

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM



2022

第36卷 总第141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

ISSN 1001-9006



9 771001 900224

03>

中国东方电气集团有限公司 主办
四川省动力工程学会

东方电气评论

第三十六卷第一期

二〇二二年三月

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



公开 ISSN 1001-9006
发行 CN 51-1333/TM

第36卷第1期(总第141期)
出版日期:2022年3月25日

国内邮发代号:62-187
国内定价:8.00元



2022

第36卷第1期 总第141期
(季刊, 1987年创刊)

東方電氣評論

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



2022

2022-3-25 Vol.36 No.1
(Quarterly, since 1987)



目次

编辑委员会

主任委员: 王为民

副主任委员: 王政 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: 王政 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: 028-87898262/63

传真: 028-87898267

电子信箱: dfdqpl@dongfang.com

印刷单位: 成都市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

工业数据空间(IDS)技术概述及其测试床部署实践
..... 周宏林 蒲晓珉 李勇等(1)
基于不同碳载体催化剂的燃料电池催化层在动态启停工况下的
耐久性研究 谢光有 李婷 姚旻翔等(6)
模糊PID控制在氢燃料系统中的应用 唐刚 练勇 余漆等(11)
加氢站内储氢瓶组等质量加注最优配比的研究
..... 袁熹 李颖茹 贺靖皓(18)

燃煤发电

不锈钢轧制式翅片管传热性能研究 杨洋(22)
定子Delta接线在大电机中的应用 冯德洋(26)
非标法兰连接密封设计探讨
..... 刘伟东 季敏东 付涛等(29)
锅炉承压管与非承压附件异种钢焊接工艺研究
..... 李文晖 银润邦 曾辉等(34)
基于主机状态监测的智慧电厂数据计算系统在新型
百万燃煤机组的应用 曹子飞 邢路平 刘征宇(39)
石灰石物相组分在湿法烟气脱硫中的化学行为和反应机理研究
..... 吕丽丹 杨志忠(43)

风力发电

浅谈海上风力发电机组长周期运输和储存的防腐 刘贵林(46)
锯齿尾缘对风电机组气动性能的影响
..... 曾明伍 杨俊伟 孙振业等(50)

汽轮机

M701F4机组一键自启停(APS)方案设计 董溢华 胥波(56)

核能发电

基于新旧《民用核安全设备无损检验人员资格管理规定
(HAF602)》差异分析浅谈过渡期如何管理 王幸幸 罗炜(62)
某换热器承压边界传热系数计算 里超 王博 杨洋等(66)
内陆核电项目凝汽器管材方案选取探讨 苏宏 李中林(71)
台山EPR(欧洲压水堆)核岛辅助设备设计流程简介与分析
..... 李萌(75)

项目管理

基于供应链协同的优化案例分析 黄敏 曾睿 郭艳丽等(78)
关于核电项目执行中风险管理的探讨 吴琛(82)
融资租赁业务中出卖人合同风险防范的研究 唐辉(86)
简讯 (17)(70)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*q*A4*88*zh*p¥8.00*750*20*2022-01

CONTENTS

BASIC RESEARCH

The Overview of Industrial Data Space (IDS) and Practice of the Testbench Deployment
..... ZHOU Honglin, PU Xiaomin, LI Yong, et al (1)
The Effect of Catalyst Supports on the Dynamic Durability of PEMFC Membrane
Electrode Assembly XIE Guangyou, LI Ting, YAO Minxuan, et al (6)
Application of Fuzzy PID Control in Hydrogen Fuel System
..... TANG Gang, LIAN Yong, YU Qi, et al (11)
Study on Optimal Ratio of Equal Mass Filling of Hydrogen Storage Bottle Group in
Hydrogenation Station YUAN Xi, LI Yingru, HE Jinghao (18)

THERMAL POWER/COAL-FIRED POWER

Research on Heat Transfer Property of Stainless Steel Rolling Fin Tube
..... YANG Yang (22)
Application of Stator Delta Connection in Large Motor FENG Deyang (26)
Discussion about Design of Nonstandard Flange Connection
..... LIU Weidong, JI Mindong, FU Tao, et al (29)
Study on Welding Technology of Dissimilar Steel for Pressure Bearing Pipe and Non-
pressure Annex of Boiler LI Wenhui, YIN Runbang, ZENG Hui, et al (34)
Application of Smart Power Plant Data-computing System Based on the Host of
Condition Monitoring in New Million Coal-fired Units
..... CAO Zifei, XING Luping, LIU Zhengyu (39)
Chemical Behavior and Reaction Mechanism of Limestone Composition in Wet FGD
..... LV Lidan, YANG Zhizhong (43)

WIND POWER

Discussion on Corrosion Protection for Long-term Transport and Storage of Offshore
Wind Turbines LIU Guilin (46)
The Influence of Trailing Edge Serrations on Aerodynamic Performance of Wind
Turbine ZENG Mingwu, YANG Junwei, SUN Zhenye, et al (50)

TURBINE

Automatic Power Plant Start-up & Shut Down System Scheme Design of M701F4
Gas Turbine Combined Cycle Unit DONG Yihua, XU Bo (56)

NUCLEAR POWER

How to Manage the Transition Period Based on the Analysis of the Difference between
the Old and New HAF602 WANG Xingxing, LUO Wei (62)
Calculation of Heat Transfer Coefficient at Pressure Boundary of A Heat Exchanger ...
..... LI Chao, WANG Bo, YANG Yang, et al (66)
Discussion on the Selection of Condenser Pipe in Inland Nuclear Power Project ...
..... SU Hong, LI Zhonglin (71)
The Introduction and Analysis of Design Process of TS EPR Nuclear Island Auxiliary
Component LI Meng (75)

PROJECT MANAGEMENT

A Case Study of Optimizing Supply Chain Collaboration
..... HUANG Min, ZENG Rui, GUO Yanli, et al (78)
Discussion about Risk Management in Nuclear Power Project Execution
..... WU Chen (82)
Research on the Prevention of Seller's Contract Risk in Financial Leasing Business
..... TANG Hui (86)

NEWS IN BRIEF (17)(70)

EDITORIAL BOARD

Chairman: WANG Weimin

Vice Chairmen: WANG Zheng, 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: WANG Zheng, 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: 028-87898262 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.)

工业数据空间 (IDS) 技术概述及其测试床部署实践

周宏林¹ 蒲晓珉¹ 李勇¹ 赵志海² 李融³ 杨志伟⁴ 刘迎² 潘轶凡³

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 中国信息通信研究院信息化与工业化研究所, 北京 100191;

3. 中国电信研究院, 北京 102200; 4. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 全球主要国家积极开展工业数据空间研究的背景下, 本文首先介绍了工业数据空间的概念内涵和 4 个典型应用场景, 其次基于应用和需求, 介绍了工业数据空间的整体架构, 然后从业务、数据与服务、软件及安全等技术层面阐述了工业数据空间的参考架构模型, 最后基于东方电气集团内部数据模型传输的场景, 搭建了测试床, 验证了系统部署的可行性。

关键词: 工业数据空间; IDS; 测试床; 数据资产; 数据共享; 数据主权

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 01-0001-05

The Overview of Industrial Data Space (IDS) and Practice of the Testbench Deployment

ZHOU Honglin¹, PU Xiaomin¹, LI Yong¹, ZHAO Zhihai², LI Rong³,
YANG Zhiwei⁴, LIU Ying², PAN Yifan³

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

2. China Academy of Information and Communications Technology, 100191, Beijing, China;

3. China Telecom Research Institute, 102200, Beijing, China;

4. Dongfang Electrical Machinery Co.,Ltd, 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: Under the background of the active development of industrial data space (IDS) research in major countries in the world, this paper first introduces the concept of industrial data space and four typical application scenarios. Based on the application and demand, this paper introduces the overall architecture of industrial data space, and then expounds the reference architecture model of industrial data space from the technical aspects of business, data and services, software and security. Finally, based on the scene of data model transmission in Dongfang Electric Corporation, a testbench is built to verify the feasibility of system deployment.

Key words: international data space (IDS); testbench; data asset; shared data; data sovereignty

工业数据的价值日益受到认可和重视, 替代石油成为工业的新血液。促进数据要素在多方主体之间的共享流通, 是工业数据发挥其价值的关键路径。但是, 在现实中数据的共享流通面临着诸多挑战。2020年3月工业互联网产业联盟开展了《工业大数据利用和管理》的问卷调查, 结果显示 86%的

企业担心数据流通泄露商业机密, 36%的企业担心泄露客户的隐私, 33%的企业担心数据流通会破坏其竞争优势。80%的企业希望有解决方案或者技术手段, 控制数据分享的范围, 58%的企业希望通过数据脱敏或者加强数据使用控制来对数据进行流通管控。

收稿日期: 2021-05-03

基金项目: 四川省科技厅项目: 智慧风电场监控系统关键技术研究; 项目编号: 2020YFG0315。

作者简介: 周宏林 (1984-), 男, 博士, 高级工程师。现任东方电气集团科学技术研究院有限公司 5G 技术应用研究所副所长。主要研究方向为新能源发电装备的网络化控制与 5G+工业互联网技术的应用。

业界需要一个解决方案，实现对数据的使用控制，解决数据拥有者的顾虑。工业数据空间（industrial data Space, IDS）就是这样一个解决方案，并已经逐渐成为了国内外推进工业数据共享流通的共同选择。

相较于传统的数据共享概念，工业数据空间实现三方面的本质提升：一是构建安全可信的共享环境，大幅度降低参与主体间的信任沟通成本；二是实现全流程的可控，有效避免传统基于纸质媒介、互联网等渠道所带来的二次分享或泄露的风险；三是实现多对多的共享，参与主体可自主选择符合需求的数据资源进行利用，有效提升单对单模式下的数据共享效率^[1]。

本文首先介绍了工业数据空间的典型应用场景。基于应用和需求，介绍了工业数据空间的整体架构。然后从技术层面的多个角度阐述了工业数据空间的参考架构模型。最后基于东方电气集团内部数据模型传输的场景，搭建了测试床，验证了系统部署的可行性。

1 工业数据空间的典型应用场景

1.1 协同生产设备管理

运行和维护生产设备需要相关各机器和部件性能、状态的最新完整数据，虽然 OPC-UA 等标准能够有效地集成许多设备数据，不同 IT 系统和平台之间仍然存在信息障碍。由于计划和执行之间存在巨大的时间差，多种因素相互依赖且动态变化，工业互联网的推进将面临严峻挑战，如当需要跨公司安全地交换数据（如维护人员所需的机器状态数据或最新的工作订单）时，通常会出现问题。

现有跨公司数据交换方法通常缺乏互操作性和可转移性。利用工业数据空间，有助于简化设备制造商和运营商之间以及整个供应链中设备数据和产品数据的跨公司交换。此外，工业数据空间有潜力成为控制信息流的标准化工具。服务提供者能够通过访问以前无法访问的设备数据来改进和扩大其服务范围；制造公司可以允许客户访问某些信息，从而扩大产品和服务的范围。

1.2 供应链数据管理

许多产业的供应链中，上下游的公司都在存储

数据，但数据互不相通并且存在冗余，这将导致产品交付时间、最小安全库存和生产过程成本的增加。为了优化整个供应链，需要提高供应链的透明度、实现对产品的跟踪与追溯、改进物流服务，并预测订单量和实际生产量。例如，在卡车和货物入境物流的管理场景中，卡车和货物到达数据至关重要，许多并行和后续活动（如卡车的登记、卸货人员的分配、生产中的工单计划等）都依赖于此数据。然而，由于航运公司差异，卡车到达时间数据往往缺乏完整性和正确性。

工业数据空间通过使不同类别和不同来源的数据（即订单数据、运输数据、客户主数据、供应商主数据、产品主数据、额外数据如交通信息或卡车 GPS 数据等）透明，可供整个供应链的所有公司使用。

1.3 端到端货物运输监控

一些敏感货物容易受到损坏或毁坏，需在特殊预防措施保证下运输。不利的环境条件，如环境温度过高或过低、湿度、冲击、振动、光照、气压、声波或磁场对敏感货物构成多种风险。在运输过程中通过传感器对环境进行监测并无线传输，可尽早发现潜在风险，并及时采取适当的风险管控措施。

工业数据空间为客户和供应商提供了平台，允许对货物在运输过程中所处的环境条件进行端到端监控。它向客户和供应商提供必要的信息，以便随时了解货物在某一时刻的位置以及状况。在此过程中，工业数据空间确保公司接收所有需要的数据，同时确保发送数据的公司拥有数据主权。

1.4 医药产品开发

医疗和临床数据都是高度敏感和异构的，缺乏数据整合是阻碍新疗法发展、疗效和耐受性的主要原因之一。为进行医学研究和评估新疗法，不仅需要临床数据（遗传学、治疗、诊断）和患者主数据，还需参考多个 IT 系统中的多源异构数据。

工业数据空间允许聚合来自不同来源的数据，进行转换及进一步分析。这种结合异构数据的新方法将加速临床研究，促进研究结果的交流，同时也有助于对发表在医学期刊上的假说和研究结果进行审查和评价。工业数据空间的开放接口允许无缝集成现有系统，为系统数据处理提供服务，并使原始数据和分析结果可视化。工业数据空间的特殊功

能和服务也将实现个人医疗数据的匿名化，并确保能访问此类敏感数据。

2 工业数据空间的整体架构

数字经济中的可信实体网络需要一种数字实体机制，该机制能够可靠地识别参与者，并提供有关交易伙伴的更多信息。应该以可信的方式提供和定期更新这些信息。IDS 在所有可想象的数据端点之间提供自确定的控制，是值得信赖的数据经济体系结构。

工业数据空间的参与主体一般有数据提供者、数据使用者、中间代理商、程序开发者和认证中心等。如图 1 所示。各类主体基于数据资源提供不同的应用创新服务。

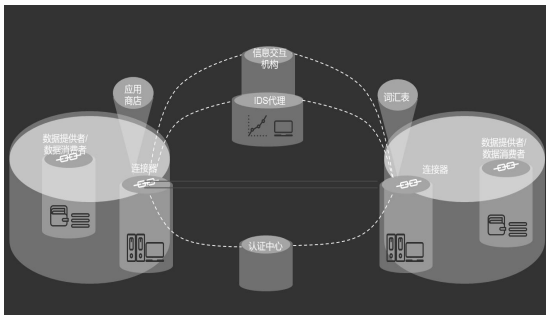


图 1 工业数据空间的整体架构

IDS 连接器负责连接和使用控制，在 IDS 生态系统中提供标准化的连接。它们允许在隔离的经过身份认证的环境中执行受信任的应用程序。

IDS 连接器在 IDS 中间代理商处注册其数据终端的描述。这样，潜在的数据使用者可以根据内容、结构质量、真实性和其他属性查找可用的数据源和数据。

应用商店提供数据应用，用于执行数据转换、聚合或分析等任务，可部署在 IDS 连接器中。数据应用程序可以由 IDS 认可的认证机构认证。应用程序可以由经过 IDS 标准认证的 IDS 成员提供。

数据提供者允许使用者访问特定用途和价格模型下的数据。他们能够控制数据使用者对数据的访问和数据的使用。

数据使用者可以搜索数据并使用不同数据提供者的数据。数据使用者必须遵守数据提供者的使用政策。

认证中心提供一系列服务来创建、维护、管理

和验证 IDS 参与者的身份信息，无论他们考虑参与上述哪种角色。IDS 中所有参与者的身份证明对 IDS 体系结构至关重要。

信息交换机构是为 IDS 内的所有金融和数据交换交易提供清算和结算服务的中介机构。

词汇表提供者管理并提供词汇表（对象本体、参考数据模型、元数据），用于标注和描述数据集。IDS 信息模型是描述数据源的基础，词汇表提供者提供特定领域的词汇表及其对 IDS 信息模型的引用。

3 工业数据空间的参考架构模型^[2]

工业数据空间参考架构模型分为业务构架、数据与服务构建、软件构建以及安全构建四个维度，如图 2 所示。

3.1 业务架构

业务体系结构从经济层面描述了工业数据空间的所有关键概念，这些概念可以分为数据治理（Data governance）、协作数据管理（Collaborative data management）和业务模式（Business model）三方面。数据治理定义了工业数据空间中不同角色的权利和义务（公有、私有、有限制或无限制等）；协作数据管理定义了组织间数据管理流程（发布、数据使用等）；业务模式定义了数据评估、数据使用的补偿、额外服务（如智能服务）中数据使用的条款和条件。

3.2 数据与服务架构

数据和服务体系结构构成了工业数据空间的功能核心。它指定了现阶段的试点应用中必须要实现的功能，包括应用工业数据空间应用商店（Appstore）、代理（Broker）和连接器（Connector）三大功能模块。应用商店具有基础数据提供、数据服务的管理和使用、词汇管理（Vocabulary management）、软件监护（Software curation）等功能。代理提供数据源管理、数据源搜索、数据交换协议、数据交换监控等功能。连接器提供数据交换执行，数据预处理软件的注入，远程的软件执行等功能。

3.3 软件架构

软件体系结构规定了工业数据空间现阶段试点应用中的数据和服务体系结构的实现。一个核心软件组件是工业数据空间连接器，包括外部工业数据空间连接器（EXIC）和内部工业数据空间连接器（INIC）。外部连接器促进工业数据空间参与者之间的数据交换。单个外部连接器可以理解为工业数据空间的边界点。内部连接器与外部连接器非常相似。但内部连接器通常在受保护的企业内网中工作。内部连接器可以访问内部数据源，并使外部连接器可以从中获取数据。

另一个核心软件组件是工业数据空间代理。它将数据提供和数据请求对接起来，创建有关数据源使用情况的报告，并执行清理功能（如交易回滚）。

3.4 安全架构

工业数据空间的安全体系结构包括许多方面。包括了网络安全、身份认证、数据使用约束、安全运行环境、远程认证、应用层虚拟化等。可以单独设计的几个安全方面的组合允许实现不同级别的安全性（图2）。

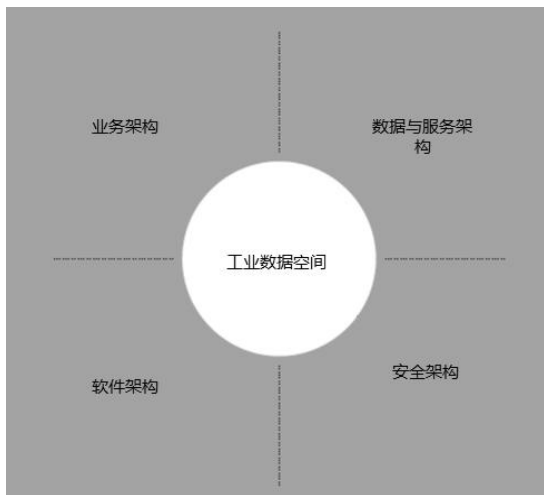


图2 工业数据空间参考架构模型的四个设计维度

4 测试床部署

4.1 应用场景

东方研究院有限公司（以下简称东方研究院）与东方电机有限公司（以下简称东方电机）为东方电气集团的两个子企业。由于业务往来，双方经常需要进行文件和数据的交换。例如，东方研究院需要将东方电机提供的一些发电设备三维模型，进行加工处理，包括简化、修复、重建、格式转换等，

并将增值后的三维模型再返回给东方电机。在传统的交换方式下，由于设备的三维模型具有保密性，双方进行业务往来，需要先签订保密协议，并在保密框架内，东方电机对模型进行解密，复制后通过安全的渠道传递给东方研究院，然后东方研究院进行加工处理，再通过安全的渠道返回给东方电机，最后进行加密。这是一种面向数据加工的典型协同生产场景。传统数据交换方式下，从解密后到重新加密前的中间过程中，模型数据处于技术上不受控的状态。而未来，这种数据加工协同可以在工业数据空间中完成，模型数据的传递和使用在技术上都是受到监测和控制的。部署本测试床实现发电机励磁控制器 DECP1000 的三维模型通过工业数据空间，从东方研究院到东方电机的传递。

4.2 网络拓扑与环境

数据提供方（Provider）主机位于东方研究院内网，数据消费方（Consumer）主机位于东方电机内网。两个企业均有防火墙等安全策略控制。收发双方主机，经过安全控制策略后，通过互联网专线相连。两者均可路由到对方。此外，双方主机均能访问公网资源，以实现证书的的申请和下载。如图3所示。

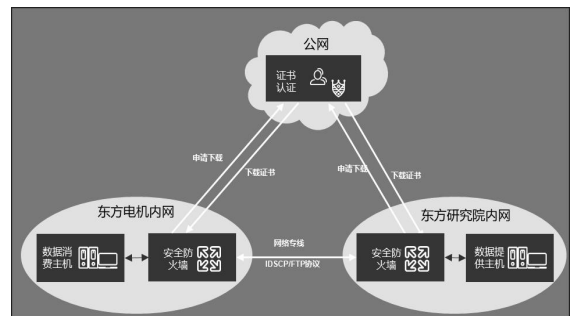


图3 测试场景的网络拓扑

主机安装有 Ubuntu 18.04 server x64 操作系统。数据提供方主机需要开启的端口：8181、8443、29998、5005、1099、1098、9292。数据消费方主机需要开启的端口：5005、8181、8443、9292。

4.3 部署方法与流程

部署方法与流程如图4所示。其中，数据提供方与数据消费方的部署流程类似，主要分为检查服务器与网络环境、准备数据模型收发目录、安装部署 Docker 环境、拉取 IDS 镜像、部署 IDS 开发者项目源代码、配置 docker-compose 文件和启动三方

基于不同碳载体催化剂的燃料电池催化层在动态启停工况下的耐久性研究

谢光有^{1,2} 李婷^{1,2*} 姚旻翀^{1,2} 刘鹏^{1,2}

1.东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司,成都 611731; 2.四川省长寿命燃料电池重点实验室,成都 611731

摘要: 启动-关机过程中阳极的氢-空界面,会导致阴极催化层出现高电位(1.4~1.5 V),严重腐蚀催化剂的碳载体。这是影响燃料电池动态运行寿命的主要因素之一。本文基于3种典型碳载体的催化剂,制备了燃料电池膜电极。并构建阳极侧氢-空界面,模拟实际启停过程,研究了3种膜电极在循环启停过程中交流阻抗、电化学活性面积及极化性能的变化规律。结果表明,石墨化碳载体可耐受900次启停,无定形的多孔型碳仅可运行250次启停,而半有序结构的高比表面积碳可运行450次启停。

关键词: 催化剂; 碳载体; 膜电极; 启停循环; 耐久性

中图分类号: TM911.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2022)01-0006-05

The Effect of Catalyst Supports on the Dynamic Durability of PEMFC Membrane Electrode Assembly

XIE Guangyou^{1,2}, LI Ting^{1,2*}, YAO Minxuan^{1,2}, LIU Peng^{1,2}

(1. Dongfang Electric Fuel Cell Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

2. Sichuan Key Laboratory of Long-life Fuel Cells, 611731, Chengdu, China)

Abstract: The start-up and shut-down (SU/SD) play an important role in the degradation of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) for automobile applications. During the SU/SD process, because of the coexist of H₂ and O₂ in the anode, the cathode reaches a high potentials (1.4~1.5 V) and results in severe corrosion of the carbon support. In this paper, three types of cathode catalyst layers are manufactured with three catalysts based different carbon supports, and the EIS, ECSA and polarization curves are evaluated as the increasing of SUSD cycles. The result shows that the more stable the carbon support is, the better durability the catalyst layer shows. The catalyst layer based graphitized carbon runs 900 SUSD cycles, the catalyst layer based semi-crystalline carbon tolerates 450 SUSD cycles, but the one based amorphous carbon only tolerates 250 SUSD cycles.

Key words: catalyst; carbon supports; membrane electrode assembly; start-up and shut-down cycles; durability

质子交换膜燃料电池(Proton-exchange membrane fuel cell, PEMFC)可实现化学能向电能的高效转化,兼具零排放、安全可靠、易于操作维

护等突出优势,被认为是最具发展前景的新型清洁发电技术^[1-3]。近年来,以交通领域为突破口,PEMFC的产业化进程进入快车道,技术突破和提

收稿日期: 2021-06-23

基金项目: 四川省重大科技专项项目: 氢燃料电池客车关键技术研究与应用(氢燃料电池客车及关联产业关键技术研究及示范); 项目编号: 2019ZDZX0002。

作者简介: 谢光有(1983-),男,2011年毕业于中科院金属研究所,工学博士,高级工程师。现在东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司从事燃料电池技术开发与管理工作。

李婷(1985-),女,2010年毕业于四川大学材料学专业,工学博士,高级工程师。现在东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司从事燃料电池膜电极研发。邮箱: liting@dongfang.com。

升的步伐明显加快,示范应用规模逐步扩大。目前,制约 PEMFC 在交通领域,尤其是汽车领域规模化应用的主要瓶颈依然是车用动态工况下的寿命问题,及由于耐久性不足带来的全生命周期成本较高,难以和传统燃油车和电动车进行竞争^[4-6]。

汽车运行的典型工况,如频繁启停、快速变载及高海拔、低温等极端运行环境等,均会导致 PEMFC 的核心部件膜电极出现持续的性能衰减,最终失效。其中频繁启停引起的性能衰减大约占总体性能下降的 30%以上^[5,7-8]。因此,如何应对频繁启停导致的性能衰减,是膜电极开发面临的主要问题和挑战。

目前,已基本明确膜电极在启停工况下的衰减机理,开关机过程中氧气进入阳极侧形成氢-空界面,导致阴极出现约 1.4~1.5 V 的高电位,会严重腐蚀阴极催化剂的碳载体,进而导致膜电极性能快速衰减^[9-10]。因此,适用于车用的膜电极对阴极催化剂的选择就变得极为重要,也是开发长寿命车用膜电极面临的关键技术。

目前,燃料电池催化剂常用的碳载体主要包括 3 种类型:①表面具有微孔结构,比表面积大,有利于铂在其表面的均匀附着;②经过一定热处理,表面孔结构较少,比表面积略降,表面结构具有一定的有序性;③石墨化处理的碳,比表面积明显下降,表面结构更有序和致密。

本文采用基于上述 3 种典型碳载体制备的催化剂,分别制备膜电极的阴极催化层,并构建了氢空界面,以模拟实际启停过程,监测了 3 种催化层的电化学活性面积 (ECSA)、欧姆阻抗 (EIS)、极化性能 (I-V 曲线) 以及催化层形貌的变化过程,通过对比分析研究了其耐久性差异,从而指导车用膜电极的催化剂选型及材料开发。

1 实验过程

1.1 样品制备

3 种碳载体类型商用催化剂:①高比表面积碳型 (HC), 46 wt% Pt/C, TEC10E50E, TKK; ②半有序结构碳型 (SC), 40 wt% Pt/C, Hispe® 4000,

Johnson Matthey; ③石墨化碳型 (GC), 46 wt% Pt/C, TEC10EA50E, TKK。PFSA 分散液, D1020, 固含量 20 wt%, 科穆化学。异丙醇, 色谱纯, ThermoFisher A451-4。H₂O, 电阻率 > 10 MΩ。

催化剂浆料的配比为: PFSA 和催化剂质量比为 3:10; 溶剂组成为异丙醇和纯水, 其质量比 1:1; 浆料固含量为 5 wt%。浆料制备过程为: 首先, 称取一定量的催化剂置于烧杯中, 分别加入纯水、异丙醇和 PFSA 分散液, 并保持磁力搅拌 20 min。随后将预混后的浆料置于超声清洗仪中超声 20 min, 制得分散良好、均匀、稳定的催化剂浆料。

将制备好的浆料通过超声喷涂机 (Prism 500, USI) 直接涂覆到质子交换膜两侧, 制得 CCM 样品 (5 cm×5 cm)。阴极铂载量 0.4 mg/cm², 阳极铂载量 0.1 mg/cm²。将制备的 CCM 样品置于烘箱中除去催化层中残留的溶剂, 即完成样品制备。3 种 CCM 样品分别标记为: HC-CCM、SC-CCM、GC-CCM。

1.2 单电池组装与活化

将制备的 CCM 样品与 GDL (SGL 29BC) 及密封垫片组装成单电池 (上海群羿能源设备有限公司)。控制 GDL 压缩率约为 25~30%, 装配力矩为 3.5 N·m。

将组装好的单电池安装于 100 W 多功能燃料电池膜电极测试平台 (东方电气自主设计) 进行活化。保持电流密度 1.0 A/cm² 下稳定运行 5 h 以上, 直至输出电压 1 h 内波动不超过 ±2 mV。活化条件: 电池温度 70 °C, 空气/氢气计量比 2.5/1.6, 气体湿度 100%RH, 压力 0 kPa。

1.3 启停耐久性测试

对活化后的单电池进行循环启停测试。循环过程如图 1 所示: ①开机前使用空气吹扫阳极 (0.5 slmp, 30 s), 模拟长时停机在阳极形成的氢-空界面; ②加载至电流密度 0.7 A/cm², 连续运行 3 min; ③关机时, 先降载至 OCV, 再关闭空气进出口, 采用 50 mA 小电流消耗阴极侧残留空气, 待电压降至 0.85 V, 撤离消载电流; ④停机 2 min 后, 再启动下一个循环。为避免空气从阴极扩散至阳极, 测试过程中保持氢气压力始终较空气高。

电池运行过程中, 温度 70 °C, 空气/氢气计量比 2.2/1.6, 阳极湿度 100%RH, 阴极湿度 100%RH, 气体出口压力 0 kPa。每测试 50 个循环监测电池的 电化学活性面积、欧姆阻抗和极化曲线。

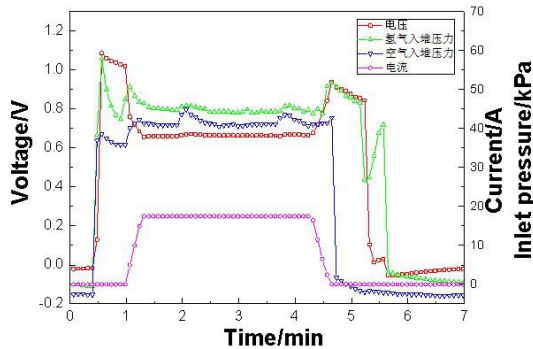


图 1 启停耐久性测试流程示意图

1.4 循环伏安测试

采用 Gamery Reference 3000 电化学工作站进行循环伏安测试。测试条件: 电池温度 70 °C, 阳极通氢气 (0.1 slpm), 阴极通氮气 (0.2 slpm), 气体湿度 100%RH, 压力 0 kPa。电压扫描范围 0~1.2 V, 扫描速率 20 mV/s。

对循环伏安曲线中的氢脱附峰进行积分得到峰面积, 通过式(1)计算得到电化学活性面积(ECSA)

$$ECSA = \frac{Q_H}{Q_0[Pt]}, \quad Q_H = \frac{A}{v} \quad (1)$$

其中: ECSA 为所测电极的电化学活性面积, 单位为 $\text{m}^2\text{g}^{-1}\text{Pt}$; [Pt]为单位面积工作电极上的 Pt 质量; A 为单位面积电极的氢脱附峰面积, 单位为 $\text{mA}\cdot\text{V}/\text{cm}^2$; v 为扫描速率, 单位为 mV/s ; Q_0 为吸附电量常数 0.21。

1.5 交流阻抗测试

采用 Gamery Reference 3000 电化学工作站, EIS300-Electrochemical Impedance 中的 Galvanostatic EIS 模式进行交流阻抗测试。阴极为工作电极, 通入空气; 阳极为参比电极, 通入氢气。测试条件: 电池温度 70 °C, 空气/氢气计量比 2.5/1.6, 空气/氢气湿度 100%RH/100%RH, 压力 0 kPa。交流信号频率范围 0.1~10 000 Hz, 振幅 0.1 mV。待各参数达到设定值并稳定 10 min, 开始测试。每次测试

重复 3 次, 待测得的 Nyquist 曲线稳定后, 取最后一次测试结果。将测得的 Z_{real} 和 Z_{imag} (Ω) 数据, 分别乘以电极反应区面积 25 cm^2 , 得到交流阻抗曲线。取 10 000 Hz 下的阻抗值作为欧姆阻抗。

1.6 极化性能测试

测试条件: 温度 70 °C, 空气/氢气计量比 2.2/1.6, 气体湿度 100%RH, 出口压力 0 kPa。待操作参数达到设定值, 采用升电流模式, 每个电流密度下稳定运行 5 min, 取其输出电压平均值。将电流密度与对应的输出电压做图, 得到所测膜电极的极化曲线 (I-V 曲线)。

1.7 电子扫描显微镜观察

将样品用导电胶粘贴于样品台架上, 通过 TESCAN VEGA3 型号电子扫描显微镜进行形貌观察。

2 结果与讨论

为了更有针对性地评估基于不同碳载体催化剂制备的催化层在燃料电池启停机过程中的耐久性差异, 模拟实际长时停机过程, 通过开机前用空气短时吹扫阳极构建氢-空界面, 从而在阴极侧形成高电位, 测试流程详见图 1。

2.1 性能衰减

随启停次数增加, 阴极催化层在高电位下作用的累积时间延长, 催化剂碳载体的腐蚀逐渐加剧。图 2 为 HC-CCM、SC-CCM、GC-CCM 3 种样品在 $0.7 \text{ A}/\text{cm}^2$ 下的性能随启停次数增加的衰减情况对比。可以看到, 3 种催化层的性能均随启停次数增加逐渐下降, 但 3 种样品的衰减程度差异显著。HC-CCM 性能下降最快, 仅经过 250 次启停电压下降至 0.3 V 左右; GC-CCM 的衰减最缓慢, 经 950 次启停电压仍能保持在 0.5 V; SC-CCM 的衰减情况居中, 400 次循环后电压降至 0.5 V。实验过程中, 每间隔一定启停次数, 测试了各样品的极化曲线, $0.7 \text{ A}/\text{cm}^2$ 下的性能衰减情况如表 1 所示。极化性能的变化情况表现出与图 2 相同趋势, 即 HC-CCM 衰减最快, GC-CCM 衰减最慢, SC-CCM 居中。

上述结果表明, 具有表面微孔的高比表面积的碳载体 (HC) 在高电位作用下, 最容易发生腐蚀, 耐久性最差; 石墨化碳载体 (GC) 由于表面结构更

为致密，耐高电位腐蚀能力显著提升，耐久性最佳；经一定热处理的碳载体（SC），表面结构有序性改善，耐腐蚀能力较 HC 有所提升，但较 GC 仍存在明显差距。即催化剂所用的碳载体耐久性越好，在启停机过程所形成的高电位下，抗腐蚀能力越强，催化层的衰减程度越弱，性能下降越慢。因此，在启停机频繁的车用工况下，不同类型碳载体的催化剂对于膜电极的耐久性具有显著影响。

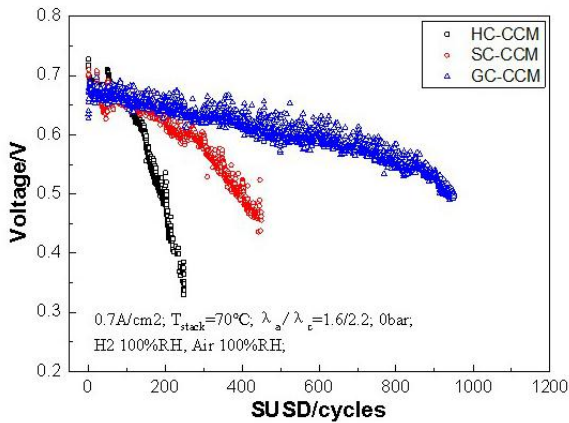


图2 3种CCM的性能随循环启停次数增加的衰减对比

表1 不同启停次数后3种CCM在0.7A/cm²的极化性能衰减情况

Sample	HC-CCM	SC-CCM	GC-CCM
50 cycles	-0.58	-1.31	+2.09
150 cycles	-19.42	-5.40	-0.15
250 cycles	-56.83	-13.28	-3.28
<i>ECSA</i> Degradation Rate /%			
350 cycles	—	-22.04	-2.09
450 cycles	—	-63.36	-5.81
550 cycles	—	—	-7.15
750 cycles	—	—	-15.35
950 cycles	—	—	-35.71

2.2 电化性能衰减

为进一步分析启停机过程中催化层的变化情况，实验过程中同步监测了3种样品阴极催化层的电化活性面积和欧姆阻抗。

2.2.1 电化活性面积

随启停次数增加，3种样品阴极催化层的循环伏安曲线如图3所示，计算得到的电化活性面积衰减数据统计于表2中。循环伏安曲线结果表现出

与极化性能相同的发展趋势，即 HC-CCM 的阴极催化层的 *ECSA* 下降最快，GC-CCM 下降最慢，而 SC-CCM 居中。表1中的数据更直观的对比了基于不同碳载体催化剂制备的催化层的 *ECSA* 的衰减差异。可以看到，HC-CCM 的 *ECSA* 的衰减速率大约是 GC-CCM 的2倍，而 SC-CCM 的 *ECSA* 的衰减速率大约比 GC-CCM 快70%，比 HC-CCM 慢15%。由此可见，碳载体的耐久性越佳，在高电位下腐蚀地越慢，从而催化层的 *ECSA* 下降地越慢。

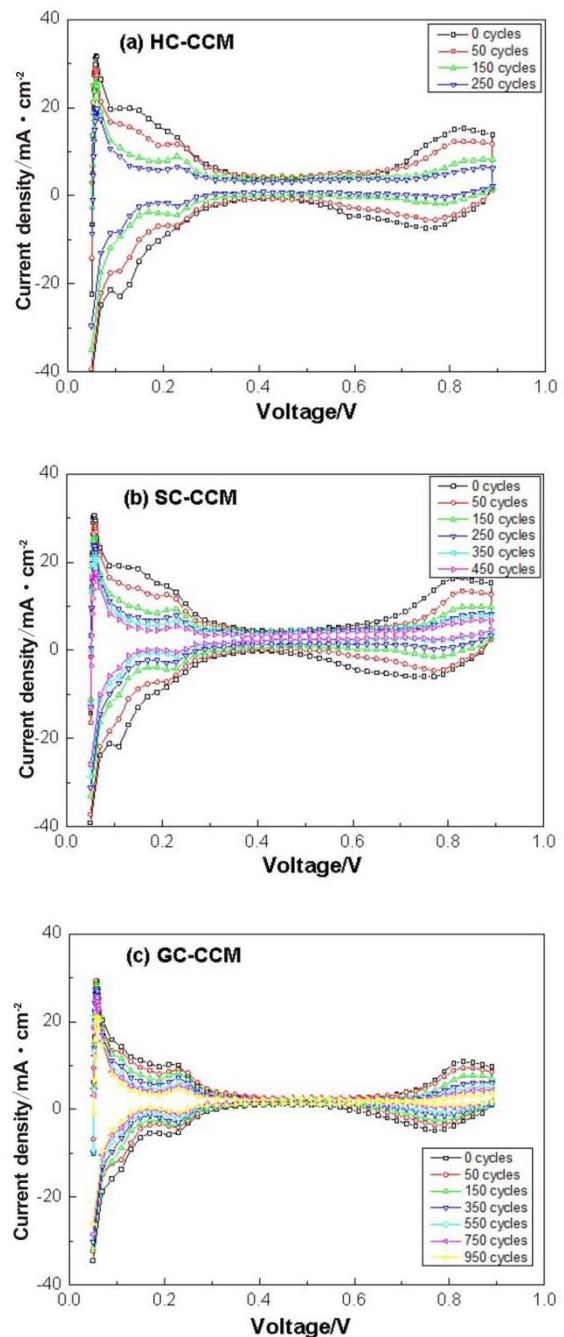


图3 CCM 循环伏安曲线随循环启停次数增加的变化趋势

表2 不同启停次数后3种CCM阴极催化层的电学活性面积衰减情况

Sample	HC-CCM	SC-CCM	GC-CCM
50 cycles	-26.03	-23.85	-12.83
150 cycles	-52.74	-48.18	-23.21
250 cycles	-64.86	-55.25	-32.53
350 cycles	—	-64.39	-37.45
450 cycles	—	-72.27	-43.80
550 cycles	—	—	-47.40
750 cycles	—	—	-56.63
950 cycles	—	—	-66.09

2.2.2 欧姆阻抗

图4对比了随启停次数增加，HC-CCM、SC-CCM和GC-CCM 3种样品欧姆阻抗的变化趋势。可以看出，HC-CCM经历200次启停后阻抗出现突增，增加约40%；SC-CCM经历400次启停后阻抗逐渐增大，增加约25%；GC-CCM的阻抗增加最为缓慢，800次启停后开始增大，仅增加约15%。由此可见，GC-CCM的催化层碳腐蚀程度最轻，HC-CCM程度最严重，SC-CCM居中。再结合2.2.1中ECSA的变化趋势，可知碳载体的耐久性越佳，抗高电位的腐蚀能力越强，碳流失的速率更慢，程度更微弱，从而催化层的衰减程度也越缓慢。

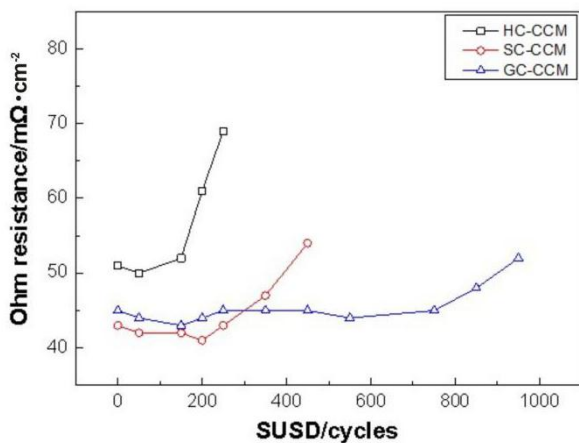


图4 3种CCM的欧姆阻抗随循环启停次数增加的变化对比

2.3 催化层形貌

为更直观的对比循环启停加速测试后催化层衰减程度的差异，对测试前后阴极催化层的形貌进行了SEM观察，如图5所示。SEM表征结果显示，经过启停加速测试，3种催化层均出现了明显的腐

蚀现象，但腐蚀程度存在明显差异。HC-CCM仅经过250次启停，催化层形貌变化最为显著，呈现连续的片状无催化层的区域，腐蚀程度最严重；SC-CCM经过450次启动，出现片状无催化层的区域，但未形成连续状，腐蚀程度较HC-CCM微弱；GC-CCM经过950次启停，催化层仍保持较好的完整性，仅出现了裂纹，无明显催化层脱落现象，表明其腐蚀程度最轻微。该结果进一步印证了极化性能、电学活性面积和欧姆阻抗的变化趋势，即在启停工况下，碳载体耐久性越佳，催化层抗高电位腐蚀的能力越强。

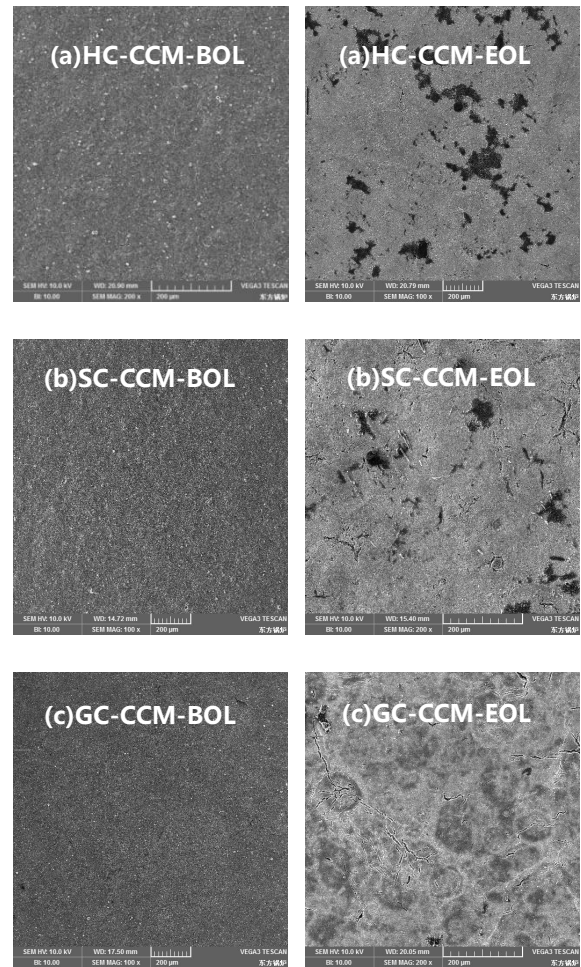


图5 采用3种碳载体催化剂制备的催化层在循环启停加速测试前后的形貌对比

3 结语

本文模拟燃料电池长时停机过程，构建了阳极侧的氢-空界面，研究了基于不同碳载体的催化剂制备的催化层在频繁启停机过程中的耐久性差异。经过循环启停加速测试，石墨化碳载体型催化层抗高

(下转第21页)

模糊 PID 控制在氢燃料系统中的应用

唐刚 练勇 余漆 郑喜东 蒲威

东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司 成都 611731

摘要: 氢燃料电池在新能源领域应用中不断加大,对应的控制系统也得到了广泛的研究。为了提高氢燃料电池系统中氢气回路压力控制精度,本文提出了基于模糊PID在氢气回路中的控制策略研究。氢气回路中供氢模块控制具有非线性、数学模型复杂的特点,传统PID控制很难获得较好的控制效果,模糊控制对大滞后、时变、非线性的复杂系统具有很好的控制效果。文章通过对模糊控制理论的研究,给出了模糊控制结构框图,结合氢气回路控制精度及实验数据,选取模糊控制隶属度函数,建立模糊控制策略表,去模糊化输出函数。在Simulink仿真中建立了模糊PID、传统PID的算法模型,通过仿真结果表明,模糊PID控制器具有响应快、振荡幅值小、稳定时间短特点。

关键词: 氢燃料系统;传统PID;模糊PID;隶属度;Matlab

中图分类号: TM911

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2022)01-0011-07

Application of Fuzzy PID Control in Hydrogen Fuel System

TANG Gang, LIAN Yong, YU Qi, ZHENG Xidong, PU Wei

(Dongfang Electric Fuel Cell Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: The application of hydrogen fuel cell in the field of new energy is increasing, and the corresponding control system has been widely studied. In order to improve the pressure control precision of hydrogen loop in hydrogen fuel cell system, a control strategy based on fuzzy PID in hydrogen loop is proposed in this paper. The control of hydrogen supply module in hydrogen loop is nonlinear and the mathematical model is complex, so the traditional PID control is difficult to obtain a good control effect, Fuzzy control has a good control effect on the complex system with large delay, time variation and nonlinear. Based on the research of fuzzy control theory, the paper gives the structure diagram of fuzzy control, Combined with the control precision and experimental data of hydrogen loop, the membership function of fuzzy control was selected, the fuzzy control strategy table was established, and the output function was defuzzified. The algorithm model of fuzzy PID and traditional PID is established in Simulink simulation. The results show that the fuzzy PID controller has the characteristics of fast response, small oscillation amplitude and short stabilization time.

