

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM



2021

第35卷 总第139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



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

第三十五卷第三期

二〇二一年九月

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



公开 ISSN 1001-9006
发行 CN 51-1333/TM

第35卷第3期(总第139期)
出版日期:2021年9月25日

国内邮发代号:62-187
国内定价:8.00元



2021

第 35 卷第 3 期 总第 139 期
(季刊, 1987 年创刊)

东方电气评论



目次

编辑委员会

主任委员: 王为民

副主任委员: 董娜 杨永

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

秘书长: 杨永

主管: 中国东方电气集团有限公司

主办: 中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会

主编: 王为民

副主编: 董娜 杨永

本期责任编辑: 王为民

英文编辑: 王为民

编辑出版: 《东方电气评论》编辑部

地址: 成都市高新西区西芯大道 18 号

邮编: 611731

电话: 028-87898262/63

传真: 028-87898267

电子信箱: dfdqpl@dongfang.com

印刷单位: 成都市新都华兴印务有限公司

国内发行: 四川省报刊发行局

国外发行: 中国出版对外贸易总公司北京 782 信箱

基础研究

- 针对控制保护逻辑的网络安全攻击对燃煤发电机组汽轮机运行的危害研究
 桑梓 赵铨冲 沈宇等(1)
- 工业控制系统可编程逻辑控制器形式化建模
 马海迎 袁晓舒 桑梓等(9)
- 基于虚假数据注入的发电厂汽轮机网络安全攻击研究
 袁晓舒 张愉菲 杨波等(17)
- 某燃料电池动力系统管道密封性能分析
 蒲守武 罗仁超 刘彦萍等(25)
- 蓄电池供电的三相 PWM 变流器直流电容设计
 刘静波 王多平 田军等(29)
- 直流式换热器壳侧流阻特性分析 任毅 王晓丁 李琼等(33)

燃煤发电

- 浅析海外燃气轮机电厂的首次检修策划 陈欣(39)
- 铜引线冷弯成型工艺研究 杨宗明 杨军 尹襄(43)
- 启动扩容器的选型计算 隆琼 易广宙 邓科(48)
- 交流电机 VPI 模具对线圈介质损耗因数影响的研究
 杨帅 黄泽 周进等(50)
- 回转式空气预热器波纹板换热元件片的三维设计及数值模拟计算探讨
 黄雪飞 王筱箴(54)
- 东方 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉的开发
 巩李明 邓启刚 刘杰等(58)

汽轮机

- 重载滑动轴承顶轴设计 何江南 杨灵 陈洪炼等(63)
- 筒形汽缸隔板结构对其变形特性的影响研究
 章艳 刘东旗 赵仕志等(66)
- 350 MW 水氢氢汽轮发电机定子水路漏氢分析与处理
 靳旭亮 李锋 宋清松(70)

水力发电

- 东电“十三五”水电技术发展与“十四五”前景展望 余小波(74)

核能发电

- 小型模块化核反应堆集成供货的项目管理 杨品铮(80)
- CAP1000 核电堆内构件出口管嘴焊接防变形控制技术
 董明亮 舒华安 李莹等(84)
- 简讯 (24)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*q*A4*88*zh*p¥8.00*750*18*2021-03

DONGFANG ELECTRIC REVIEW

3

2021

2021-9-25 Vol. 35 No. 3
(Quarterly, since 1987)

CONTENTS



BASIC RESEARCH

- Hazard Assessment of Steam Turbine for Cyber Attack on Control and Protection Logic *SANG Zi, ZHAO Chengchong, SHEN Yu, et al*(1)
- Formal Modeling for Programmable Logic Controller of Industrial Control Systems *MA Haiying, YUAN Xiaoshu, SANG Zi, et al*(9)
- Research on False Data Injection Attack of Power Plant Steam Turbine *YUAN Xiaoshu, ZHANG Yufei, YANG Bo, et al*(17)
- Analysis of Pipeline Sealing Performance of A Fuel Cell Power System *PU Shouwu, LUO Renchao, LIU Yanping, et al*(25)
- DC Capacitance Design of Battery-powered Three-phase PWM Converter *LIU Jingbo, WANG Duoping, TIAN Jun, et al*(29)
- Analysis of Flow Resistance Characteristics for Once-through Heat Exchanger *REN Yi, WANG Xiaoding, LI Qiong, et al*(33)

