳定产线生产节拍，评估产线生产效率，同时制定应急处理方案以保证产线后期的稳定运行。

4 风电电控系统产品数字化车间建设探讨

4.1 项目建设效果

风电变桨控制系统产品数字化车间的建设在提升和改善一线生产人员作业环境的同时优化了产品的生产工艺流程和生产组织方式，柜体装配效率得到一定程度的提升。从测试数据测算柜体批量连续装配效率有一定的提升。但由于柜体仍以人工装配为主，根据测试情况来看它容易受产线生产连续性、操作熟练性、人员思想状态等因素影响，因此在后续的稳定运行阶段再进行综合统计评估。MMS系统的ESOP改良了文件传递和查阅方式，操作方便，作业交互体验感好；整合手工账本和纸质单据，便于查询和分析；产品生产全过程质量信息透明可追溯。

4.2 自动化与数字化

在电控柜的自动化装配方面，魏德米勒在佛山机器人学院打造了一个占地50多平米的电控柜自动化装配生产线，采用了大量自动化设备实现简单电控的自动化装配生产。然而对于风电电控系统产品来讲，多品种、小批量、多品牌、常缺料的生产特点和结构紧凑、柜体精度低的产品结构特点都增加了自动化实现难度和实现成本。在变桨控制系统数字化车间的建设方案设计阶段也曾考虑多套自动化生产方案，比如自动制线、元件自动打标、物料自动分拣、导轨线槽自动装配、元件自动装配等方案，但最终因成本、可靠性、技术等原因而放弃。

数字化车间的核心是“用数字连接不同单元，对生产运行过程进行规划、管理、诊断和优化”，其中产品生产运行过程信息的数字化便是车间数字化的关键。西门子成都数字化工厂入选了世界经济论坛发布的首批全球“灯塔工厂”名单^[2]，其自动化程度很高，但在自动产线上仍然有不少工位采用人

工操作，原因是人工操作更具经济比较优势。通信行业的巨头，华为公司的某些电控柜生产线上也是以人工操作为主，但其生产过程信息是高度数字化，辅助生产管理人员进行精准调节、提高生产效率和产品质量。因此，数字化车间生产线上是否需要自动化设备，需要什么样的设备，需要多少，应由产品自身结构、工艺和生产管理特点决定，并应充分体现其经济比较优势；但生产过程信息的数字化是必要的，是数字化车间智能化的关键和基础。

4.3 数字化与精益生产

信息化的核心是互联网，强调的是信息呈现和连接。数字化车间是设备、网络、信息、自动化、精益管理与制造技术相互集成的表现，将生产车间打造成数字化的制造平台，通过改善车间的管理和生产制造各环节，最终实现快速的生产制造过程^[3]，其建设的关键在于将车间生产运行过程的信息数字化。将自然信息转化为数字后便能参与程序运算，通过数学方法对车间的生产运行过程进行分析和优化，这便是建设智能工厂的关键环节，实现智能制造的核心要素。有了精确的数字系统和先进的数据分析手段作为支撑，生产过程管控会变得更加精准，杜绝生产浪费，提高生产效率和生产质量，提升用户体验，促进生产模式的创新发展。

4.4 风电电控系统产品及数字化车间的发展方向

MOOG公司在2017年北京风能展上推出了高度集成的第三代变桨系统，容易实现自动化制造。虽然该产品集成度过高，维护备件受限，未能在国内得到推广应用。但它提供了一种电控系统产品的发展方向，即在实现产品自动化、数字化高效生产的道路上，不能仅从制造技术方面发力，还需要从产品设计源头着手，继续深化产品的系列化、通用化、标准化、模块化设计，创新设计理念，优化系统集成方式，提高电控系统产品的集成度、可靠性和灵活性，简化系统配置，让产品更适合数字化车间的高效生产，降低制造成本。

4.5 数字化车间中的人

不论是传统车间还是数字化车间，人始终是车间健康稳定运行的关键因素。数字车间的建设不是一蹴而就的工程，而是一个不断创新，持续改进、持续投入的过程，这一过程离不开人的参与。车间的数字化和智能化是由人赋予的。在风电变桨控制

系统产品数字化车间的建设中可以切身体验到实现人工智能的前提是人。车间的数字化建设是一个系统工程中，涉及机械、电气、自动控制等多学科融合，企业不仅需要培养和储备这方面的专业人才队伍，还需要各部门通力协作，全面配合和投入。

5 结语

数字化车间建设是有前提、有条件、有成本的，风电变桨系统产品数字化生产车间的建设虽然没有采用大量自动设备，用机械替代人工，但它是贴合该类产品当前生产技术水平的一种数字化车间建设方案。数字化的背后是人，是集体智慧的融合，体现在业务流程梳理、流程规划、软件编写测试等环节中。在该项目中数字化车间建设目标是提质增效，保交付，服务对象是与产品全生命周期中相关的人。只有提升操作用户的体验感，系统才能被接受和应用。熟悉产品、懂技术、懂管理的复合型数字化人才是建设、管理、发展数字化车间的必备基础，同时还需企业上层统筹规划，各部门通力协作，全面投入，共谋数字化，是推进企业数字化转型的组织保证。