Key words: hydrogen fuel system; traditional PID; fuzzy PID; membership; Matlab;

在人工智能化、数字化技术快速发展的时代,在很多生产、控制领域中,一些对象的状态难以通过普通的数学模型进行描述,例如温度控制是大惯性滞后系统且存在环境的随机干扰,比例阀模型复杂,传统PID控制采用固定的P、I、D控制系数,在不同的控制偏差时不能满足系统的动态响应,不能

满足设计要求。在实际运用中,仅仅依靠传统PID控制不能达到设计要求,而生产线上熟练的操作人员通过经验进行控制能够达到较好的控制效果,这种通过经验及数据积累的方式产生新的理论,模糊控制理论和方法应运而生。

1965年,美国自动控制专家扎德提出了拟人方

收稿日期: 2021-08-20

基金项目: 四川省重大科技专项项目,氢燃料电池客车关键技术研究与应用(氢燃料电池客车及关联产业关键技术研究与示范);项目编号2019ZDZX0002。

作者简介: 唐刚(1987—),男,2011年毕业于电子科技大学控制理论与控制工程专业,硕士。现就职于东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司,从事控制系统研发工作。

式的控制概念，为模糊控制理论奠定了基础。模糊控制对比例阀、温度控制等控制对象难以建模，存在滞后及随机干扰，且存在多输入多输出系统问题进行解决^[1]。1973年，美国自动控制专家扎德进一步优化了模糊控制理论，并提出了模糊语言规则和控制程序的概念。丹麦学者J.J.Ostergaard将模糊控制成功地应用水泥窑的控制，为模糊控制理论的发展展现了光明的前景^[2]。模糊控制具有较好的抗干扰能力、适应性、鲁棒性^[3]，特别适合于非线性、时变及纯滞后系统的控制。传统PID控制经过长期的迭代和优化，逐渐向自适应化、智能化、最优化的方向发展，模糊PID控制在传统PID控制基础上进行迭代优化，在很多方面表现出了更好的特性。

1 模糊PID控制器的设计

模糊PID主要是在传统PID控制基础上进行迭代优化，将固定的P、I、D控制参数改变为变化的P、I、D控制参数，从而得出的一种新型的控制方式；通过改变P、I、D控制参数，可以及时响应外部的变化，具有更强的适应性，同时在稳态情况下具有常规PID控制精度高的特点，能够满足快速响应系统及稳态系统的需求。在这种控制方式中，根据误差E和误差变化Ec设计P、I、D控制参数，运行中实时检测误差E和误差变化Ec，通过提前确定的参数表在线调整，满足不同E和Ec时对三个参数的动态要求，使P、I、D控制参数最优，达到设计需求。

1.1 模糊控制基本原理

通常模糊控制器分为一维、二维、三维控制器^[4]。实际生产应用中，需要满足较高的动态性能，一维控制器不能满足设计要求，三维控制器虽然动态性能好，但是计算量大、推理复杂，对单片机和PC性能要求高。二维控制器能够满足动态响应要求，常规系统通常采用这种方案。本文设计的模糊PID控制器的模糊部分采用二维控制器，将E、Ec作为输入，PID三个参数 k_p 、 k_i 、 k_d 作为对PID控制器参数进行在线整定。模糊PID控制系统结构如图1所示。

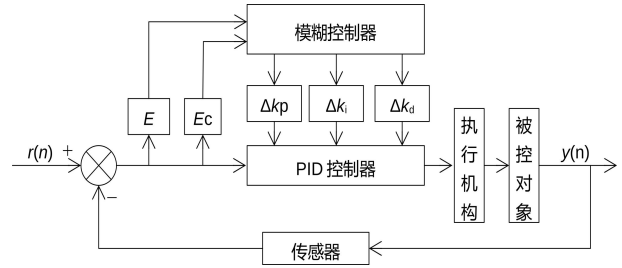


图1 模糊PID控制系统框图

图中， r 为设定值， E 为误差， E_c 为误差变化， Δk_p 为调节比例系数， Δk_i 为调节积分系数， Δk_d 为调节微分系数， y 为控制量输出。根据误差E和误差变化 E_c 设计P、I、D控制参数，运行中实时检测误差E和误差变化 E_c ，通过提前确定的参数在线调整，满足不同E和 E_c 时对三个参数的动态要求，使P、I、D控制参数最优，达到设计需求。模糊控制器过程简述如下：

(1) 模糊化处理。考虑模糊控制规则较多，需要对系统输入进行归一化处理，将实际值转化成模糊量，模糊量通过归一化处理才能用于模糊推理和决策，此过程称为模糊化^[5]。模糊化的数据通常缩放到合适的论域范围内进行处理，并分配给各个语言变量，通常选择7个语言变量集{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。

(2) 模糊规则和决策。模糊规则是经验的总结，常用的规则有49条，规则的制定需要模糊控制设计者具有丰富的控制经验，并且经过梳理总结的精准方案，从而达到使用目标系统的控制规则来模拟操作人员的行为。一般通过IF-THEN, ELSE, ALSO, OR等关键词构成了模糊规则语句。

(3) 去模糊化处理。在模糊控制中输出量是归一化处理的数据，不能直接在实际系统中使用，需要进行反向换算得到真正的控制量输出。通过模糊控制规则及决策得到的输出量进行模糊化，现在常用的方法有最大隶属度法^[6]，中位数法^[7]，加权平均法^[8]等。

1.2 控制规则确定

由图1模糊控制系统结构可知，模糊控制输入是误差E和误差变化 E_c 对不同误差E和误差变化 E_c

为两输入变量，以 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 为三输出语言变量的模糊控制器，系统的响应可以用误差 E 和误差变化量 E_c 体现。针对实际值与目标值的误差 E 和误差变化 E_c ，采用不同的 k_p 、 k_i 、 k_d 控制参数，经过经验积累，人们总结出了一套整定规律^[9]：

(1) 当误差 $|E|$ 偏大时，为了快速响应， k_p 应取较大值，由于 k_d 具有抵消作用应取较小值，同时由于控制周期快， k_i 应取0，避免积分饱和，产生较大的超调；

(2) 当误差 E 和误差变化 E_c 符号一致时，表示实际值偏离目标值越来越大，若误差 $|E|$ 偏大，为了快速响应， k_p 应取较大值，较小的 k_i ， k_d 取中间值，根据变化趋势可以满足动态性能和稳态性能。若误差 $|E|$ 较小， k_p 应取较小值，增大积分 k_i ， k_d 取较小值；

(3) 当误差 E 和误差变化 E_c 符合不一样时，表示实际值偏离目标值越来越小，若误差 $|E|$ 偏大，为了快速响应， k_p 应取较大值，较小的 k_i ， k_d 取中间值，根据变化趋势可以满足动态性能和稳态性能。若误差 $|E|$ 较小， k_p 应取较小值，增大积分 k_i ， k_d 取较小值。

由此可见，实际值与目标值在不同偏差时应选择相应的P、I、D参数，模糊PID对参数 k_p 、 k_i 、 k_d 进行选择，其结构分成两部分：传统PID控制和模糊PID控制校正。通过上述总结可得到49条模糊关系语句：

IF E is NB and Ec is NB THEN Δk_p is PB and Δk_i is NB and Δk_d is PS;

IF E is NM and Ec is NB THEN Δk_p is PB and Δk_i is NB and Δk_d is PS;

IF E is NS and Ec is NB THEN Δk_p is PM and Δk_i is NB and Δk_d is ZO;

IF E is ZO and Ec is NB THEN Δk_p is PM and Δk_i is NM and Δk_d is ZO;

.....

上述采用条件语句进行描述比较方便，但是不便于集中数据分析，将数据做成表格形式可以方便

数据分析、交流，因此将语句描述转化为表格形式，如表1、表2、表3所示，分别为 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 所对应的模糊控制规则表，表中 E 代表输入误差， E_c 代表误差变化。

2 系统仿真研究

2.1 模糊PID控制器仿真

2.1.1 模糊控制编辑界面

在Matlab中输入“fuzzy”，回车，进入编辑界面^[10]，在界面上选择两输入、三输出系统，输入误差 E 、误差变化 E_c ，输出量为 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d ，选择后界面如图2所示。

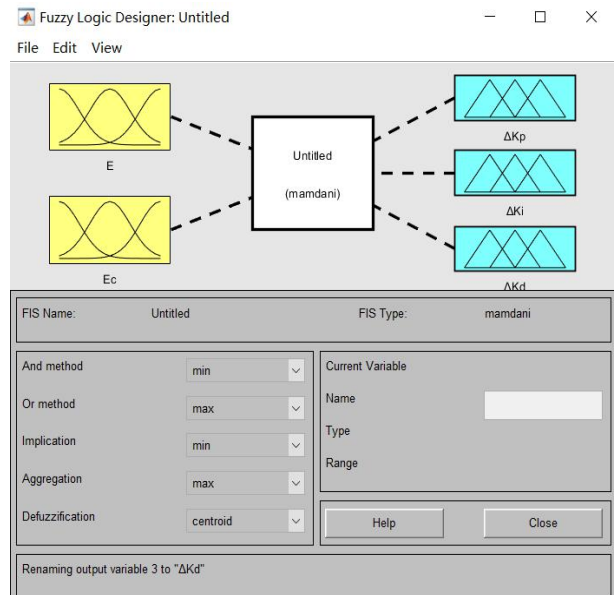


图2 模糊控制编辑界面

2.1.2 确定隶属度函数

本文选择为两输入三输出系统，制定49条模糊控制规则，确立输入隶属度函数，确定模糊论域。常用的模糊子集为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，模糊论域选为[-6, 6]，除了NB和PB选用正态分布型隶属度函数外，其他的都选用三角隶属度函数。在Matlab模糊控制工具箱中，首先打开Member Function Edit窗口，本文选择为两输入三输出系统，确定三输出变量论域范围，其界面如图3所示。

表1 Δk_p 模糊控制规则表

		误差变化 E_c						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
误差 E	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表2 Δk_i 模糊控制规则表

		误差变化 E_c						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
误差 E	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	PS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表3 Δk_d 模糊控制规则表

		误差变化 E_c						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
误差 E	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

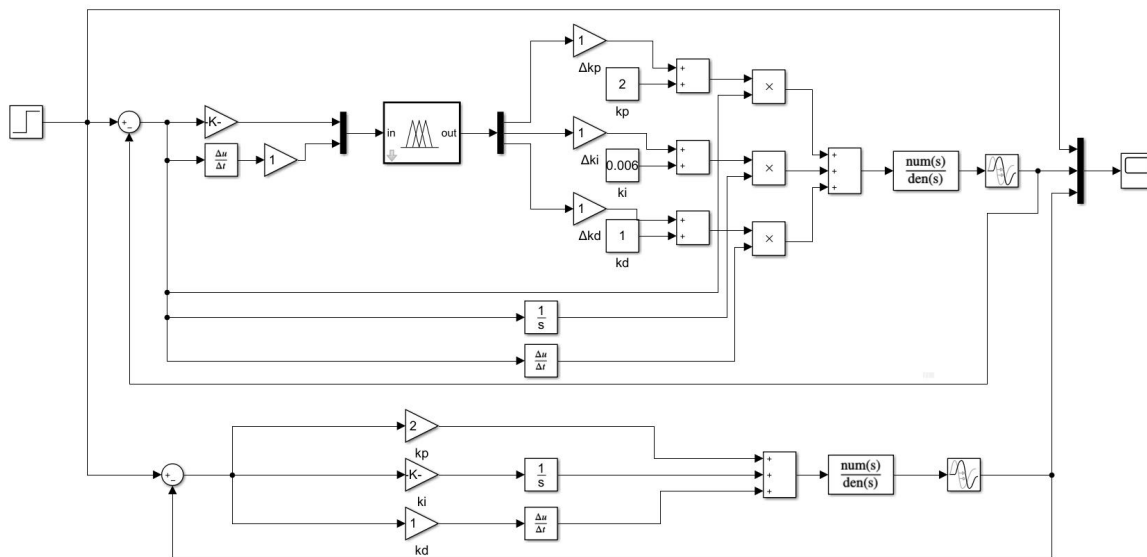


图5 模糊PID及常规PID控制器仿真框图

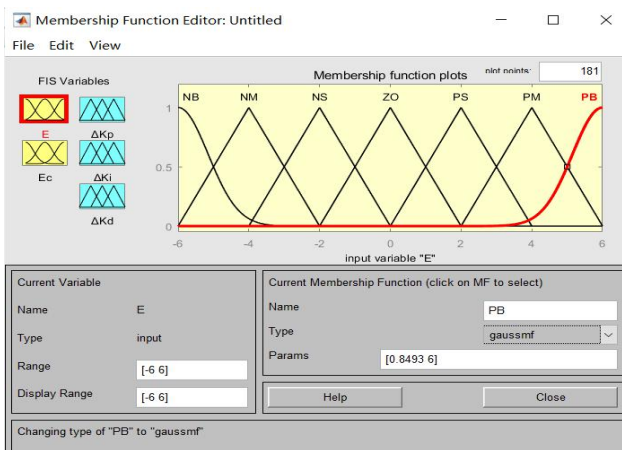


图3 隶属度函数选取界面

2.1.3 输入模糊控制规则

在模糊控制规则编辑器中输入49条控制规则，其界面如图4所示。

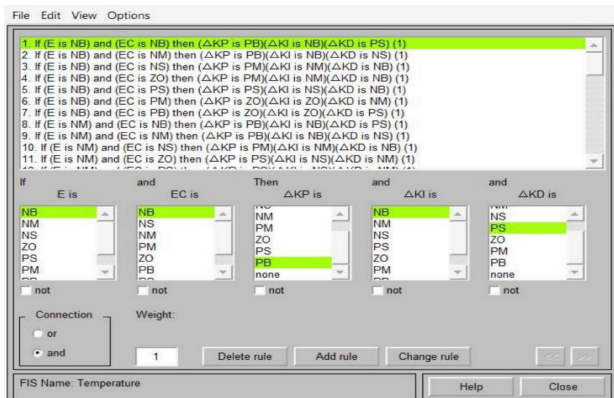


图4 模糊控制规则编辑器界面

2.2 仿真结果分析

通过Simulink模块，设计员可以对各种函数模块进行拖拽及连接，来搭建一个复杂的测试系统。本文在Simulink中搭建出如图5所示的模糊PID及常规PID控制器仿真模型。其中 k_p 、 k_i 、 k_d 为传统PID控制器的控制参数， Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 则为模糊控制器输出对应比例、积分、微分控制增量修正参数，其中 k_p 取2， k_i 取0.06， k_d 取1。

本文采用一阶惯性环节及纯滞后环节作为被控对象模型，其传递函数为：

$$G(s) = \frac{1.8}{318s + 1} e^{-3s} \quad (1)$$

为了直观分析模糊PID的控制效果，在阶跃输入情况下，对传统PID控制方法与模糊PID控制方法进行仿真分析，可以方便对比两种控制方法的输出结果。图5把两个系统对比进行组合在一起，同时在一台示波器上显示输出情况，如图6所示。

图6可看出，在同样的阶跃输入情况下，模糊PID控制超调20%，常规PID控制超调30%，模糊PID控制较常规PID超调小10%，提高了系统控制的抗干扰能力，模糊PID控制用了两个调节周期，传统PID控制用了三个调节周期，模糊PID控制调节时间短，提高了系统控制的实时性，综上表明模糊PID

控制算法可以在非线性、延时系统中应用。

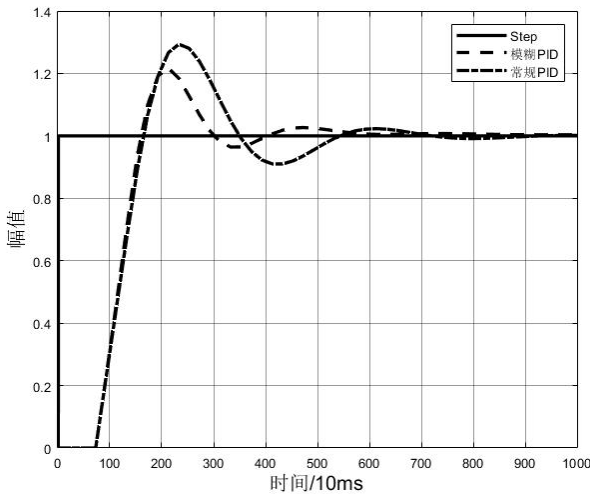


图6 常规PID和模糊PID控制仿真曲线

3 燃料电池氢气压力控制

3.1 氢气子系统压力控制

在燃料电池系统中，高压储氢瓶中压力通常为35 MPa，通过一级减压阀得到供氢模块入口压力0.8 MPa到1.5 MPa压力范围，通过比例电磁阀得到燃料电池所需氢气压力。稳定的氢气压力是燃料电池安全性、可靠性的重要评价因素，在燃料电池系统中，影响压力稳定的因素主要包括电流变载、排气阀排气、排水阀排水时夹带着排气。其中，大电流变载影响最为显著，电流的大小代表氢气消耗的多少，对应压力也会跟着发生变化；排气时由于堆内压力与外部环境压差大，瞬间大量氢气被排出，氢气压力随之发生较大的波动；排水时前一段时间主要排水，后一段时间也会对应着排出氢气，引起压力波动。

由于比例阀数学模型复杂、具有非线性的特点，传统PID控制很难获得较好的控制效果，在电流大变载时，由于传统PID控制参数固定，响应不及时，不能应对复杂的工况，抗扰动能力较差。模糊PID控制采用不同的PID控制参数，能够根据目标压力与实际压力的偏差大小，偏差的变化速率采用不同的控制参数，从而达到响应快、振荡幅值小、稳定时间短的效果，因此在燃料电池系统中采用模糊PID控制氢气压力，能够保证燃料电池对氢气压力的需求。

3.2 氢气子系统台架测试

将模糊PID控制算法用到氢燃料发动机氢气子系统上面进行测试，实验台架所需器材如表4所示。

表4 台架器材

名称	数量	功能
供氢模块	1	被控对象，用于气体控制
管路	若干	气体管路
球阀	1	模拟压降
压力传感器	2	气体压力反馈
电源	1	24 V、5 V供电
控制器	1	控制供氢模块，采集信号
示波器	1	观察控制信号

实验台架搭建如图7所示，控制器采集压力传感器反馈电压，通过换算得到实际输出压力，采用模糊PID、常规PID控制算法，通过控制器计算输出信号控制比例电磁阀，通过占空比的开度控制输出压力大小，达到燃料电池所需目标压力。

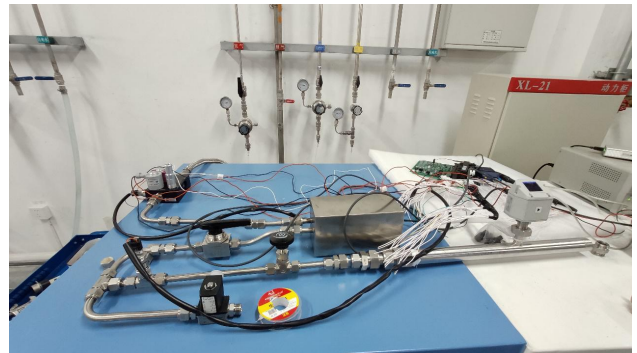


图7 供氢模块台架

本实验通过常规PID控制及模糊PID控制进行对比，模拟燃料电池在各个运行工况下的目标压力，控制器采集压力传感器输出电压信号0.5 V~4.5 V，将电压信号转换为实际压力值，通过控制器的CAN通讯模块将压力数据上传到PC机，PC机通过LabVIEW软件读取，将数据显示并进行存储，通过存储的实际数据进行绘图可得图8所示：

从图8中可知，采用常规PID控制、模糊PID控制，目标压力升高从100 kPa-120 kPa-140 kPa-170 kPa，目标压力降低从170 kPa-150 kPa-130 kPa-110 kPa，从图中可知虚线代表模糊PID控制的实际压力，实线代表常规PID控制的实际压力，模糊PID控

制实际压力过冲小，振荡幅值小且收敛快，台架测试结果与仿真结果相符，满足燃料电池在各个工作点对氢气压力控制的要求。

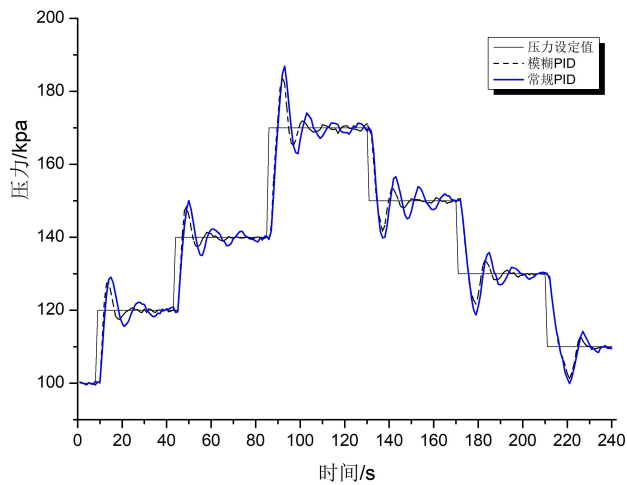


图8 常规PID和模糊PID台架测试曲线

4 结语

本文通过计算实际值与目标值的误差E和误差变化率Ec，通过模糊控制推理方法，在传统PID控制参数的基础上，查询P、I、D对应的调节参数表进行参数调整，该方法实现简单、方便易用。利用Matlab中模糊逻辑设计工具，可以方便的修改输入输出的论域、隶属度函数及模糊控制规则，通过仿真可以加快模糊控制器设计周期，减少编制程序的工作量。模糊PID控制在传统PID控制方法的基础上，通过在动态过程中改变P、I、D的控制参数，既满足传统PID的高精度控制，又具有模糊PID控制

超调量小、振荡小、响应快等功能。将模糊PID控制算法应用到氢燃料系统氢气压力控制中，在更短时间内达到稳定且超调量小，满足燃料电池对氢气压力的设计要求。

参考文献

- [1] 白鹏. 基于PCS7的磨矿过程控制系统设计与应用[D]. 大连理工大学, 2012
- [2] Ostergaard J J. Fuzzy logic control of a heat exchange process in fuzzy automation and decision processes[C]. Amsterdam: North Holland, 1977: 285-320
- [3] Hunt KJ. Adaptive filtering and neural networks for realization of internal model control[M]. multiloop design, 2000: 75-77
- [4] 吕红丽. Mamdani模糊控制系统的结构分析理论研究及其在暖通空调中的应用[D]. 山东大学, 2007
- [5] Arimotos S, Kawamura S, Miyazaki F. Bettering Operations of robotis by Leaning[J]. Journal of Robotic system, 1984,1(2): 123-140
- [6] 陶永华. 新型PID控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.6
- [7] 杜柳青, 罗辑, 唐毅锋. 基于模糊自适应PID的注塑机温度控制系统[J]. 机床与液压, 2006(5): 168-170
- [8] 张峰. 智能PID温度控制技术研究及应用[D]. 南京: 南京工业大学, 2005
- [9] 杨胜利. 基于模糊PID参数自整定的电加热炉温度控制系统设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2018
- [10] 谭浩, 吴何畏, 廉佳霖, 刘明泽. 基于MATLAB的模糊PID控制系统设计与仿真分析[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(05): 58-59+62

集团要闻

东方电机研制的 4 台抽水蓄能机组全部投入商业运行

3月2日，国内最高、世界第二高水头长龙山抽水蓄能电站4号机组完成15天考核试运行，成功投入商业运行。至此，东方电气集团东方电机有限公司为该电站研制的4台抽水蓄能机组全部投入商业运行。

东方电机为项目提供4台350兆瓦抽水蓄能机组及其辅助设备，机组最高水头/扬程达到756米，中国第一、世界第二，额定转速500转每分钟，单机容量350兆瓦。机组安全性、可靠性、稳定性、效率和均衡性要求高，具有超高水头、超高转速、超大容量、超高难度、超高品质的特点，设计开发难度高。长龙山机组的成功研制，树立了抽水蓄能行业标杆。

长龙山抽水蓄能电站位于浙江安吉，地处华东电网负荷中心，总装机容量210万千瓦，全部机组投产年后平均发电量可达24.35亿千瓦时，是华东地区最大的抽水蓄能电站，主要承担华东电网调峰、填谷、调频、调相及紧急事故备用等任务，对于优化华东地区电源结构、改善华东电网运行条件、促进新能源发展、助力构建新型电力系统、服务国家能源安全战略具有重要意义。

来源：东电微讯

加氢站内储氢瓶组等质量加注最优配比的研究

袁熹 李颖茹 贺靖皓

东方电气(成都)工程设计咨询有限公司, 成都 611731

摘要: 氢能是一种清洁低碳的能源, 目前对于氢能的利用和开发主要集中于交通领域(氢燃料电池汽车)。加氢站是氢燃料电池汽车实现商业化应用的关键基础设施之一, 是构建氢能产业链的重要环节。目前, 加氢站内氢气储存主要方式是高压存储, 储存容器为储氢瓶组和储氢罐。加氢站内储氢瓶组配置方式对于提高储氢瓶组利用率、减少压缩机启停次数至关重要。本文通过研究储氢瓶组的分级方式, 得出储氢瓶组三级等质量加注时的最优配比, 对指导加氢站储氢瓶组分级设计具有实际工程意义。

关键词: 加氢站; 储氢瓶组; 最优配比

中图分类号: TK91; U473.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2022)01-0018-04

Study on Optimal Ratio of Equal Mass Filling of Hydrogen Storage Bottle Group in Hydrogenation Station

YUAN Xi, LI Yingru, HE Jinghao

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

Abstract: Hydrogen energy is a kind of clean and low-carbon energy. At present, the utilization and development of hydrogen energy are mainly concentrated in the transportation field (hydrogen fuel cell vehicle). Hydrogen refueling station is one of the key infrastructures for the commercial application of hydrogen fuel cell vehicles, and it is an important link in the construction of hydrogen energy industry chain. At present, the main method of hydrogen storage in hydrogen refueling stations is high-pressure storage, and the storage containers are hydrogen storage bottle group and tank. The configuration of hydrogen storage bottle group in hydrogenation station is very important to improve the utilization rate of hydrogen storage bottle group and reduce the Start-stop frequency of compressor. In this paper, the classification method of hydrogen storage bottle group is studied, and the optimal ratio of three-stage filling of hydrogen storage bottle group is obtained, which has practical engineering significance for guiding the classification design of hydrogen storage bottle group in hydrogen station.

Key words: hydrogen refueling station; hydrogen storage bottle group; optimal ratio

当今全球能源危机和环境污染问题日益突出, 全球气候变暖正逐渐加剧。为应对气候变化, 2020年9月22日国家主席习近平在联合国大会上承诺中国将采取更加有力的政策和措施, 使二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和。因此减少传统化石能源的利用, 寻找新的洁净和经济能源已成为大势所趋。氢能作为能

源革命的突破口, 以其清洁、零排放、高热值等自身优势, 正逐步成为新能源行业的主要力量。氢能的发展和利用必将带来能源结构的重大变革^[1-2]。

目前对于氢能的利用和开发主要集中于交通领域, 氢燃料电池汽车的市场份额正逐年扩大。作为氢燃料电池汽车燃料的充装场所, 加氢站的开发和运营在氢燃料电池汽车发展的过程中具有至关

收稿日期: 2021-12-23

作者简介: 袁熹(1988—), 男, 2014年毕业于中国科学院大学环境科学专业, 硕士, 工程师。现在东方电气(成都)工程设计咨询有限公司工作。

重要作用^[1]。

作为加氢站内的重要组成部分，储氢瓶组配置规模和利用效率，不仅关乎着加氢站加氢效率，还关乎着加氢站建设成本。因此选择一种最优容积配置的储氢瓶组，对于提高整站氢气利用率，减少氢气压缩机启停频次，降低加氢站建设成本，都有着至关重要的作用^[3-5]。

1 储氢瓶组配比应用现状

储氢瓶组是加氢站内最为常用的一种高压氢气的储氢容器。目前应用最为广泛的是单瓶容积为 0.895 m³ 的瓶组集合，有 6 瓶组和 9 瓶组的形式。其中 6 瓶组的总容积为 5.37 m³，9 瓶组的总容积为 8.05 m³。为了提高储氢瓶组利用率，常将储氢瓶组分级利用，目前 35 MPa 加氢站内较为常见的分级方式有 2 种：①将长管拖车作为低压级，压力等级为 20 MPa；将储氢瓶组作为高压级，其内部再分为两级，压力等级均为 45 MPa。燃料电池汽车到站加氢，先启动低压等级的长管拖车直充，待压差小于额定值时切换储氢瓶组充气，此方式称为“两级加注”；②不考虑长管拖车直充，长管拖车内氢气全部加压至 45 MPa 储存于储氢瓶组中，并将储氢瓶组人为地分为三级逐级加注，此方式称为“三级加注”。

由于“两级加注”中长管拖车氢气压力为 20 MPa，氢气并不完全按照 45 MPa 高等级压力对车辆进行加注，且 45 MPa 储氢瓶组分级少，氢气利用率低于“三级加注”方式。因此，目前绝大多数加氢站储氢瓶组都按照“三级加注”的方式对车辆进行加注。以 9 瓶组为例，加氢站内常见的一、二、三级的储氢瓶组配比有“3:3:3”、“2:3:4”、“1:3:5”等，但哪种配比最优、哪种配比的瓶组内氢气利用率最大，目前还鲜有研究。

2 储氢瓶组最优配比研究

2.1 研究条件假设

(1) 假设每辆氢燃料电池汽车均是 7.5 MPa 氢气压力（剩余 5 kg）时到站加氢，加到 35 MPa（20 kg），车载氢储罐容量为 0.87 m³。即每辆车加注量均为 15 kg。

(2) 储氢瓶组采用 9 瓶组形式，单个储氢瓶组的容积为 0.895 m³，氢气压力为 45 MPa，瓶组分为三级。

(3) 每一级加注时考虑达到平衡或者站内储氢瓶或车载储氢瓶达到目标压力时停止加注。站内第一级储氢瓶的终点压力为 25 MPa；站内第二级储氢瓶的终点压力为 30 MPa；站内第三级储氢瓶的终点压力为 35 MPa。

(4) 采用“等质量加注”方式，即第一级储氢瓶组将车载储罐气压由初始压力 P_{cr} 加注到 25 MPa，第二级储氢瓶组将车载储罐加注到 30 MPa，第三级储氢瓶组将车载储罐加注到 35 MPa。每辆车依次循环加注。

2.2 瓶组最优配比计算

高压状态下的氢气遵循带有压缩因子的真实气体状态方程，见式（1）：

$$PV=ZmRT \quad (1)$$

其中： P -气体压力(Pa)； V -储气容积(m³)； m -储气质量(kg)； R -氢气气体常数 4 214 J/(kg·K)； T -储气温度(K)； Z -氢气压缩因子= $1+\alpha P/T$ ($\alpha=1.9155 \times 10^{-6}$ K/Pa)。

对于储氢瓶组的研究参数如下：

m_x -第一级瓶组向车载储罐充装的氢气质量 (kg)；
 m_y -第二级瓶组向车载储罐充装的氢气质量 (kg)；
 m_z -第三级瓶组向车载储罐充装的氢气质量 (kg)；
 m_u -储氢瓶组向车载储罐充装的氢气总质量 (kg)；
 m_{cr} -车载储罐氢气的初始质量 (kg)；
 n -储氢瓶的总取气率 (%)；
 P_0 -储氢瓶组的初始压力 (Pa)；
 P_1 -站内第一级瓶组的压力 (Pa)；
 P_2 -站内第二级瓶组的压力 (Pa)；
 P_3 -站内第三级瓶组的压力 (Pa)；
 P_{cr} -车载储罐的初始压力 (Pa)；
 V_0 -站内储氢瓶总容积 (m³)；
 V_1 -站内第一级低压瓶组的体积 (m³)；
 V_2 -站内第二级中压瓶组的体积 (m³)；
 V_3 -站内第三级高压瓶组的体积 (m³)；
 V_c -车载储罐容积 m³；
 Z_1 -第一级低压瓶组的压缩因子；
 Z_2 -第二级中压瓶组的压缩因子；
 Z_3 -第三级高压瓶组的压缩因子；
 Z_c -车载储氢瓶目标压力下的压缩因子；
 N -站内储氢瓶

组的加注车辆数； η -站内储氢瓶组取气率（%）。

对于达到车载储罐的目标压力 P_c 的车载储罐氢气质量 m_c 见式（2）：

$$\begin{aligned} P_c V_c &= Z_c m_c R T \\ m_c &= P_c V_c / Z_c R T \end{aligned} \quad (2)$$

同理： $m_{cr} = P_{cr} V_c / Z_{cr} R T$

则车载储氢瓶的单个充装量 m_u 应为：

$$m_u = m_c - m_{cr} = \left(\frac{P_c}{Z_c} - \frac{P_{cr}}{Z_{cr}} \right) V_c / R T \quad (3)$$

因此，每一级瓶组可加注的车辆数如式（4）-（6）：

$$N_1 = \frac{m_x}{m_{u1}} = \frac{\left(\frac{P_0}{Z_0} - \frac{P_1}{Z_1} \right) V_1}{\left(\frac{P_1}{Z_1} - \frac{P_{cr}}{Z_{cr}} \right) V_c} \quad (4)$$

$$N_2 = \frac{m_y}{m_{u2}} = \frac{\left(\frac{P_0}{Z_0} - \frac{P_2}{Z_2} \right) V_2}{\left(\frac{P_2}{Z_2} - \frac{P_1}{Z_1} \right) V_c} \quad (5)$$

$$N_3 = \frac{m_z}{m_{u3}} = \frac{\left(\frac{P_0}{Z_0} - \frac{P_3}{Z_3} \right) V_3}{\left(\frac{P_3}{Z_3} - \frac{P_2}{Z_2} \right) V_c} \quad (6)$$

$$N = \min(N_1, N_2, N_3)$$

$$\eta = N m_u / \left(\frac{P_0 V_0}{Z_0 R T} \right)$$

假设第一级、第二级、第三级的瓶组数量比值为 $a:b:1$

$$V_1 + V_2 + V_3 = V_0 \quad (7)$$

$$V_1 : V_2 : V_3 = a : b : 1 \quad (8)$$

联立公式（1）-（8），假设 $T = 298 \text{ K}$ ，则求得在等质量加注模式下可加注车辆与储氢瓶组配比的关系：

$$N_1 = 1.068 V_1 = \frac{1.068 a V_0}{a + b + 1}$$

$$N_2 = 3.104 V_2 = \frac{3.104 b V_0}{a + b + 1}$$

$$N_3 = 2.127 V_3 = \frac{2.127 V_0}{a + b + 1}$$

① 当 N_1 为三者中最小者：

$$N = N_1 = 1.068 V_1 = \frac{1.068 a V_0}{a + b + 1}$$

设 $f(a, b)$ 为 a 和 b 的二元一次函数：

$$f(a, b) = \frac{a}{a + b + 1} = 1 - \frac{b + 1}{a + b + 1}$$

$$f_a(a, b) = \frac{b + 1}{(a + b + 1)^2}$$

$$f_b(a, b) = \frac{-a}{(a + b + 1)^2}$$

对于 $f_a(a, b) = f_b(a, b) = 0$ 没有解析解，因此 $f(a, b)$ 在定义域范围内没有极值。

假设此时 $N_2 < N_3$ ，则 $f(a, b) < 0.5417$ ， $N < 0.5785 V_0$ ；

② 当 N_2 为三者中最小者：

$$N = N_2 = 3.104 V_2 = \frac{3.104 b V_0}{a + b + 1}$$

设 $f(a, b)$ 为 a 和 b 的二元一次函数：

$$f(a, b) = \frac{b}{a + b + 1} = 1 - \frac{a + 1}{a + b + 1}$$

$$f_b(a, b) = \frac{a + 1}{(a + b + 1)^2}$$

$$f_a(a, b) = \frac{-b}{(a + b + 1)^2}$$

此时，对于 $f_a(a, b) = f_b(a, b) = 0$ 亦没有解析解，因此 $f(a, b)$ 在定义域范围内没有极值。

假设此时 $N_1 < N_3$ ，则 $f(a, b) < 0.5417$ ， $N < 0.5785 V_0$ 。

同理当 N_3 为三者中最小者时，亦可求得 $N < 0.5785 V_0$ 。

由此看出：当 N_1, N_2, N_3 任意一组为最小值时， N 均未有极值。亦就是 N 出现极大值时， $N_1 = N_2 = N_3$ 。

此时： $N = 0.5785 V_0$ ， $a = 1.992$ ， $b = 0.685$ ；

$$\eta = \frac{N m_u}{\frac{P_0 V_0}{Z_0 R T}} = \frac{0.5785 m_u}{\frac{P_0}{Z_0 R T}} = 30.91\%$$

因此等质量加注储氢瓶组利用率最高时，第一、二、三级的储氢瓶组数量比为 $1.992:0.685:1$ 。即对于 9 瓶组形式的储氢瓶组，其一、二、三级的

瓶组数量分别为：5、2、2。

通过分析还可得出：对于等质量加注，氢气利用率与站区储氢瓶容积体积无关，只跟站内储氢瓶每一级瓶组的终点压力和瓶组配比有关。

3 结语

加氢站内储氢瓶组如何配置对于提高储氢瓶组利用率、减少压缩机启停次数至关重要。本文通过研究氢燃料电池汽车“等质量加注”模式下储氢瓶组的分级方式，以瓶组利用率最高为出发点，即单次加注的氢燃料电池汽车数量最多，得出储氢瓶组三级加注的最优配比，对指导加氢站储氢瓶组分级设计具有实际工程意义。

但本次研究仅限于燃料电池汽车的“等质量加注”方式，并未考虑“变质量加注”，即加注时内外压

差达到额定值时再切换储氢瓶组。因此，在以后工作中将对“变质量加注”方式下储氢瓶组的最优配比做进一步研究。

参考文献

- [1] 赵月晶, 何广利, 缪平等. 35 MPa/70 MPa 加氢机加注性能综合评价研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 702-706
- [2] 王莹. 70 MPa 车载储氢气瓶供应系统及快充过程研究[D]. 大连理工大学, 2019
- [3] 潘相敏, 梁阳, 刘京京等. 国内外加氢站发展述评及相关建议[J]. 交通与运输, 2020, 36(3): 97-101
- [4] 潘相敏, 梁阳, 刘京京等. 国内外加氢站发展述评及相关建议[J]. 交通与运输, 2020, 36(3): 97-101
- [5] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书[R]. 中国氢能联盟, 2019

(上接第 10 页)

电位腐蚀的能力最强，显著优于其他两种碳载体催化剂，制备的膜电极具有更优异的动态耐久性。

参考文献：

- [1] 衣宝廉. 燃料电池—原理、技术、应用[M]. 化学工业出版社, 2003
- [2] 刘奎仁, 韩庆. 新能源技术[M]. 化学工业出版社, 2010
- [3] Mandal P, Hong B K, Oh J G, et al. Understanding the voltage reversal behavior of automotive fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2018, 397(sep.1):397-404
- [4] Hong B K, Mandal P, Oh J G, et al. On the impact of water activity on reversal tolerant fuel cell anode performance and durability[J]. Journal of Power Sources, 2016, 328(OCT.1):280-288
- [5] Reiser C A, Bregoli L, Patterson T W, et al. A Reverse-Current Decay Mechanism for Fuel Cells[J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 2005, 8(6): 273-276
- [6] Spornjak D, Fairweather J, Mukundan R, et al. Influence of the

microporous layer on carbon corrosion in the catalyst layer of a polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2012 (214):386-398

- [7] Chaparro A M, Ferreira-Aparicio P, Folgado M A, et al. Study of superhydrophobic electrosprayed catalyst layers using a localized reference electrode technique[J]. Journal of Power Sources, 2016 (325):609-619
- [8] Jeonghee, Jang, Monika, et al. Boosting Fuel Cell Durability under Shut-Down/Start-Up Conditions Using a Hydrogen Oxidation-Selective Metal-Carbon Hybrid Core-Shell Catalyst[J]. ACS applied materials & interfaces, 2019, 11(31):27735-27742
- [9] Perry M L, Patterson T, Reiser C. [ECS 210th ECS Meeting - Cancun, Mexico (October 29-November 3, 2006)] ECS Transactions - Systems Strategies to Mitigate Carbon Corrosion in Fuel Cells[J]. 2006(3):783-795
- [10] Yi Y, Hui L, Wang H, et al. A review on performance degradation of proton exchange membrane fuel cells during startup and shutdown processes: Causes, consequences, and mitigation strategies[J]. Journal of Power Sources, 2012, 205(2):10-23

不锈钢轧制式翅片管传热性能研究

杨洋

东方电气股份有限公司，成都 611731

摘要：本文通过对不锈钢轧制式翅片管进行传热性能试验，得出了翅片管传热系数关系曲线和关联式，有效验证了不锈钢轧制式翅片管的传热能力。

关键词：不锈钢轧制式翅片管；试验；验证；传热能力

中图分类号：TK172；TM623

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2022）01-0022-04

Research on Heat Transfer Property of Stainless Steel Rolling Fin Tube

YANG Yang

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

Abstract: In this paper, through the experimental study on heat transfer performance of stainless steel rolling fin tube, the relationship curve and formula of heat transfer coefficient are obtained, which effectively verifies the heat-transfer capability of stainless steel rolling fin tube.