THERMAL POWER/COAL-FIRED POWER

- A Brief Analysis of First Inspection Planning and Scheme for the Oversea Gas Turbine Power Plant *CHEN Xin*(39)
- Study on the Cold-bending Forming Process of Copper Lead *YANG Zongming, YANG Jun, YIN Xiang*(43)
- The Selection Calculation Method of Start-up Expansion Tank *LONG Qiong, YI Guangzhou, DENG ke*(48)
- The Study on the Influence of VPI Mock on Dielectric Loss of Stator Coil for AC Rotating Machine *YANG Shuai, HUANG Ze, ZHOU Jin, et al*(50)
- Discussion of the Three-dimensional Design and Numerical Simulation for Rotary Air Preheater Heating Elements *HUANG Xuefei, WANG Xiaozhen*(54)
- Development of 700 MW High Efficiency Ultra-supercritical CFB Boiler *GONG Liming, DENG Qigang, LIU Jie, et al*(58)

TURBINE

- Design of Jacking Oil for Heavy-duty Sliding Bearing *HE Jiangnan, YANG Ling, CHEN Honglian, et al*(63)
- Study on the Influence of Diaphragm Structure of Cylindrical Casing on Its Deformation Characteristics *ZHANG Yan, LIU Dongqi, ZHAO Shizhi, et al*(66)
- Analysis and Treatment of Hydrogen Leakage from Water Cooled Stator Windings Circuit of 350 MW *JIN Xuliang, LI Feng, SONG Qingsong*(70)

HYDRO POWER

- The Development of Hydropower Technology in the 13th Five-Year Plan and the Prospect of the 14th Five-Year Plan of Dongfang Electric *YU Xiaobo*(74)

NUCLEAR POWER

- Project Management for Integrated Supply of Modular Miniature Nuclear Power Reactor *YANG Pinzheng*(80)
- Deformation Control Technology for Nozzle Welding of Internals Outlet in CAP1000 Nuclear Power Plant *DONG Mingliang, SHU Huaan, LI Ying, et al*(84)

- NEWS IN BRIEF (24)

EDITORIAL BOARD

Chairman: WANG Weimin

Vice Chairmen: DONG Na, YANG Yong

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

Chief Secretary: YANG Yong

Sponsor: Dongfang Electric Corporation

Chief Editor: WANG Weimin

Vice Chief Editors: DONG Na, YANG Yong

Executive Editor: WANG Weimin

English Editor: WANG Weimin

Edited and Published by:

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

Postal Code: 611731

Tel: 028-87898262 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.)

针对控制保护逻辑的网络安全攻击 对燃煤发电机组汽轮机运行的危害研究

桑梓^{1*} 赵铨冲² 沈宇² 杨波¹ 刘丝丝¹ 谢云云² 袁晓舒¹

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 南京理工大学, 南京 210094

摘要: 汽轮机是燃煤发电机组的三大主设备之一, 而汽轮机控制保护逻辑是实现汽轮机主要控制和保护功能的载体, 可能成为网络安全攻击的目标。本文通过介绍控制保护逻辑的基本原理及其工程实现, 提出了一种针对汽轮机控制保护逻辑的网络安全攻击方法, 并分析了网络安全攻击对汽轮机运行的危害, 最后通过基于仿真实验平台的网络安全攻击实验, 验证了针对控制保护逻辑的网络安全攻击能够危害汽轮机的正常运行, 提出了强化控制系统通信鉴权的建议。

关键词: 汽轮机; 控制保护逻辑; 网络安全攻击

中图分类号: TP393.08

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0001-08

Hazard Assessment of Steam Turbine for Cyber Attack on Control and Protection Logic

SANG Zi^{1*}, ZHAO Chengchong², SHEN Yu², YANG Bo¹, LIU Sisi¹, XIE Yunyun², YUAN Xiaoshu¹