产品是有形的，车间生产线是有形的，数字是无形的，思想是无形的，只有将无形的数字化思想注入有形的车间产品生产线，数字化转型方能行且

致远，持续发展。在有形与无形的互动过程中，人的行为和思想也会随之变化，如何运行和管理现代数字车间，数字化企业将是我们需要去面对，思考和探索的新课题。随着风电变桨系统产品数字化生产车间的投入运行，它将源源不断的向系统提供数据，为产线和产品的优化改进，为数字化车间和企业管理提供研究数据。数字车间的投运不是其建设的终点，而是企业数字化转型升级的起点。

参考文献：

- [1] 刘雯霏, 马婷艳. 从数字化车间建设场景“破局”, 以先进技术深挖工业数据价值[J]. 智能制造, 2022(3):23-25
- [2] 贲可存, 胡长明, 冯展鹰等. 复杂电子装备数字化车间发展趋势与实践[J]. 电子机械工程, 2022, 38(1):21-28
- [3] 曹先锋, 贾广鹏. 企业如何搭建数字化生产车间[J]. 时代汽车, 2020(9):8-9
- [4] 邵崢. 装备制造企业数字化车间方案设计与实践[J]. 信息系统工程, 2022(1):12-15
- [5] 胡虎. 三体智能革命[M]. 机械工业出版社, 2016
- [6] 宁振波. 智能制造的本质[M]. 机械工业出版社, 2021
- [7] 赵敏, 宁振波. 铸魂: 软件定义制造[M]. 机械工业出版社, 2020
- [8] 方志刚. 复杂装备系统数字孪生: 赋能基于模型的正向研发和协同创新[M]. 机械工业出版社, 2020
- [9] 陈心德, 吴忠. 生产运营管理(第2版)[M]. 清华大学出版社, 2013

(上接第 80 页)

3 结语

近年来，风电机组因为叶片扫塔引起机组事故事件频繁发生。同时，目前行业内的检测方案并无法精确完整完成净空距离监测，并且系统质量受天

气影响较大。利用本文使用的叶片轨迹完成叶片净空距离计算的方法，可实现实时监测净空距离，最大程度避免叶片扫塔，保证机组安全。通过该方法，可以有效降低叶片扫塔风险，提高机组安全性。同时利用同步搜集的叶片定位数据和风电机组状态数据，可为叶片设计降载提供数据支撑。

欢迎投稿，欢迎订阅！

《东方电气评论》征稿须知

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

《东方电气评论》综合介绍我国电站装备制造领域的科技研发成果及先进制造技术，主要栏目有基础研究、燃煤发电、燃气发电、核能发电、水力发电、风力发电、光伏发电、工程技术、项目管理等。

《东方电气评论》为著作性刊物，欢迎评论性文章，少量接受综述类文章。

来稿必须未公开发表过，且创新性强、观点明确、数据可靠。文稿格式请参照《学术论文编写规则》(GB/T 7713.2—2022)和 GB7714《文后参考文献著录规则》的较新版本；量和单位必须符合国家标准和国际标准。

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

- 1、**投稿方式**：请使用电子文档投稿。电子文档的格式为 WPS 或 Word 文件。投稿时请提供作者第一作者的电话号码、电子信箱和详细准确的通讯地址。
- 2、**论文内容结构包括**：论文题名（20 字内），作者姓名，作者单位（单位及部门名称、地址及邮编），摘要（200 字内），关键词（3~8 个），正文（图、表应在正文中明确引用位置出现），参考文献。
- 3、**英文项目**：题名、摘要、关键词、作者姓名及其单位与通讯信息几部分，除中文外，须译成英文一并提供。
- 4、**插图与表格都应有图（表）序与图（表）题**。刊出后的图片均为灰度图片，请作者确保能准确反映需表达的全部信息，画面清晰，大小适宜。图中字符一般用 6 号宋体字，表格应做成三线表。
- 5、**文中符号**：外文字母、符号必须分清大小写、正斜体，上下角标，数码符号等其位置高低应区别明显，容易混淆的外文字母，请在第一次出现时注明文种或含义。
- 6、**论文作者署名应遵守相关学术不端规定**。
- 7、**作者简介**：包括姓名、出生年、性别、职称和职务、何时何地取得何校何专业学位（最高学历），曾获得过的重大成果获奖励，现在从事的专业工作。
- 8、**参考文献**：只列出已公开发表并在文中直接引用的主要文献，序号按文中出现的先后顺序编排。
- 9、**著作权声明**：本刊已被《中文科技期刊数据库（全文版）》、《中国核心期刊（遴选）数据库》、《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库收录，有关作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付，如作者不同意被收录，请在来稿时向本刊说明。
- 10、**版面费**：本刊未收取发表版面费。论文一经录用，编辑部酌付稿酬并赠送当期杂志每个作者 2 本。
- 11、**邮箱投稿**：dfdqpl@dongfang.com；投稿地址：成都市高新西区西芯大道 18 号，邮编：611731。