Key words: stainless steel rolling fin tube; experimental study; effective verification; heat transfer capability

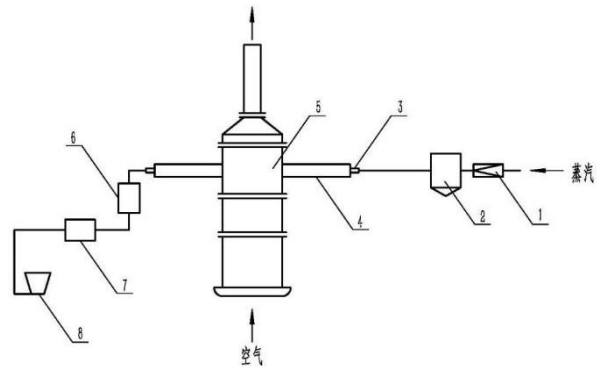
翅片管作为一种高效传热元件，其具有多种型式，不同类型的翅片管由于其成型方式不同，具有不同的应用场合、适合不同的设计参数。

某项目空气冷却器在设计过程中，结合设备结构特点、设计参数等确定使用的翅片管为轧制式翅片管，翅片管基管为不锈钢、翅片为铝片。

为对该空气冷却器使用的翅片管传热性能进行有效评估，在设计过程中对该空气冷却器使用的不锈钢轧制式翅片管进行了传热试验，验证了其传热性能。

片管根径： $D27\text{ mm}$ ；翅片管长度： 300 mm ；基管：不锈钢；翅片：铝。

1.2 试验装置



1-减压阀 2-分离、加热装置 3-试验件 4-保温层
5-风筒 6-凝结水箱 7-过热器 8-计量装置

图1 不锈钢轧制式翅片管传热性能试验装置

不锈钢轧制式翅片管传热性能研究试验装置如图1所示。

1 试验装置及方法

1.1 试验对象

试验对象为4根该空气冷却器使用的同种材质、规格的翅片管，编号分别为A1、A2、B1、B2，具体参数如下：基管： $D25 \times 2.5\text{ mm}$ ；翅片外径： $D50.15\text{ mm}$ ；翅片间距： 2.3 mm ；翅片厚度： 0.5 mm ；翅

收稿日期：2021-10-18

作者简介：杨洋（1984—），男，2008年毕业于四川大学机械设计制造及其自动化专业，硕士，高级工程师。现在东方电气股份有限公司核设备设计所从事核能设备研发设计工作。

试验件管内为水蒸汽，管外为空气，蒸汽温度及空气进、出口温度采用铂热电阻进行测量；冷凝液温度采用水银温度计测量；空气流量采用笛型均速管差压传感变送流量计测量。

试验件中通入 110 °C 饱和水蒸汽，与管外的空气进行换热，风筒内有效通风面积的空气流速在 2 kg/m².s~12 kg/m².s 范围内调节。

空气侧与蒸汽侧的热平衡相对误差小于±5% 时，且各相关参数稳定 15 min 后进行参数测量及记录。

2 试验数据及结果分析

2.1 试验数据

不锈钢轧制式翅片管传热性能主要由其传热系数 K 体现，传热系数 K 按下式进行计算。

空气侧热流量计算见式 (1)：

$$\Phi_a = q_{ma} C_{pa} (t_{a2} - t_{a1}) \quad (1)$$

q_{ma} ：空气质量流量 kg/s； C_{pa} ：空气定压比热容 J/kg·K； t_{a1} ：空气进口温度 (°C)； t_{a2} ：空气出口温度 (°C)；

蒸汽侧热流量计算见式 (2)：

$$\Phi_s = q_{ms} (h_s - h_l) \quad (2)$$

其中：

$$q_{ms} = \frac{\rho_l V_l}{\tau}$$

q_{ms} ：蒸汽凝结液流量 (kg/s)； h_s ：水蒸汽比焓 J/kg； h_l ：冷凝液比焓 (J/kg)； ρ_l ：冷凝液密度 (kg/m³)； V_l ：冷凝液体积 (m³)； τ ：收集冷凝液的时间 (s)； t_s ：蒸汽进口温度 (°C)； t_l ：冷凝液温度 (°C)； A ：有效通风截面空气质量流速 kg·m⁻²·s⁻¹；

平均热流量计算见式 (3)：

$$\Phi_m = \frac{\Phi_a + \Phi_s}{2} \quad (3)$$

对数平均温差计算见式 (4)：

$$\Delta t_m = \frac{[(t_s - t_{a2}) - (t_l - t_{a1})]}{\ln[(t_s - t_{a2}) / (t_l - t_{a1})]} \quad (4)$$

总传热系数 K 计算见式 (5)：

$$K = \frac{\Phi_m}{A \Delta t_m} \quad (5)$$

试验件 A1、A2、B1、B2 测量参数及传热系数 K 值计算结果见表 1~表 4。在上述参数测量过程中，空气进出口温度波动控制在±0.5 °C、空气质量流速控制在±1%、蒸汽温度控制在±0.5 °C、冷凝液温度控制在 0.5 °C、冷凝液质量流量控制在±1%。

表 1 试验件 A1 传热性能数据

参 数	序 号					
	1	2	3	4	5	6
空气进口温度 / °C	29.9	29.8	30.0	29.7	29.8	29.8
空气出口温度 / °C	61.28	59.3	56.65	54.54	51.97	49.8
蒸汽冷凝压力 / MPa	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
蒸汽进口温度 / °C	114.0	113.9	114.2	114.6	113.7	119.0
冷凝液温度 / °C	110.1	109.8	109.9	110.5	109.3	114.6
蒸汽凝结液流量 / kg·h ⁻¹	1.461	1.595	1.712	1.852	1.949	2.301
蒸汽凝结放热量 / W	901.5	984.2	1 056.4	1 142.8	1 202.6	1 419.8
空气流量 / kg·s ⁻¹	0.029 6	0.034 2	0.041 5	0.047 2	0.056 6	0.070 3
有效通风截面空气质量流速 / kg·m ⁻² ·s ⁻¹	4.62	5.34	6.48	7.37	8.84	10.98
空气吸热量 / W	933.5	1 013.9	1 111.5	1 178.3	1 261.1	1 413.0
热平衡误差 / %	-3.43	-2.93	-4.96	-3.01	-4.64	0.48
平均温差 / °C	65.5	66.49	68.11	69.92	70.24	76.74
传热系数 (以基管外表光滑面积为基准) / w·m ⁻² ·K ⁻¹	598.6	642.1	680.1	709.3	749.5	788.8

表 2 试验件 A2 传热性能数据

参 数	序 号					
	1	2	3	4	5	6
空气进口温度 / °C	29.3	29.5	29.2	29.0	28.9	28.7
空气出口温度 / °C	61.78	59.1	56.95	54.37	51.23	48.52
蒸汽冷凝压力 / MPa	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
蒸汽进口温度 / °C	113.9	113.7	114.6	113.7	114.1	113.8
冷凝液温度 / °C	110.1	109.6	110.4	109.6	109.8	109.3
蒸汽凝结液流量 / kg·h ⁻¹	1.556	1.599	1.759	1.851	2.022	2.244
蒸汽凝结放热量 / W	960.1	986.7	1 085.4	1 142.2	1 247.7	1 384.7
空气流量 / kg·s ⁻¹	0.030 3	0.034 9	0.040 9	0.046 7	0.057 0	0.070 6
有效通风截面空气质量流速 / kg·m ⁻² ·s ⁻¹	4.73	5.45	6.39	7.29	8.90	11.03
空气吸热量 / W	989.1	1 038.2	1 140.6	1 190.7	1 279.2	1 406.3
热平衡误差 / %	-2.92	-4.96	-4.84	-4.08	-2.46	-1.54
平均温差 / °C	65.42	66.54	68.75	69.42	71.51	72.67
传热系数（以基管外表光滑面积为基准） / w·m ⁻² ·K ⁻¹	636.7	650.3	691.8	718.0	755.1	820.6

表 3 试验件 B1 传热性能数据

参 数	序 号					
	1	2	3	4	5	6
空气进口温度 / °C	27.15	26.9	26.7	26.4	26.1	25.5
空气出口温度 / °C	57.89	55.59	52.76	50.78	47.53	44.81
蒸汽冷凝压力 / MPa	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
蒸汽进口温度 / °C	114.2	113.6	114.7	114.9	114.3	115.0
冷凝液温度 / °C	110.2	109.5	110.4	110.6	109.9	110.5
蒸汽凝结液流量 / kg·h ⁻¹	1.46	1.577	1.774	1.816	1.947	2.255
蒸汽凝结放热量 / W	900.9	973.1	1 094.7	1 120.6	1 201.4	1 391.5
空气流量 / kg·s ⁻¹	0.029 6	0.034 2	0.042 0	0.047 5	0.057 0	0.071 0
有效通风截面空气质量流速 / kg·m ⁻² ·s ⁻¹	4.62	5.34	6.56	7.42	8.90	11.09
空气吸热量 / W	914.5	986.1	1 100.0	1 163.8	1 227.6	1 377.9
热平衡误差 / %	-1.48	-1.32	-0.49	-3.72	-2.14	0.99
平均温差 / °C	68.79	69.58	72.25	73.7	74.96	77.36
传热系数（以基管外表光滑面积为基准） / w·m ⁻² ·K ⁻¹	563.9	601.6	649.1	662.3	692.4	764.9

2.2 传热系数与空气质量流速曲线与关联式
根据实测的风筒有效通风截面积 U 及所计算的总

传热系数 K , 得出试验件 A1、A2、B1、B2 的 K 与 U 的关系曲线, 具体如图 2 所示。

表4 试验件 B2 传热性能数据

参 数	序 号					
	1	2	3	4	5	6
空气进口温度 / °C	28.4	28.5	28.3	28.3	28.05	27.8
空气出口温度 / °C	59.47	56.03	53.51	51.39	48.69	46.17
蒸汽冷凝压力 / MPa	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
蒸汽进口温度 / °C	114.2	113.9	114.6	113.8	114.2	115.5
冷凝液温度 / °C	110.3	109.9	110.4	109.6	109.9	110.9
蒸汽凝结液流量 / kg·h ⁻¹	1.468	1.644	1.787	1.819	1.991	2.096
蒸汽凝结放热量 / W	905.8	1 014.4	1 102.7	1 122.4	1 228.6	1 293.3
空气流量 / kg·s ⁻¹	0.029	0.035 6	0.041 5	0.047 2	0.057 0	0.070 6
有效通风截面空气质量流速 / kg·m ⁻² ·s ⁻¹	4.53	5.56	6.48	7.37	8.90	11.03
空气吸热量 / W	905.5	985.0	1 051.4	1 095.3	1 182.4	1 303.4
热平衡误差 / %	0.03	2.99	4.87	2.48	3.91	-0.77
平均温差 / °C	67.38	68.97	71.08	71.44	73.38	76.01
传热系数 (以基管外表光滑面积为基准) / w·m ⁻² ·K ⁻¹	574.5	619.5	647.6	663.3	702.1	730.0

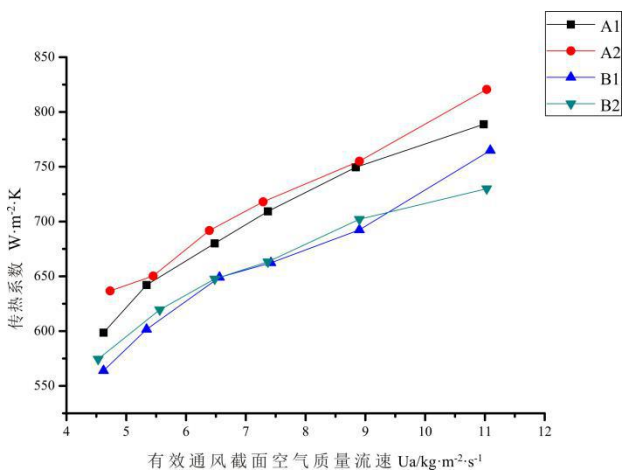


图2 试验件 K-U 关系曲线

根据试验件 K-U 关系曲线, 拟合出的试验件 A1、A2、B1、B2 传热系数关联方程式 (6):

试验件	K-U 关系式	拟合误差	当 $U=6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 传热系数 K
A1	$K=375.8U^{0.314}$	0.4%	659.6 W·m ⁻² ·K
A2	$K=394.0U^{0.302}$	0.34%	676.9 W·m ⁻² ·K
B1	$K=344.8U^{0.328}$	0.5%	620.6 W·m ⁻² ·K
B2	$K=389.2U^{0.267}$	0.38%	628.0 W·m ⁻² ·K

3 传热性能判定

标准 NB/T 47007-2010 中, 评判翅片管是否合格的传热系数数据是根据碳钢基管给出的, 针对不锈钢基管的双金属轧制式翅片管, 导热系数低于低碳钢, 为了合理地判别其传热性能, 将上述试验得到的传热系数换算为碳钢基管的传热系数。

根据传热热阻计算公式, 采用式 (7) 进行换算:

$$\frac{1}{K^*} = \frac{1}{K} - \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda^*} \quad (7)$$

K^* : 碳钢基管的传热系数

K : 不锈钢基管的传热系数

λ^* : 碳钢基管的导热系数

λ : 不锈钢基管的导热系数

δ : 基管的壁厚

将 $\lambda^*=43 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $\lambda=14 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $\delta=0.0025 \text{ m}$ 以及试验件 A1、A2、B1、B2 的传热系数 K 代入上式, 即可得到试验件换算为碳钢基管的传热系数 K^* , 如式 (8):

(下转第 49 页)

定子 Delta 接线在大电机中的应用

冯德洋

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 定子 delta 接线易在定子绕组中产生三次谐波环流, 增加损耗, 并引起发热, 电机学经典理论均不推荐在大电机中采用定子 delta 接线。但定子 delta 接线在保证电机相电压不变的前提下, 可有效降低供电电源电压。且通过改变定子接线的星/角方式, 可实现同电机适应于不同电压等级。可见, 在大功率电机, 定子绕组的 delta 接线仍有一定应用前景。本文以 7 200 kW 电机为例, 论证定子 delta 接线应用的关注点, 并通过工业应用证明其在大电机应用中的可行性。

关键词: delta 接线; 三次谐波; 环流

中图分类号: TM311

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 01-0026-03

Application of Stator Delta Connection in Large Motor

FENG Deyang

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

Abstract: Delta connection of stator is easy to produce the third harmonic circulating current in stator winding, increase the loss and cause heating. The classical theory of electrical machinery does not recommend delta connection in high-power motor. However, delta connection can effectively reduce the power supply voltage on the premise of keeping the motor phase voltage unchanged. Also, by changing the star / delta connection, the same motor can adapt to different voltage levels. It can be seen that delta connection still has application prospect in high-power motor. In this paper, taking 7 200 kW motor as an example, we demonstrates the focus of delta connection application, and proves its feasibility in high-power motor application through industrial application.

Key word: delta connection; third harmonic; circulating current

若电机定子绕组采用 delta 接线, 电机的三次谐波电动势会将在闭合的 delta 回路中形成环流, 从而增加定子铜耗, 产生额外的杂散损耗, 使电机的效率下降、温度升高。传统认识, 大功率电机一般采用星型接线, 而不采用 delta 接线。但定子 delta 接线在保证电机相电压不变的前提下, 可降低线电压, 即降低供电电源电压。这在变频电机的应用中凸显其优势, 相同的相电压设计下, 变频器的电力电子元件可选用低电压级别, 可有效的降低变频器成本, 从而实现整个拖动系统的降本。另一方面, 类似于小功率电机的应用, 同样的电机可以考虑改变定子接线的 Y/Δ 接线方式, 实现同一电机适应于不同的电压等级。基于 Y 接与 delta 电机连接的三

次环流为出发点, 本文首先给出三次环流产生的原因, 并以此为基础论证 delta 接线电机的设计关注点, 最后给出定子 delta 接线技术在 7200kW 电机中的应用案例, 论证其应用的可行性。

1 环流的产生与抑制

1.1 环流的产生

根据电机学原理, 电机的气隙中存在空间谐波, 空间谐波切割定子线圈产生谐波电动势, 谐波电动势的有效值 $E_{\phi v}$ 为:

$$E_{\phi v} = 4.44 f_v N k_{wv} \Phi_v \quad (1)$$

公式中 f_v 表示谐波电动势的频率, $f_v = \nu f_1$, 即谐波电动势的频率为基波电动势频率的 ν 倍; N 表示

收稿日期: 2021-05-03

作者简介: 冯德洋 (1989—), 男, 2014 年毕业于大连理工大学, 硕士, 工程师。现在东方电机有限公司主要从事交直流电动机设计研究方面工作。

每相串联匝数； k_{wv} 表示 v 次谐波的绕组因数，其值为 v 次谐波的分布因数与节距因数的乘积； Φ_v 表示 v 次谐波磁通，其值为：

$$\Phi_v = \frac{2}{\pi} B_v \tau_v l \quad (2)$$

公式中， B_v 表示 v 次谐波磁场的幅值； τ_v 表示 v 次谐波的极距，其值为基波极距的 $1/v$ ； l 表示电枢的有效长度。

定子三相绕组可采用delta型接线或Y型接线。对于 v 次空间谐波磁场，相邻线圈之间相距 $v\alpha$ 电角度，故在对称的三相系统中，各相电动势的三次及三的倍数次谐波在时间上同相位。又由公式(1)知，其幅值相等，故可认为各相电动势的三次及三的倍数次谐波同相且幅值相等。

当三相绕组采用Y型接线时，线电压等于相电压之差，相减时三次及三的倍数次谐波电动势相互抵消，相端不存在三次及三的倍数次谐波电流。当三相绕组采用delta型接线时，三相的三次及三的倍数次谐波电动势之和为单相电动势的三倍，其将在闭合的delta回路中形成环流。

结合公式(1)及公式(2)可知，相比较，三次谐波电动势占比明显高于三的倍数次谐波电动势，故在环流分析时，主要考虑三次谐波形成的环流 $I_{3\Delta}$ ，其值：

$$I_{3\Delta} = \frac{3E_{\phi 3}}{3Z_3} \quad (3)$$

公式中， $3E_{\phi 3}$ 表示在delta接线型式中，三次谐波电动势之和； $3Z_3$ 表示回路的三次谐波阻抗。

以上分析基于对称三相系统，若三相系统中存在磁路或电路的不对称时，三相回路会因不对称量的存在，产生额外的附加环流。

1.2 环流的抑制

从1.1节的分析可知，若要降低delta接线型式产生的环流影响可从两方面出发。第一，降低电机气隙内的三次谐波占比值；第二，尽可能的提高三相系统的对称性。

2 delta 接线的应用细则

为降低定子delta接线产生的环流引起的电机温升，在电机的电磁及结构等方面需进行特殊考虑。

2.1 每极每相槽数

在满足冲片强度的前提下，选用较多的齿数。即选用较大的每极每相槽数 q 值，减少因定子绕组空间分布造成的空间谐波含量。

如我公司应用该技术的7200 kW电机，定子冲片外径为1500 mm，在保证定子齿强度的情况，综合考虑定转子槽配合，选用较多的定子齿数，定子齿数选为120。电机为4极，则对应的每极每相槽数为10，这样采用大的每极每相槽数可有效降低大部分低次空间谐波产生的电流占比。

2.2 气隙

异步电机的励磁为感应励磁，其功率因素不可调。对于异步电机在满足功率因数的前提下，增大定转子之间的气隙，减少谐波漏磁，可有效降低环流占比。

电机的气隙值影响电机的有功功率占比，从而影响功率因数。在大电机中，适当增大气隙值，对功率因数的影响相对较小。如我公司7200 kW电机，定转子气隙由4变为5时，电机功率因素只是小幅度降低。功率因素等各项参数亦能符合要求，在保证参数的前提下，选用较大气隙值5，可有效降低谐波漏磁值，从而降低环流占比。

2.3 环流占比分析

基于对称三相系统，采用有限元的分析方法，可定量衡量三次及三的倍数次环流在整体电流中的占比，为delta接线型式的电机设计提供参考。

4极电机较成熟的槽配合有120/101及96/77。在仿真分析上，采用二维运动电磁场时步有限元模型与电路模型相结合的方法，对东方电机7200 kW电机额定运行工况的环流电流占比进行了仿真分析计算。通过FFT分析，可以看出采用120/101槽配合时，相电流中三次谐波电流占比为0.57%，三的倍数次谐波电流占比较低，120/101槽配合时负载相电流谐波分析如图1所示，其谐波具体占比如表1所示；96/77槽配合时，相电流中环三次谐波电流占比为1.21%，三的倍数次谐波电流占比较低，96/77槽配合时负载相电流谐波分析如图2所示，其谐波具体占比如表2所示。

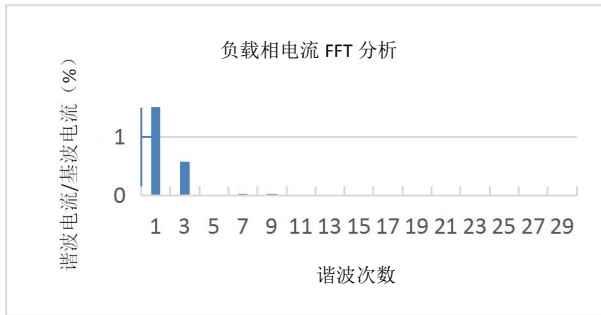


图1 120/101 槽配合时负载相电流谐波分析

表1 120/101 槽配合时负载电流谐波分析

谐波次数	谐波幅值 (A)	谐波百分比	谐波次数	谐波幅值 (A)	谐波百分比
1	1 263.03	100.00%	11	0.09	0.01%
3	7.2	0.57%	13	0.05	0.00%
5	0.08	0.01%	15	0.05	0.00%
7	0.35	0.03%	27	0.17	0.01%
9	0.32	0.03%	29	0.13	0.01%

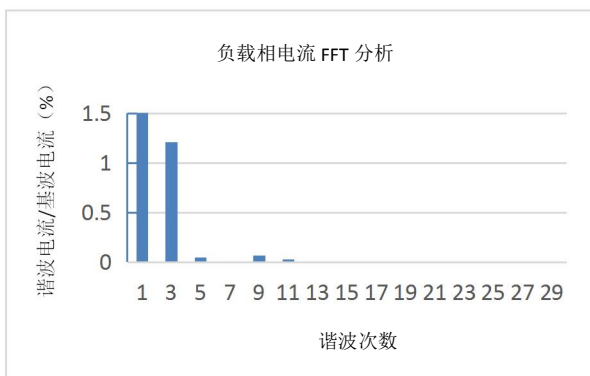


图2 96/77 槽配合时负载相电流谐波分析

表2 96/77 槽配合时负载电流谐波分析

谐波次数	谐波幅值 (A)	谐波百分比	谐波次数	谐波幅值 (A)	谐波百分比
1	1 245.15	100.00%	11	0.34	0.03%
3	15.01	1.21%	13	0.07	0.01%
5	0.67	0.05%	15	0.12	0.01%
7	0.06	0.00%	27	0.15	0.01%
9	0.81	0.07%	29	0.14	0.01%

经分析计算，电机的槽配合选用 120/101 槽配合方案，按照此方案得到的负载环流电流占比为

0.57%，可以忽略不计。

对比分析可知，电机选用 120/101 槽配合环流占比较低，按照此方案得到的负载环流占比为 0.57%。相比于基波电流，其所占比例较低，采用有效的方案，较容易控制因环流因素对电机温升的影响。

2.4 三相对称度提升

提升三相系统的对称度，可有效降低因不对称量原因产生额外的附加环流，为此可通过从产品质量控制上提升电机的磁路对称性及电路对称性。具体措施包括：提升叠片质量及三相线圈电阻的对称度、提高装配时的气隙均匀度等。

在叠片质量上要求转子整圆冲片不采用调节冲片，为保证后续冲片厚度均匀性，要求理片时转子冲片旋转 45 度冲制，同时，要求冲片的原材料的横向厚度差不大于 0.01 mm；电机总装时，严格控制电机装配时的气隙均匀度，这就要求一方面提升定子铁心叠片后的尺寸精度，另一方面提升总装时对气隙误差的验收标准；在电路对称度的控制上，要求考核每支路的定子线圈的电阻度值偏差，且在并相后考核每相电阻值的偏差，以避免因并线时因虚焊等原因造成的三相电路不对称。

3 结语

本文的研究成果在东方电机 7 200 kW 电机得到了成功应用，电机基本参数如表 3 所示。电机为高线轧机精轧主电机，2018 年 12 月完成调试安装，目前已连续运转超两年时间，电机各项运行指标正常，未出现定子温升过高情况。获得了用户好评，本文所提应用细则的可行性在实际工业应用中得到了验证。另，本文所提应用细则在东方电机另一台 5 400 kW 电机上亦得到了推广应用。

表3 电机基本参数

型号	功率	相数	极数	额定电压
BPY7200-4	7 200 kW	3	4	2 900 V
额定频率	额定转速	接线型式	工作制	
33.52Hz	1 000 rpm	delta	S1	

非标法兰连接密封设计探讨

刘伟东^{1,2} 季敏东^{1,2} 付涛^{1,2} 张永璐^{1,2} 张强强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: 针对某项目采用非标法兰连接结构的大型压力容器, 两次水压试验均出现局部密封失效的情况, 首先按标准、规范对结构的强度、刚度等进行校核, 结果表明满足要求。接着从法兰设计的基本原理和方法出发, 通过分析排除可能失效的原因, 得出结论为法兰密封设计不合理。为寻找经济损失最小的解决方案, 从密封失效机理出发, 采用 Waters 法、圆板理论和数值计算相结合的方式, 进行分析、试算并对法兰结构进行细微修改解决了问题。此方法在非标法兰设计时可联合法兰设计方法用于密封设计的校核。

关键词: 非标; 法兰连接结构; 密封设计; 探讨

中图分类号: TQ055.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 01-0029-05

Discussion about Design of Nonstandard Flange Connection

LIU Weidong^{1,2}, JI Mindong^{1,2}, FU Tao^{1,2}, ZHANG Yonglu^{1,2}, ZHANG Qiangqiang²

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

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

Abstract: Based on large pressure vessel with nonstandard flange connection of one project, local sealing failure occurs during hydro-static test twice. Firstly check and verify strength and stiffness of structure as per standard and code whose result meet the requirement. Then according to the basic principle and method of flange design, analyze the probable reasons and preclude, the conclusion is that flange sealing design is unreasonable. To achieve economical solution, utilize the Waters method, theory of circular plate and numerical simulation to analyze and calculate based on mechanism of sealing failure and the flange structure is changed slightly to solve the problem. This method can be utilized to verify sealing design in conjunction with flange design method during nonstandard flange design

Key words: nonstandard; structure of flange connection; sealing design; discussion

螺栓法兰连接是压力容器和管道中常用的部件^[1], 螺栓法兰密封结构包括螺栓、法兰和垫片及反法兰或法兰盖, 通常是压力容器设计中应用广泛的密封型式。本文以采用非标大法兰连接结构进行密封的某项目大型压力容器, 设备制造完成后进行水压试验时, 压力在未达到试验值时, 便出现了部分区域泄漏现象 (即密封失效), 致压力试验无法进行为例。

从法兰结构设计基本原理和密封设计机理出发, 探索解决密封失效的方法。开展工作: ①结构

设计, 采用 GB/T 150.3 中的 Waters 法 (华脱斯法)、平盖计算分别对法兰、法兰盖校核验证, 结果满足标准要求; ②密封设计, 基于圆平板理论并辅以数值计算确定原设计不合理, 并用此法确定修改方案: 增加垫片 (非金属) 厚度, 同时减小垫片压紧力作用下中心圆直径 D_G 至螺栓中心圆径向距离。即 D_G 处平盖变形量减小许多, 垫片回弹量可补充平盖变形, 从而有效解决了密封失效的问题。

本文期望进行非标法兰结构设计时, 依据垫片实际压缩、回弹数据, 按圆平板理论辅以数值计算

收稿日期: 2021-04-12

作者简介: 刘伟东 (1984—), 男, 2006年毕业于哈尔滨工程大学核工程与核技术专业, 本科学历, 高级工程。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司技术创新中心, 从事核安全设备及支承的研制及技术服务等工作。

进行密封设计验证的方法对工程设计有一定帮助。也为在遇到法兰连接结构密封失效时，提供一种破解思路。本文公式中计算符号，如未特别说明均采用 GB/T150.3 中法兰计算符号。

1 非标法兰连接结构介绍

1.1 法兰连接总体结构

该项目压力容器用法兰密封结构，采用：芯部 165 mm 厚，端部 160 mm 厚的法兰盖（如图 1）；内径为 $D3000$ ，厚度 160 mm 的法兰（如图 2）；采用中心圆直径 $D3350$ ，M39 规格的 52 颗螺栓预紧；采用 $\delta 3$ 外径 $D3055$ /内径 $D3005$ 的非金属柔性石墨垫片进行密封。法兰结构如图 3。各零件的力学性能见表 1。设备水压试验压力为 1.13 MPa。

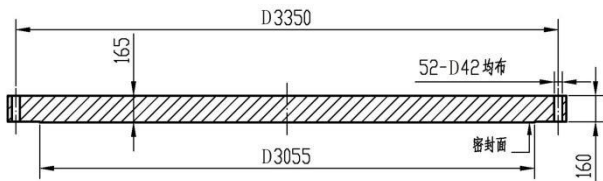


图 1 法兰盖示意

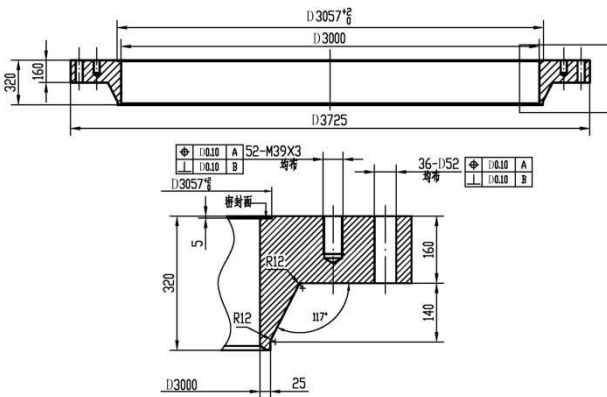


图 2 法兰盖示意

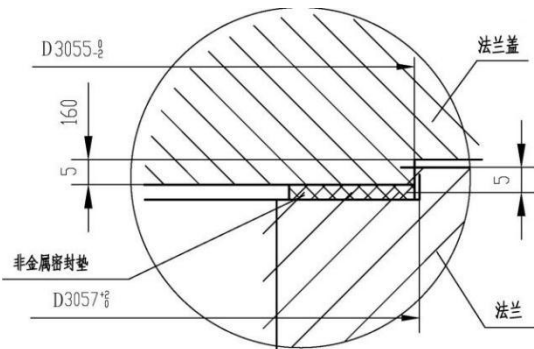


图 3 法兰连接结构示意图

表 1 各零件力学性能

名称	材料	常温许用应力(MPa)
法兰	SA-965 F316	130.41
法兰盖	SA-965 F316	130.41
螺栓	SA-193 B7	172
垫片	304+柔性石墨	$m=2; y=22.8\text{MPa}$

1.2 法兰、垫片尺寸对标

因采用非标设计，故对法兰、垫片尺寸对标。查 NB/T 47024-2012《非金属软垫片》标准规定的最大尺寸为 DN3000 ($D3055/D3005$)，压力最大 PN 0.25 MPa，无法满足本项目水压试验 1.15 MPa 的要求。

再查 HG/T 20592-2009 可知标准规定的最大法兰尺寸为 DN2000，PN1.6 MPa 的法兰螺栓中心圆直径为 $D2230$ 。查 NB/T 47024-2012 可知 DN2000 的垫片按 PN1.6 MPa，尺寸为 $D2089/D2029$ 故垫片外端与螺栓中心圆距离为 70.5 mm，垫片的基本密封宽度 $b_0=15$ mm。

按 GB/T150-2011 规定，垫片压紧力作用下中心圆直径 $D_G = \text{垫片接触外径} - 2b = 2089 - 2 \times 2.53 \times \sqrt{15} = 2069.4$ mm，螺栓中心圆与 D_G 距离为 80.3 mm。而本项目垫片的基本密封宽度 $b_0=12.5$ mm，垫片压紧力作用下中心圆直径 $D_G = 3055 - 2 \times 2.53 \times \sqrt{12.5} = 3029.7$ mm，螺栓中心圆与 D_G 距离为 160.2 mm。从经验来看，此值过大。

通过对标可知，按标准设计的 PN 1.6 MPa，DN1000~DN2000 法兰螺栓孔中心圆与垫片 D_G 的距离均未超过 100 mm。

2 原因分析

当前世界各国的压力容器规范对法兰的计算方法绝大多数还是采用 Waters 法（包括 GB/T 150 和 JB/T 4732，详细计算可参考这些标准）^[1]，此方法主要是基于标准定义的（或厂家推荐的）2 个垫片系数 m 、 y 开展的强度、刚度校核计算。

经过大半个世纪的众多工程应用，证明了其设计方法还是合理的。当然也出现过一些泄漏和密封问题。

Waters 法的传统设计计算方法，其计算模型并非完美无缺。它是一个简化的应力计算方法加上基

于使用经验的刚度系数校核，将复杂的法兰连接，运用了及其简化的计算模型进行设计计算^[2]。但此方法在计算中不考虑预紧和操作状态下螺栓载荷的变化关系，仅包含了法兰组合结构的强度完整性，对法兰连接结构的密封性能的评判和认识是不太充分的。

首先对本项目的非标法兰按 Waters 法进行了校核，同时对法兰盖也进行了强度计算，计算结果均表明满足要求，仍发生了密封失效。

鉴于上述已开展工作，考虑该项目的密封失效原因主要如下：

(1) 法兰密封面可能存在局部缺陷，导致密封失效。从文献^[3]，可知泄漏量的经验公式如下式：

$$Q = \frac{9.8\pi h^3 \Delta p}{13.9\eta \log_{10}(r_2/r_1)} \times 10^5 (\text{cm}^3/\text{s}) \quad (1)$$

式中： h -垫片和法兰之间的间隙宽度 (cm)； Δp -管道内外压力差 (MPa)； r_1 -垫片内半径 (cm)； r_2 -垫片外半径 (cm)； η -介质的动力粘度 (Pa·s)。

从式 (1) 可知，管道 Δp 通常都大于零， η 大于零， r_2/r_1 大于 1，则只有当 h 等于零时，才可能使泄漏量为零。如果法兰密封面存在局部缺陷，垫片与法兰之间存在间隙，则会产生泄漏。

(2) 因垫片的 m 、 y 值与实际垫片的密封性能和螺栓拧紧要求存在较大差异，实际的螺栓预紧力比按计算值加载的预紧力值偏低，即法兰操作状态下的总载荷偏低，而在垫片计算直径范围内产生的轴向力 $\pi/4 \times D_G^2 p_c$ 不变，从而造成垫片在操作状态下的压紧力 ($2\pi D_G b m p$) 过小，导致密封失效。

(3) 因垫片的 m 、 y 值与实际垫片的密封性能和螺栓拧紧要求存在较大差异，为了实现密封可能存在过度的增加螺栓预紧力，从而法兰操作状态下的总载荷偏高太多，从而造成垫片在操作状态下的压紧力 ($2\pi D_G b m p$) 过大，导致垫片处于塑性变形而无法很好回弹来补充法兰端面的分离量，导致密封失效。

(4) 为实现法兰密封，笔者认为在操作工况下法兰盖或反法兰在垫片计算直径 (按 D_G 考虑) 范围外的变形量，是通过垫片压缩后的回弹量进行法兰端面分离的补偿 (即垫片的回弹量应大于法兰

盖的变形量)，从而实现密封。对该项目大型非标法兰，可能因垫片 D_G (也可理解为垫片外边缘) 与螺栓孔中心圆距离过大 (如 1.2 所述)，造成法兰盖的变形过大，而垫片压缩后的回弹量过小无论如何都不能实现密封。

3 原因的进一步排查

通过密封泄漏的原因分析，现逐一排查，并提出解决方案。

3.1 法兰密封面可能存在局部缺陷的排查

通过拆卸法兰密封结构并进行目测、粗糙度对比，确定此情况不存在，排除了此原因。尽管如此，仍对螺栓和螺母进行了必要的润滑 (如加二硫化钼或油)，并要求工人再次试验时对称多次拧紧螺栓。

3.2 因垫片的 m 、 y 值与实际垫片的密封性能和螺栓拧紧要求存在较大差异的排查

通过提高螺栓的使用安全系数 (可考虑螺栓破坏屈服强度取至许用的 0.9)，此时可考虑将拧紧力矩系数 K 值提高 (按无润滑 0.24 考虑) 进行螺栓拧紧力矩计算 (将得到更大螺栓拧紧力矩值，垫片压紧力相应的增大)。同时按有润滑的一般加工表面拧紧力矩系数 K 值 0.13 进行垫片接触应力校核，按工程上的一般经验保证垫片有限密封面积上的压紧力不大于 $4y$ ，即压紧力 $F=2\pi D_G b m p$ 。

随后，利用满足工程要求的上述计算所得更大的螺栓拧紧力矩拧紧螺栓后进行水压试验，仍泄漏，排除此原因。

3.3 对于垫片 D_G 与螺栓孔中心圆距离过大的排查

通过对标，可知该项目非标大法兰的螺栓中心圆与垫片压力作用中心圆的距离相对是偏大的，是极有可能导致密封失效的原因。本项目采用法兰盖为凸面、法兰为凹面的 MFM 密封结构型式，要分析是否因螺栓中心圆与垫片外边缘的距离相对是偏大导致密封失效，解决思路应从平盖的计算方法着手。

对于平盖的计算方法主要有两种，因本项目压力较低属于“中低压”^[4]，按 GB 150-1989《钢制压力容器》标准释义，应按薄圆平板理论进行计算。

其主要计算过程叙述如下。

垫片的平均直径（即压紧力作用中心圆直径）为 $D_c=2R_c$ ，螺栓孔到垫片平均直径的距离为 h_g ，内压 p ，螺栓总载荷 W_p 。平盖受力简图如图4。受力情况为：

- (1) 均布载荷 p 作用在简支的圆平板上。
- (2) 螺栓载荷 W_p 作用在圆平板周边（螺栓圆）上。
- (3) 垫片反作用力 Q_m 作用在圆平板支承面上。

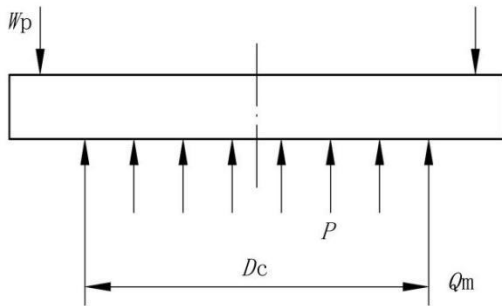


图4 平盖受力简图

为便于简化计算，再做进一步假设和简化，因 Q_m 作用于支承面，可考虑不引起平盖的挠度和应力，螺栓载荷可简化为一个力偶作用于简支边上，其简化结果如下图5。其中 m 为单位圆周长度上的力矩。

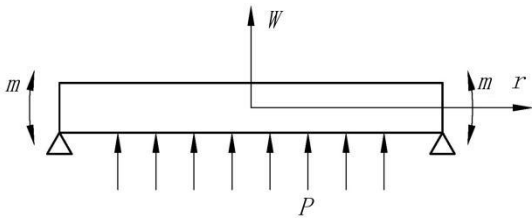


图5 平盖计算简图

推导出平盖各处扰度（变形量）公式如下式（2），详细推导过程，请参考圆板理论计算文献。

$$W = \frac{p(R^2 - r^2)}{64D} \left(\frac{5 + \mu}{1 + \mu} R^2 - r^2 \right) + \frac{m}{2(1 + \mu)D} (R^2 - r^2) \quad (2)$$

式中： p -平盖所受压力（MPa）； R -螺栓孔中心圆半径（mm）； r -平盖上任意处至平盖中心的距离（mm）；

D -平盖的抗弯刚度 $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ ， δ -平盖的厚度

（mm）； E -材料的弹性模量； μ -材料泊松比； m -

螺栓总载荷在单位圆周长度上的力矩， $m = \frac{M}{\pi D_c}$ 。

此原因是密封失效最可能的原因，下一步将按圆板理论辅以数值计算进行校核。

4 原始设计密封核算

4.1 原始设计的经典公式计算结果

对于该项目再次采用 Waters 校核法兰结构的过程，本文不赘述。按 Waters 法计算得出操作状态下，螺栓总载荷为 8 567 754 N，折算 m 为 143 678 N·mm，按水压试验压力 1.13 MPa 代入式（2），知垫片 D_G 处平盖变形量为 1.35 mm。原设计的垫片厚度为 3.5 mm，据厂家提供的数据：压缩量为 42%，回弹量为 12%，计算垫片回弹量为 $3.5 \times 0.42 \times 0.12 = 0.176$ mm，无法补偿平盖的变形量。从式 2 知，离平盖中心越近变形量越大（平盖中心变形量最大），故若垫片外缘处平盖变形量无法得到补偿而实现密封。

4.2 原始设计的数值计算结果

因按经典公式做了较多简化，为获得更平盖更精确的变形量，再采用数值计算，边界条件如图6所示，计算结果如图7所示。

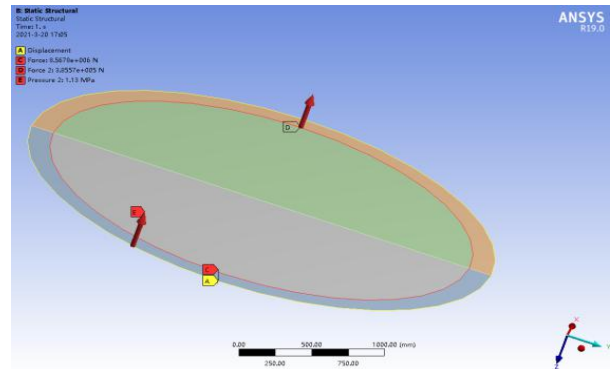


图6 边界条件

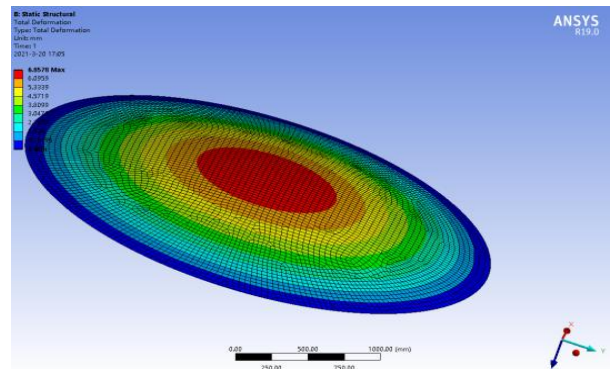


图7 计算结果

提取结果文件，可知在垫片压紧力中心的变形量为 1.245 mm，是由于经典公式忽略了压紧力的作用且螺栓总载荷简化为均匀的力矩造成，但二者误

差不大约7%，在工程上可接受。垫片的回弹量0.176 mm 无法补偿法兰盖的变形。

通过上述计算可见：垫片 D_G 与螺栓孔中心圆距离过大，导致平盖变形无法得到补充是密封失效的直接原因。

5 密封设计改进及效果

解决该项目法兰密封存在的设计缺陷，从以下几方面考虑：

(1) 增加法兰盖的厚度，从而增加其抗弯刚度，达到减小变形量的目的。但从式(2)可知，抗弯刚度与厚度的2次方成正比，而变形量与平盖半径的2次方成正比，而半径是厚度的数倍，因此平盖的厚度增很厚才能抗弯刚度提高量足够，不可取。

(2) 法兰盖加筋以增加其刚度，而焊接筋板可能引起平盖变形不可控，亦不可取。

(3) 增加密封垫片厚度，减少垫片 D_G 与平盖螺栓孔中心圆间距。此方法只需新购垫片，影响最小，可取。

通过一系列迭代计算，最终确定垫片厚度为5 mm，尺寸为D3250/D3300，即保证垫片宽度 b 不变更有利于垫片载荷。按式2计算平盖在垫片压紧力中心处变形量为0.235 mm(此时总的螺栓载荷上升为9 972 196 N，折算 m 为32 884 N·mm，数值计算变形量为0.214 mm(如图8示)，两者偏差非常小。垫片的回弹量为 $5 \times 0.42 \times 0.12 = 0.252 \text{ mm}$ ，可补偿平盖的变形。最终通过上述第(3)方法改进密封结构后，水压试验成功。

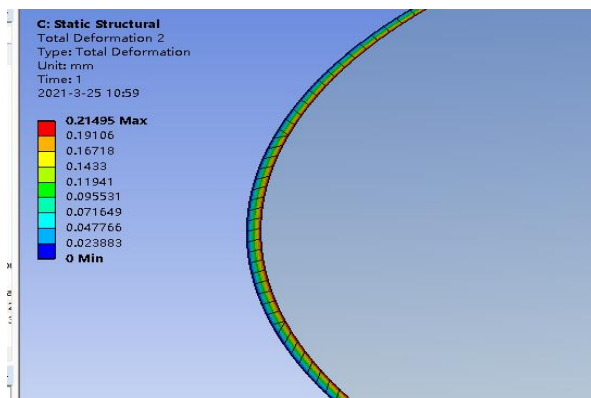


图8 改进后垫片压紧力处平盖变形量

6 结语

通过某项目法兰连接设计缺陷分析、优化，从法兰设计基本方法、机理去分析问题最终解决了水压不通过的实际问题，得出如下结论。

(1) 非标法兰设计时，密封垫片压紧力作用下中心圆直径 D_G 与螺栓孔中心圆径向距离不宜过大，过大易导致垫片的回弹量不足以补偿法兰盖或反法兰的变形量而密封失效。还会导致法兰盖的厚度过大。在采用 Waters 法进行法兰结构设计时，可考虑校核法兰盖或法兰的变形量是否能得到垫片回弹的有效补偿来验证密封设计的合理性。

(2) 法兰结构螺栓应留有充足的螺栓面积、法兰小端、大端应留一定余量以便在施加计算螺栓预紧力不能实现密封的情况下，通过增加螺栓拧紧力矩实现密封而确保强度足够。

(3) 通常，在垫片未被压坏，法兰、螺栓应力不超标的情况下，螺栓预紧力应尽可能大。因加大预紧力，使垫片的弹性和塑性变形均增大，可以更好的实现贴合密封面和抑制垫片回弹，从而实现有效密封。

(4) 根据厂家提供的垫片压缩率和回弹率对垫片实际回弹量进行计算，校核能否补偿法兰盖或反法兰的变形量对非标法兰结构设计是有必要的。

参考文献

- [1] 张斯亮, 杨宇峰, 王峰等. 法兰连接强度和密封性能的有限元分析[J]. 当代化工, 2013(10): 1468-1471
- [2] 蔡暖姝. 法兰计算方法和垫片性能参数[J]. 石油化工设备技术, 2014, 35(2): 57-61+8
- [3] 邢桂萍, 罗广辉, 郑新兵. 法兰密封泄漏的原因分析[J]. 石油化工设备技术, 2008, 29(2), 63-66+24
- [4] GB150-89, 《钢制压力容器》(三) 标准释义[S]
- [5] 桑茹苞, 高洁, 冯清晓. WATERS 法兰设计方法的进展与评述[J]. 石油化工设计技术, 2014, 35(2): 1-2+5

锅炉承压管与非承压附件异种钢焊接工艺研究

李文晖 银润邦 曾辉 曾会强 潘毅

东方电气集团东方锅炉有限公司, 四川 自贡 643001

摘要: 本试验针对锅炉过热器、再热器部件中的珠光体钢承压件与奥氏体钢非承压件焊接进行试验研究, 分别用 R317 焊条和 A307 焊条焊接珠光体钢 (12Cr1MoVG) 和铁基奥氏体不锈钢 (1Cr20Ni14Si2) 接头, 对焊接所形成的熔合区的显微组织和显微硬度进行研究分析。经研究得出, 珠光体钢承压件+铁基奥氏体不锈钢非承压件异种钢焊缝选用珠光体钢焊材更有利于保证产品运行的安全性。

关键词: 珠光体; 奥氏体; 异种钢; 熔合区; 显微组织

中图分类号: TG44; TM621.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-9006 (2022) 01-0034-05

Study on Welding Technology of Dissimilar Steel for Pressure Bearing Pipe and Non Pressure Annex of Boiler

LI Wenhui, YIN Runbang, ZENG Hui, ZENG Huiqiang, PAN Yi

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

Abstract: In this test, the welding of pearlitic steel pressure parts and austenitic steel non pressure parts in boiler superheater and reheater components was studied. The joints of pearlitic steel (12Cr1MoVG) and iron-based austenitic stainless steel (1Cr20Ni14Si2) were welded with R317 electrode and A307 electrode respectively, and the microstructure and microhardness of the fusion zone formed by welding were studied and analyzed. It is concluded that the selection of pearlitic steel welding materials for dissimilar steel welds of pearlitic steel pressure parts + iron-based austenitic stainless steel non pressure parts is more conducive to ensure the safety of product operation.

Key word: pearlitic steel; austenitic steel; dissimilar steel; fusion zone; microstructure

珠光体钢与奥氏体钢焊接在我国锅炉制造中应用比较普遍, 尤其在水冷壁包墙、低再、低过、高过、高再、屏过等部件中大量设计了 12Cr1MoVG, 15CrMoG 等珠光体钢管与 1Cr20Ni14Si2、1Cr18Ni9Ti 等奥氏体不锈钢附件的焊接。这两种钢在化学成分、金相组织、物理性能等方面存在较大差异, 焊接时有一定难度, 主要存在的问题有熔合区化学成分的稀释、碳的迁移、残余应力较大等。基于这些问题, 目前一般采用奥氏体不锈钢焊材或镍基焊材进行焊接, 而不采用接近珠光体钢成分的焊材^[1]。这样尽管提高了焊缝的塑性、增大了承受应力的能力, 但却使珠光体钢与奥氏体钢的过渡层产生在作为承压件

的珠光体钢管上, 而过渡层是比较容易出现问题的部位, 一旦过渡层出现问题, 将会影响到承压件管子, 从而造成管屏泄漏事故。那么在此类结构中能否采用低匹配的方式, 即采用珠光体焊材, 若采用该种焊材究竟会存在哪些问题, 有必要进行试验研究。

1 试验内容

1.1 试验材料

为了与生产实际相符合, 选择比较具有代表性的结构, 本试验选用 12Cr1MoVG, D51×8 的钢管, 1Cr20Ni14Si2, δ6 的滑动块、支撑块其化学成分见表 1。焊接材料的化学成分见表 2。

收稿日期: 2021-11-05

作者简介: 李文晖 (1968—), 女, 1987年毕业于四川师范大学政教系行政管理专业, 大专, 工程师。现就职东方电气集团东方锅炉股份有限公司水冷壁车间焊接制造技术员。

表 1 母材化学成分

母材母材	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Wt%
12Cr1MoVG	0.12~0.15	0.20~0.25	0.60~0.70	1.0~1.2	0.28~0.30	0.20~0.25	/	
1Cr20Ni14Si2	0.12~0.15	2.2~2.4	1.0~1.2	21.0~21.6	/	/	13.0~13.2	

表 2 焊材化学成分

焊材牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Wt%
R317	0.05-0.12	≤0.60	≤0.90	≤0.035	≤0.035	0.80~1.50	0.40~0.65	0.10~0.35			
A307	≤0.15	≤0.90	0.5~2.5	≤0.040	≤0.030	22.0~25.0	≤0.75		12.0~14.0		

1.2 试验条件

1.2.1 试样的焊制

12Cr1MoVG 的管子跟 1Cr20Ni14Si2 滑动块根据产品中的典型结构如图 1，试样共焊接四件，编号为 A、B、C、D，其中 A、B 用 R317 焊条焊接，C、D 用 A307 焊条焊接；为了进行性能比较，采用同样的焊接规范进行施焊，焊接规范见表 3。

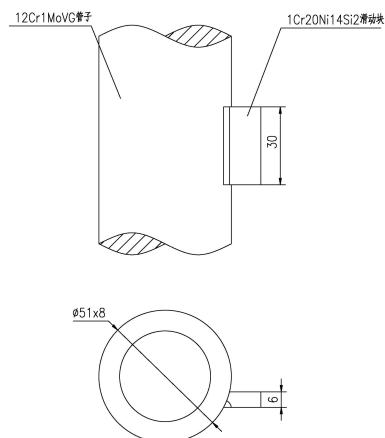


图 1 接头形式

表 3 焊接规范

试样编号	母材牌号	焊材牌号	焊接电流(A)	焊接电压(V)	焊道序数	焊接速度(mm/s)
A	12Cr1MoVG+ 1Cr20Ni14Si2	R317, φ3.2	120~125	22	第一道	2.4~2.6
					第二道	1.6~2.1
B	12Cr1MoVG+ 1Cr20Ni14Si2	R317, φ3.2	120~125	22	第一道	2.4~2.6
					第二道	1.6~2.1
C	12Cr1MoVG+ 1Cr20Ni14Si2	A307, φ3.2	90~100	22	第一道	2.4~2.6
					第二道	1.6~2.1
D	12Cr1MoVG+ 1Cr20Ni14Si2	A307, φ3.2	90~100	22	第一道	2.4~2.6
					第二道	1.6~2.1

1.2.2 焊后热处理

因为类似结构的部件在生产中一般都需要热处理，为了与实际生产相一致，同时为了考察异种钢焊缝在热处理时碳迁移的因素，试验过程中对试样在焊后进行热处理，热处理规范见图 2。

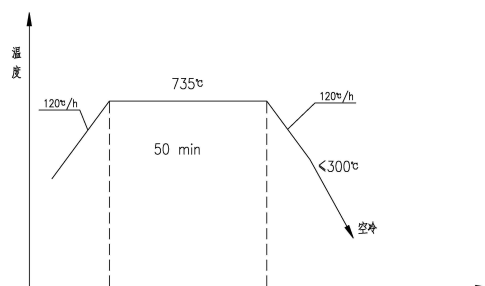


图 2 热处理规范

2 试验结果

2.1 金相组织

2.1.1 熔合区管子侧的组织

试样 A、B、C、D 的管子与焊缝熔合线附近管子热影响区的组织见图 3~图 6。可见，采用 R317 焊条焊接和采用 A307 焊条焊接后熔合区管材的组织相同，均为贝氏体。

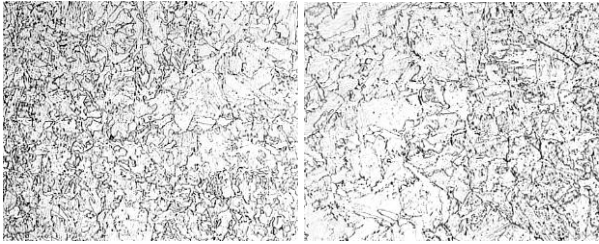


图 3 试样 A

图 4 试样 B

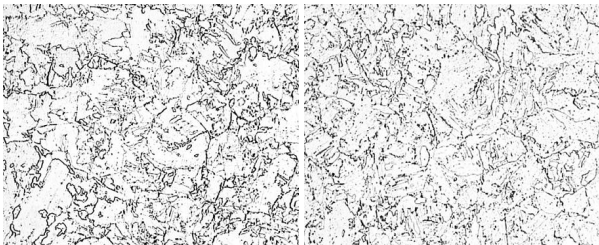


图 5 试样 C

图 6 试样 D

2.1.2 管子与焊缝熔合区的组织

试样 A、B、C、D 的管子跟焊缝的熔合区组织见图 7~图 10。可见靠近熔合线的管子组织均为贝氏体，A、B 未出现马氏体带，C、D 在熔合线处出现了马氏体带（图中的黑色带），A、B 的焊缝为贝氏体加少量铁素体，C、D 的焊缝为奥氏体加少量铁素体和碳化物。

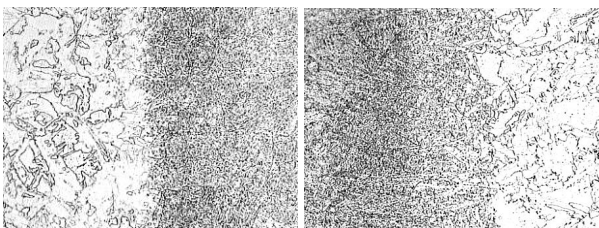


图 7 试样 A

图 8 试样 B



图 9 试样 C

图 10 试样 D

2.1.3 焊缝与滑动块融合区的组织

试样 A、B、C、D 的焊缝跟滑动块融合区的组织见图 11~图 15。可见，滑动块或支撑块组织均为奥氏体加少量碳化物，A、B 焊缝组织为贝氏体加少量铁素体，C、D 的焊缝组织为奥氏体加少量碳化物，A、B 在焊缝跟滑动块或支撑块熔合线处出现了马氏体带，而 C、D 未产生马氏体带。

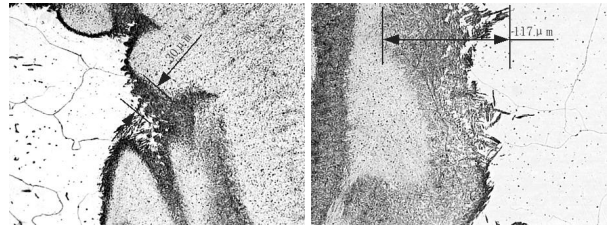


图 11 试样 A

图 12 试样 B

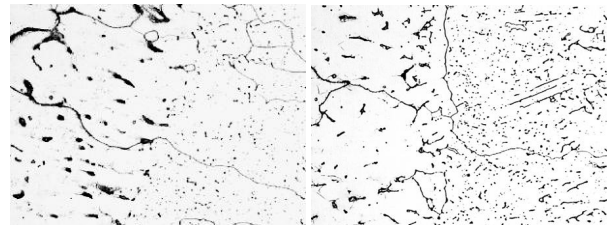


图 13 试样 C

图 14 试样 D

2.1.4 马氏体带的比较

A、B 试样中焊缝跟滑动块熔合线的组织见图 11、图 12，C、D 试样中管材跟焊缝熔合线组织见图 9，图 10。由金相可见，珠光体钢跟奥氏体材料的熔合线处都产生了马氏体带。A、C 的过渡层宽度相差不大，A 的最大宽度为 30 μm，C 的最大宽度为 38 μm。B 的马氏体带最大宽度较大，为 117 μm，D 的马氏体带宽度较小，只有 20 μm。同时，由图可见 B 的马氏体带分布的较松散且不够连续，A、C、D 的相对比较紧密且连续。

2.2 过渡层硬度值

硬度值测试位置示意图见图 15~图 16，a 点在马氏体带上，b 点在近马氏体带的焊缝上，c 点在近马氏体带的母材上。A、B 的按图 15、C、D 按图 16。过渡区硬度值见表 4。

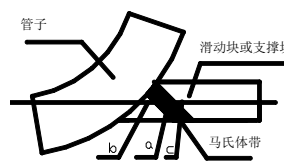


图 15 试样(A、B)测点

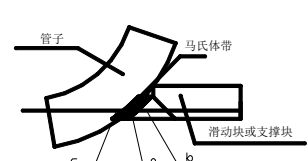


图 16 试样(C、D)测点

表 4 过渡区显微硬度值

试样号	12Cr1MoVG 侧 (近马氏体带区域) HV(0.2/10S)即 c 点	马氏体带 即 a 点	焊缝侧 (近马氏体带区域) HV(0.2/10S)即 b 点	1Cr20Ni14Si2 侧 (近马氏体带区域) 即 c 点
A	/	350~360	260~290	260~290
B	/	325~335	260~290	260~290
C	240~280	350~380	260~290	/
D	240~280	350~380	260~290	/

由表 4 可见, A、B 的马氏体带硬度略低于 C、D, 同一试样的马氏体带的硬度值远高于母材侧热影响区和焊缝侧热影响区。

3 讨论与分析

3.1 成分的稀释

3.1.1 珠光钢管跟奥氏体焊缝过渡层形成

由 A307 化学成分根据 Schaeffler 曲线知, 其熔敷金属组织应为奥氏体+少量铁素体。而焊缝跟管子交界位置由于焊接时熔池在该位置的温度较低、流动性差, 存在不完全混合区, 不完全混合区与半熔化区组成“熔合区”, 由于这种成分上的过渡变化区是熔池凝固特性造成的, 又称为过渡层或凝固过渡层。越靠近半熔化区的不完全混合区, 母材所占的比列越大^[2]。因此在该区域的 Cr、Ni 含量较焊缝中心低, 当 Cr、Ni 含量低到一定值时, 由 Schaeffler 曲线知, 会出现马氏体带, 试验结果也是如此, 图 9、图 10 中奥氏体焊缝跟珠光体管子熔合区位置均出现了马氏体带。

3.1.2 珠光体焊缝跟滑动块的熔合区中滑动块成分的稀释

与 3.1.1 同样的原理, 在焊缝与滑动块交界处, 由于滑动块成分的稀释, 形成熔合区, Cr、Ni 含量降低, 从而出现了马氏体带, 见图 11~12。

3.2 碳迁移

在试验结果中发现, 试样 A、B 中焊缝跟滑动块熔合线处以及试样 C、D 中管子跟焊缝熔合线处都出现了马氏体带, 而且, 马氏体带的硬度值

远高于相邻热影响区的硬度值, 这除了与 3.1 中所介绍的成分稀释形成马氏体组织有关外, 还与碳的迁移有关。资料^[3]介绍, 当母材的碳含量高于焊缝时, 在焊接或热处理时, 碳将从热影响区向熔合区扩散(迁移), 这就会在熔合区边界产生一个很窄的硬度很高的马氏体区。产生碳的迁移是因为作为间隙原子的碳的扩散性要比其他溶质元素大, 而且碳在 α -Fe 中的活度比在 γ -Fe 中的活度大得多, 活度越大越容易扩散, 另外碳在 γ -Fe 中的溶解度大于 α -Fe 中的溶解度, 因此出现了珠光体一侧的碳往奥氏体一侧迁移得现象。

化学成分是影响碳迁移的一个重要因素, 因为一般来说碳化物形成元素(Cr、Mo、V、Ti、Nb)都降低碳的活度系数, 非碳化物形成元素(Si、Al、Ni)增大碳的活度系数。此外, 在碳迁移的影响因素中, 热处理温度和时间也是一个重要因素, 研究^[4-5]表明异种钢接头中的碳迁移随着热处理时间的增加而增加, 随着热处理温度的升高而增加。试验中, 12Cr1MoVG、R317、1Cr20Ni14Si2、A307 化学成分见表 1、表 2, 从表 1、表 2 可见管子 12Cr1MoVG 的成分跟焊条 R317 的成分相近, R317 熔敷金属的组织跟管子热影响区的组织也同属 α 相; 1Cr20Ni14Si2 的滑动块的成分与焊条 A307 的成分接近, A307 熔敷金属跟滑动块热影响区的组织都为 γ 相。此外, A、B、C、D 试样的热处理温度和时间均相同, 因此热处理产生的作用是相同的。根据化学成分、组织及热处理对碳迁移的影响, 可以推断 A、B 焊缝中的碳向滑动块迁移的程度跟 C、D 管子中的碳向焊缝迁

移的程度差不多。那么，A，B的过渡层的硬度应该跟C，D的相近，但实际测试结果发现，B的硬度相对略低，经分析产生此种差异与焊接时的操作有关，从B的照片可见，其熔合区的边界很不规则且不连续，而且熔合区宽度也较大，这是由于焊接时摆动引起熔合比变化所致。

3.3 接头残余应力

由于两种钢的线膨胀系数相差很大，且奥氏体钢的导热性差，在焊后冷却时因收缩量的差异而导致这类接头产生较大的残余应力。研究^[1]得出，在垂直于焊缝的中央截面上，纵向残余应力和横向残余应力在异种钢熔合区最大。异种钢接头中的焊接残余应力，即使通过焊后热处理也难以消除^[2]。在A、B中管子跟焊缝的线膨胀系数相近，焊缝跟滑动块的线膨胀系数相差较大，因此焊接残余应力集中在附件滑动块与焊缝交界处，相同的道理，C、D的残余应力集中在管子跟焊缝交界处。而应力集中的位置相对其他位置容易出现裂纹等缺陷，从保护受压件不受影响来看，选用R317更合理。

3.4 12Cr1MoVG的管子+1Cr20Ni14Si2的滑动块采用焊条R317跟A307焊接的比较

从结果可知，12Cr1MoVG的管子与1Cr20Ni14Si2的滑动块采用焊条R317焊接，其过渡层在附件滑动块一侧，残余应力也集中在附件一侧；而采用A307，过渡层在受压件管子一侧，残余应力也集中在受压件一侧。从硬度值来看除了B稍低外，A,C,D的都相差不大，从马氏体带宽度看，除了B外A,C,D的都相近。因此不论采用R317还是A307，过渡层的宽度跟硬度都相近，而此位置又容易造成破坏，那么在相同条件下过渡层产生破坏的可能性相近，只是A、B在附件一侧，即使出现问题，返修时只对附件进行处理，易于返修，其损失较小；C、D在受压件一侧，缺陷有可能扩展到管子上，一旦受压件出现问题，就容易出现爆管事故，需要通过换管方式进行返

修，难度很高，返修成本大。因此，从安全性、返修的简易性和制造成本方面考虑采用R317焊接12Cr1MoVG管子与1Cr20Ni14Si2的滑动块更为合理。

当然，采用R317焊条，与A307相比也有其不足之处，首先R317的塑性变形能力没有A307强，故承受应力的能力相对要差一些。其次，因R317的焊缝组织为贝氏体，溶氢能力比A307(焊缝组织为奥氏体)差，因此抗冷裂纹能力没A307好，因此在使用R317时，当拘束度较大时，应考虑采用预热等措施来防止冷裂纹的产生。

4 结语

(1) 珠光体钢跟奥氏体不锈钢焊接，不论采用珠光体材质的焊材还是选用奥氏体材质的焊材都会产生过渡层，其过渡层的宽度相近，硬度也相近。采用珠光体焊材时，过渡层产生在不锈钢一侧，采用奥氏体材质的焊材时，过渡层产生在珠光体钢一侧。

(2) 从过渡层位置、残余应力分布特点分析，珠光体钢承压件管子跟奥氏体不锈钢附件焊接时选用珠光体焊材更有利于保证产品运行的安全性。

参考文献:

- [1] 孙咸.珠光体钢与奥氏体钢异种钢焊接材料的选择与应用[J].机械制造文摘(焊接分册), 2013(4):17-22
- [2] 李亚江主编.焊接冶金学:材料焊接性[M].北京:机械工业出版社, 2006
- [3] John C.Lippold, Damian J. Kotecki. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 陈剑虹译. 北京:机械工业出版社, 2008
- [4] 李滨, 张亚奇, 李春光. 热处理制度对异种钢接头的影响[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2011(6):10-13
- [5] 辛伟, 张艳, 魏礼运. Q345R和S30408异种钢焊接接头组织与性能分析[J]. 电焊机, 2016(11):131-134
- [6] 黄本生, 陈权, 杨江等. Q345/316L异种钢焊接残余应力与变形数值模拟[J]. 焊接学报, 2019(2):138-144

基于主机状态监测的智慧电厂数据计算系统 在新型百万燃煤机组的应用

曹子飞¹ 邢路平¹ 刘征宇²

1.华电莱州发电有限公司, 山东 莱州 261400; 2.东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要: 本文以建设现代能源电力系统, 实现安全、高效、绿色、低碳的智慧电厂为核心目标, 以“智慧电池”建设思路为主线, 按照“整体设计、统筹考虑, 服务导向、业务驱动, 系统构建、突出重点”的总体原则, 以提升数据资源对电厂设备运行状况和故障诊断的支撑能力为落脚点, 实现跨层级、跨系统、跨业务的数据分析, 支撑协同管理和综合服务, 最终实现数据资源平台化、交换共享高可用、综合应用协同化、开放服务一站式, 发挥智慧电厂大数据对电力设备的整体支撑效能。本文着重介绍该系统的总体架构及部分应用案例。

关键词: 智慧电厂; 数据分析与应用; 发电设备管理

中图分类号: TM621; TP311.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 01-0039-04

Application of Smart Power Plant Data-computing System Based on the Host of Condition Monitoring in New Million Coal-fired Units

CAO Zifei¹, XING Luping¹, LIU Zhengyu²

(1.Huadian Laizhou Power Company Co., Ltd., 261400, Laizhou, China

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

Abstract: In order to comprehensively improve the reliability of unit equipment operation and the safety production management level of power plant, the comprehensive monitoring equipment, the professional operation and maintenance personnel, the integrity of data and information, and the standardization of power plant management are comprehensively considered, Huadian Laizhou has put into operation a smart power plant data computing platform for remote monitoring and diagnosis of some new million coal-fired units. This paper mainly introduces the overall architecture and some application cases of the system.

Key words: power plant unit; smart power plant; remote monitoring; diagnostic analysis

本文以建设现代能源电力系统, 实现安全、高效、绿色、低碳的智慧电厂为核心目标, 以“智慧电池”建设思路为主线, 按照“整体设计、统筹考虑, 服务导向、业务驱动, 系统构建、突出重点”的总体原则, 以提升数据资源对电厂主机设备运行状况和故障诊断的支撑能力为落脚点, 实现跨层级、跨系统、跨业务的数据分析, 支撑协同管理和综合服务, 最终实现数据资源平台化、交换共享高可用、综合

应用协同化、开放服务一站式, 发挥智慧电厂大数据对电力设备的整体支撑效能。

1 系统总体结构

根据先进性、高可靠性、可扩展性、开放兼容、安全性等原则。底层采用超融合基础架构, 在通用的 x86 服务器硬件上无缝集成计算虚拟化、网络虚拟化、存储虚拟化、虚拟化安全、运维监控管理、云计算业务流程交付等软件技术, 利用高速网络聚

收稿日期: 2021-08-18

作者简介: 曹子飞 (1991—), 男, 2012年毕业于上海电力学院热能与动力工程专业, 本科, 助理工程师。现在华电莱州发电有限公司生产技术部任热控专工。

合多套超融合设备，实现资源模块化的横向弹性伸缩，形成统一的计算与存储资源池。在超融合平台构建虚拟机承载数据管理系统、数据库、应用管理系统等应用。

数据管理系统从数据获取，数据分层存储、数据分析以及数据归档整个全生命周期角度，对异构数据提供统一的体系化管理，形成行之有效的数据管理解决方案；应用管理系统构建于容器应用之上，通过容器管理平台承载数据门户，微服务及相关业务，以保证应用高可用、负载均衡和弹性伸缩等；数据库采用主备架构，主要存储分析结果性数据、部分结构性数据。

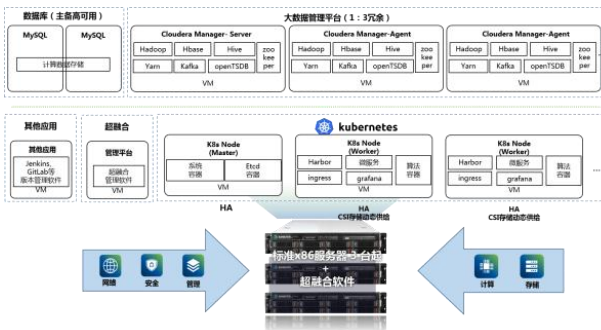


图1 系统总体架构

系统主要包含数据分析系统、应用管理系统和展示门户系统3部分：

(1) 数据分析系统。基于电厂提供的数据接口，进行实时数据采集，根据电厂对设备长期运行的工况^[1]、故障等方面的电力设备要素等动态数据信息的可视化、直观化展示和预警，形成全面覆盖、动态感知、自动预警的电力设备运行数据分析系统。系统主要包括4个系统建设，分别为：数据采集、数据处理、数据交换共享、算法模型计算。

(2) 应用管理系统。应用管理系统用于自动化部署、扩展和管理容器应用，提供资源调度、部署管理、服务发现、扩容缩容、监控等一整套功能。是基于容器平台搭建高可用环境，并协助进行应用的容器化，实现应用容器的高可用。同时，有效的将单个操作系统的资源划分到孤立的组中，以便更好的在孤立的组之间平衡有冲突的资源使用需求，为数据分析系统的业务提供高性能可伸缩的展现。

(3) 展示门户系统。展示门户系统采用前后端分离开发模式，与后端通过专有数据库进行数据

交互。由应用管理系统为展示门户系统提供所需数据。展示门户系统采用诸如 UmiJs+AntDesign 作为技术栈构建前端应用，后期可结合三维模型扩展三维展示功能。

1.1 数据分析系统

智慧电厂数据系统主要对电厂数据资源采集、汇聚、整合、清洗，形成电厂的数据计算与服务中心，并对数据进行管理、监控、质量管控，支撑数据对内对外的交换共享服务与计算服务^[2]。数据系统主要包括4个功能模块建设，分别为数据采集功能、数据处理功能、数据交换共享功能、算法模型计算功能。

1.1.1 数据采集

数据采集服务主要功能为调用电厂提供的 Kafka 数据接口服务获取数据，对数据进行解析处理，对数据进行预处理操作，完成一系列工作后将处理后的数据存放到数据库或缓存中，由数据处理服务获取数据进行业务逻辑处理。

系统调用电厂数据过程中，电厂提供的数据接口服务仅支持调用，需要调用方主动消费数据接口服务。根据电厂提供的接口协议，服务研发接口适配器适配，配置文件可进行相关配置。根据电厂对数据需求，调用服务提供实时数据接口调用或历史数据接口调用。

1.1.2 数据处理

数据处理服务主要功能是对采集到的数据进行相应的逻辑处理（数据清洗，数据转换，数据统计等），输出中间数据、处理结果数据到数据库或缓存中，由数据订阅服务调用该部分数据，供数据交换模块、计算模块等调用。主要完成：数据同步、数据纠错、重复数据过滤、数据规格统一、数据存储、数据目录管理。

1.1.3 数据交换共享

数据交互共享服务主要功能为数据库或缓存中数据，将数据发布到共享接口，支持数据共享接口消费。消费数据时，需要消费对方进行权限鉴定，确保数据的安全性。

1.1.4 算法模型计算

算法模型计算服务主要功能是对电厂发布的8个计算模型进行接口测试封装调用、功能验证、性能测试、稳定性测试。并把模型计算结果用于页面

展示与历史归档。

1.2 应用管理系统

系统用于自动化部署、扩展和管理容器应用，提供资源调度、部署管理、服务发现、扩容缩容、监控等一整套功能。

(1) 支持多开发语言，多运行环境。不局限于任何一种语言，没有限定任何编程接口，不论是 Java、Go、C++ 还是用 Python 编写的服务，都可以被映射为服务，并通过标准的 TCP 通信协议进行交互。

(2) 微服务架构。微服务架构的核心是将一个巨大的单体应用分解为很多小的互相连接的微服务，一个微服务可能由多个实例副本支撑，副本的数量可以随着系统的负荷变化进行调整。微服务架构使得每个服务都可以独立开发、升级和扩展，因此系统具备很高的稳定性和快速迭代能力，开发者也可以自由选择开发技术^[3]。

(3) 服务弹性扩容机制。在服务高峰期时，可使用命令、UI 或者基于 CPU 使用情况自动快速扩容或缩容应用程序实例，保证应用业务高峰并发时的高可用性；业务低峰时回收资源，以最小成本运行服务。

(4) 超强的横向扩容能力。不用修改代码，就能将一个集群从只包含几个 Node 的小集群平滑扩展到拥有上百个 Node 的大集群，甚至可以在线完成集群扩容。

(5) 支持迁移到公有云平台。支持将业务无缝迁移到主流的公有云平台，同时无须改变运行期的配置文件，架构与底层的硬件拓扑无关。

(6) 解决环境不一致性。消除了线上线下的环境差异，保证了应用生命周期的环境一致性和标准化。屏蔽开发环境、测试环境以及生产环境不一致性为项目周期带来的影响。

(7) 持续集成，减少项目周期。自动化集成部署，提高集成效率，更快地修复问题，更快地进行交付，提高项目质量；周期性自动化项目测试流程，包括构建、部署、测试、发布等工作，减小人工干预^[5-6]。

(8) 滚动升级。为了服务升级过程中提供可持续的不中断的服务。支持查看升级的历史信息。在升级失败的情况下，支持及时回滚。

1.3 展示门户系统

展示门户系统采用前后端分离开发模式。传统的 web 开发模式中，前后端代码耦合在一起，造成了代码的可读性以及可扩展性不高，给后期项目的维护和扩展增加了难度。而前后端分离开发模式的推出，使得后端只需要负责业务逻辑，前端只需要关注页面渲染，实现了代码的高度解耦，增强了代码的可维护性和可复用性，缩短了项目开发周期，为项目后期的维护和升级也提供了良好的环境。

前后端分离模式也有利于分布式集群部署，多台服务器共同承担并发访问流量，避免单点崩溃导致的系统崩溃，增强系统稳定性，提升用户的使用体验。

2 应用实例

2.1 数据流转逻辑

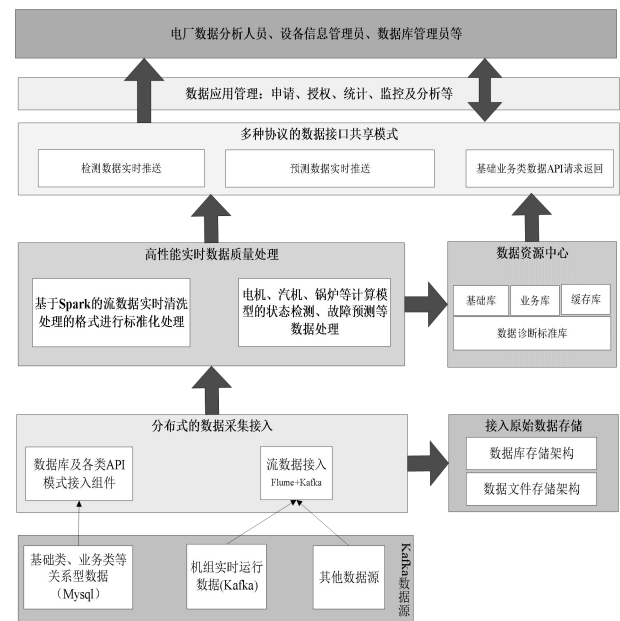


图 2 数据流图

数据的接入、处理、存储及数据应用具体包括：

(1) 接入数据源：对接入数据源从接入种类进行了分析，主要可以归纳为 3 类数据，基础类和业务类（例：Mysql）、实时类（例：Kafka）^[4]、其他等的的数据源；

(2) 分布式数据采集接入：数据采集接入是通过分布式的数据接入组件进行实时定时等模式的采集，对应不同源数据的类型采用不同的组件，对于关系型数据类型采用数据库及 API 接口进行接

入,对于机组实时运行数据进行数据消费等模式接入。数据接入后采用多个线程进行并行处理,一路直接实时推送到数据质量处理中心,一路进行原始数据存储,进入原始存储的数据就作为后期数据溯源及容灾进行保留。

(3) 高性能数据质量处理:数据到达处理中心后,同样是分为两路进程进行数据处理,一路是对于实时性要求比较高的状态检测等数据,进行简单清洗后直接向上推送至 Web 页面展示,同时进行数据存储;另外一路是基于实时性要求相对弱的数据按规则进行相关的故障预测、计算分析等数据处理与存储。

(4) 多协议的数据接口共享:针对已经被授权的数据应用方,对实时数据会通过流数据的模式直接推送到数据应用方,其他数据存入数据中心后,可通过 API 接口数据实时查询请求及定时推送等模式实现和数据应用端的共享开放。

2.2 算法调度及数据交互

2.2.1 调度流程

(1) 获取电厂 Kafka 数据源存储至本地数据中转站。

(2) 算法模型调度中心把数据整理后传输至各个模型。

(3) 模型获取所有计算参数 (Redis 配置数据交互)。

(4) 通过分析、预测获取结果。

(5) 调度中心获取结果并进行状态检测 (超时/失效)。

(6) 数据结果存储至 MongoDB 供 Web 页面查询展示。

2.2.2 主要内容

(1) 模型状态检测

为了保障模型的正常运行稳定性,分别使用远程请求检测与本地状态检测来保障能够长期稳定的运行,状态检测方式分为两类:

远程请求检测

通过请求超时与超时次数判断某模型处于异常状态,调度模型发送异常码至数据库,模型本地状态检测脚本,通过时间轮询方式判断是否终止该模型进程,在一分钟后重新恢复该模型进程。例如:单次请求超时时间 6s,超时次数 5 次,若数据传输请

求。

本地状态检测

通过本地 Shell 脚本定时一分钟检测计算模型进程是否存在,若不存在,进行启动操作,若存在,记录时间。

(2) 模型请求方式

模型请求方式统一使用 HTTP 网络协议进行数据传输。

(3) 输入\输出格式

请求数据格式统一使用 json 数据交换格式。

(4) 型配参调用方式

由于模型在运行过程中,可能涉及参数的调整,为保障客户的实时查看参数结果详情,各个模型参数的数据交换与 Web 页面通过 Redis 实时交互。

(5) 数据存储

模型在运算完成之后的结果数据,存储至 MongoDB 数据库 (现状)。

(6) 数据查询

Web 页面查询通过 MongoDB、Hbase、Kylin 等进行数据可视化。

2.2.3 数据格式

由于目前计算模型的研发有不同人员完成,为了更好的调配这些模型,抽象出一个统一的数据格式,用于模型研发的所需的数据传输 (表 1)。

表 1 数据传输格式表

属性名称	属性解释
modelName	模型名称
owner	归属者
collectionTime	原始时间
setcode	机组编码
dataInfo	测点信息 (模型接受数据)
calcResult	计算结果 (模型返回数据)
additionalInfo	附加信息

3 结语

本系统利用工业互联网、大数据、云计算、人工智能、5G/VR/AR 等技术,实现主机及重要辅机设备智能化,实现系统运行优化。运用大数据分析训练故障预警模型和运行优化模型,结合机理模型使

(下转第 55 页)

石灰石物相组分在湿法烟气脱硫中的化学行为和反应机理研究

吕丽丹¹ 杨志忠^{1,2}

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

摘要: 本文对石灰石中物相组分在湿法烟气脱硫中的化学行为和反应机理进行研究, 在石灰石-石膏湿法烟气脱硫体系中, 除石灰石主要成分 CaCO_3 外, 石灰石中杂质-固溶体 MgCO_3 也会参与反应。研究 CaCO_3 和 MgCO_3 与烟气中 SO_2 、 SO_3 及 HCl 、 HF 等酸性组分的反应行为, 分析反应发生的优先顺序, 对湿法烟气脱硫物料衡算、脱硫系统设计具有指导意义。

关键词: 石灰石; 湿法烟气脱硫; CaCO_3 ; MgCO_3 ; 反应机理

中图分类号: X773

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 01-0043-03

Chemical Behavior and Reaction Mechanism of Limestone Composition in Wet-FGD

LV Lidan¹, YANG Zhizhong^{1,2}

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

2. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: The chemical behavior and reaction mechanism of compositions in limestone in wet flue gas desulfurization (WFGD) are studied. In limestone-gypsum WFGD system, in addition to the main component of limestone CaCO_3 , the soluble MgCO_3 in limestone also participates in the reaction. This paper studies the reaction behavior of CaCO_3 and MgCO_3 in WFGD in the presence of SO_2 , SO_3 , HCl and HF in flue gas, and analyzes the priority of reaction, which has guiding significance for calculation of material balance and system design in WFGD.

Key words: limestone; wet FGD; CaCO_3 ; MgCO_3 ; reaction mechanism

石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术具有可靠性高、脱硫效率高、工艺过程简单、成本低等特点^[1], 因此在燃煤电厂和钢厂等大容量烟气脱硫领域得到广泛应用。石灰石是湿法烟气脱硫工艺中广泛采用的吸收剂, 但不同国家和地区的石灰石品质参差不齐。我国电力行业标准 DL/T 5196-2016《火力发电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统设计规程》对烟气脱硫用石灰石品质进行了规定, 要求碳酸钙宜 $\geq 90\%$ 、碳酸镁不宜超过 3% , 但实际工程中往往会遇到石灰石品质不能满足要求的情况, 考虑吸收剂

的获得、运输成本等因素, 仍然可能采用低品质石灰石作为吸收剂。当石灰石中杂质含量较高时, 对脱硫系统设计和物料平衡都将产生影响, 有必要研究石灰石中物相组分在湿法烟气脱硫中的化学行为和反应机理, 进而指导脱硫系统设计。

1 石灰石中杂质的组成

石灰石的主要成分为 CaCO_3 , 其所含杂质主要有 MgCO_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等^[2], 由于其中 MgCO_3 含量相对较大, 因此对脱硫系统设计和物料

收稿日期: 2021-07-07

作者简介: 吕丽丹(1987-), 女, 2013年毕业于北京化工大学化学工程与技术专业, 工学硕士, 工程师。主要从事烟气净化技术研发与设计。

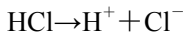
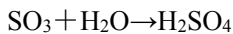
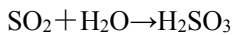
杨志忠(1969-), 男, 正高级工程师, 主要从事烟气净化技术研发与设计。

平衡会产生影响。石灰石中的 $MgCO_3$ 一部分以固溶体 $MgCO_3$ 的形式存在, 该部分 $MgCO_3$ 将参与化学反应; 另一部分则以白云石 ($CaMg(CO_3)_2$) 的形式存在, 该部分 $MgCO_3$ 由于难以在脱硫系统中溶解, 因此几乎不参与脱硫体系的化学反应。

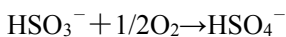
目前对湿法烟气脱硫的反应机理研究主要围绕烟气中 SO_2 与石灰石主要成分 $CaCO_3$ 的反应^[3], 对反应体系中 $MgCO_3$ 的反应研究较少, 且烟气中除 SO_2 外, HCl 、 HF 等酸性组分也会参与与 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 的反应。

2 烟气中 HCl 、 HF 、 SO_2 的反应优先顺序

在湿法烟气脱硫中, 吸收液通过喷嘴雾化分散成细小的液滴进入吸收塔, 这些液滴与塔内烟气逆流接触, 发生传质与吸收反应, 烟气中的 SO_2 、 SO_3 及 HCl 、 HF 等被吸收进入液相:



其中一部分 HSO_3^- 在吸收塔喷淋区被烟气中的氧所氧化, 剩余 HSO_3^- 在吸收塔浆池中被氧化空气完全氧化, 氧化反应如下:



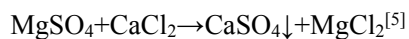
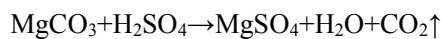
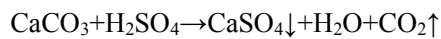
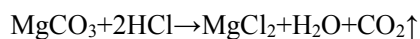
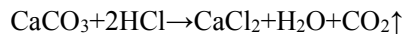
综合以上反应, 在物料衡算中, 烟气中的 HCl 、 HF 、 SO_2 、 SO_3 最终转化成为液相中的 HCl ($H^+ + Cl^-$)、 HF ($H^+ + F^-$)、 H_2SO_4 ($H^+ + SO_4^{2-}$) 参与反应。由于液相中各酸性组分发生化学反应的优先顺序影响湿法烟气脱硫的物料衡算, 因此有必要对液相中 HF 、 HCl 、 H_2SO_4 的反应优先顺序进行分析。

表 1 HCl 、 HF 、 H_2SO_4 的电离平衡常数^[4]

序号	名称	电离平衡常数 K_a
1	HCl	完全电离
2	HF	3.53×10^{-4}
3	H_2SO_4	1.0×10^3 (K_{a1})
		1.2×10^{-2} (K_{a2})

根据电离平衡常数比较, 表 1 物质酸性强弱为: $HCl > H_2SO_4 > HF$ 。从酸性强弱来看 HCl 比 HF 的酸性更强, 但由于 HF 与 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 反应生成的产物 CaF_2 和 MgF_2 为沉淀, 复分解反应的趋势是使离子在溶液中的浓度降低, 因此反应会优先向生成沉淀的方向进行, 即在有 HCl 和 HF 同时存在时, 由于 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 与 HF 反应的反应产物为沉淀, 因此优先发生 HF 与 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 的反应。虽然溶液中有 SO_2 、 SO_3 转化生成的 SO_4^{2-} , 其与 $CaCO_3$ 反应生成的最终产物 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 也为沉淀, 但与 CaF_2 相比, CaF_2 更难溶, 即有 H_2SO_4 和 HF 同时存在时, 优先发生 HF 与 $CaCO_3$ 的反应。

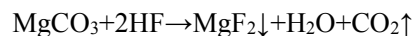
由于石灰石—石膏湿法烟气脱硫体系中 HF 的量较少, $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 为过量, 与 HF 反应剩余的 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 将继续与 HCl 和 H_2SO_4 反应, 从酸性强弱角度分析, HCl 优先与 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 反应, 但由于 $CaSO_4$ 为沉淀, 因此反应会继续向降低离子浓度的方向进行, 即会向生成 $CaSO_4$ 的方向进行:



综合以上分析, 在湿法烟气脱硫反应体系中产物出现的优先顺序为 CaF_2 、 $MgF_2 \rightarrow CaSO_4 \rightarrow CaCl_2$ 、 $MgCl_2 \rightarrow MgSO_4$ 。可以认为烟气中 HCl 、 HF 、 SO_2 与 $CaCO_3$ 反应的优先顺序为: $HF \rightarrow SO_2 \rightarrow HCl$; 烟气中 HCl 、 HF 、 SO_2 与 $MgCO_3$ 反应的优先顺序为: $HF \rightarrow HCl \rightarrow SO_2$ 。

3 HF 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 反应

由于 HF 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 反应生成的产物为沉淀, 且溶度积均较小, 因此在石灰石—石膏湿法烟气脱硫反应体系中会优先发生 HF 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的反应:



对于具体的物料衡算还需进一步分析 HF 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 反应的难易程度。

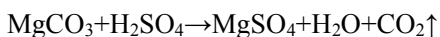
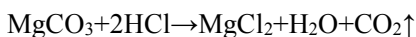
表 2 CaCO₃、MgCO₃、CaF₂、MgF₂ 的溶解平衡常数

序号	名称	溶解度(g/100mL H ₂ O) ^[6]	溶解平衡常数 K _{sp}
1	CaCO ₃	0.001 3	8.8×10 ⁻¹²
2	MgCO ₃	0.01	6.7×10 ⁻⁹
3	CaF ₂	0.001 5	2.8×10 ⁻¹¹
4	MgF ₂	0.013	3.6×10 ⁻⁸

查《兰氏化学手册》，根据 CaCO₃、MgCO₃、CaF₂、MgF₂ 的溶解度计算得到对应的溶度积见表 2，可以看出，虽然反应物 MgCO₃ 比 CaCO₃ 的溶解度高，MgCO₃ 更容易解离出 CO₃²⁻与 H⁺反应，但对应的反应产物 CaF₂ 的溶度积比 MgF₂ 的溶度积更小，更难溶，因此反应会不断向生成 CaF₂ 的方向发生。综合以上分析，HF 与 Ca²⁺、Mg²⁺ 的反应以 HF 与 Ca²⁺ 的反应为主。

4 Mg 元素化合物在湿法烟气脱硫中的反应行为

石灰石中除含有 CaCO₃ 外还含有一定量的 MgCO₃，且 MgCO₃ 一部分以固溶体 MgCO₃ 的形式存在，另一部分以白云石 (CaMg (CO₃)₂) 物相形式存在。当 Mg 以固溶体 MgCO₃ 的形式存在时，其反应行为如下：



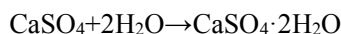
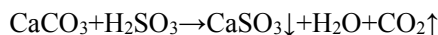
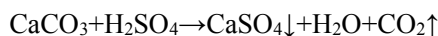
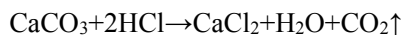
在有 HCl 和 HF 同时存在的条件下，MgCO₃ 优先与 HF 反应生成 MgF₂ 沉淀^[7]。通常来源于烟气中的 HF 量较少，MgCO₃ 为过量，过量的 MgCO₃ 与 HF 反应后继续与 HCl 反应生成 MgCl₂，如体系中仍有 MgCO₃ 剩余，则进一步与 H₂SO₄ 反应生成 MgSO₄。从以上反应也可以看出，当石灰石中固溶体 MgCO₃ 含量较高时，体系中 Cl⁻和 SO₄²⁻含量也会较高，而 Cl⁻和 SO₄²⁻含量会影响废水排放量^[2]，影响物料平衡计算。

当 Mg 以 CaMg (CO₃)₂ 的物相形式存在时，由于其不参与反应，最终绝大部分以 CaMg(CO₃)₂ 的形式进入石膏，少部分进入废水外排。

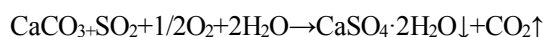
5 Ca 元素化合物在湿法烟气脱硫中的反应行为

湿法烟气脱硫石灰石中主要成分 CaCO₃ 在石

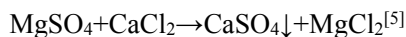
灰石—石膏湿法烟气脱硫体系中的反应行为如下：



烟气中 SO₂ 与 CaCO₃ 反应生成的最终产物为石膏 (CaSO₄·2H₂O)，可以看作发生以下总反应：



由于在湿法烟气脱硫体系中投入的石灰石有一定的过量系数，因此在该反应体系中脱硫剂石灰石为过量，以上反应均会发生。如石灰石中固溶体 MgCO₃ 含量较高，则反应体系中会生成 MgSO₄，此时 MgSO₄ 会进一步与 CaCl₂ 发生复分解反应：



由以上反应可知，在湿法烟气脱硫反应体系中 MgSO₄ 和 CaCl₂ 不会同时存在，当溶液中有 MgSO₄ 和 CaCl₂ 时，两者会进一步反应生成 CaSO₄ 沉淀，最终反应生成石膏。

综合以上分析，石灰石—石膏湿法烟气脱硫体系液相中可溶性组分由石灰石中固溶体 MgCO₃ 含量确定。当石灰石品质较低，固溶体 MgCO₃ 含量较高时，反应生成足量的 MgSO₄，CaCl₂ 完全与 MgSO₄ 反应，最终溶液成分中有 MgSO₄、MgCl₂，而无 CaCl₂；当石灰石中固溶体 MgCO₃ 含量较低时，无 MgSO₄ 生成或仅有少量 MgSO₄ 生成，此时溶液中的 CaCl₂ 不会完全消耗生成 CaSO₄，即溶液成分中有 CaCl₂、MgCl₂，而无 MgSO₄。

6 结语

(1) 在石灰石—石膏湿法烟气脱硫体系中除石灰石主要成分 CaCO₃ 外，石灰石中固溶体 MgCO₃ 也会参与反应。

(2) 在脱硫系统设计中可以认为烟气中 HCl、HF、SO₂ 与 CaCO₃ 反应的优先顺序为：HF→SO₂→HCl；烟气中 HCl、HF、SO₂ 与 MgCO₃ 反应的优先顺序为：HF→HCl→SO₂。

(3) 由于 HF 与 CaCO₃ 和 MgCO₃ 反应生成的产物 CaF₂ 和 MgF₂ 难溶，因此在石灰石—石膏湿法

(下转第 65 页)

浅谈海上风力发电机组长周期运输和储存的防腐

刘贵林

东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 海上风力发电机组一般会经历长时间的海上运输和储存, 海上气象多变、湿度大、盐雾重, 机组内的金属及电气零部件面临很大的腐蚀风险, 所以对于机组在运输和储存过程中的防护就显得比较重要。本文对风电机组在运输和储存过程中的防护措施提出了一些经验性建议以供业内参考。

关键词: 风力发电机组; 运输; 储存; 防腐

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 01-0046-04

Discussion on Corrosion Protection for Long-term Transport and Storage of Offshore Wind Turbines

LIU Guilin

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

Abstract: Offshore wind turbines generally experience a long period of maritime transportation and storage, the marine weather is changeable, humidity is large, salt spray is heavy, and the metal and electrical components in the unit face a great risk of corrosion, so it is more important for the protection of the unit in the transportation and storage process. This paper puts forward some empirical suggestions for the protection measures in the transportation and storage of wind turbines for reference in the industry.

Key words: wind turbines; transport; storage; corrosion protect

海上的气象多变、高盐雾、长日照、相对湿度 $\geq 90\%$, 使海上风力发电机组面临严峻的腐蚀考验, 腐蚀与防护问题已成为海上风电遇到的技术难题之一, 如何进行防腐蚀设计是重中之重。而首先面对防腐考验的是风电机组在海上长周期的运输和储存, 这个过程可能长达3~6月甚至更久, 如果机组的防护不到位, 机组也同样面临很大的腐蚀风险。

一直以来大家都比较关注重点技术, 却常常对运输和储存过程没有引起足够的重视, 简单的认为海上机组只要能防雨不进水就可以, 而实际上海上机组的包装和防护不仅要防雨防沙尘, 更重要的是防潮和防盐雾。

1 高湿度和盐雾对机组的影响

当相对湿度大于80%时称为高湿, 湿度对电气设备的影响主要是绝缘强度、金属腐蚀、霉菌生长。高湿度会降低电气设备绝缘强度, 空气中的水分附着在绝缘材料的表面, 使电气设备的绝缘电阻降低; 高湿度会腐蚀电气设备中的导电金属、导磁硅钢片, 将严重降低设备的性能和使用寿命; 潮湿的空气还有利于霉菌孢子发芽生长, 尤其在25~35℃的环境条件中繁殖生长迅速, 其分泌的弱酸会使电路板的金属细线被腐蚀断, 损坏电路功能。特别是电子仪器的印刷电路板, 如果长期处在这样环境中会腐蚀电路, 将降低仪器精度, 或造成设备故障。

收稿日期: 2021-12-28

作者简介: 刘贵林(1983-), 男, 2007年毕业于吉林工程技术师范学院机械设计制造及其自动化专业, 本科学历, 高级工程师。现在东方电气风电股份有限公司主要从事推动数字化工具、智能装备的应用及构建数字化车间。

另外，沿海地区空气中含有大量随海水蒸发的盐分，其溶于潮湿的空气小水滴中形成了浓度很高的盐雾。盐雾中高浓度的NaCl分解为Na⁺离子和活跃的Cl⁻离子与分子式很活跃的铁、铝、铜等金属材料发生化学反应生成强酸性的金属盐，其中的金属离子与氧气接触后又还原生成较稳定的金属氧化物。常见的腐蚀有以下几种：电化学反应导致的腐蚀、盐沉积物导致电气设备损坏、产生导电的覆盖层、绝缘材料和金属的腐蚀、机械部件活动部分阻塞或卡死、因电解作用而导致涂层起泡等^[1]。

举例说明：福清兴化湾二期项目5 MW机组的塔筒外部平台及入门爬梯，对于金属构件表面涂层处理不到位的、普通不锈钢、焊缝油漆脱落的、镀锌紧固件等，在现场安装期间就开始有浮锈，一个月后大面积生锈，半年后锈蚀严重，两年后开始腐烂，腐蚀后的金属构件承载力大大降低。另，塔筒外部平台吊车，在机组安装期间几天内链条及齿面就开始有生锈，半个月后大面积生锈，三个月后外置接线箱开始生锈，有部分接头开始腐蚀。一年后，接头处腐蚀明显有氧化膨胀、收缩现象，铜-铜接头腐蚀比较轻，铝-铝接头腐蚀严重，铜-铝接头处有明显的白色锈斑。

2 运输和储存过程中的防护措施

海上风电机组为方便现场吊装，运输方式一般分为两种，一般为机舱+发电机+轮毂整体发运；另一种为机舱+发电机整体发运、轮毂单独发运。对机组的各部件防腐除机组本身合理的密封结构设计外，还有就是最直接有效的包装密封防腐。

2.1 密封设计和工艺措施增强防腐

海上风电机组为应对高湿度和盐雾的腐蚀，在实际应用中整个机组内部包括塔筒、机舱、发电机、轮毂都是一个相对封闭的空间，在塔筒和机舱内一般也设置有除湿机和盐雾过滤器，即使机组与外界有冷热交换散热，也是通过密封管路或经过过滤器，确保机组内的低湿度和低盐雾。而一般轮毂和发电机、机舱和发电机、机舱和塔筒是相对转动的，大量冷空气还是会通过机舱与塔

筒、机舱与发电机之间的缝隙进入机舱内，形成对流循环，即使有盐雾过滤器，还是需要合理的设计结构来进行防护。

海上风电机组的发电机结构多为外转子，与轮毂之间是相对固定的，轮毂罩壳和发电机外壳之间可以直接涂抹密封胶进行密封。机舱和发电机、机舱和塔筒之间应有比较可靠的柔性密封结构（见图1和图2）。同样，机组的运输支架也可设计成塔筒一样尺寸的筒状密封结构，可以减少空气进入。

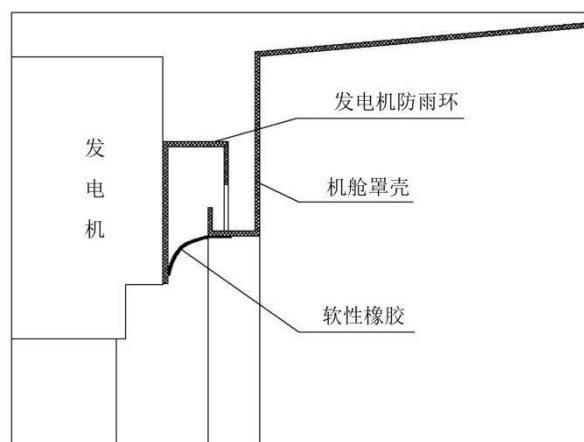


图1 发电机与机舱密封结构示意图

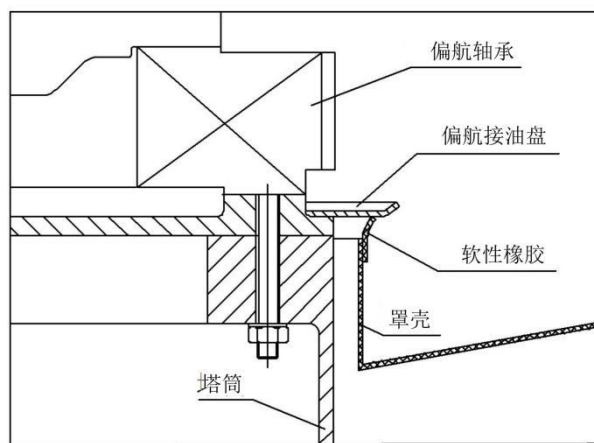


图2 机舱与塔筒密封结构示意图

对于一些无法做防腐的表面，比如螺纹孔，需要先涂抹防锈油再进行严实封堵；对于螺栓需要涂抹冷喷锌；对于电气元件可使用缓蚀剂和钝化剂抑制盐雾腐蚀；对于电气设备的电线穿孔处可采用嵌橡皮圈、涂抹防火泥等隔离措施。

2.2 包装密封防腐

2.2.1 电气零部件及齿面的防护

对于电气零部件及齿面的防护，包括机舱控制柜、机舱配电柜、液压站、振动传感器、润滑泵、偏航电机、变桨电机、变桨控制柜、冷却风机、按钮、开关、电气插接头及其它电气元件等。首先，在电气柜内喷涂一些防潮防盐雾绝缘保护剂，一般保护效果可达6~12个月；第二，放置干燥剂，能放置干燥剂的必须要放置；第三，用热缩塑料或防水塑料布将整个柜体或部件进行包装密封，尽可能的将其密封完整。第四，对于偏航轴承齿面、变桨轴承齿面、减速器齿轮面等需涂抹润滑油脂，并用铝膜进行包覆。

2.2.2 单轮毂的防护

首先，需要将轮毂本体进行密封，轮毂底部、顶部、三个变桨轴承孔及通风口等都需要设计盖板进行密封，实际应用中大多采用木板，这将影响密封效果，推荐选用轻质树脂，密封性好，还可重复利用。

其次，需要将整个轮毂罩壳进行包装密封。由于轮毂罩壳的三个叶片孔直径较大，外包装布容易塌陷，直接覆盖防雨布当遇到大风会产生强烈的鼓动，再结实的包装布都会很容易被撕裂，所以必须要在叶片孔口处先固定一块内板，然后再套上防雨布，最后还需要在防雨布上覆盖网兜绳索，使防雨布贴紧轮毂罩壳表面，并将其固定牢靠。

为方便人员进出，需在三个叶片安装孔的任选一面预留可开闭的进出口，为方便转运外包装还应在轮毂顶部吊装处开孔，并制做搭接包装布，确保密封性良好。

2.2.3 机舱+发电机+轮毂的防护

首先，机舱、发电机和轮毂在车间总装配时，确保各接口处均安装到位、密封严实。发电机外壳与轮毂罩壳之间因相对固定需打上密封胶，发电机与机舱、机舱与运输支架之间密封结构良好，罩壳各接缝处均要打上密封胶。很多人认为罩壳本身就有防水结构，只要机组不进水就可以了，打不打密封胶无所谓，这是极其不正确的观点，

海上腐蚀是非常严峻的，必须要尽可能的确保机组的密封性。

其次，对机组必须进行整体包装，包括底部。海上风电机组在机舱罩壳上方一般都设置有直升机平台和气象架，对于这些部件需在车间试装没有问题后拆除发货，只有这样才能确保密封良好。而实际上绝大多数的主机厂家并没有这样做，认为这样会增加现场吊装时间，但也可以通过优化直升机平台结构来达到节省安装时间的目的。

机组的外包装防雨布应缝制成整体，与机组外形匹配，在轴线方向上还需要间隔2~3m固定束紧带，上下部分及进口接缝必须搭接牢实，密封性好，最后在防雨布上覆盖网兜绳索，使防雨布贴紧机组表面，并将其固定牢靠，增强防雨布对大风的抵抗能力。

现在海上机组的运输支架都采用架空式结构，液压车可直接开到支架底部，顶升后就可以开走，不再需要大型吊车，为节省现场安装吊具时间，还需要在发货前将与机组连接部分的吊具先安装到位。

2.2.4 塔筒的防护

海上风电机组为节约现场吊装时间，塔筒一般会在塔筒厂内将所有电气柜、电缆都安装到位后再发货，所以对电气零部件的防护也同样需要，基本的防护方法与2.2.1节相同。另外，竖直运输的塔筒顶部需要盖上防雨罩，其它平放运输的塔筒两端也要覆盖防雨布，尽可能的将塔筒段密封。

2.2.5 中小件的防护

每台机组的中小件是非常多的，装箱和防护也同样重要，对于木箱内所有的部件都必须用薄膜或铝薄做好防水，电气零部件还需要先进行单独包装密封，然后再装箱。

为了节省现场吊装船主吊的占用时间，可定制运输集装箱。各种木箱的尺寸需要先做好规划，然后根据现场使用先后顺序放置在订制的集装箱内，集装箱需要顶部和侧面均能打开，以方便履带吊和叉车进行作业。而通常采用木制托盘结构，防雨、承载性和重复利用性均不好，故不推荐。

2.2.6 包装布的选择

海上运输包装要求防水性好、防紫外线、抗撕裂，市场上常见的包装布有 PE 布、PVC 布、PVC 涂层的牛津布和刀刮布等几种，防雨和抗撕裂性都比较强，但 PE 布和 PVC 布抗老化较差，一般只能防护 2~3 月，适用于海上运输周期和恶劣条件的只有带 PVC 涂层的牛津布和刀刮布两种。

带 PVC 涂层的牛津布优点是成本低、高强度、耐气候变化性以及优良的几何稳定性，常用于背包、拉杆箱、工具包、车棚、家居等。缺点是对接需要采用针线缝制，然后再抹胶粘接覆盖针眼孔以防止渗水。刀刮布其特点是抗撕裂性好、表面平整、高强度、优良的产品稳定性及表面自洁性、抗老化、耐寒性好，接缝可能采用热压无缝拼接，密封性好，缺点是成本稍高。

考虑到包装对整个机组的密封性要高，也经过很多项目使用经验总结推荐刀刮布。

3 储存过程防护措施

国内各风电项目中普遍存在主机厂家只要把风电机组运送到现场或交给业主后就不再管理，而在吊装以前如果时间较长，机组又缺少必要的维护，必将对机组产生不良的影响，这些影响基本上都会在 5 年质保期内爆发出来，直接给主机厂家造成不良的影响和经济损失。以下是几个主

要的防护措施：（1）每个月定期检查各电气柜体内的干燥剂是否失效，更换失效的干燥剂，并重新密封柜体；（2）每个月定期对发电机盘车 180°，发电机存储时间超过六个月的需更换注脂泵和轴承腔室的油脂；（3）每个月定期开启机组内的除湿机和盐雾过滤器，有效降低机组内部的湿度和盐雾；（4）每个月定期对控制柜、配电柜、偏航柜等进行通电加热；（5）每 3 个月定期对偏航变桨轴承齿面及减速器齿面进行检查,并重新涂抹油脂；（6）对于一些其它无涂层的金属表面，每 3 个月定期打开包装进行检查，并重新涂抹防锈油脂。

4 结语

对海上风电机组长时间海上运输和储存过程的防护说起来很简单，但是却被很多主机厂家忽视或认为不重要，细节决定成败，绝对不能向内陆机组那样对待。高湿度和高盐雾对机组内的金属及电气零部件腐蚀非常大，会直接影响机组投运后的可靠性，各主机厂家应该认真对待。

参考文献

- [1] 陈琳, 唐忠达. 盐雾过电气设施的危害及防治措施 [J]. 工程技术, 2015, (11):231

(上接转第 25 页)

试验件	传热系数 K^*
A1	716.5 W/(m ² ·K)
A2	737.0 W/(m ² ·K)
B1	670.7 W/(m ² ·K)
B2	679.4 W/(m ² ·K)

(8)

根据 NB/T 47007-2010 的要求，在管内介质为 110℃ 的饱和水蒸汽，空气入口温度为室温，最窄

截面质量风速为 6 kg/m²·s 的条件下，翅片管（基管 D 25×2.5 mm，材料：碳钢，翅片间距：2.3 mm，翅片：铝）的传热系数应不小于 650 W/m²·K。

试验件 A1、A2、B1、B2 传热系数在换算为碳钢管基管的情况下，其传热系数分别为 716.5 W/(m²·K)、737.0 W/(m²·K)、670.7 W/(m²·K)、679.4 W/(m²·K)，大于标准要求的传热系数应不小于 650 W/m²·K。因此设计的空气冷却器，其选用的不锈钢轧制式翅片管传热系数满足标准要求，具有良好的传热性能，能够保证空气冷却器的换热要求。

锯齿尾缘对风电机组气动性能的影响

曾明伍¹ 杨俊伟² 孙振业² 吴鑫波¹

1. 东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 扬州大学, 江苏 扬州 225127

摘要: 随着我国风电场建设由三北地区向西南山区、沿海等地区转移, 同时风力机的风轮直径已经突破 200 米, 风力机的噪声问题越来越严重。锯齿尾缘是目前最常用的风电叶片被动降噪附件, 但也导致风电机组气动性能和载荷发生变化。在扬州大学低速风洞开展了翼型升力、阻力、表面压力分布等风洞试验研究, 验证了不同锯齿尾缘对翼型气动性能的影响。采用大型风力发电机组设计与分析软件 BLADED 进行仿真模拟, 探讨了锯齿尾缘对风电机组气动性能的影响, 评估了锯齿对叶根稳态载荷的影响。结果表明, 锯齿尾缘会提高风电机组气动性能, 也会增大叶根稳态载荷。

关键词: 风电机组; 锯齿尾缘; 风洞试验; 气动性能

中图分类号: TM315; TK83 文献标识码: A 文章编号: 1001-9006 (2022) 01-0050-06

The Influence of Trailing Edge Serrations on Aerodynamic Performance of Wind Turbine

ZENG Mingwu¹, YANG Junwei², SUN Zhenye², WU Xinbo¹

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

2. Yangzhou University, 225127, Yangzhou, Jiangsu, China)

Abstract: With the transfer of wind farm from northwest, northeast, and north of china area to southwest mountainous area and coastal area in China, and the diameter of wind turbine exceedsd 200 meters, the noise problem of wind turbine is more and more serious. Trailing edge serration is the most commonly used passive noise reduction accessory of wind turbine blades, but it also leads to changes in the aerodynamic performance and load of wind turbine. Wind tunnel tests of lift, drag and surface pressure distribution of airfoil were carried out in Yangzhou University low-speed wind tunnel to verify the influence of different trailing edge serrations on the aerodynamic performance of airfoil. Using large-scale wind turbine design and analysis software BLADED, and the influence of trailing edge serrations on the aerodynamic performance of wind turbine is discussed, and evaluates the influence of serration on the steady-state load of the blade root. The results show that the trailing edge serrations can improve the aerodynamic performance of the wind turbine, but increase the steady-state load of the blade root.

Keywords: wind turbine; trailing edge serrations; wind tunnel testing; aerodynamic performance

在我国风电产业发展初期, 风电场主要位于三北地区的广袤草原和戈壁滩上, 这些地区地广人稀, 噪声问题并未显现。随着我国风电场建设由三北地区向西南山区、沿海等地区转移, 特别是分散式风电逐步兴起, 风电机组装机地点距离人口密集地区越来越近, 居民区和机位穿插的情况十分普遍, 由于风电机组噪声引起的矛盾越来

越凸显, 降低风电机组噪声刻不容缓。为了降低风力机叶片气动噪声, 可采用主动控制和被动控制技术, 目前最常用的是在叶片尾缘加装锯齿的被动控制方法, 可以有效降低叶片气动噪声 2~2.5 分贝。

国内外大部分研究学者重点关注锯齿尾缘的降噪机理研究, 针对锯齿尾缘对风电机组气动

收稿日期: 2021-03-03

基金项目: 德阳市科技计划项目资助 (2020CKC002)

作者简介: 曾明伍 (1983-), 男, 2006年毕业于西安交通大学飞行器制造工程专业, 学士, 高级工程师。现在东方电气风电有限公司从事风力机叶片设计与分析工作。

性能和载荷的影响研究较少,大部分学者仅针对二维翼型开展数值研究。张学迅等采用 CFD 方法数值模拟 NACA63418 翼型段加装锯齿前后的气动性能,工作攻角范围内加装锯齿的翼型综合气动性能优于原翼型^[1]。杨景茹等基于 NACA0018 翼型,采用大涡模拟的方法研究锯齿相对齿宽和齿高对叶片气动特性和非定常绕流流场的影响规律,发现锯齿在一定来流攻角范围内能提高升阻比^[2]。贺艳文等使用 Fluent 软件对三角形锯齿尾缘叶片进行了数值仿真模拟研究^[3],黄乾基于 NACA0018 翼型数值模拟了锯齿尾缘翼型的流场情况^[4],武威对基准叶片与三种锯齿尾缘叶片平面叶栅进行了定常数值模拟,发现三角形锯齿尾缘可以改善叶片表面及尾迹区气体流动形态,降低损失的同时减轻了尾迹对下游叶片的负面影响^[5]。许雅苹以 DU97-W-300 翼型为研究对象,采用 CFD 方法研究了翼型加装尾缘锯齿后的静态失速和全攻角动态失速情况,发现尾缘锯齿能一定程度推迟流动分离,提高翼型气动性能^[6]。由于数值计算方法是近似求解,复杂流动模型准确度仍有待提升,因此风洞试验就显得十分必要,目前国内专门研究锯齿尾缘翼型气动性能的风洞试验开展不多。

为了验证不同锯齿尾缘对二维翼型气动性能的影响,在扬州大学低速风洞开展了翼型升力、阻力、表面压力分布等风洞试验,采用湍流格栅测试高湍流度条件下选定翼型的气动性能,对加装不同尾缘锯齿的翼型进行气动力测试,研究锯齿附件对翼型气动性能的影响。同时针对某 MW 级风电机组,采用大型风力发电机组设计与分析软件 BLADED 进行仿真模拟,探讨锯齿尾缘对风电机组气动性能和稳态载荷的影响规律。

1 风洞试验

1.1 模型

翼型的风洞试验主要是将翼型按相似理论缩放后置于试验段中模拟翼型表面的流动,目前气动力测量方法主要包括直接测量法和间接测量法。通常风洞试验中所产生的湍流可分为均匀湍流和模拟大气边界层湍流,在风洞中可以通过加装被动格栅、振动格栅来产生湍流,边界层湍流的形

成可以借助于在风洞入口处布置曲网、风障、旋涡发生器和粗糙元组合起来形成边界层湍流结构,也可以通过喷射气流、多风扇法来控制产生湍流。

试验选用的翼型段相对厚度 21%,模型弦长 600 mm,展向长 1.5 m。模型采用上、中、下三段,全部是铝合金整体车削加工,中间转轴贯穿三段模型,并将翼型模型固定于试验段转盘上,如图 1 所示。本文所涉及锯齿的参数由齿高 h 、齿宽 λ 、直板长度 W 三个参数定义,锯齿尾缘相邻两个锯齿之间距离记为 λ ,锯齿波峰到波谷的距离记作 $2h$,称为锯齿尾缘幅值,用于安装的直板部分长度记为 W 。图 2 表示锯齿尾缘安装示意图, U 为风洞来流方向。



图 1 风洞试验模型图

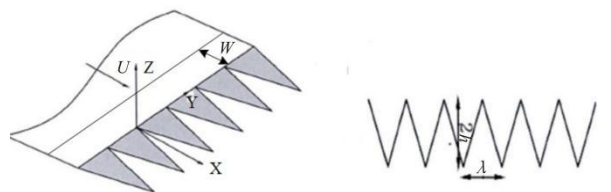


图 2 锯齿尾缘安装示意

锯齿的降噪和增功效果与锯齿的形状参数有关,比如齿高 h 和齿宽 λ ,如果采用这两个参数进行实验方案设计,会大大增加实验任务量。因此本试验采用行业通用的参数锯齿宽/高比 λ/h 进行实验方案设计, λ/h 过小锯齿越细长,结构强度降低,不满足工程应用, λ/h 过大会降低锯齿的降噪效果^[7]。本次试验共设计了四种试验模型,见图 3,包括两种锯齿尾缘翼型、一种无齿直板以及原始翼型,三种锯齿试验模型均保证翼型平均弦长一致。两种锯齿模型方案的 λ/h 取值分别为 5/6 和 1/2,处于行业通用的范围内,见表 1,两种方案的齿高 h 相等,但齿宽 λ 不同。

表1 风洞试验模型参数

方案	齿数	2h (mm)	λ (mm)	λ/h	w(mm)
1	3	90	75	5/6	20
2	5	90	45	1/2	20
3	无齿板	0	0	-	20

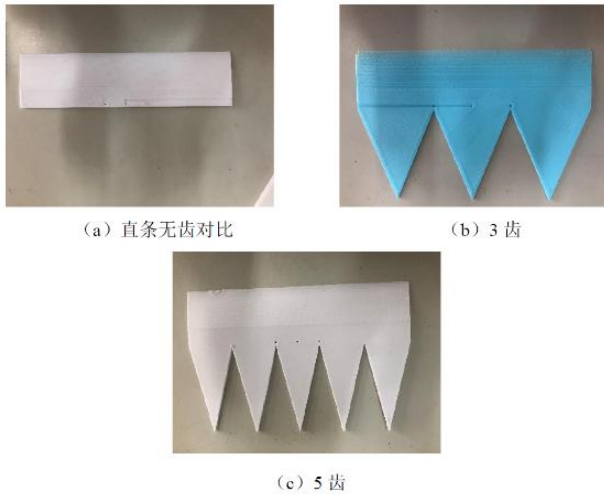


图3 三种锯齿实物图

1.2 试验方法

风洞试验在扬州大学低速风洞中进行，分两部分进行，一部分是翼型低湍流强度工况试验，即在试验段中仅装有翼型模型，没有扰流装置；另一部分是翼型高湍流强度工况试验，即在试验段进口处安装典型格栅，用来进行翼型在湍流场中的气动特性试验。试验所用压力采集系统是由美国进口的PSI电子压力采集系统，共四个压力模块，每个模块有64个通道，可以同时采集256个测点的压力数据，适合于翼型、建筑物等物体表面风压同步测量。本文试验使用四个压力模块同时测量翼型表面压力和尾迹排管压力，采样频率为333.3 Hz，采样数据个数为15 000个。

尾迹排管用于测量翼型尾迹区的流场分布，如图4。尾迹排管安装于距翼型后缘0.7倍弦长处，与翼型表面测压孔平齐，共有102根外径为1.2 mm的总压管，4根外径为2 mm的静压管。试验模型间截面位置上布置测压孔，用于测量翼型表面的压力分布，翼型上下表面一共布置77个测压孔，具体位置如图5所示。



图4 尾迹排管

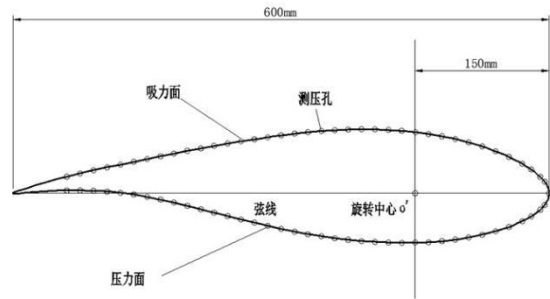


图5 压力测控布置示意图

在风洞中制造湍流场的方法主要有主动调节方法和被动调节方法。主动调节法是指通过对风洞中的气流进行可控的主动干扰方法，如喷射法、振动格栅法、多风扇法等。被动调节法指人为的在风洞中加装一些装置对气流阻塞，使气流中的部分动能转化为湍流的脉动能量，目前常用的被动调节装置有格栅、尖劈、粗糙元等，其中格栅主要被用来产生均匀湍流，而尖劈配合粗糙元主要用来模拟大气边界层，本次试验采用格栅装置来产生，试验用格栅采用3 cm×3 cm的铝合金型材组装。

1.3 试验结果分析

针对加装尾缘锯齿前后的翼型，试验模拟了高、低湍流工况下翼型升阻力系数的差异。首先在雷诺数(Re)为 8.0×10^5 低湍流工况下测试四种模型的气动特性，结果如图6所示。从图6(a)中可以看出，翼型尾部加入不同类型的锯齿后均有较好的失速特性，与原始翼型比较，失速前最大升力系数均有小幅度增加，三齿和五齿情况提升最多，失速后升力系数基本不变。从图6(b)中可以看出，翼型尾部加入不同类型的锯齿后阻力系数在 $-5^\circ \sim 10^\circ$ 范围内变化平缓，和原有翼型比

较失速前区域阻力系数基本重合。加入锯齿尾缘后，失速攻角略有提前，在失速后阻力系数较原始翼型均快速增大，三齿和五齿尾缘阻力系数变化最为剧烈，直板无齿模型次之。从图 6 (c) 中可以看出，翼型尾部加入不同类型的锯齿尾缘后力矩系数在失速点前均有不同程度的提升，之后随攻角变化而减小，失速点后力矩系数较原有翼型均有小幅度减少。从图 6 (d) 中可以看出，翼型尾部加入锯齿尾缘后升阻比在失速前区域均有不同程度的提升，在失速后呈下降趋势。在负攻角区域，三种尾缘锯齿对应的升阻比几乎重合，而在 $0^\circ\sim 10^\circ$ 攻角范围内，三齿尾缘对应升阻比略大于其他两种模型。三种锯齿模型的最大升阻比和原始翼型基本相等，但对应的攻角前移。

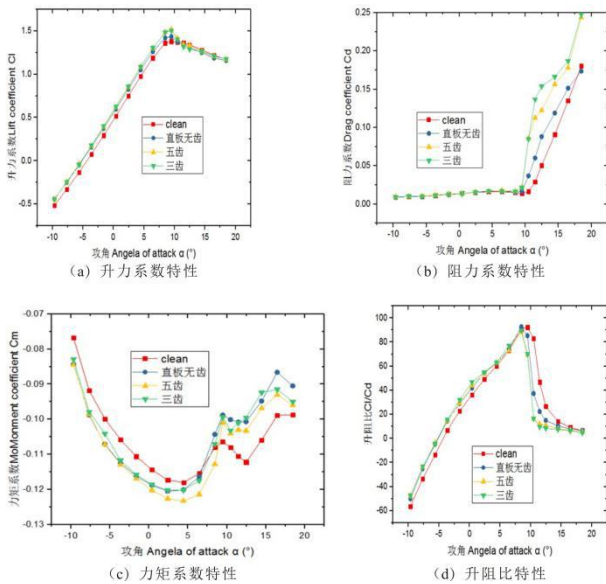


图 6 $Re=8\times 10^5$ 及低湍流度工况四种模型气动特性对比

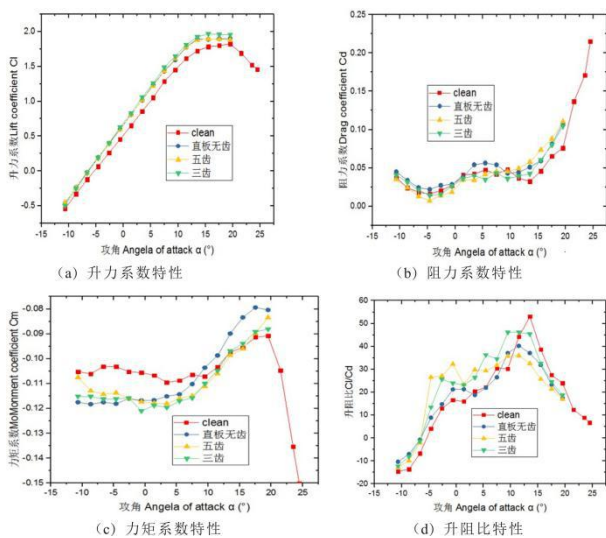


图 7 $Re=8\times 10^5$ 及湍流度 0.19 工况四种模型气动特性对比

在 $Re=8.0\times 10^5$ 、湍流强度为 0.19 时测试四种模型的气动特性，结果如图 7 所示。从图 7 (a) 中可以看出翼型尾部加入不同类型的锯齿后，失速攻角均为 15° 左右，与原始翼型比较，失速前升力系数有明显增加，且三齿和五齿情况提升最多。从图 7 (b) 中可以看出，与原始翼型比较，加入不同锯齿尾缘后阻力系数在 $-5^\circ\sim 15^\circ$ 范围内上下波动起伏变化，失速攻角略有提前，失速后三种模型的阻力系数均快速增大，变化较为剧烈，三齿和五齿尾缘阻力系数变化最为剧烈，直板无齿模型次之。从图 7 (c) 中可以看出，加入锯齿尾缘后力矩系数在失速前均有不同程度的提升，失速后力矩系数较原有翼型比较均有小幅度的减少。从图 7 (d) 中可以看出，加入锯齿尾缘后升阻比在失速前均有不同程度的提升，在 -5° 至 0° 攻角范围内，五齿与三齿尾缘升阻比有一个峰值，加入锯齿尾缘后三种模型最大升阻比约在攻角 12.5° 位置，并随着失速后呈下降趋势。三种模型最大升阻比和原始翼型比较均有不同程度的下降，且对应的攻角出现前移，三齿尾缘对应升阻比大于其他两种模型。

2 锯齿尾缘对气动性能及载荷的影响

文中选取某 2.5 MW 和 7 MW 风电机组作为参考模型，利用 BLADED 软件仿真风电机组气动性能及叶根稳态载荷，锯齿尾缘位于叶片尖部区域，安装区域占叶片长度的 40%，主要影响 25%、21%、18% 三种相对厚度的翼型。首先根据翼型风洞试验数据，推算出加装尾缘锯齿后翼型气动性能修正系数，本文选用三齿尾缘作为研究对象，分别对 2.5 MW 和 7 MW 风电机组采用的 25%、21%、18% 原始翼型气动特性进行修正。将修正后翼型参数输入 BLADED 软件，研究锯齿对机组轴功率系数 C_p 、年发电量以及叶根稳态载荷的影响。

用于风力机叶片气动分析的理论包括贝兹理论、动量理论、叶素理论、动量-叶素理论等^[8-10]，其中动量-叶素理论给出了诱导因子的求解方法，采用普朗特、Wilson、Glauert 等修正模型，是目前最成熟的叶片设计理论基础。BLADED 软件基于动量-叶素理论，是进行风力机气动分析以及风电行业工程应用最广泛的一款商业软件。

2.1 锯齿尾缘对轴功率系数 C_p 的影响

分别计算某 2.5 MW 和 7 MW 风电机组带锯齿尾缘前后的轴功率系数 C_p , 结果见表 2 和图 8。结果表明, 叶片加装尾缘锯齿以后, 轴功率系数均有不同程度提高, 某 2.5 MW 机组增大 3% 左右, 某 7 MW 机组增大 1.2% 左右。

表 2 轴功率系数 C_p 对比

	某 2.5MW 机组	某 2.5 MW 机组带锯齿	某 7 MW 机组	某 7 MW 机组带锯齿
最佳桨距角	0	0.5	0	0.2
最佳 C_p	0.481	0.495	0.485	0.491

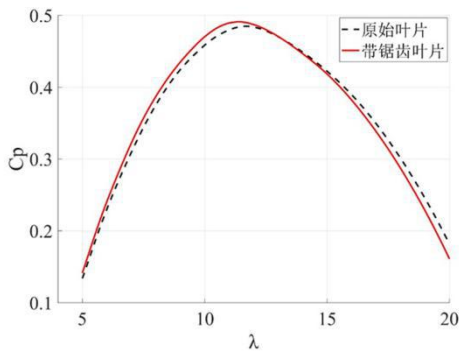


图 8 某 7 MW 机组 C_p - λ 曲线对比

2.2 锯齿尾缘对年发电量的影响

分别计算某 2.5 MW 和 7 MW 风电机组带锯齿尾缘前后的静态功率曲线, 据此计算单台机组年发电量, 结果见表 3、表 4, 风速为轮毂中心高度处风速, 年平均空气密度取 1.225 kg/m^3 , 切入风速取 3 m/s , 切出风速取 25 m/s , 折减系数取 75%, 威布尔因子 k 取 2。结果表明, 叶片加装尾缘锯齿后, 某 2.5 MW 机组年发电量增大 0.5%~2.5%, 平均增大 1.5% 左右, 某 7 MW 机组年发电量增大 0.5%~1.5%, 平均增大 1% 左右。

表 3 年发电量对比 (某 2.5 MW 机组)

风速 [m/s]	原发电量 [MWh/a]	带锯齿发电量 [MWh/a]	带锯齿/无锯齿 [-]
3	1 072	1 099	102.5%
4	2 634	2 693	102.2%
5	4 574	4 654	101.8%
6	6 477	6 564	101.4%
7	8 132	8 218	101.1%
8	9 490	9 570	100.8%
9	10 561	10 633	100.7%
10	11 360	11 427	100.6%

表 4 年发电量对比 (某 7 MW 机组)

风速 [m/s]	原发电量 [MWh/a]	带锯齿发电量 [MWh/a]	带锯齿/无锯齿 [-]
3	2 133	2 165	101.5%
4	5 449	5 524	101.4%
5	10 000	10 126	101.3%
6	14 907	15 068	101.1%
7	19 490	19 666	100.9%
8	23 451	23 626	100.8%
9	26 698	26 866	100.6%
10	29 218	29 373	100.5%

2.3 锯齿对叶根稳态载荷的影响

分别计算某 2.5 MW 和 7 MW 风电机组叶根稳态载荷, 取叶根 0 截面位置, 结果见表 5、表 6。年平均空气密度取 1.225 kg/m^3 , 风速范围取 $3\sim 25 \text{ m/s}$ 。结果表明, 叶片加装尾缘锯齿后, 叶根稳态载荷均有不同程度增加, 某 2.5 MW 机组摆振负方向载荷 $M_{x-\min}$ 增大 2.8%, 某 7 MW 机组弯曲合成载荷 $M_{xy-\max}$ 增大 3%。因此进行叶片锯齿尾缘降噪方案设计时, 必须评估叶片载荷的变化情况, 确保风场叶片安全运行。

表 5 叶根稳态载荷对比 (某 2.5 MW 机组)

载荷分量	-	无锯齿	带锯齿	带锯齿/无锯齿
$M_x-\max$ [kNm]	—	—	—	—
$M_x-\min$ [kNm]	—	-596	-613	102.80%
$M_y-\max$ [kNm]	—	5 368	5 384	100.30%
$M_{xy}-\max$ [kNm]	—	6 613	6 659	100.70%
$M_z-\max$ [kNm]	—	21	21.3	101.50%

表 6 叶根稳态载荷对比 (某 7 MW 机组)

载荷分量	-	无锯齿	带锯齿	带锯齿/无锯齿
$M_x-\max$ [kNm]	—	—	—	—
$M_x-\min$ [kNm]	—	-596	-613	102.80%
$M_y-\max$ [kNm]	—	5 368	5 384	100.30%
$M_{xy}-\max$ [kNm]	—	6 613	6 659	100.70%
$M_z-\max$ [kNm]	—	21	21.3	101.50%

3 结语

本文开展了翼型升力、阻力、压力分布等风洞试验, 研究不同湍流度下锯齿附件对翼型气动性能的影响, 采用 BLADED 软件模拟锯齿尾缘对风电机组气动性能和稳态载荷的影响, 得出以

下结论:

(1) 基于选定翼型, 在 $Re=8.0 \times 10^5$ 低湍流工况下, 翼型尾部加入不同类型的锯齿后, 失速前最大升力系数均有小幅增加, 三齿和五齿情况提升最多。升阻比在失速前均有不同程度的提升, 在失速后呈下降趋势, 在 0° 至 10° 攻角范围内, 三齿尾缘对应升阻比略大于其他两种模型。

(2) 基于选定翼型, 在 $Re=8.0 \times 10^5$ 、湍流强度为 0.19 工况, 翼型尾部加入不同类型的锯齿, 失速前升力系数有明显增加, 三齿和五齿情况提升最多。升阻比在失速前均有不同程度的提升, 在 -5° 至 0° 攻角范围内, 三齿尾缘对应升阻比大于其他两种模型, 三种模型最大升阻比略有下降。

(3) 叶片加装尾缘锯齿后, 机组轴功率系数 C_p 增大 1~3% 左右, 机组年发电量平均增大 1~1.5% 左右。

(4) 加装尾缘锯齿后, 叶根稳态载荷均有不同程度增加, 因此必须有效评估锯齿尾缘对机组极限和疲劳载荷的影响, 确保风场叶片安全运行。

参考文献

[1] 张学迅,赵晓路,徐建中.锯齿尾缘对翼型气动性能影响的数

(上接第 42 页)

模型更精准; 基于智能预警模型, 实现动态预警, 更加及时准确; 新增传感器与定制软件 APP 软硬件深度整合, 诊断功能更实用; 基于智能优化模型, 学习时间越长优化越精准。通过全生命周期服务的智慧火电产品的研发应用, 在提高电厂发电效率、降低煤耗、减少非计划停运时间、少人巡检等多方面为电厂带来优化效益, 提高电厂市场竞争力。

参考文献

[1] 邓宏贵,罗安,刘雁群等.电力关键设备远程监测与故障诊断系

值模拟研究[J].工程热物理学报,2013,34(5):870-873

[2] 杨景茹,杨爱玲,陈二云,等.锯齿尾缘叶片气动特性和绕流流场的数值研究[J].航空动力学报,2017,32(4): 900-907

[3] 贺艳文,李学军,冯和英,等.锯齿尾缘对叶片尾迹特性的影响[J].机械工程与自动化,2019,212(1): 15-20

[4] 黄乾. 基于大涡模拟的锯齿尾缘翼型流动分析及气动噪声预测[D].北京: 清华大学

[5] 武威. 锯齿尾缘叶片的气动性能研究 [D].南京: 南京航空航天大学

[6] 许雅苹. 带涡发生器和尾缘锯齿的风力机翼型气动性能数值模拟研究[D].北京: 华北电力大学

[7] Howe M S. Aerodynamic noise of a serrated trailing edge[J]. Journal of Fluids & Structures, 1991, 5(1):33-45

[8] LU Lin, YANG Hongxing, Burnett J. Investigation on wind power potential on Hong Kong islands: An analysis of wind power and wind turbine characteristics[J]. Renewable Energy,2002, 27(1): 1-12

[9] Noda M, Flay R G J. A simulation model for wind turbine blade fatigue loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1/3): 527-540

[10] Maalawi K Y, Badawy M T S. A direct method for evaluating performance of horizontal axis wind turbines[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2001, 5(2): 175-190

统的研究[J].电网技术,2003,27(5):51- 54

[2] 韩旭东,王仲.火电机组智能辅助诊断系统研究[M].热力发电,2020

[3] 陈木斌.基于 Storm 与 Kafka 集群的火电厂分布式流式数据建模与分析系统[J].工业控制计算机,2021,34(5): 33-34+36

[4] 王琰洁,王孟强,刘泽三,等.基于微服务的统一应用开发平台应用上云关键技术研究 [J]. 电力信息与通信技术,2021,19(4):64-69

[5] 李若愚.大数据平台智能运维系统的设计与实现[M].北京邮电大学,2020

[6] 朱小亮.基于容器引擎的云平台设计与实现[M].北京工业大学,2019

欢迎投稿, 欢迎订阅!

M701F4 机组一键自启停 (APS) 方案设计

董溢华 胥波*

东方电气股份有限公司, 成都 611731

摘要: 本文通过对东方-三菱 M701F4 型燃气轮机联合循环机组一键自启停方案的研究,结合燃机顺序控制及联合循环配置方案并借鉴实际工程经验,对该型燃机联合循环单轴机组的一键自启停整体方案及主要控制流程进行梳理,对 M701F4 一拖一单轴联合循环机组的自启停系统(APS)提出了初步的设计方案。通过介绍一键自启停的总体设计、断点设置和功能分组,分析了实施的大致思路与主要困难。最终目的为实现机组 APS,减少机组启、停过程中的人工干预,提高机组自动化运行和控制的水平,为最终实现机组“无人值守”提供必要条件。

关键词: 燃机联合循环; 自启停控制; APS; 功能组; 断点

中图分类号: TM611.31 文献标识码: A 文章编号: 1001-9006 (2022) 01-0056-06

Automatic Power Plant Start-up & Shut Down System Scheme Design of M701F4 Gas Turbine Combined Cycle Unit

DONG Yihua, XU Bo*

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

Abstract: In this paper, through the research on the one button auto start stop scheme of Dongfang Mitsubishi M701F4 gas turbine combined cycle unit, combined with the gas turbine sequence control and combined cycle configuration scheme, and referring to the actual engineering experience, the overall scheme and main control process of one key self start and stop of this type of gas turbine combined cycle single shaft unit are sorted out, A preliminary design scheme for APS of M701F4 one driven one single shaft combined cycle unit is proposed. By introducing the overall design, breakpoint setting and function grouping of one button auto start stop, the general idea and main difficulties of implementation are analyzed. The final purpose is to realize APS of the unit, reduce the manual intervention in the process of unit startup and shutdown, improve the level of automatic operation and control of the unit, and provide necessary conditions for the final realization of "unattended" unit.

Keywords: gas turbine combined cycle; automatic power plant start up & shut down system; APS; functional groups; breakpoint;

所谓燃气轮机联合循环电厂的一键启停(APS, automatic power plant start up&shut down system)即能够按照燃气轮机发电的热力流程和设备运行工况,调动并协调各功能子系统进行预定参数、预定进程的控制,从而使得整个机组能够在极少的人工干预下自动、安全地完成启动或停运过程的自动控制^[1]。

1 联合循环机组实施 APS 的优势

1.1 提升机组启停过程中的本质安全

一键自启停通过对机组启停过程中的工艺条件、工艺过程和相关调节参数进行自动化的判定,减少了机组启停过程的人为干预,进一步降低了因

收稿日期: 2021-12-28

作者简介: 董溢华 (1987—), 男, 2013 年毕业于西安交通大学通信工程专业, 工学硕士, 工程师。现在东方电气股份有限公司从事燃气轮机技术管理工作。

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燃机事业部, 邮箱: xubo@dongfang.com。

人为主观错误判断和误操作等导致的风险，提升了机组启停过程的本质安全^[2]。

1.2 降低了运行人员的工作强度

实施燃机发电机组一键启停功能可以进一步提升机组自动化运行水平，降低运行人员对机组的操作难度，运行人员仅需要关注控制系统是否正确运行，这一改变有效降低了运行人员的操作强度。

1.3 提高启动和停机经济性

为了实施一键自启停，使得各项操作逐步标准化，同时在实施过程中对原有的流程进行进一步梳理分析，可以逐步优化启停机流程，有助于实现最优化操作手法，提高了启停机的效率，使得启动和停机成本得以有效降低，机组启停经济性进一步提高。

2 M701F4 联合循环机组控制系统

2.1 燃机控制系统--DIASYS Netmation 介绍

DIASYS Netmation是由三菱重工开发的技术领先的电厂控制系统。DIASYS Netmation利用了最新的信息技术和通信技术，实现了对电厂各要素的控制，诸如电厂控制逻辑的设计、电厂的运行、监视和维护以及数据备份等。其系统构成及其功能如下：

(1) MPS: 多功能站，执行自动控制和 I/O 处理。

(2) OPS: 操作员站，监视和操作机组的人机交互界面。

(3) EMS: 工程师站，维护整个 DIASYS 系统，注册相关的组件，包括创建和更改 MPS 中的计算逻辑，设计 OPS 上的图形输出，趋势和控制回路面板。所有的维护数据都保存在 ORCA 数据库中。

(4) Browser OPS: DIASYS Netmation 也提供基于浏览器的 OPS 软件。

(5) ACS: 附属站，存储和管理大量的机组数据。可以利用外部存储设备。

(6) CPS: 兼容处理站，包含了 smart CPU 可以挂载在总线上。小型设备或者机组的外部设备可以直接使用。与 MPS 兼容。

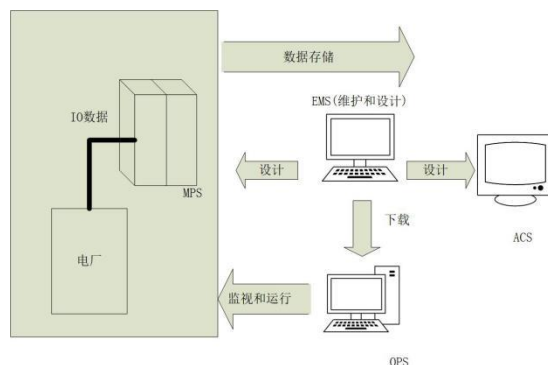


图 1 DIASYS Netmation 示意图

DIASYS Netmation 可以实现对机组（主要针对燃气轮机）数据的获取，处理并按照对应的控制逻辑来对各系统/设备进行自动化控制。而对于整套机组的辅助系统和公共系统其控制则基本上依靠分散控制系统（DCS）来实现。

2.2 分散控制系统（DCS）

M701F4 燃机联合循环一拖一单轴机组共配置一套分散控制系统（DCS），随机组供货的燃机-汽机控制系统（DIASYS Netmation）通过通讯和少量硬接线与 DCS 进行联通，实现对整个联合循环机组相关设备和系统进行集中监控的控制系统。厂用电系统、各种变压器、汽机旁路系统及余热锅炉等的控制均通过 DCS 实现。

由于目前 M701F4 燃机和汽机主要部分已经具备一键自启停的功能，因此为了实现整套机组的 APS，需要在 DCS 系统中实现对辅助系统以及全厂公用系统的顺控和自动化，进而实现整个机组的全自动启停顺序控制。

一般地，机组 APS 涉及到的 DCS 系统顺控的工艺系统包含如下：

① 辅助蒸汽及轴封系统；② 闭式水系统；③ 凝结水系统；④ 锅炉上水系统；⑤ 凝汽器抽真空系统；⑥ 循环水及开式水系统。

除此之外，DCS 中控制的如下工艺过程也应实现自动控制：

① 锅炉汽包水位控制过程；② 锅炉高压主蒸汽温度控制过程；③ DCS 与 DIASYS Netmation 系统的通讯过程。

要实现机组的一键自启停，必须至少对上述工艺系统和工艺过程进行自动化改造，以满足机组一键自启停的顺控要求。

3 M701F4 型联合循环“一拖一”单轴 APS 实施方案及主要逻辑设计

M701F4型燃气-蒸汽联合循环机组APS的运行方式分为全自动、半自动和手动三种方式。全自动模式指不设断点的APS方式。在全自动方式下,APS将自动执行并不需要任何人为操作。即只需要按一个机组启动按钮,则联合循环机组可起动并升至满负荷运行。半自动方式将整个机组的启动分为若干个功能相对独立的模块,各功能模块的分界点定义为APS的“断点”,在每个断点完成时需要人为进行确认才能进入下一个断点的运行。断点方式的APS的系统架构如图2所示:

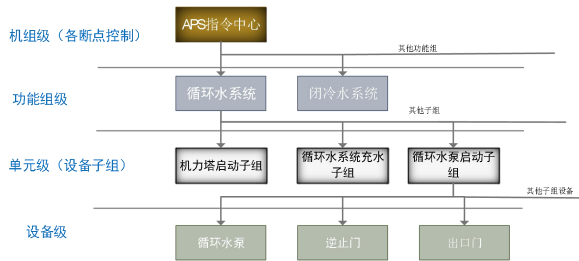


图2 APS的系统架构

从图2可以看出APS样式系统自上而下可以分为四级^[3]: 机组级、功能组级、单元级和设备级。其中机组级就是断点级功能组级则是在每个断点中所涉及到的各个功能相对独立的层级。单元级则是功能单一的完成具体某项功能的层级。最底层是

设备级,该级直接关联到具体设备。

而对于APS中断点的设置,根据机组运行工艺过程的需求以及机组安全的考虑,需要遵循以下的基本设计原则:

- 断点的划分根据工艺流程是否需要运行人工检查确认设备状态和当前运行工况;
- 每个断点执行完后能够保持机组在当前状况稳定运行;
- 断点与断点之间不能有逻辑或时序上的交叉;

3.1 一键自启动方案设计

根据三菱的设计,联合循环燃机主机岛部分的燃机由DIASYS Netmation系统控制,可实现自启停功能;而汽机部分控制由DEH系统实现,HRSG及辅助系统在DCS侧控制,控制系统间需要协同,特别减少启停机过程中运行操作人员手动操作及压缩手动干预点。

依据机组的启停操作规范,一般地可以将M701F4分轴机组的半自动APS启动过程划分为如下6个断点,具体在本项目中如何划分可以在设计联络会中协商确定:①断点1.辅助设备启动断点;②断点2.凝汽器真空建立断点;③断点3.HRSG启动断点;④断点4.透平启动断点;⑤断点5.同期断点;⑥断点6.升负荷断点。

其启动的总体流程如图3所示^[4]:

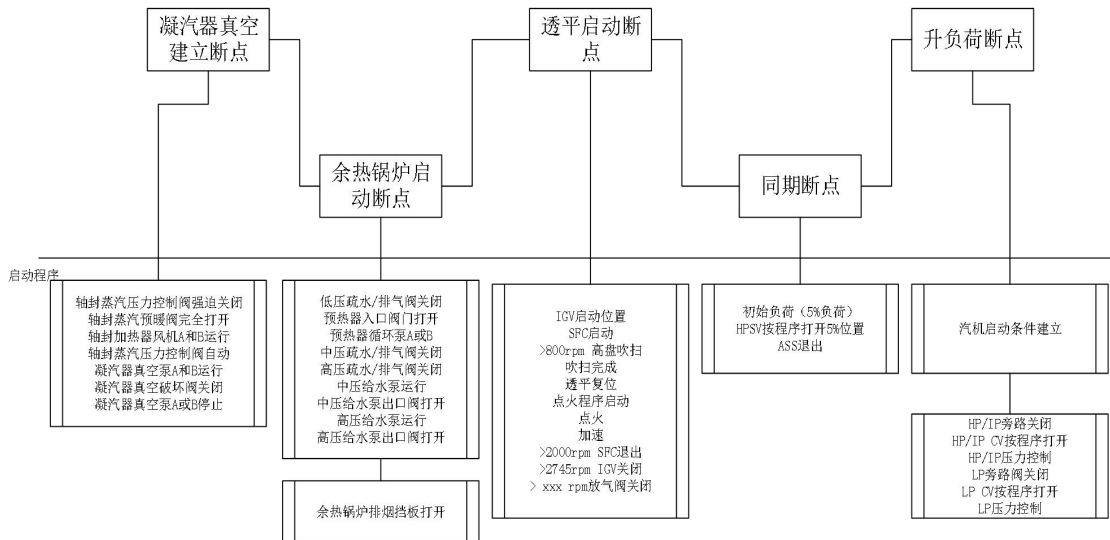


图3 一键启动总流程

(1) 辅助设备启动断点

该断点完成各辅机小顺控，包括顶轴油泵、盘车电机、循环水泵、闭冷水泵、控制油泵、润滑油

泵、燃机罩壳风机等主要设备的一键启停；其基本流程如图4所示。

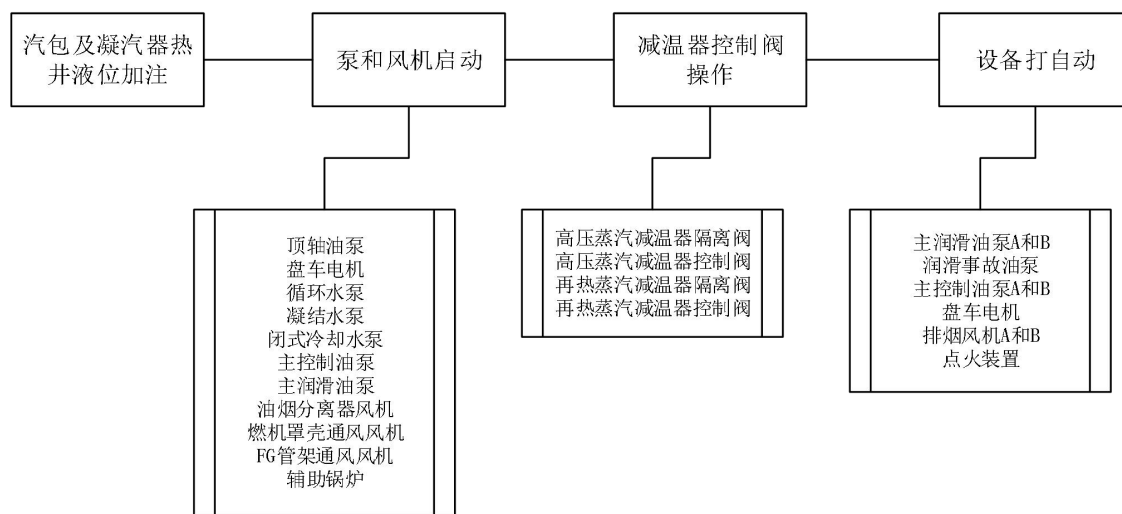


图4 辅助设备启动逻辑

(2) 凝汽器真空建立断点

该断点在各辅机系统正常启动的基础上，完成凝汽器真空条件的建立；其流程如图5所示。

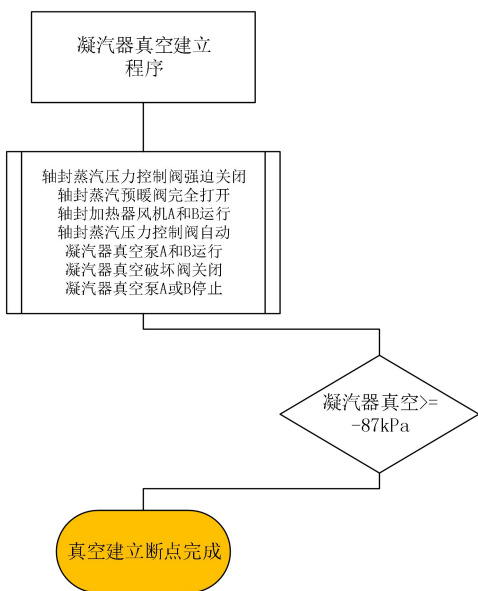


图5 凝汽器真空建立逻辑

(3) HRSG启动断点

该断点的主要功能是启动高中压给水泵，最终完成余热锅炉的启动；其流程如图6所示。

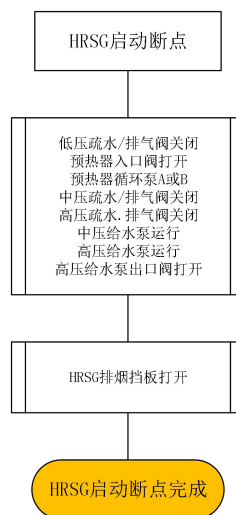


图6 HRSG启动逻辑

(4) 透平启动断点

该断点的主要功能是完成燃气轮机的启动，最终达到全速空载。其流程如图7所示。

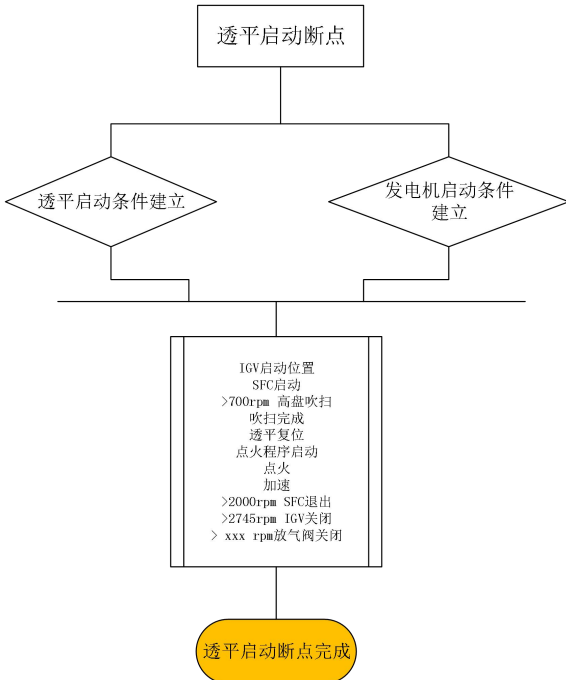


图7 透平启动逻辑

(5) 同期断点

同期的目的是在条件建立后，合上发电机出口断路器，建立发电机与电网的连接。其流程如图8所示。

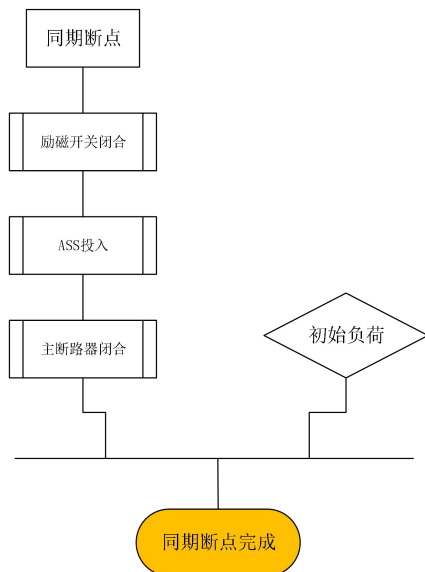


图8 同期断点逻辑

(6) 升负荷断点

该断点的功能主要是在蒸汽条件建立后启动汽轮机，并将机组负荷升至设定负荷。至此机组的自启动过程完成。该断点的流程如图9所示。

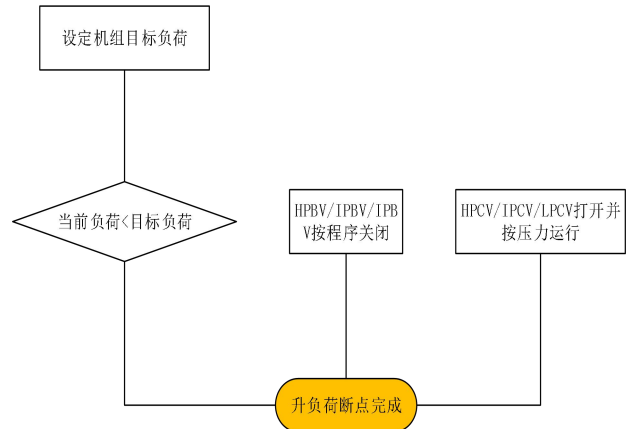


图9 升负荷断点逻辑

3.2 一键自停机

依据机组的启停操作规范，一般地可以将M701F4单轴机组的半自动停机过程分为如下3个断点：①断点1.透平停机断点；②断点2.HRSG停机断点；③断点3.真空破坏断点。

其详细的启动流程可以参见机组的启停操作规范编制相应的流程逻辑，此处不作详细展开。

3.3 APS的画面设计

按照前述的断点的划分，设计的APS启动的画面（APS停机类似）如图10所示。具体工程项目画面的设计可进一步结合用户需求及项目实际进行调整。

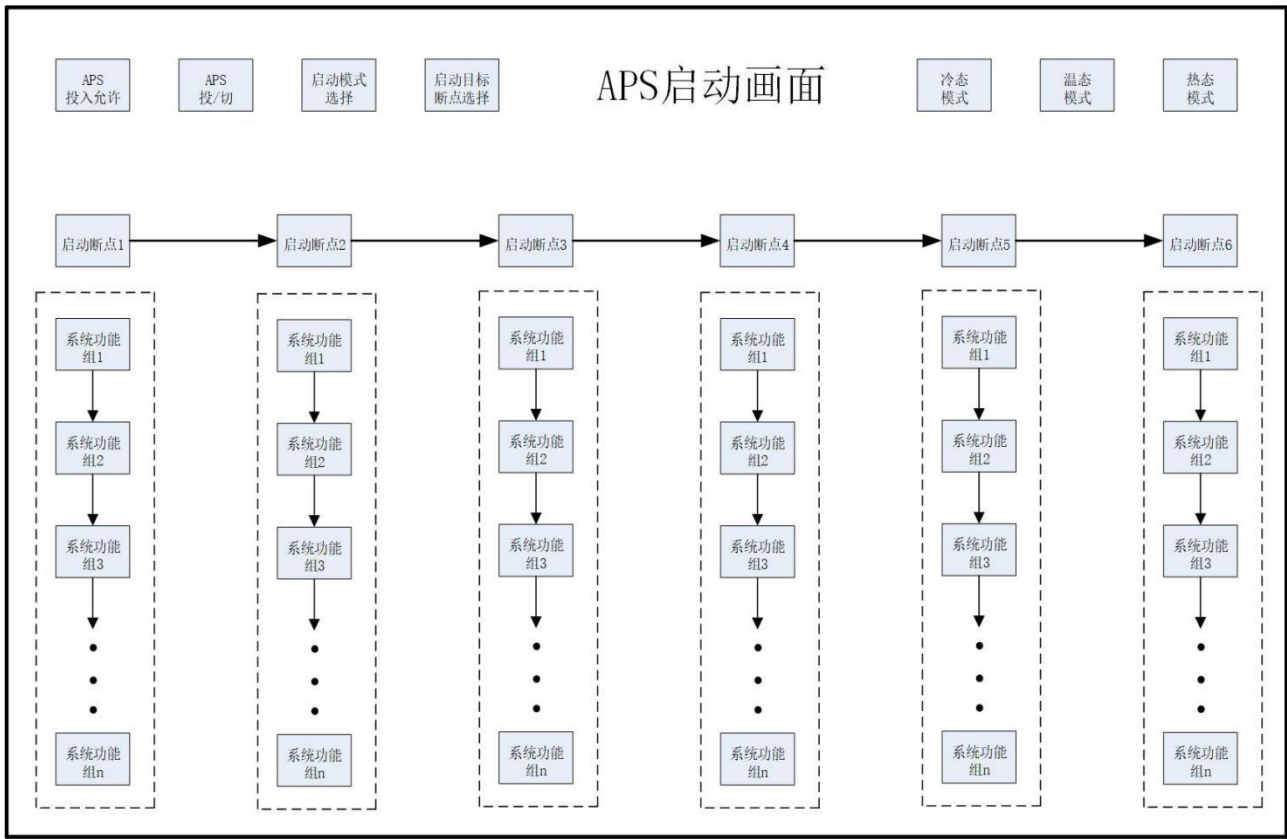


图 10 APS 启动画面

4 结语

(1) 燃气轮机联合循环一键自启停对开关、阀门、辅机等辅助设备的可靠性提出了更高的要求。阀门卡涩、辅机故障等均会影响一键启动的应用过程。因此需要选用可靠性更高的设备，并需要更加良好的维护。

(2) 燃气轮机联合循环一键自启停顺控逻辑组态在DCS中完成，需要对DCS现有逻辑上进行改动，因此，需对改动的逻辑进行充分论证，并对调试和运行过程中的风险制订专项预案。

(3) 燃气轮机联合循环一键自启停程序将所有设备进行自启动连接后，在各断点内运行时不需要任何的人为干预，这其中难点在于当某个设备出现故障时，如何保证主设备及主程序的安全。因此

在逻辑设计与论证时，必须要充分考虑到单一或多个设备故障时一键自启停程序如何确保主机设备顺利进入到一个安全稳定的工况，以确保主机设备和人身安全。

参考文献：

- [1] 曹泉. 联合循环燃机机组APS控制策略及其实践[J]. 湖北电力, 2015, 39(4): 71-73
- [2] 归一数, 沈丛奇, 胡静. APS技术在机组DCS改造中的应用[J]. 华东电力, 2006, 34(2): 51-53
- [3] 於晓博. 大型火电机组一键启停方案设计研究[D]. 华北电力大学, 2017
- [4] Gas turbine combined cycle power generation project turbine start and stop procedure. Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

基于新旧《民用核安全设备无损检验人员资格管理规定（HAF602）》差异分析浅谈过渡期如何管理

王幸幸¹ 罗炜²

1.东方电气股份有限公司, 成都 611731; 2.东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455

摘要: 为了适应和满足新法规要求, 确保核电设备制造单位民用核安全设备无损检验人员队伍建设在法规新旧更替中平稳过渡, 降低新旧法规变化带来的风险和影响, 进而提升设备制造质量管理能力, 作者通过对比新旧 HAF602 的差异, 从法规修订意义、主要变化方面分析探讨应对策略, 并对新老资格过渡期如何管理提出建议。

关键词: HAF602; 无损检验; 新旧对比; 资格管理; 过渡期

中图分类号: TL **文章标志码:** A **文章编号:** 1001-9006 (2022) 01-0062-04

How to Manage the Transition Period Based on the Analysis of the Difference between the Old and New HAF602

WANG Xingxing¹, LUO Wei²

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

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

Abstract: In order to adapt and meet the requirements of the new regulations, ensure the smooth transition of the team construction of nuclear safety equipment nondestructive testing personnel in the reform, reduce the risks and impact brought by the changes of the old and new regulations, and improve the equipment manufacturing quality management ability, the author commits to analyze and discuss the coping strategies, puts forward suggestions on how to manage the transition period of new and old qualifications through comparing the differences between the old and new HAF602, and the significance of regulatory amendments.

Key words: HAF602; nondestructive examination; comparison between the old and the new; qualification management; transition period

2020年12月, 国家能源局和生态环境部联合发布《关于加强核电工程建设质量管理的通知》(国能发核电〔2020〕68号), 再一次强调“核安全不仅是核电的生命线, 更是国家安全的重要组成部分”并进一步明确“工程质量是保证核电安全的物质基础, 建设期的质量就是运行期的核安全。”无损检测是确保核设备质量、保障核安全的重要环节, 是核安全设备活动中非常重要、广泛使用的特种工

艺。无损检验人员在核电设备制造过程中扮演着关键角色, 素有“核安全卫士”、“工业医生”之称, 其个人技能水平、实践经验和文化素养直接关系到核电设备的质量和可靠性。

民用核安全设备无损检验人员的培训和资质管控是提高无损检验管理水平的必要举措, 我国对民用核安全设备无损检验人员资质进行了严格管理, 形成了相应的法规。随着核工业发展, 法规几

收稿日期: 2021-11-15

作者简介: 王幸幸(1984—), 女, 2013年毕业于西南财经大学公共管理专业, 硕士, 中级经济师。现在东方电气股份有限公司核能事业部从事质量管理、核安全文化建设方面工作。

经演化，最近的一次《民用核安全设备无损检验人员资格管理规定》(HAF602)于2019年6月13日由生态环境部发布,2020年1月1日实施，距离上一版法规发布有十二年。在新旧法规过渡阶段，为了适应和满足新法规要求，确保核电设备制造单位民用核安全设备无损检验人员队伍的稳定性和可持续性，降低新旧法规变化带来的风险和影响，本文从新旧法规变化分析本次法规改版的初衷和目的，从而找出应对策略。

1 2007版和2019版HAF602差异

法规的每一次改版都像一次洗礼，经过反复考究、验证和征求意见，为适应上层法规的新要求、政府改革的新举措，吸收实践经验，优化孕育出来的新生命。2019版HAF602较2007版有很大的变化，下面主要从机构职责、工作范围、报考资格、考试内容、资格审核以及到期续证等方面做比较分析。

1.1 机构及职责

原法规规定，国务院核行业主管部门负责设立民用核安全设备无损检验人员资格委员会（简称鉴委会），由鉴委会组织无损检验人员的资格考试，负责发放证书，并将考试结果报核准委员会审查。国务院核安全监管部负责设立民用核安全设备无损检验人员资格核准委员会，负责鉴委会成员的备案和无损检验人员资格的审查，审查合格后，方予以发证。原法规存在两方面问题，一方面存在流程冗余，效能不高的情况；另一方面还存在持有证书但核准不通过人员从事证书范围工作的违规风险。

因国家部委职能调整，2019版较原版简化组织机构，合理调整组织设置，职责更加清晰科学。首先反映在篇章结构上取消了第二章“机构及职责”，原版用8条来解释参与资格管理的机构及其职责，新版用了2条。其次，由原来参与的4个单位（国务院核行业主管部门、国务院核安全监管部、无损检验人员资格核准委员会、无损检验人员资格考核单位）精简为两个（国务院核安全监管部和考核单位），由国务院核安全监管部统一组织无损检验人员资格考核，颁发证书。

尤其是在资格核准流程上，简化了行政审批程序，原需要45天，现周期缩短到30天。不难看出，这一变化是政府部门落实“放管服”改革精神的具体体现。所谓的“放管服”简单来说就是简政放权、放管结合、优化服务，其目的是提高政府管理和服务能力，激发市场活力。组织机构的精简，行政审批流程的简化，实实在在为企业带来了便利，减少了接口关系，提高了效率。

1.2 优化无损检验人员承担的工作范围

新版HAF602与旧版HAF602，对各级无损检验人员所能承担的工作主要有以下几方面的变化：

(1)明确I级无损检验人员要在II级或者III级无损检验人员的监督指导下才能工作，并取消了I级人员对检验结果初步评定的工作内容。

(2)II级无损检验人员不再有资格审核无损检验规程和结果报告，也不再有资格培训I级无损检验人员。并明确只有III级无损检验人员才有资格审核无损检验规程和检验结果报告。

(3)III级无损检验人员不再由法规来规定监督、管理无损检验活动的职责。需要由持证单位指定相关的管理人员来实施无损检验活动的监督和管理，履行主体管理责任。

1.3 完善无损人员报考条件

新HAF602强调逐级培养、逐级取证、逐级提升的思想和理念。提高I级人员报考门槛，原学历要求为初中以上，现改为中等职业教育和高中以上，体现了核安全的重要性。原HAF602根据考核的检验方法对学历实践经历要求有区别，新HAF602对报考II级和III级无损检验人员没有学历要求，但更看重实践经历要求，调整了工作经历要求，报考II级要求I级人员持证时间统一为2年，报考III级要求II级持证时间统一为5年。拓宽人员来源渠道，持有特种设备相应方法可报考II级。

1.4 优化考核内容与方式

I级和II级的理论考试增加核安全文化基础知识，III级考试明确要对标准规范的应用能力进行考试。优化考核方法，考试成绩有效期为1年，可至多补考2次。

1.5 简化续证流程

原资格证书延续要求参加操作考试，现调整为审核工作记录和业绩情况，对于良好的，予以延续。

但这并不意味着放宽监管尺度，而是更重视持证期间的工作记录和业绩，如此一来把行政资源从事前审批转移到加强事中事后的监管上，精准管控更有针对性。

1.6 证书维持

旧版 HAF602 规定，无损检验人员连续脱离无损检验专业工作 1 年以上，相应证书自动废止。因此，要求聘用单位做好无损检验人员的工作安排和记录，避免因脱离相应证书方法的工作超过 1 年，导致该项目证书作废，引发无证操作。

新版 HAF602 未规定无损检验人员连续脱离无损检验专业工作 1 年以上情况的处理措施，建议各单位参照旧版执行。

1.7 监督管理

新版 HAF602 为落实聘用单位的主体责任，要求聘用单位应对本单位无损检验人员进行培训和岗位管理。旧版更多的是体现国务院核安全监管部门的监督管理，未强调聘用单位的培训和岗位管理。

旧版法规规定“无损检验人员不得同时在两个单位执业”，若企业面临人力资源紧张问题只能将工作外包给持有《民用核安全设备无损检验许可证》的无损检验单位。而本次新的政策有所松动，规定“无损检验人员一般应当固定在一个单位执业，确需在两个单位执业的，应当报国务院核安全监管部备案”。可以看出本次法规修订着实为企业减负，在为解决企业面临的资源紧张的问题上开了一个小口。

2 新旧变化对制造企业的影响

因新法规对无损检验规程和报告的审核有更高要求，为确保新旧法规平稳有序过渡，国家核安全局 2019 年底发布《关于民用核安全设备特种工艺人员资格管理有关事项的通知》，补充规定“2020 年 1 月 1 日前取得民用核安全设备特种工艺人员资格证书的，在证书有效期届满前可继续按照原许可范围开展相应的民用核安全设备活动。自 2020 年 1 月 1 日起取得我局颁发的民用核安全设备特种工艺人员资格证书的，应按照国家修订后的规定要求开展相应的民用核安全设备活动”。补充规定可通俗解读

为：老证老办法，新证新办法。持有按旧版 HAF602 获取的 II 级证书，还可按旧版 HAF602 从事无损检验规程和报告的审核工作，一旦按新版 HAF602 换证后，则不能从事审核工作。该补充规定给没有 III 级证书的单位提供了一定的缓冲期，各单位必须在缓冲期内加快人员培养。

据统计，某核电设备制造企业的 III 级无损检验资格证书占全部证书的 6.9%，II 级无损检验资格证书占 88.8%，I 级无损检验资格证书占 4.2%，III 级资格证书占比较小。同时，各方法 III 级无损检验资格证书分布也不均匀，其中 RT 占 28.2%、UT 占 25.6%、PT 占 23.1%、VT 占 12.8%、MT 占 7.7%，ET 占 2.5%，LT 无 III 级人员。建议进一步加大 III 级人员的培养，维持在 10% 左右为宜。若不能在缓冲期内取得 LT-III 级证书，将存在生产经营风险。建议进一步加大 III 级人员的培养，维持在 10% 左右为宜。

3 法规实施过程中的注意事项

在《民用核安全设备无损检验人员资格管理规定》法规实施过程中，各单位应特别注意：

- (1) 各单位无损检验人员管理员在报考时，须仔细核对报考人的毕业证、视力检查、工作经历及劳动合同等报考资料，避免弄虚作假。
- (2) 报考人不得考试舞弊。
- (3) 持证人员不得超出资格证书范围作业。
- (4) 离职再入职人员，新聘持证人员，须仔细核对持证期间的连续工作记录。只有证明持证期间未脱离相关工作 1 年，才能授权其继续从事相关工作。如集团内借调，也需核实其在原单位的连续工作情况，再授权。

4 制造企业在过渡时期的应对办法

在逐项分析、研究新版 HAF602 规定后，在适合本企业特点的情况下，我们建议制造企业在过渡期尽快完成以下工作：

4.1 提升从业人员素质

新聘无损检验人员至少应为高中或中等职业教育学历，建议为大专及以上学历。

在职无损检验人员应开展自我提升，开展在职学习，获得大专及以上学历。

4.2 加快人员培养做好资源储备

各制造单位，需抓紧紧缺方法Ⅲ级人员的培养，如：ET 和 LT。同时，建议每种方法按 2~3 名Ⅲ级持证人员配置，避免因Ⅲ级人员离职造成生产经营风险。建议每名无损检验人员同时持有表面和体积方法，以便需要时，具备Ⅲ级的报考条件。

按照新版 HAF602 规定，工作满 1 年后，才能申请 I 级资格考核；取得 I 级资格证书满 2 年，才能申请 II 级资格考核，无损检验人员工作至少 3 年才能具备独立操作的资格。按照 TSG Z8001《特种设备无损检验人员考核规则》，理工类大专毕业生可直接申请相应方法的 II 级资格考核。而持有特种设备 II 级资格证书满 1 年可申请 HAF602 相应方法的 II 级资格考核。因此，建议先考取特种设备 II 级资格证书，再申请 HAF602 相应方法 II 级资格考核，可有效缩短人员培养周期。

4.3 建立 III 级无损检验人员资质的激励机制

新版 HAF602 明确向用人单位提出了对无损检验人员激励政策的要求，鼓励聘用单位对 II 级和 III 级无损检验人员在职称评定、薪酬待遇、荣誉激励等方面给予政策倾斜。建议企业出台激励政策，鼓励员工考取无损检验 III 级资质，减少 III 级无损检验人员流失，保持队伍稳定性。

4.4 建立新老资质共存期的管理规定

为确保民用核安全设备特种工艺人员（包括焊接人员和无损检验人员）资格管理工作平稳有序开展，国家核安全局于 2020 年 2 月发布《关于做好新冠肺炎疫情防控期间民用核安全设备特种工艺

人员资格管理有关工作的通知》（国核安函〔2020〕13）补充规定“因疫情防控考试暂缓导致民用核安全设备特种工艺人员证书失效或至考试计划公布时证书有效期不足 6 个月的，证书有效期可延长至考试计划公布后 6 个月”，目前已积压约 1/3 的 II 级人员资质 2021 年有效期到期，有效期的延长从某种角度看缓解了 III 级人员紧缺的形势，为企业提供了培养 III 级人员的缓冲期，但同时企业也面临老证和新证共存的问题，主要矛盾在于老证 II 级人员可以审报告，新证 II 级人员不可以审报告，从而带来潜在的违规风险。

企业为防范风险尽快采取措施，如：分别建立新资质和老资质人员清单，根据每次取换证的情况同步更新；编制内部工作程序明确两个清单中的人员分别可以从事的工作范围；不定期核查实际执行的落实情况；对于资质使用有误时的更正办法等。

5 结语

新版 HAF602 的实施，对持证单位提出了较高要求，后续工作中应从以下几方面加强管理：

- (1) 维持无损检验队伍稳定，需减少因人员流失，特别是 III 级人员流失而导致生产经营的风险。
- (2) 新法规强化了对检验人员从业操守、知识技能等方面的监管，聘用单位需进一步强化管理，防止违规作业、弄虚作假等事件发生。
- (3) 聘用单位应落实主体责任，开展好无损检验人员的岗位培训和岗位管理，从严、从细开展无损检验活动的监督和管理。

（上接第 45 页）

烟气脱硫体系中，优先发生 HF 与 CaCO_3 和 MgCO_3 的反应，其中以 HF 与 CaCO_3 的反应为主。

(4) 石灰石—石膏湿法烟气脱硫体系液相中可溶性组分根据石灰石中固溶体 MgCO_3 含量确定：当石灰石中固溶体 MgCO_3 含量较高时，最终溶液成分中有 MgSO_4 、 MgCl_2 ，而无 CaCl_2 ；当石灰石中固溶体 MgCO_3 含量较低时，溶液成分中有 CaCl_2 、 MgCl_2 ，而无 MgSO_4 。

参考文献

[1] 赵龙彬. 燃煤烟气石灰石—石膏湿法脱硫影响因素研究[J].

哈尔滨商业大学学报（自然科学版），2017，33(4): 423-425
 [2] 杨志忠. 石灰石湿法烟气脱硫废水排放计算[J]. 东方电气评论, 2020, 34(2): 25-29
 [3] 李晓丹. 湿法脱硫技术的开发与利用[J]. 辽宁化工, 2014, 43(3): 302-303
 [4] 张锦柱, 杨保民, 王红, 张斌. 工业分析化学[M]. 冶金工业出版社, 2008
 [5] 刘润静, 胡永琪, 胡庆福. 白云石钙镁分离技术进展[C]. 2012 年全国镁盐行业年会暨镁化合物分会成立大会专辑, 2012: 70-72
 [6] James G. Speight. LANGE'S HANDBOOK OF CHEMISTRY[M]. McGRAW-HILL, 2005
 [7] 张丽红. 含氢氟酸和盐酸的混合酸的回收利用方法[J]. 河北化工, 2010, 33(8): 75-77

某换热器承压边界传热系数计算

里超 王博 杨洋 郭正荣 曹雪幡 姜凤鸣

东方电气股份有限公司，成都 611731

摘要：承压边界传热系数是核级换热器结构安全性评价的重要输入条件。本文通过单管模型方法论证，确定了适用于工程应用的承压边界传热系数求解方法。在此基础上，开展了某核级换热器承压边界异型结构的 CFD 仿真，分析表明该换热器进出口腔室内传热系数分布偏差极大，并给出了不同流量、温度条件下进出口腔室传热系数的取值方法。本文得到的数据可为承压边界传热系数计算提供参考，并为结构安全性评价提供关键输入参考。

关键词：CFD；方法论证；传热系数；异型结构

中图分类号：TM623；TK124

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2022）01-0066-05

Calculation of Heat Transfer Coefficient at Pressure Boundary of A Heat Exchanger

LI Chao, WANG Bo, YANG Yang, GUO Zhengrong, CAO Xuefan, JIANG Fengming

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

Abstract: Pressure boundary heat transfer coefficient is an important input condition for structural safety evaluation of nuclear heat exchanger. Through the demonstration of single tube model method, this paper determines the solution method of pressure boundary heat transfer coefficient suitable for engineering application. On this basis, the CFD simulation of a special-shaped structure with pressure boundary of a nuclear stage heat exchanger is carried out. The analysis shows that the distribution deviation of heat transfer coefficient in and out of the oral cavity of the heat exchanger is great, and the value method of heat transfer coefficient in and out of the oral cavity under different flow and temperature conditions is given. The data obtained in this paper can provide reference for the calculation of heat transfer coefficient at pressure boundary and provide key input reference for structural safety evaluation.

Key words: CFD; method demonstration; heat transfer coefficient; heteromorphic structure

承压边界上的传热系数是核级换热器结构安全性评定的重要输入，其准确性将直接影响设备的安全性评价。一般可采用传统传热经验关系式计算承压边界的传热系数，但也存在传统经验关系式不适用或直接计算误差较大的异型结构。对于异型结构，常采用实验方法直接测量其传热系数。随着计算流体动力学的发展及计算机软硬件能力的提升，越来越多学者采用 CFD 分析方法计算热工水力现象^[1]^[2]。为获得核级换热器承压边界上的传热系数，有

必要开展异型结构 CFD 分析，为换热器结构安全性评定提供重要的输入参数。

1 计算方法

本文研究的换热器包括蒸发器和过热器，进出口腔室内流动较为复杂，不同位置流速和传热系数相差极大。图 1 为换热器（蒸发器和过热器）结构示意图及蒸发器入口腔室结构图。

收稿日期：2021-11-10

作者简介：里超（1985—），男，2021年毕业于西南交通大学机械设计及理论专业，工学硕士，工程师。现在东方电气股份有限公司核能事业部核设备设计所主要从事核电设备设计研发项目管理。邮箱：lichao@dongfang.com。

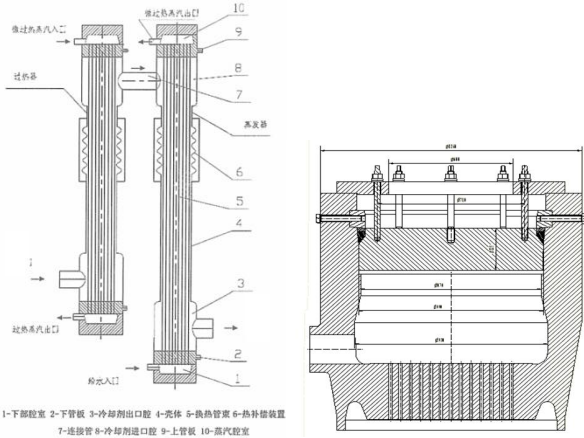


图1 换热器结构示意图及蒸发器入口腔室结构图

CFD 分析的准确性主要受网格尺度、边界层厚度、湍流模型及边界条件的影响。本文采用单管模型进行网格、边界层、湍流模型、壁面函数选择合理性分析。通过与经典传热经验关系式计算结果的对比，确定了一种适用于工程上传热系数计算的网格、边界层、湍流模型、壁面函数 CFD 分析方法。

1.1 传热经验关系式计算

分析的单管模型内介质状态为过热蒸汽，对于大流量区 ($Re > 2500$) 传热系数的计算可采用

Dittus—Boelter 关系式：

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (1)$$

式中： Re ——雷诺数； Pr ——普朗特数。

1.2 CFD 分析计算

采用 ICEM 对单管模型进行纯结构化网格划分，网格质量大于 0.9，以保证能较快的获得收敛解，形成的网格如图 2 所示。

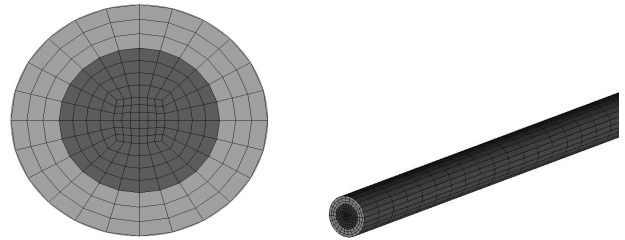


图2 单管模型网格示意图

采用 ANSYS FLUENT 对单管模型的传热系数进行模拟计算。本节分别采用 $k-\epsilon$ 模型 (scale 壁面函数) 和 SST $k-\omega$ 模型对不同网格、边界层厚度的网格模型开展传热系数进行计算。表 1 给出了不同湍流模型、网格、边界层厚度计算获得的传热系数与 Dittus—Boelter 关系式计算结果的对比。

表 1 不同湍流模型、边界层厚度、网格数与 Dittus—Boelter 关系式计算结果对比

$k-\epsilon$ 模型 (scale 壁面函数)							
序号	边界层总厚度 (mm)	边界层数	网格个数	Y^+	对流换热系数 ($W/m^2 \cdot K$)	DB 公式 ($W/m^2 \cdot K$)	相对偏差
1	1	5	117 000	113.541	5 096.645	5 765.28	-11.60%
2	0.8	5	126 000	90.876	4 962.348	5 765.28	-13.93%
3	0.5	5	133 000	56.969	5 002.726	5 765.28	-13.23%
4	0.3	5	135 000	34.389	5 078.075	5 765.28	-11.92%
5	1.2	5	111 000	136.188	5 101.572	5 765.28	-11.51%
6	1.5	5	110 000	170.046	5 125.708	5 765.28	-11.09%
7	2	5	108 000	226.417	5 109.092	5 765.28	-11.38%
SST $k-\omega$ 模型							
序号	边界层总厚度 (mm)	边界层数	网格个数	Y^+	对流换热系数 ($W/m^2 \cdot K$)	DB 公式 ($W/m^2 \cdot K$)	相对偏差
1	0.3	5	346 000	33.7106	5 031.314	5 765.28	-12.73%
2	0.2	5	358 000	10.949	4 672.348	5 765.28	-18.96%
3	0.1	5	369 000	8.9324	4 513.348	5 765.28	-21.72%
4	0.05	5	382 000	5.320	4 319.776	5 765.28	-25.07%
5	0.04	5	432 000	1.530	4 210.186	5 765.28	-26.97%
6	0.03	5	461 000	1.320	4 103.545	5 765.28	-28.82%

由表 1 可以得到：①当 SST $k-\omega$ 模型受边界层厚度 (Y^+) 及网格数量的影响较大，计算结果本身偏差较大；② $k-\varepsilon$ 模型 (scale 壁面函数) 受边界层 (Y^+) 及网格数量的影响较小，计算结果本身偏差较小且 CFD 计算误差与 DB 公式计算误差均能保证在 15% 范围以内。

对于分析的换热器，由于水/汽腔室内流量分配不均，流速偏差较大，各位置 Y^+ 极难控制在一个较为恒定的范围内。基于此，采用 $k-\varepsilon$ 模型 (scale 壁面函数) 开展换热器水/汽腔室传热系数计算能更好的避免由于 Y^+ 值波动而引入的传热计算误差。

2 换热器腔室传热系数计算

2.1 几何模型

建立的几何模型为换热器进出口腔室、进出口接管及一定长度的换热管流体域^[3]，延长进出口接管长度并适当缩短换热管长度，保证接管、换热管长度大于 10 倍的水力直径以获得收敛解。

2.2 数学模型

本文采用商用软件 ANSYS FLUENT 进行三维流场计算求解三维黏性雷诺时均 N-S 控制方程组^[4]，其通用控制方程为：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{U}\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (2)$$

式中， ϕ 为通用变量； Γ_{ϕ} 为广义扩散系数； S_{ϕ} ——广义源项。

根据 1.2 节的分析，湍流模型选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型并搭配 scalable 壁面函数。

2.3 边界条件

本文主要考察进出口腔室周向传热系数，为保证计算精度及避免干扰项，对边界条件进行了如下设置及简化：

- (1) 分析时仅考虑周向腔室引入的热流密度 ($10000\text{W}/\text{m}^2$)，其他位置均考虑为绝热条件；
- (2) 根据不同入口温度条件，设置介质物性且定义为恒定物性，以此避免由于传热导致物性变化对传热系数的影响；
- (3) 设置质量流量入口，压力出口；
- (4) 根据换热器整个运行工况下，腔室的温度变化区间及流量变化区间设置各腔室计算工况。

2.4 网格划分及无关性

为保证网格质量，采用“分体构建、整体装配”的思路完成各腔室的网格划分。根据各分区结构特性，对传热管、进出口接管采用纯六面体网格单元，对腔室采用四面体网格划分。各分区采用 interface 方式进行连接并控制接界面的网格尺度，以保证获得收敛解和准确解 (图 3)。

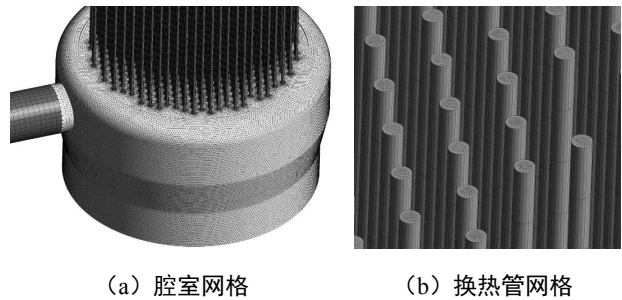


图 3 网格划分示意

图 4 给出了进出口汽腔室平均周向传热系数与网格数量之间的关系。综合计算精度及计算速度的要求，最终确定的网格单元数约为 610 万。

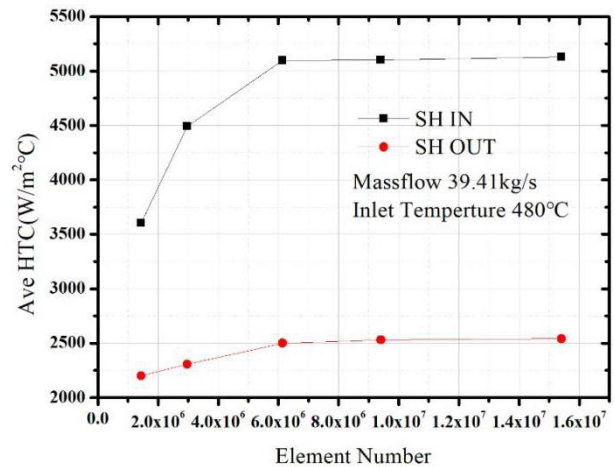


图 4 进出口腔室网格无关性

3 计算结果及分析

本节给出了换热器 4 个水/汽腔室传热系数随温度、流量变化的关系并拟合了相关关系式。

3.1 温度变化对传热系数的影响

为获得腔室周向平均传热系数，并为结构安全性评定提供可供参考的输入条件，定义腔室周向平均传热系数 AVEHTC 如下。

$$\text{AVEHTC} = \text{Wall_AveHFlux}/(\text{Wall_AveTemp} - \text{QS_AveTemp}) \quad (3)$$

式中: Wall_AveHFlux 为壁面平均热流密度, W/m^2 ; Wall_AveTemp 为壁面平均温度, $^{\circ}C$; QS_AveTemp 为腔室平均温度, $^{\circ}C$ 。

图 5、6 给出了蒸发器/过热器各腔室平均传热系数随温度的变化曲线。由图可以看出: ①过热器上/下腔室、蒸发器上腔室平均传热系数随着温度的升高而降低; 蒸发器下腔室平均传热系数随温度的升高而升高; 这是由于过热器上/下腔室、蒸发器上腔室内流动介质为过热器蒸汽, 雷诺数 Re 随温度的升高而降低; 蒸发器下腔室为过冷水, 雷诺数 Re 随温度的升高而升高; ②蒸发器上腔室与过热器下腔室流动特性相近, 传热系数随温度变化趋势相近; ③过热器下腔室传热系数略大于蒸发器上腔室, 这应该这是由于过热器换热管相对较少, 导致腔室内局部流速较大引起的; ④蒸发器下腔室传热系数远大于其他几个腔室, 这主要是由于过冷水的导热系数远大于过热蒸汽。

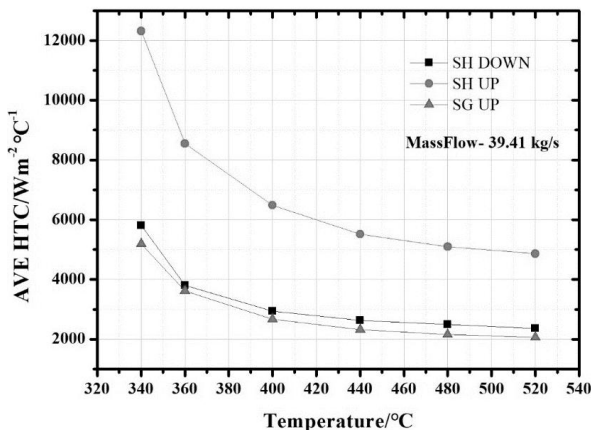


图 5 过热器上/下腔室、蒸发器上腔室平均传热系数随温度变化曲线

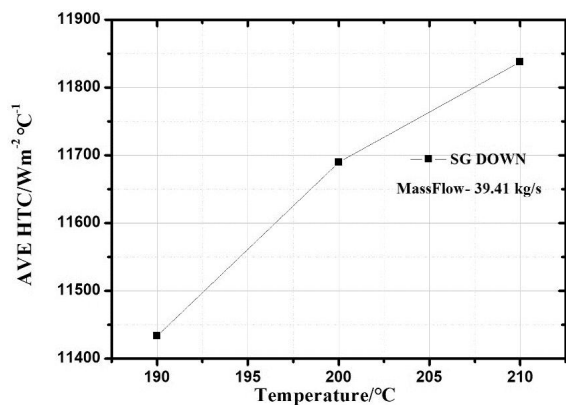


图 6 蒸发器下腔室平均传热系数随温度变化曲线

3.2 流量变化对传热系数的影响

图 7 给出了蒸发器/过热器各腔室平均传热系数随流量的变化曲线。由图 7 可以得出, 各腔室传热系数随流量 (Re) 的增大而增大。

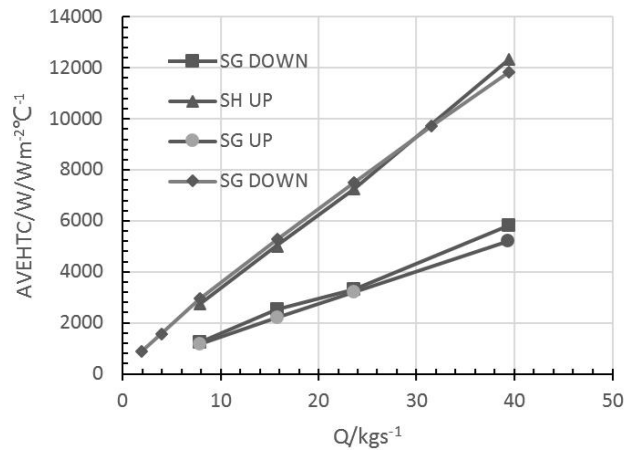


图 7 各腔室平均传热系数随流量变化曲线

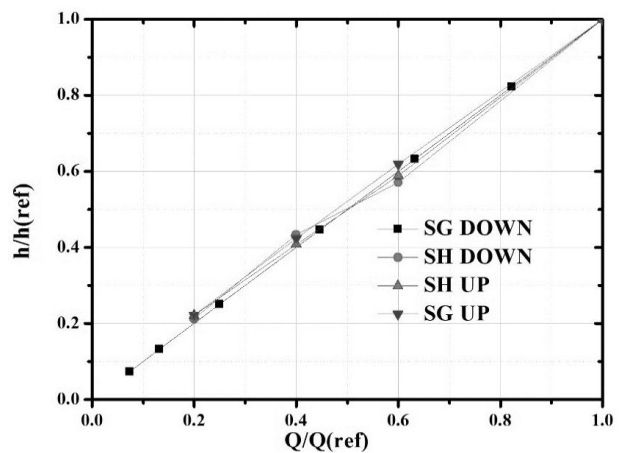


图 8 偏离额定流量时的传热系数修正曲线

图 8 给出了蒸发器/过热器各腔室偏离额定流量时的传热系数修正曲线, 根据该修正曲线可拟合各腔室偏离额定流量时的传热系数关联式如式 (4) 至 (7) 所示。

$$\text{蒸发器上腔室: } h/h(\text{ref})=(Q/Q(\text{ref}))^{0.9361} \quad (4)$$

$$\text{蒸发器下腔室: } h/h(\text{ref})=(Q/Q(\text{ref}))^{0.867} \quad (5)$$

$$\text{过热器上腔室: } h/h(\text{ref})=(Q/Q(\text{ref}))^{0.9319} \quad (6)$$

$$\text{过热器下腔室: } h/h(\text{ref})=(Q/Q(\text{ref}))^{0.9472} \quad (7)$$

式中: $Q(\text{ref})$ 为额定流量 (kg/s); Q 为实际流量 (kg/s); $h(\text{ref})$ 为额定流量下传热系数 ($W/(m^2\cdot^{\circ}C)$); h 为实际流量对应传热系数 ($W/(m^2\cdot^{\circ}C)$)。

3.3 换热器腔室传热系数取值

(1) 根据 3.1-3.2 节的分析, 获得了额定流量

下,当介质平均温度在一定参数变化范围时,各腔室传热系数的计算结果见表2。

表2 额定流量下各腔室传热系数 W/(m²·°C)

温度(°C)	过热器下腔室	过热器上腔室	蒸发器上腔室	蒸发器下腔室
520	2 353.31	4 863.45	2 069.26	/
480	2 500.6	5 095.85	2 155.91	/
440	2 624.16	5 512.23	2 321.8	/
400	2 936.07	6 485.71	2 673.69	/
360	3 802.03	8 545.27	3 609.1	/
340	5 814.59	12 315.19	5 194.62	/
210	/	/	/	11 837.57
200	/	/	/	11 689.51
190	/	/	/	11 433.58

(2) 对于额定流量,可以通过查取表2来确定对应传热系数,若没有对应的点,可以对流体温度进行线性插值查取;

(3) 当实际流量偏离额定流量时,需对传热系数进行修正。各腔室传热系数的修正参考由式(4)至式(7)确定;

(4) 从第2节的分析及保守性的角度出发,计算获得的传热系数需考虑15%的安全系数,用以补偿计算本身的不确定度。

4 结语

本文采用商用软件 ANSYS FLUENT 对换热器二次侧承压边界传热系数进行计算。经过方法论证

及各腔室传热系数详细计算,获得以下结论。

(1) 通过单管模型论证得:采用 k-ε 湍流模型搭配 scalable 壁面函数能较好地避免边界层尺度变化对计算精度的影响,并能获得较为合理的收敛解,满足工程应用需要;

(2) 对于单侧进口、出口结构,腔室内传热系数偏差较大,开展结构安全性评定时需充分考虑不均匀性的影响;

(3) 在额定流量下,当介质平均温度在一定的参数范围变化时,可通过查取表2来确定对应的传热系数,若没有对应的温度,可以对流体温度进行线性插值查取;

(4) 当实际流量偏离额定流量时,可由式(4)至式(7)获得相应的传热系数。

(5) 为补偿计算本身的不确定性,需对计算结果增加一个安全系数,本文建议安全系数取证为15%。

参考文献:

- [1] 孙世梅,张红. 热管换热器传热性能及温度场数值模拟[J]. 化工学报, 2004(3):472-475
- [2] 谭礼斌,袁越锦,赵哲等. 基于 CFD 的发动机冷却水套共轭传热分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(11):87-93
- [3] 许余,皇甫泽玉,胥建群等. 直流蒸汽发生器建模与仿真研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(1):154-160
- [4] 陶文铨编著. 数值传热学[M]. 西安交通大学出版社, 2001

集团要闻

东方风电中标浙能台州海上风电项目和三峡平潭海上风电项目

3月14日报道。近日,东方风电公司先后中标浙能台州海上风电项目和三峡平潭海上风电项目,总容量共计360MW,实现浙江、福建海上风电市场两地齐开花。

浙能台州1号海上风电项目位于浙江省台州市雀儿岙岛北侧,是东方风电与浙能合作的首个批量海上风电项目。该项目采用的7.5MW海上风电机组,是基于东方风电自主研发的7.0S MW海上直驱平台开发,为平价海上风电项目量身定制,按照IEC S类标准设计,具备高可靠性、高经济性和超强的抗台风性能。

三峡平潭外海海上风电项目位于福建省平潭海域,将安装东方风电自主研发的10MW等级海上风电机组。合作双方将致力于把该项目打造成为全国首个全容量并网的海上风电平价示范项目。

两个项目的中标,充分彰显了用户对东方风电7.0S MW、10.0S MW等级大容量海上风电机组的认可。东方风电10MW等级机组于2020年7月首次投运,平均可利用率超过99%,并于2021年实现批量投运。截止2021年底,东方风电7MW及以上等级海上风电机组已投运1.12GW,占全国同等级机组的43%,居国内首位。

来源:东方风电微信公众号

内陆核电项目凝汽器管材方案选取探讨

苏宏 李中林

东方电气股份有限公司，成都 611731

摘要：本文对 TP304 和 TP316 材料成份、物理和机械性能和经济性进行比较，并考虑水质条件情况以及核电站寿命 60 年要求，对凝汽器管材方案选取进行探讨。

关键词：凝汽器；不锈钢；TP304；TP316

中图分类号：TM623

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2022）01-0071-04

Discussion on the Selection of Condenser Pipe in Inland Nuclear Power Project

SU Hong, LI Zhonglin

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

Abstract: In this paper, the composition, physical and mechanical properties and economy of TP304 and TP316 materials are compared, and the selection of condenser pipe is discussed in respect of the water quality conditions and the requirement of 60-year life of nuclear power plant.

Keywords: condenser; stainless steel; TP304; TP316

中国目前所有的商运核电站都建设在沿海地区。目前几个内陆核电厂址均在停工状 0 况，内陆要不要发展核电这一问题的探讨多年来从未停息。全球范围内现有核电站 440 多座，其中位于内陆地区的占 50%以上。世界多个国家发展核电的实践证明，内陆核电厂与滨海核电厂在安全性上没有本质区别。法国和美国的内陆核电比例分别占到 69%和 61.5%，美国的密西西比河流域建有 32 台核机组；有些国家如瑞士、乌克兰、比利时等，其核电厂全部建在内陆。作者认为从我国能源结构优化的角度考虑，核电发展应占一定比重。在沿海厂址开发的同时，应加大内陆厂址的开发力度。

沿海核电厂回路使用大量的海水作为冷却介质，由于钛固有的性能，钛焊管凭借优异的耐腐蚀、抗冲刷、热导性、机械性能好等特点，特别适合用作海水或污染严重的淡水作为冷却介质的凝汽器

用管。但钛管价格比不锈钢管贵一倍，因此从经济性考虑，在可以选择不锈钢管的情况下应尽量选择不锈钢管。

内陆核电采用冷却塔的循环冷却方式，冷却水采用闭式循环淡水，水质较海水条件好，凝汽器用管可以采用不锈钢管。以下是对内陆核电用不锈钢管 TP304、TP304L、TP316 和 TP316L 材料成份、物理和机械性能和经济性进行比较，并考虑水质条件情况以及核电站寿命 60 年要求，对凝汽器管材方案选取进行探讨。

1 凝汽器管材选取原则

根据我国电力行业标准 DL/T 712-2000《火力发电厂凝汽器管选材导则》，凝汽器管的选用原则：应根据管材的耐蚀性、使用年限、价格、维护费用

收稿日期：2021-12-28

作者简介：苏宏（1968—），女，1996 年电子科技大学本科毕业，高级工程师。现工作于东方电气股份有限公司核能事业部营销室。

李中林（1974—），男，1996 年重庆大学研究生毕业，高级工程师。现工作于东方电气股份有限公司核能事业部营销室。

及凝汽器结构等进行全面的技术经济比较确定。所选用的凝汽器管，在采用正确维护措施的前提下，不出现管材的严重腐蚀和泄漏，使用寿命应在20年以上。

在《导则》适用范围内所选管材的质量应符合相应的国家标准的要求。《导则》是在材质符合标准要求、安装、运行与维护均属正常的基础条件下，根据不同的冷却水水质进行选材的。采用不锈钢管（图1）时，应保证足够的流速，并采取措​​施以保证所需的清洁度。冷却水水质指标是凝汽器管材选择的技术依据。

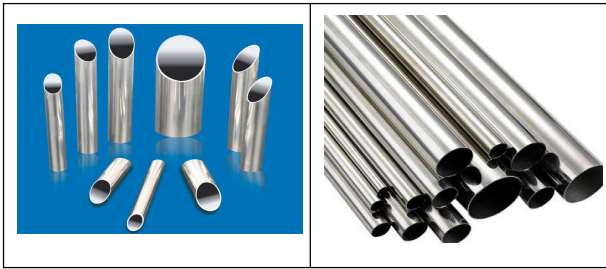


图1 不锈钢管样式

2 材料成份比较

“TP304”(SUS304)是美国 ASTM 标准中的牌号名称。在我国新制定的不锈钢牌号标准 GB/T

20878-2007 中，与之对应的牌号是 06Cr19Ni10(旧牌号为 0Cr18Ni9)，属 Cr-Ni 奥氏体不锈钢。

其特点是：TP304 的组成成分中含有 Cr，且 Cr 的含量超过 12%，因此其具有优良的不锈耐腐蚀性能和较好的抗晶间腐蚀性能，对氧化性酸具有很强的抗腐蚀性，对碱溶液及大部分有机酸和无机酸亦具有良好的耐腐蚀能力。但 TP304 钢也有性能上的不足之处，例如在含 Cl⁻水中(包括湿态大气)对应力腐蚀非常敏感。

“TP316”(SUS316)是美国 ASTM 标准中的牌号名称。在我国新制定的不锈钢牌号标准 GB/T 20878-2007 中，与之对应的牌号为 022Cr17Ni12Mo2 (旧牌号为 0Cr17Ni12Mo2)，属 Cr-Ni 奥氏体不锈钢。

其特点是：与 TP304 相比，TP316 的组成成分中添加了 Mo，而 Mo 是一种耐高温的物质，可以提高不锈钢的稳定性，高温下或者焊接以后能够生成 Mo 的碳化物，有效的抑制碳化铬的形成，保护不锈钢不会因为脱碳而导致晶间腐蚀，因此与 TP304 相比，TP316 的耐腐蚀性更强。

牌号中 L 是低碳的意思，TP316 和 TP316L 的区别是碳含量不一样，TP316 碳含量 ≤0.08%，TP316L 碳含量 ≤0.035%。具体见表 1。

表1 化学成分比较表

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	%
TP304	0.04~0.10	≤1.00	≤2.0	≤0.04	≤0.03	18.0~20.0	8.0~11.0		
TP304L	≤0.03	≤1.00	≤2.0	≤0.035	≤0.03	18.0~20.0	8.0~11.0		
TP316	≤0.08	≤1.00	≤2.0	≤0.035	≤0.03	16.0~18.5	10.0~14.0	2.0~3.0	
TP316L	≤0.035	≤0.75	≤2.0	≤0.04	≤0.03	16.0~18.0	10.0~14.0	2.0~3.0	

3 各种不锈钢管凝汽器管材的物理、机械性能对照表

表2 各种不锈钢管凝汽器管材性能对照表

材料牌号	状态	抗拉强度 MPa	屈服强度 MPa	延伸率 %	弹性模量 GPa	密度 g/cm ³	热导率 W/m·K	热胀系数 10 ⁻⁶
TP304	退火	≥515	≥205	≥35	193	8.03	13.8	15.1
TP304L		≥485	≥170	≥35				
TP316	退火	≥515	≥205	≥35	193	8.03	13.4	16.2
TP316L		≥485	≥170	≥35				

4 常用不锈钢管凝汽器管适用水质的参考标准

表3 常用不锈钢管凝汽器管适用水质参考标准

氯离子量	mg/L	美 国
<200		TP304、TP304L、TP430
<1 000		TP316、TP316L

5 某内陆工程技术规范书中循环水水质条件

表4 某内陆工程技术规范书中循环水水质条件

水质	项目	mg/L	水质	项目	mg/L
阳 离 子	K ⁺		硬 度	总硬度	985
	Na ⁺		度	非碳酸盐硬度	485
	Ca ²⁺	245	酸	碳酸盐硬度	500
	Mg ²⁺	89.5	碱	负硬度	
	Fe ³⁺	13.25	度	甲基橙碱度	610
阴 离 子	Cl ⁻	160		pH 值	6.5~9.8
	SO ₄ ²⁻	880		氨氮	
	HCO ₃ ⁻	610		COD _{Mn/Cr}	
	NO ₃ ⁻			电导率(μS/cm)	
	F ⁻			悬浮物	100

注：以上水质为根据最近两年内原水水质资料和循环水浓缩倍率按小于5倍计算所得，本水质表并没有考虑原水水质出现不可预见性恶化情况下的水质情况。

用长江九江段2007年1月至2009年9月的水质数据，在此仅将Cl⁻列出。一般而言，循环水进入凝汽器前需经过加氯处理，所以实际进入凝汽器的循环水中含有的Cl⁻要高于下表所列。

表5 长江九江段2007年1月-2009年9月水质Cl⁻数据

时间	07/01/08	07/02/07	07/03/07	07/04/05	07/05/08	07/06/06	07/07/09
Cl ⁻ (mg/L)	13.44	13.75	16.49	7.64	9.42	11.04	8.61
时间	07/08/07	07/09/13	07/10/10	07/11/03	07/12/05	08/01/04	08/02/15
Cl ⁻ (mg/L)	8.58	8.58	12.03	12.77	17.11	14.51	16.59
时间	08/03/04	08/04/15	08/05/06	08/06/05	08/07/03	08/08/11	08/09/09
Cl ⁻ (mg/L)	15.01	9.39	10.17	10.48	10.38	9.20	10.85
时间	08/10/10	08/11/06	08/12/03	09/01/05	09/02/03	09/03/10	09/04/06
Cl ⁻ (mg/L)	10.74	13.23	11.43	11.14	12.17	11.10	9.27
时间	09/05/05	09/06/04	09/07/02	09/08/05	09/09/08	平均值	\
Cl ⁻ (mg/L)	9.62	9.67	10.43	21.38	31.39	12.36	\

循环水浓缩倍数是指循环冷却水系统在运行过程中，由于水分蒸发、风吹损失等情况使循环水不断浓缩的倍率(以补充水作基准进行比较)。国内内陆核电项目工程循环水系统设计选材按5倍浓缩倍率考虑，在选材时，需将上表中的数据乘以5之后才可与《火力发电厂凝汽器管选材导则》(DLT 712-2000)的规定进行对照。由上表可看出，在09/07/02之前，长江水Cl⁻的含量在一定范围内波动，最小7.64mg/L，最大17.11mg/L，但09/08/05及09/09/08两次测定时，Cl⁻的含量变化波动较大，与07年08年同时期相比，增长明显。考虑到核电站对安全可靠要求更高，因此在选材时需结合水质变化的因素综合考虑，采用较为保守的方案。

6 国内常规火电项目使用不锈钢的业绩情况

目前国内常规火电机组如采用淡水作为循环水则一般采用不锈钢材料，主要有304、316、317及其衍生牌号的不锈钢材料。

7 国际核电站凝汽器使用不锈钢管的业绩

例如法国核电站在淡水凝汽器中使用不锈钢管的业绩(表6)。

表6 法国核电站在淡水凝汽器中使用不锈钢管的业绩

不锈钢牌号	应用电站
TP 304 L	900 MW 机组 2 台
	1 300 MW 机组 2 台
TP 316L	440 MW 机组 4 台
	632 MW 机组 1 台
	965 MW 机组 2 台
	900 MW 机组 10 台
	1 300 MW 机组 2 台
	1 400 MW 机组 4 台

8 价格因素

按照某内陆核电站冷却水水质指标，凝汽器管材选择 TP304、TP304L、TP316 和 TP316L 均可满足要求。

对比 TP316 和 TP304 价格，TP316 比 TP304 约贵 100 元/m² 左右，若凝汽器管材采用 TP316，1 台机组(凝汽器面积按 100 000m² 计算)约增加投资 1 000 万元。

9 结语

按《火力发电厂凝汽器管选材导则》要求：“应根据管材的耐蚀性、使用年限、价格、维护费用及凝汽器的结构等进行全面的技术经济比较确定。所选用的凝汽器管，在采用正确维护措施条件下，不出现管材的严重腐蚀和泄漏，使用寿命应在 20 年以上。”火电厂的设计寿命一般为 30~40 年，火电厂凝汽器管寿命大概在 30 年左右。而内陆 AP1000 核电项目工程设计寿命为 60 年，根据某内陆水质条件，理论上凝汽器管材选择 TP316 或者 TP304 都能满足要求，但是核电站对安全可靠要求更高，考虑长江水中 Cl⁻ 的含量有可能发生恶化考虑到远期水质可能出现的无法预测的恶化情况，虽然 TP316 比 TP304 价格高，但其抗腐蚀能力更强，有利于减少电站日常维护工作量，保证凝汽器的使用寿命，因此建议采用 TP316 材质作为内陆核电项目凝汽器管材更为合适。

参考文献：

- 1、国标 DLT712-2000《火力发电厂凝汽器管选材导则》
- 2、岭澳核电站循环水过滤系统 316L 不锈钢管道点腐蚀的理论分析

欢迎投稿，欢迎订阅！

台山 EPR (欧洲压水堆) 核岛辅助设备设计 流程简介与分析

李萌

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455

摘要: 主要介绍第三代 EPR (欧洲压水堆) 台山核岛辅助设备的初步设计及设计审查过程, 包括设计输入及接口、设计文件输出、设备详细设计及审查。

关键词: 核岛辅助设备; 初步设计; 接口; 详细设计; 设计审查

中图分类号: TL35; TM623 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-9006 (2022) 01-0075-03

The Introduction and Analysis of Design Process of TS EPR Nuclear Island Auxiliary Component

LI Meng

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

Abstract: The process of basic design and design review for TS EPR nuclear island auxiliary component is introduced. Including design input and interface, design output, detailed design and design review.

Key words: nuclear island auxiliary component; basic design; interface; detailed design; design review

德国 AREVA SOFINEL 公司承担了 EPR 台山项目部分核岛辅助承压设备的设计工作, 在德国 SOFINEL 分公司, 由于核岛辅助设备的详细设计由设备制造商来完成, 德国分公司只是完成初步设计的技术文件并对设备制造商提交的技术文件和图纸进行审查, 所以目前核岛辅助设备的工作并不涉及设备的详细设计。通过德国 SOFINEL 分公司针对具体设备编制的表格, 能够从这些技术文件和相应的技术规定中了解到一些非常重要的信息。数据表中提供的设备外形图以及一些设备数据: 例如设备的外形尺寸、壁厚、重量等信息, 这些对我们日后的设计都极具参考价值, 由此可以了解出国外公司的设计理念和设计思路。另外数据表中提供的设备载荷组合表, 给出了在不同运行工况下应考虑的不同载荷及这些载荷的叠加, 将运行工况, 载荷及应力进行分类, 按不同工况不同载荷产生的不同

应力强度分别加以控制, 防止失效。为我们的设备分析计算指明方向。

1 设计输入及相关接口

在 EPR 项目里 Q2 (核 2 级)、Q3 (核 3 级) 和 NC (非核级) 核岛辅助设备设计的首要任务就是确定设备设计的初始条件和要求, 即编写设备的“Data Sheet”(数据单)和“Requisition File”(所需文件), 同时也需要在其他专业和部门的协调下共同完成这两项任务, 因此就存在和其他部门如何进行信息交流等工作问题。在此应注意设备设计从输入开始, 设备专业的人员将以己为主, 负责全部过程的协调和管理工作以保证工作流程的顺利执行。以下介绍具体的执行步骤。

1.1 “Work Order” 的填写

收稿日期: 2021-12-28

作者简介: 李萌 (1972—), 女, 1994 年毕业于四川轻化工大学, 工学学士, 高级工程师。现在东方电气(广州)重型机器有限公司技术部从事核岛设备研制工作。

设计输入的第一步就根据有关要求和规定，填写一个“Work Order”表格，此表格就是一个工作指令，表明设备的初步设计工作正式开始。将填完后的“Work Order”发给信息文档管理部门，该部门将会在“Documentum”文件系统中创建一个叫“Data Sheet”(数据单)和“Requisition File”(所需文件)文件模板，由此开始设备初步设计的流程。在填写该表时要设定好该文件出版时需要发布的人员。需要下游专业行动的，则属于 Action 类人员，需要通知别人作为了解的则定义为 Information 类人员。

1.2 设备初步设计和所涉及的接口部门

设备专业在完成上述第一步工作后，在接下来的流程中要涉及到其他一些部门，并与之协作，同时以设备专业为主共同完成“Data Sheet”(数据单)和“Requisition File”(所需文件)的编制任务，涉及的接口部门如下：①系统专业；②布置专业；③管道专业；④力学专业。

设备专业主要依据上述各接口部门提供的信息完成“Data Sheet”(数据单)第二部门的内容，“Requisition File”(所需文件)内容基本上由设备专业完成。

各接口部门的主要任务如下。

1.2.1 系统专业

为设备专业提供设备初步设计所需要的各类原始条件和要求，以便设备专业为设备下一步的详细设计提供依据和要求，主要完成“Data Sheet”(数据单)中第一部分的内容，具体有：①设备分级(功能、机械、质量、地震及清洁度级别)；②总的设计要求(最大最小工作压力、最高最低工作温度、材料类型等)；③操作条件(介质、最大最小操作压力、最高最低操作温度、最大填充容积等)；④系统特别功能的描述；⑤管口表；⑥外部和内部危害引起的载荷状况(设计地震、空袭、压力波及检查地震等各种工况)；⑦各种工况下的载荷情况、应力水平以及有关要求；⑧特别要求(除盐)。

1.2.2 布置专业

该专业根据设备所在房间的大小为设备部门提供设备的外形极限尺寸、设备主要接口位置等要求。

1.2.3 管道专业

管道专业主要负责校核与设备接管相连接管

道的参数，具体内容有：①管道尺寸(外径，壁厚)；②管道材料。

1.2.4 力学专业

主要负责提供设备管嘴的接管载荷(即管道在各个工况下施加给设备接管管嘴的作用载荷)，当接管载荷在管道分析工程师和设备分析工程师之间取得一致时，接管载荷可以作为管道力学计算的许用载荷和设备力学分析的设计载荷使用。

2 设计文件输出

设计文件的输出主要是“Data Sheet”(数据单)和“Requisition File”(所需文件)这两个文件，但是两者针对性不同。

其中“Data Sheet”是由系统专业和设备专业(其中一些信息需要管道和土建专业确认)提供设备详细设计的出事条件和要求，如系统参数、设备初始外形尺寸、接管载荷和楼层反应谱等。“Data Sheet”主要分为两部分，其中第一部分由系统工程师填写，主要包括设备在系统中的作用、设备运行的外部条件(所在房间、温度、压力、湿度等)、设备与系统接口(接管表)以及设备的载荷状况和应力等级等。第二部分是由设备工程师填写，主要包括设备基本外形尺寸、设备材料(推荐，具体选用由详细设计者确定，但须征得 SOFINEL 同意)、设备外形图和设备接管载荷等。

而“Requisition File”作为设备规格书“Specification”的补充，主要针对某一类设备(结构、材料或功能具有相似性，因而在制造方面也有一些相同的设备)的采购和制造的。“Requisition File”从质保体系、供货范围、文件体系、设备的设计、制造、检验和验收、供应商提交文件等方面作了详细规定。

这两个文件经过上述流程和各接口部门审查签字确认后进入“CFC”(可执行)状态即可在文件系统中正式发布使用。

3 设备详细设计

由于 AREVA SOFINEL 并不进行核岛 Q2、Q3 和 NC 级辅助设备的详细设计，而是由下一级分包商来完成，所以此处只是从设计的原则上作以简述。

3.1 设计方案的确定

设备的详细设计者在承接业主的任务后，主要依据业主或其委托公司如 AREVA SOFINEL 提供的“Data Sheet”(数据单)和“Requisition File”(所需文件)和相应的“Specification”(设备规格书)以及所采用的标准规范从设备的结构、材料、制造工艺、检验、验收及包装运输等方面确定设计方案，并将此方案的图纸、工艺计算书(如果有)和强度计算书提交给业主或其委托公司进行审查，待方案确定后再进一步开展深入设计。

3.2 设备工艺计算

一般情况下设备的工艺计算主要指换热器的热工水力计算，是设备能否满足所规定功能要求的基本保障。由于工艺计算没有统一的强制标准，因此各设计者可依照公认的计算公式和理论进行计算，也可按照业主或其委托公司推荐的方法进行计算。通过热工水力计算能够初步确定设备的主要几何结构和相应尺寸参数，为后续强度计算提供必要的基础数据。

3.3 设备强度计算

设备强度计算是设备设计工程中一个非常重要的环节，是设备是否能满足核电站安全要求的基本保证。设计者主要以业主或其委托公司提供的“Data Sheet”(数据单)和“Requisition File”(所需文件)中所含设计要求部分作为基本输入条件，对设备进行强度计算。强度计算一般分两个步骤，首先是按“Specification”(设备规格书)和适用标准规范进行初步强度计算以确定设备的几何参数，然后依据此参数和设备的其他已知条件开展详细的应力分析计算，由此判断设备是否满足安全要求并最终确定设备所有结构和尺寸参数，为设备图纸绘制和出版提供所需信息，并正式出版。

3.4 设备设计外部审查和批准

设备设计的外部审查和批准是指业主或其委托公司对设计单位提供的设备所有相关设计文件的审查和批准，不经过业主或其委托公司的认可，这些文件将不能正式发布和使用，这是个非常重要的过程。在 AREVA SOFINEL 从设备的详细设计开始到最终批准要经过几个阶段：设计图纸、计算书和相关配套技术文件的审查、技术问题的澄清、审查意见回复和澄清、技术文件的修改和升版、修改

后的再审查及设计文件的最终批准。AREVA SOFINEL 不仅对设计文件进行审查和批准，还要对设计文件中提出的各类技术问题进行澄清和回复。

3.5 设计审查范围和责任

3.5.1 设计审查范围

主要从以下几个方面进行审查：①设备图纸；②工艺计算书(如果有)；③强度计算书(含应力分析报告)；④配套的其他技术文件；⑤其他相关专业审查。除了上述几方面，还应根据 Requisition File(所需文件)里的要求对设计单位提交的技术文件进行审查

3.5.2 设计审查责任

设计审查是保证设计质量的非常重要的环节。在对详细设计文件审查之前，审查人员必须全面熟悉和理解项目所涉及的设计标准和规范、相关技术规程和程序文件，以便审查详细设计是否满足初步设计和上游文件要求，确保所设计的产品满足设计条件并达到其应该承担的相应功能和安全要求。

同时，设备设计的审查以设备部门有关人员为主，并协调其他相关专业部门对设计文件进行联合审查。

3.6 设计审查的基本内容

审查人员对详细设计文件进行审查时，为了能够准确有效地审查文件，应从以下几个关键方面去审查，这样才能抓住重点，确保设计质量。以下主要从设计图纸和强度计算书两个方面简述审查内容：①设备设计采用标准是否符合数据表和设备规格书要求；②设备分级和技术特性参数是否满足数据表的要求；③设备主要材料是否满足数据表和设备规格书要求；④设备强度计算说采用的方法和公式是否满足标准规定的条件，计算是否全面，所选用的参数是否合理，计算结果是否正确；⑤设备各接口布置是否满足数据表的要求；⑥设备总图外形尺寸及结构是否满足数据表要求；⑦设备的详细结构设计是否合理，是否满足功能需求；⑧设备上筒体和封头的拼接焊缝数量和位置设置是否合理；⑨接管端部焊接连接坡口型式和尺寸是否满足相关规程要求；⑩主要焊接接头型式是否满足设备规格书的要求；⑪技术要求是否满足相关标准规范和规格书的要求，是否合理和正确；⑫明细表中零件和

(下转第 81 页)

基于供应链协同的优化案例分析

黄敏 曾睿 郭艳丽 巫长彬

东方电气集团东方锅炉股份有限公司，成都 611731

摘要：企业为了加强供应链的管理，采取“横向一体化”管理思想，通过产品部件网络报交、原材料发货清单、对协作厂商图纸电子化发放等系统，打通内部与外部的壁垒，建立企业与其各供应厂商的有效联动，在体制上，构建利益共同体；在实际运行上，构建了整条供应链的有效地闭环管理。

关键词：供应链；产品部件网络报交；原材料发货清单；对协作厂商图纸电子化发放

中图分类号：F252；F49 文章标识码：A 文章编号：1001-9006（2022）01-0078-04

A Case Study of Optimizing Supply Chain Collaboration

HUANG Min, ZENG Rui, GUO Yanli, WU Changbin

(Dongfang Boiler Group Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: In order to strengthen the management of the supply chain, the enterprise adopts the management idea of "horizontal integration" to break through the internal and external barriers through the systems such as product component network submission, raw materials delivery list, and drawings e-distribution to collaborators to establish an effective linkage between the enterprise and its suppliers. Thus an effective closed-loop management of the whole supply chain is constructed practically while a community of shared interests is built up systematically.

Key words: supply chain; product component network submission; raw materials delivery list; drawings e-distribution to collaborators

近年来，随着锅炉、环保和电站服务等企业重点行业的快速发展，在生态体系不断完善过程中，公司急切需要提高供应链的竞争力，以适应新时代高质量发展要求。同时，随着大数据、云计算、人工智能等新技术推广，制造业的智能化供应链将进入一个全新的快车道。企业间的合作共赢，成为制造企业在市场竞争中获得优势的关键，因此，打造高效供应链协同平台，共享信息，将使企业取得更高的赢利能力。

1 供应链协同优化

在合作共赢观念盛行的今天，从供应链的角度

出发对企业管理体系进行优化，可以提高企业的市场竞争力，增强信息共享，改善相互之间的交流，从而更好地达到共赢的目标。特别是离散制造企业，供应链相对复杂和脆弱，对企业生产经营影响较大。离散制造企业，需要混合生产差别很大的产品，造成供应商的数量庞大，生产的产品多数属于专用设备制造业，以大型设备为主，订单设计、订单制造型定制化生产程度高。不同产品源自于不同的销售订单，每个订单的技术要求、验收标准都不同，每个项目涉及的原材料、配套件、外协厂家等都有不同，给企业项目管理带来更高的复杂性，也对供应链管理提出更高要求。对此，需要对供应链协同进

收稿日期：2022-01-27

作者简介：黄敏（1972—），女，1994年毕业于西南民族学院计算机应用专业，大专，高级工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司信息中心从事软件开发和实施方面工作。

行优化，与供应链企业构建发展共同体，可以从战略匹配、文化相融、管理对接、系统兼容等方面入手，本文主要从实施信息化系统角度，促进供应链企业管理对接，系统兼容等方面进行阐述，选取了原材料协同、制造协同、物流协同等几个典型案例进行分析，具体情况如下。

1.1 产品部件网络报交

公司产成品的生命周期中有几个需要重点管理的阶段：生产前的产成品生产计划阶段、生产完工后的产成品报交阶段和移交运输商后的运输阶段。这几个阶段的参与者主要有生产制造单位（包括公司内部资源、公司外部资源）、生产管理部门、质量管理部门、项目管理部门和第三方运输商。早期传统的管理方式均为手工纸质单据式管理，大量纸质单据在各单位间流转汇总，暴露出很多问题：

（1）生产计划往往随着项目执行情况和生产资源情况动态调整，纸质计划的调整存在传递不及时、审批不规范、版本不可靠、难以追溯等问题；

（2）迫于商品计划考核压力，出现“承诺报交”现象，即提前报交完成考核要求，掩盖了项目进度真实情况，且后续追踪困难；

（3）移交运输商后的入库、发运、到货签收信息反馈不及时，多数时候需要打电话、查签收回执单才能了解产品的物流状态，且信息很难追溯，若出现错发货问题，很难调查取证；

（4）由于项目需求变更导致的在生产现场和成品库房积压闲置的产成品，没有清晰准确的台账，不便于及时合理利用，造成资产减值损失。

为解决上述传统管理模式下产生的主要问题，真正实现从产品计划开始，到投产、完工、检验、入库、发运、到货签收全过程的闭环管理，减少纸质单据管理造成的效率低、可靠性低、规范性差、可追溯性差等问题，提高整个项目执行计划和进度的准确性，最终为公司战略决策提供大数据支撑，我们开展了产成品生命周期管理系统的建设工作，规划了产成品部件级的生产计划管理、完工报交管理、物流信息管理、滞留产品管理、装箱单管理等模块，并以二维码载体的形式贯穿整个周期管理流

程，形成了产成品生命周期的闭环管理体系。

1.2 原材料发货清单

公司产品制造所用原材料的材质、规格、品种繁多，所需的大部分原材料不能从钢材现货市场采购，加之材料的通用性差，为避免采购过量造成长期积压，只能采取订单式生产模式。

1.3 对协作厂商图纸电子化发放

公司产品中，钢结构（轻钢、重钢）部件生产方式采用委外加工，其部件完工报交虽然在委外合同中有要求，但因生产厂家实际加工情况各异，其报交时间常常无法满足。对部件生产执行过程中受影响情况进行了详细分析讨论，其中技术图纸纸质提供方式迫切需要优化调整为提供电子数据（电子图纸和电子信息）。

2 基于供应链协同的关键点分析

2.1 产品部件网络报交

（1）首先梳理产成品的管理制度，固化管理流程及单据，形成管理标准，通过信息化手段实现管理流程的落地执行和单据电子化；

（2）产成品管理的数据基础是产品结构BOM数据，以BOM数据为基础进行包装信息和生产计划信息的数字化；

（3）大型装备的生产制造和物流都有很多供应商参与，包括制造供应商和物流供应商，将数据筛选脱敏后与供应商进行数据共享，让供应商做出数据贡献，实现非企业内部的制造和物流过程管控，实现供应链上下游的协同发展；

（4）定义产成品滞留周期，包括出产现场、成品库房、运输途中的滞留，通过数据分析识别积压存货、物流异常等情况，提高异常情况处置力度和积压存货利用率；

（5）实现装箱单模板化生成，针对业主方有格式要求的装箱单，以项目为单位制作模板，业主无要求的采用公司统一模板，智能生成装箱单。

（6）以箱件二维码为信息载体，贯穿产成品整个生命周期流程，实现基于二维码的产成品供应链上下游数据共享、采集。

2.2 原材料发货清单

(1) 以业务流程再造为指导思想，信息化开发、应用为抓手，拟定材料验收入库全流程信息化方案

以业务流程梳理为起点，将核心业务流程和辅助业务流程进行区分，将业务查询节点的需求与业务必经节点进行严格区分，将项目计划员、物管计划员、物管仓库办的流程节点取消，大幅缩短业务流程。以流程再造端到端流程梳理为指导思想，将采购订单到检验结论审核全流程实现信息化，避免当前线上线下两条腿走路，避免数据多处录入。

(2) 开发发货清单录入系统，为材料验收入库业务提供基础数据来源

2.3 对协作厂商图纸电子化发放

搭建协作厂商图纸电子化发放平台，以参考现有纸质图纸发放管理模式，探索图纸电子化发放。发放平台主要由两部分构成：①电子化图纸上传管理；②电子化图纸客户端查阅应用。

取得了一些经验和成效如下：

(1) 从数据角度分析，产品的结构清单、包装清单是静态数据，生产计划、执行进度是动态数据，以静态数据为基础，动态数据形成闭环，提供整个项目的视图总览，相对于传统项目管理模式，极大地提高了管理水平。

(2) 在与供应链企业合作的过程中，将数据共享作为合作条款之一，在完善的系统权限体系作用下，企业提供静态数据指导供应链企业协同运作，供应链企业提供动态数据形成闭环，连接供应链上的数据孤岛，打通业务链，实现双赢。

(3) 由于大型装备交付的定制化、离散化程度较高，产品箱件清单并不能做到完全统一，既要保证一定的统一性，也要满足业主的定制需求，我们采用了动态模板的管理方式，将模板数字化、要素结构化，以项目为单位动态生成模板，智能生成箱件清单。

(4) 大型装备制造与交付涉及的供应链企业较多，管理水平也参差不齐，对于项目执行过程中的异常情况需要及时发现、及时处置。通过量化异

常条件定义异常情况，智能识别异常，推送相关人员及时处置。

(5) 东方锅炉分别在2016年1月1日和2016年7月1日在自贡和德阳地区的回厂直管材料推行材料验收入库系统以来取得比较显著的效果，解决了材料验收入库效率低下的问题，受到各业务部门的欢迎和大力支持。

(6) 建立起电子化图纸发放管理规则并同步建设电子化发放平台。

(7) 客户端自动获取电子化发放信息，同步查阅电子图纸。

(8) 电子化图纸发放建立LOGO留痕，打印时同时打印登录信息，确保图纸使用可追溯。

3 基于供应链的优化创新

3.1 产品部件网络报交

(1) 面向流程来看，通过生产计划指导排产、制造完工报交、质量检验、移交物流入库、出库发运、到货签收整个流程的信息化管理，串联起整个业务链，让供应链企业都参与进来，实现供应链的流程闭环管理。

(2) 面向数据来看，供应链上的各企业都是数据的提供者和消费者。本企业作为提供者生产产品结构数据、包装清单数据、生产计划数据等，作为消费者获取生产进度、物流进度数据。而供应链企业需要消费产品结构数据、生产计划数据指导生产，消费包装清单数据指导运输，产生的则是项目执行各节点的进度数据。可以看出数据共享在供应链协同运作中的必要性。

(3) 通过产品箱件清单的动态模板化，即满足了定制化程度较高的供应链协同运作中的多样性需求，也满足了公司品牌塑造的统一性需求。

(4) 针对大型装备制造与交付的供应链复杂程度，供应链异常情况的信息化管理很好的促进了企业对供应链协同监管水平的提升。

3.2 原材料发货清单

(1) 以业务流程再造为指导思想，信息化开发、应用为抓手，严格区分核心和辅助业务流程，

进而大大缩短业务流程环节，提升了工作效率，实现了材料验收入库业务全程信息化。

(2) 提升了公司供应链管理水平和实现原材料供方使用公司供应链系统；供方提供的发货清单数据大大减轻了检查员、保管员录入数据的工作量，为采购员全程不参与材料验收入库业务创建了条件。

(3) 采用 SOA 技术，实现线性系统等四个系统的数据交互，在公司多系统、大数据交互方面开创了先河，解决信息化系统条状分割的现状，大大减轻了检查员、保管员在不同系统操作带来的工作量，提高了他们工作的便利性。

4 结语

通过几年来的成功运行和推广，利用现有技术

(上接第 77 页)

部件数量与图示是否一致；③图纸的版本和状态是否正确；④设备编码及名称是否正确；⑤设备是否完整，满足供货范围要求。

上述审查的内容仅指设备专业的审查，其他相关专业的审查根据各自的标准和要求进行审查，并将审查意见反馈给设备部门有关负责人员，然后一并以审查意见单 (Review Sheet) 的形式发给设备详细设计单位。

3.7 设计审查意见澄清

在对设计文件审查完毕后，将会形成书面审查意见单 (Review Sheet)，详细设计单位对审查意见有疑问的部分提出澄清，审查方进行解释或者接受

建立的支持系统，已有多家供应商和企业间形成了企业间的长期合作的稳固关系，并通过系统运行建立一套供应链的管理性的方法体系，为更好地服务于企业竞争的需求提供了坚强的保障。

本文分析的原材料协同、制造协同、物流协同等几个典型案例，构成了一条从供应商、制造商到最终用户的物流和信息流网络。供应链协同通过将供应链上分散在各地的、处于不同价值增值环节（如资源提供、生产加工、物流服务等）的、具有特定优势的独立企业联合起来，以协同机制为前提，以协同技术为支撑，以信息共享为基础，从系统的全局观出发，促进供应链企业内部和外部协调发展，在提高供应链整体竞争力的同时，实现供应链节点企业效益的最大化目标，开创“多赢”的局面。

对方意见。经过这样几次澄清和修改，形成最终设计文件。

4 结语

通过以上描述，仅就核岛辅助设备，可以大概了解到国外先进公司在设备设计前期是如何开展准备工作，如何在通用性标准的基础上根据项目要求编制更为具体明确，更具可操作性的相关技术文件，将标准规范和项目、设备设计有机的结合；也了解到设备初步设计与各接口之间的相互联系，如何根据各接口提供的信息完成设备初步设计，如何审查详细设计文件。对今后核岛辅助设备设计工作具有指导意义。

欢迎投稿，欢迎订阅！

关于核电项目执行中风险管理的探讨

吴琛

东方电气股份有限公司, 成都 611731

摘要: 为加强核电项目交货进度的风险管控, 按项目总目标和各关键节点制定风险预警指标和监控措施的过程, 可采用质量管理体系的 PDCA 思想, 即通过风险管控工作策划 (确认和输入顾客关于风险管控的要求、确认风险管控的目标、明确相关责任范围和责任人)、对风险进行识别分析和评价 (明确风险分类清单、判定风险评价指数与级别、风险接受准则和决策层次)、对风险管理执行效果进行跟踪获得有效的经验反馈, 从而实现项目执行风险管理的良性循环。从系统角度出发, 可扩大风险因素的分类分级管理, 实现以项目成本、进度、质量三要素为中心的立体风险管控体系。

关键词: 核电项目; 风险管理

中图分类号: F272.35

文章标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 01-0082-04

Discussion about Risk Management in Nuclear Power Project Execution

WU Chen

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

Abstract: In order to strengthen the risk management and control of the delivery schedule of nuclear power projects, the process of formulating risk early warning indicators and monitoring measures according to the overall objectives of the project and key nodes adopts the PDCA idea of the quality management system, that is, through risk control work planning (confirming and inputting the customer's requirements for risk control, confirming the objectives of risk control, clarifying the relevant responsible scopes and responsibilities), identifying and analyzing and evaluating risks (clarifying the risk classification list, determining the risk evaluation index and level, risk acceptance criteria and decision-making level), tracking the effectiveness of risk management execution and obtain effective empirical feedback, so as to achieve a virtuous cycle of project execution risk management. From the perspective of the system, the classification and hierarchical management of risk factors are expanded, and a risk management and control system centered on the three elements of project cost, schedule and quality is established.

Key words: nuclear power projects; risk management

1 定义

1.1 风险

是指能产生积极效应 (即机会) 或负面效应 (即损失) 的不确定事件, 并伴有一定的发生可能性 (或频率) 及后果 (或影响)。

1.2 风险分类清单

根据核电项目执行特点, 将影响项目进度的各类风险因素归入相应类别、分项 (3 层: 总类别、

子类别和细分项) 的《风险分类清单》(表 1)。

1.3 风险评价指数与级别、风险接受准则和决策层次

将风险发生的可能性 (或频率) 与后果影响程度叠加, 定义风险评价指数与级别, 再按级别范围确认风险接受准则和决策层级。风险可能性 (或频率) 等级取 5 级; 风险后果影响等级 (按风险对进度及回款影响程度) 取 5 级; 按核电项目执行进度要求, 各定级设置如表 2。

收稿日期: 2021-12-28

作者简介: 吴琛 (1973—), 女, 1998 年毕业于西安理工大学机械学专业, 工学硕士, 工程师。现在东方电气股份有限公司核能事业部从事项目管理方面工作。

表 1 影响交货进度的风险分类清单（仅截取部分）

总类别	子类别	子类别 风险代码	细 分 项
D 设计风险	DA 上游资料风险	DA01	设备接口资料延迟提供
D 设计风险		DA02	设备接口资料不准确或不可用风险
D 设计风险		DA03	接口资料未及时固化风险
D 设计风险		DA04	分包设计输入资料延迟、不准确或不可用风险
D 设计风险		DA05	设备资料变更
D 设计风险	DB 设计管理风险	DB01	设计审查不及时
D 设计风险		DB02	技术支持服务滞后风险
D 设计风险		DB03	设计计划不当（为考虑施工逻辑变化等因素）
D 设计风险		DB04	接口流程长
D 设计风险		DB05	设计审查不到位风险
D 设计风险	DC 设计技术风险	DC01	设计参数或设计方案未能及时明确风险
D 设计风险		DC02	采用先进新技术方案风险
D 设计风险		DC03	设计改进项影响
D 设计风险		DC04	设计变更风险
D 设计风险		DC05	选型风险（未考虑采买便利、成本超出等因素）
D 设计风险		DC06	材料替换决策不当风险
D 设计风险		DC07	设计方案适用性风险（未能综合考虑施工需求等）
P 采购风险	PA 上游资料风险	PA01	技术规格书延迟提供风险
P 采购风险		PA02	图纸或采购清单文件滞后
P 采购风险		PA03	技术文件内容不够清晰或不够完整，不具备采购条件
P 采购风险		PA04	乙供事项转甲供，采购周期不足
P 采购风险	PB 技术准备方面风险	PB01	上游技术要求识别充分性风险（合同技术输入评审）
P 采购风险		PB02	工艺试验准备相关风险
P 采购风险		PB03	工艺评定准备相关风险
P 采购风险		PB04	检验和检测
P 采购风险		PB05	产品试验

表 2 风险可能性及后果影响等级（具体数值按项目需求界定）

风险可能性等级 (等级说明)			风险后果影响等级
1	不可能	1 非常弱	极微弱，或无影响 预计进度偏差 ≤ 15 天；
2	极少	2 弱	需额外资源配给；可满足交货期；项目执行受到轻微影响 15 天 < 预计进度偏差 ≤ 30 天；
3	有时	3 一般	微弱偏离重点里程碑节点；不能满足交货期；项目执行受到影响但未影响项目关键路径 30 天 < 预计进度偏差 ≤ 60 天；
4	很可能	4 较严重	突破重点里程碑节点稍微偏离关键路径；项目执行将受到一定影响 60 天 < 预计进度偏差 ≤ 90 天；
5	频繁	5 很严重	突破工程一体化三级进度计划/主线计划，严重影响关键里程碑 预计进度偏差 > 90 天

(1) 风险评价指数。按风险出现的严重性和可能性进行叠加，形成风险评价指数，如表 3。

表 3 风险评价指数

可能性等级	后果影响等级				
	1	2	3	4	5
5	H	H	H	S	S
4	M	H	H	S	S
3	M	M	H	H	S
2	L	M	M	H	S
1	L	L	M	M	H

注：L代表轻微风险；M代表中度风险；H代表高度风险；S代表极高度风险。

(2) 风险接受准则和决策层次（表 4）。

表 4 风险评价指数、级别、接受准则、决策层级（按核电项目管理层级界定）

色块标识	风险级别	风险指数	风险接受准则	决策层次
	第一级 极度高风险 - 不可接受	S	不可接受的极度高风险，会严重威胁项目执行 (该类风险必须避免)	应报请所在公司领导层决策
	第二级 潜在高风险 - 重点监控	H	潜在高风险，会威胁项目执行 (该类风险必须专门制定管理措施，并报知事业部领导层)	【部门级风险】 由项目组所在部门领导层决策
	第三级 中等风险 - 不完全受控	M	风险不完全受控，且可能减蚀项目利益 (该类风险需受控管理，按需决定是否专门制定降减措施，并报知项目组领导层)	【项目组级风险】 需评审后方可接受
	第四级 低风险 - 完全受控	L	风险无需评审即可接受 (该类风险应关注，一般无需防控措施)	

(3) 第二级和第三级风险，是项目执行应着力进行管控的风险（第一级风险往往在标前评审中即判定）。

2 项目组职责

(1) 按顾客风险管控及实际工作要求，对项目风险因素进行动态识别、分析评估和监督反馈。

(2) 按项目进度管理，对各项目实施进度分级管控。

(3) 逐一判定影响项目交货进度的风险因素(表 1) 级别。

(4) 判定为第二级和第三级的风险项，联合项目执行协作方完成风险项识别、分析和评估、监督反馈，建立和完善《风险清单监控闭环管理记录》(见表 5)。

表 5 风险清单监控闭环管理记录

风险识别	项目名称	
	机组号	
	关键节点名称	
	风险代码	
	风险事件描述	
风险分析和评估	日期	
	风险持续时间估计	
	责任人	
	风险发生可能性	
	风险对进度拖延的影响程度	
	初始风险等级	
	风险建议措施	

	建议措施要求完成时间	
风险监控	滞后计划时间天数	
	上期建议措施是否有效	
	当前风险等级	
	风险趋势(+/-)	
	风险建议措施执行情况/后续建议采取措施	
	日期	

说明：1、关键节点：主要是项目里程碑节点；2、相关项可填写要点，或按需另附具体说明；3、可按项目执行情况，在本表框架基础上增加项目。

(5) 项目协调沟通实行逐层汇报；建立并完善项目风险管理经验反馈数据库是关键。

(6) 逐步完善影响交货进度的风险分类清单；定期修编和执行中完备演绎记录是关键。

3 项目风险控制的程序规定

3.1 核电项目风险管控的 PDCA 原则要求

(1) 第一阶段—P，风险管控工作策划：①确认和输入顾客关于风险管控的要求；②确认风险管控的目标（结合项目所在单位的风控管理要求）；③明确相关责任范围和责任人。

(2) 第二阶段—D，对风险进行识别、分析和评价。主要有：①风险识别：关键节点、对应风险分类清单项及风险事件描述；②风险分析和评估（风险持续时间估计，按责权确认主要责任人，风险发生概率、风险影响程度、初步判定评价指数、风险接受准则及决策层次、最后确认风险等级，风险建议措施、措施完成时间）。

(3) 第三阶段—C，风险管理执行效果的跟踪、监督并反馈以下内容：①滞后进度计划（与客户最终达成一致的进度计划）的时间；②上期建议措施是否有效（有效/无效）；③当前风险等级、风险趋势（较上期风险等级是否增大/降低/持续/关闭）；④风险后续建议采取措施。

(4) 第四阶段—A，形成风险管控的经验反馈，指导业务改进。

3.2 关于重点项目风险管控的具体工作要求

(1) 对判定为第二级和第三级的风险项，按上述原则要求，严格实施动态闭环管理，落实专项纠偏和风控措施主要有：①对明确存在或潜在的风险因素（包括但不限于：技术文件准备、原材料及

配套件采购、工艺试验和工艺评定计划、焊工无损检测等人力及设备资源等生产要素配置）判定风险级别，牵头制定应对措施、监督方案有效性；②动态跟踪项目执行人-机-料-法-环-测等各类资源要素的变化情况，提前识别相关风险项，按规定频次进行书面记录《风险清单监控闭环管理记录》（参考表 5，按需增减）。

(2) 第二级风险项，涉及重大资源调整或配置的，应由项目经理汇同项目执行的协作方如各子公司并汇通供方形成专项分析报告，按项目执行的层级管理规定审核、协调、决策，并实施专项进度跟踪。

(3) 第三级风险项，由项目经理汇同项目执行的协作方落实防控措施。

(4) 判定为第四级的风险项，可纳入日常关注。

(5) 其他纠偏改进措施有：① 驻厂跟踪：项目执行组按职责，实施驻厂协助，重点就第三级、第四级及分项计划任务，进行现场进度检查和难点协调；② 完善客户走访等增值活动：a) 不断响应和提高客户满意度、以提供更多增值服务为中心，开展针对性的客户交流，充分评估项目的进度风险；b) 活动人员要求：由分管领导带队，项目组人员参加；c) 活动信息要求：相关项目进度汇报（关键路径及里程碑进展，阶段难点、NCR-不符合项次处置进展等）、客户意见交流反馈、与进度匹配的里程碑商务情况跟等；d) 活动输出要求：明确顾客对于进度和质量的后续要求、相关问题补遗及具体措施与时间表。

3.3 项目进度风险管控的定期经验总结与反馈

针对风险管控组织与实施、风险损失（已引发及或有损失）、措施效果、预后及预防措施、经验反馈等方面进行总结，重点是风险清单监控闭环管理、纠偏要点、实施效果、同类项目经验总结。

4 结语

核电项目执行中风险管理，应持续贯彻 PDCA 的方法，以有效输入和预判为前提，以经验反馈为基础、以建立风防数据库持续完善风险清单监控闭环管理有效性为抓手，各方通力协作，逐步扩大风险管理网络的覆盖度与密度，实现以成本、进度、质量三要素为中心的风险立体管控体系。

融资租赁业务中出卖人合同风险防范的研究

唐辉

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 融资租赁是随着经济的发展而滋生的一种新型的交易制度, 与传统的分期付款销售交易模式具有显著的区别。在电力能源点项目建设中, 特别是发电设备采购环节, 融资租赁更是成为屡见不鲜地融资手段。本文从发电设备出卖人视角出发, 以融资租赁的意义、相关方的角色为着手点, 分析探讨发电设备出卖人面临的合同执行风险及防范措施, 希望能对发电设备制造行业提供一些借鉴。

关键词: 融资租赁; 出卖人; 合同; 风险及防范措施

中图分类号: F272

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 01-0086-03

Research on the Prevention of Seller's Contract Risk in Financial Leasing Business

TANG Hui

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

Abstract: Financial leasing is a new transaction system with the development of economy, which is significantly different from the traditional installment sales transaction mode. In the construction of power energy point projects, especially in the procurement of power generation equipment, financial leasing becomes a common financing means. From the perspective of power generation equipment seller, this paper analyzes and discusses the contract execution risks and preventive measures faced by power generation equipment seller based on the significance of financial leasing and the role of relevant parties, hoping to provide some reference for power generation equipment manufacturing industry.

Key words: financial leasing business; seller; contract; risks and risks' preventive measures

2015年8月, 国办发〔2015〕68号文件——《国务院办公厅关于加快融资租赁业发展的指导意见》明确指出, “鼓励融资租赁公司积极拓展新一代信息技术、高端装备制造、新能源、节能环保和生物等战略性新兴产业市场”。融资租赁已经成为电力能源点项目建设中越来越常见的融资手段。在实际项目管理过程中, 客户使用融资租赁的手段采购发电设备的现象也越来越多, 这对在融资租赁业务中承担出卖人角色的发电设备制造厂商的项目风险管控提出了新的挑战。

文献[1]对出卖人承担回购义务或履行担保义务、出卖人无法向承租人追偿或无法受偿以及承租人对租赁物设置了抵押权或者转让了租赁物后出卖人无法主张设备取回权等三类风险进行了分析。文献[2]对融资租赁交易中出租人、承租人、出卖人的破产法律问题进行了研究。本文作者认为在电力能源建设这个特殊行业中, 融资租赁业务实质是作为融资手段出现, 是为推动货物采购合同执行服务的。因此对合同履行过程给予高度关注, 认为发电设备制造供货出卖人在项目管理、合同履行环节风险居主要地位, 旨在针对使用融资租赁方式采买发电设备的模式进行分析, 并对开展融资租赁业务所

1 过往研究和本文研究方向

收稿日期: 2021-07-05

作者简介: 唐辉 (1980—), 男, 2003年毕业于哈尔滨工业大学机械电子专业, 硕士学位, 经济师职称。现在东方电气集团东方电机有限公司发电机分厂工作, 主要从事分厂行政管理工作。

应遵循的原则进行探讨。

2 开展融资租赁业务的现实意义

从出卖人的角度来分析,与传统的销售模式相比,融资租赁销售模式存在以下两大明显优势:

2.1 有利于促成实质交易行为

对于能源电力行业来说,发电设备产品显著特点是产品技术附加值高、产品价格高,客户受国家政策、短期盈利能力等因素限制,即使有购买需求,也有可能受到短期资金不足的影响而无法有效开展设备采买。融资租赁提供给客户除自筹资金、银行贷款外第三条融资渠道,将客户模糊的、远期的需求转变为现实的需求从而促成实质交易行为^[1],促进物资采买行为落地,释放发电设备供给端产能,提升出卖人销售额和销售业绩。

2.2 有利于货款回收

相较于传统的分期付款销售模式,出卖人在融资租赁模式下通常能减小部分货款回收成本,缩短回收设备货款周期,有利于减少资金占用,提升生产经营效率,提高资金周转率。

3 融资租赁业务中各方关系、角色演变、责任担当及权益享有的分析

根据合同法第237条,融资租赁合同是出租人根据承租人对出卖人、租赁物的选择,向出卖人购买租赁物,提供给承租人使用,承租人支付租金的合同。

具体实践中,融资租赁合同晚于货物采购合同签订成为普遍现象。客户与发电设备制造商作为货物采购合同的买方和卖方,首先签订货物采购合同,后续由于客户融资的需要,客户引入第三方融资租赁公司作为出租人。客户作为融资租赁交易的中心方,与融资租赁公司、发电设备制造商签订融资租赁合同,融资租赁公司获得物资采购合同项下设备的货物所有权,将货物作为租赁物出租给客户使用,客户向融资租赁公司支付租金。

因此在整个融资租赁业务中,项目管理对象由原物资采购合同变为融资租赁合同,原物资采购合同的买方演变为承租人,原物资采购合同的卖方演变为出卖人,新进第三方为融资租赁公司,角色为

出租人。

经以上分析,三方承担责任和享有权利如下:

出租人:承担了融资租赁合同项下价款的支付责任及取得融资租赁合同项下货物的所有权。

承租人:出租人除承担融资租赁合同项下合同价款的支付义务以及依约取得全部租赁物所有权外,融资租赁合同项下的其他权利、义务仍由承租人享有和承担。

出卖人:享有收取融资租赁合同项下协议价款的权利,物资采购合同项下的其他权利、义务仍由出卖人享有和承担。

4 现存问题

在承租人引入出租人后,项目的整个执行环节增多。三方的合同责任、义务边界容易混乱,模糊不清。由于出租人在整个融资租赁行为中为出资方,承租人在市场上的买方地位以及与出租人天然的联系,导致两方在融资租赁业务中均占有强势地位。出卖人应特别注意后续合同履约的风险,注意明确约定出租人、承租人、出卖人之间的责任、义务、权利的界限,防止出租人和承租人随意更改上述界限。

4.1 融资租赁公司的资质、实力、业绩的确认

由于出卖人属于发电设备制造业,融资租赁公司属于金融服务业,两者属不同行业,无业务交集,存在天然的鸿沟。对出卖人而言,如何确认融资租赁公司自身实力能够满足发电设备交易本就是一个困难的问题。

4.2 融资租赁合同中涉及交易文件约定较多,且条款相互复合嵌套、引用,无法知悉其内容,为合同履行带来不可控因素

除三方融资租赁协议以外,融资租赁业务还存在出租人、承租人两方的《租赁协议》、《应收账款质押协议》等,出租人倾向于在三方融资租赁协议中直接引用有关协议和相关条款。由于文件约定较多且无法知悉其内容,出卖人评估风险的难度加大,应避免此类情况。

4.3 物资采购合同中由买方单方享有的权利、履行的义务,变为部分由出租人享有和履行,部分由承租人享有和履行。出卖人项目管理接口增多,项目

管理不确定性加大

由前所述，物资采购合同的权利和义务被人为割裂，鉴于出租人、承租人、出卖人处于不同行业，风控水平、流程规范、风险好恶等大不一样，出租人利用其市场强势买方地位，倾向于在融资租赁合同中寻求特权条款，在条款中谋求利益，撇开责任，直至寻求单方面终止融资租赁合同的权力。这对正常物资采买行为实施埋下了巨大的隐患。

4.4 融资租赁协议约定不合理，出卖人承担义务超出货物采购合同的约定范围

出卖人应仔细研究货物采购合同，识别各项权力义务，以此为框架，把控融资租赁协议条款，防止单方面扩大自身责任。

比如出租人和承租人利用市场上强势地位，可以对支付路径提出要求，要求出租人首先将款项支付给承租人，再由承租人支付给出卖人。此时，出卖人应主要考虑如何规避资金被承租人挪用而不能及时回款的风险。

再比如，履约保函有一定的格式限制，也有一定的条件。出租人为保障自身权益，会要求出卖人开具履约保函。但是从出卖人执行合同角度判断，一般来说一份合同的受益方有且仅有一方，因此对应的保函也应仅开具一份。开具履约保函的义务可以由出卖人承担，但是需要出租人和承租人协商确定受益人。

5 对于融资租赁业务中的风险防控建议

5.1 了解客户、了解融资租赁公司，审慎开展融资租赁业务

除涉及客户关系外，融资租赁业务还涉及与融资租赁公司关系。在开展融资租赁业务前应做好尽职调查。对于融资租赁公司的背景、支付能力、过往业绩、融资租赁合同的合法性、合规性、真实性、合理性做好调查，对于融资租赁业务的真实目的进行确认，对于发电设备制造商自身是否有能力配合实现和满足客户对于工程建设款项融资的要求进行评估。避免为了单纯追求合同生效执行、货款回收一味迎合客户要求，从而低估了融资租赁业务的难度，忽视了融资租赁公司主体资格不符、融资租赁合同强加给出卖人不平等责任等而引发的潜在风险。

5.2 完善健全融资租赁业务管理制度

如何使融资租赁服务成为一个完善、安全、合规的产品，还需要从制度上进行完善。监管部门应健全融资租赁业务的行业规范，明确融资租赁业务的法律性质，规定出租人、承租人、出卖人在融资租赁业务中的权利、义务、违规违法后果。出卖人要针对最新的业态发展适时分析、及时反应，整合财务、法务、市场、项目资源对融资租赁业务建立立项、组织、实施、风险评估等维度的企业管理制度和相关文本模板，并不断完善，以便合规合法开展业务活动。

5.3 融资租赁合同细节考虑周全，条款设定合理，避免扩大风险

在合同变更时，应严格按照契约精神，平等协商，严格按照规章制度办理业务。发电设备制造商要力争平等协商原则，接受客户合理要求。对客户提出的超出自身服务范围，增加自身运营风险的，不能一味委曲求全，以损害自身利益为代价，不能抱着“先答应再想办法”的想法，随意予以接受。

融资租赁合同条款的约定应当明确、具体，要从实际出发，一定要使用清楚明晰、不容易引发歧义的表述。出卖人应注意对支付方式、支付流程、履约保函开具、保险受益人、货款拖欠追索等方面做出合理安排。注意融资租赁合同中权利义务的设定，不能为了短期内盲目扩大销售，而增大出卖人承担的责任。

5.4 出卖人加强与相关金融服务企业的合作

出卖人应加强与出卖人合作银行所属融资租赁公司、与有业务往来的央企财务公司等金融服务企业的融资信息对接，主动向承租人推介相关融资渠道。出卖人应创新思维模式，主动作为，聚焦于夯实融资租赁业务的基础条件，着眼于满足商事活动的实际需求，在出租人的自身资质上下功夫，由接受出租人的角色变为推荐、甚至引入出租人的角色，变“被动”为“主动”，化“双赢”为“三赢”。

参考文献：

- [1]程娜. 机械行业融资租赁业务风险防范浅析——基于设备出卖人视角的分析[J]. 现代商业, 2015(7):130-131
 [2]彭雪梅. 融资租赁交易中的破产法律问题研究[D]. 重庆大学, 2016