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

2. Nanjing University of Science and Technology, 210094, Nanjing, China)

Abstract: Steam turbine is one of the three major components in coal-fired generating units. As the carrier of steam turbine control and protection function, control and protection logic is likely to be the target of cyber attack. This paper introduces its basic principle and engineering implement, proposes the cyber attack methods for control and protection logic, and also analyzes the damage for a running steam turbine. Finally, some cyber attack experiments are performed by using cyber security simulation testbed. The experiment results illustrate that cyber attack on control and protection logic endangers the safety of steam turbine, and proposes some suggestions to strengthen the authentication management of communication in the control and protection system for steam turbine.

Key words: steam turbine; control and protection logic; cyber attack

燃煤发电机组是利用煤的化学能转变成电能的发电能源装备, 由锅炉、汽轮机、发电机三大主设备构成。其中, 汽轮机是将锅炉燃烧产生的蒸汽热能转变成机械动能的旋转设备, 实现了带动发电机旋转发电的重要功能。汽轮机本体主要由汽缸、阀门、转子、轴承、隔板、连通管、汽封等多个部件构成。阀门是控制汽轮机运转的唯一执行机构, 包括

主汽阀和调节阀两类阀门。主汽阀作为汽轮机的总开关, 使蒸汽能够进入汽轮机, 并防止汽轮机发生超速等安全事故的发生。调节阀实现了蒸汽进汽量的调节, 能够改变汽轮机的转速和功率。

汽轮机控制保护系统是一套高可靠性、强实时性的工业控制系统, 通过监测汽轮机的各项运行参数, 执行控制保护逻辑, 控制主汽阀、调节阀的开

收稿日期: 2021-07-09

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目资助: 汽轮机网络安全一体化保护系统关键技术研究; 项目编号: 2019YFG0534。

作者简介: 桑梓(1985-), 男, 2012年毕业于南京理工大学自动化学院控制科学与工程专业, 博士, 高级工程师。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司能源装备工控网络安全工程实验室从事能源装备工控网络安全技术研究工作。邮箱: sangzi@dongfang.com。

度,实现对汽轮机运行的控制和保护功能。在工程上,工业控制系统已广泛应用现代计算机和网络通信技术,导致系统存在多种类型的网络安全风险。控制保护逻辑作为汽轮机控制保护功能的载体,常以程序或配置的方式部署在汽轮机控制保护系统之内,容易成为网络安全攻击的首要目标。目前国内对于工控网络安全的研究主要集中在拒绝服务、控制系统漏洞研究等方面^[1-4],针对控制保护逻辑的网络安全攻击研究相对较少。

本文以燃煤发电机组汽轮机控制保护逻辑为研究对象,介绍汽轮机控制保护原理及其工程实现,分析网络安全攻击控制保护逻辑对汽轮机运行的危害,并采用基于实际控制保护系统硬件在环的半实物仿真实验方法,验证针对控制保护逻辑的网络安全攻击对汽轮机运行的危害。

1 汽轮机控制保护逻辑

1.1 汽轮机控制保护系统

汽轮机控制保护系统由数字电液控制系统(DEH, Digital Electronic Hydraulic control system)、危急遮断跳闸系统(ETS, Emergency Trip System)、安全监视系统(TSI, Turbine Supervisory Instrument)三个子系统构成。

汽轮机控制功能是通过 DEH 采用经典比例 - 积分 - 微分(PID)控制算法实现汽轮机的转速、功率、压力、总阀位控制。汽轮机保护功能是通过 TSI 和 DEH 采集涉及到汽轮机安全运行的重要运行参数,并判断任一参数是否超过限制值,若超限则触发 ETS 快速关闭主汽阀,阻止蒸汽进入汽轮机,从而实现汽轮机的安全停机。

1.2 汽轮机控制保护逻辑的工程实现

从硬件层面,在具体工程实现中,DEH 常采用分散控制系统(DCS, Distributed Control System)来实现。ETS 采用冗余大型可编程逻辑控制器(PLC, Programmable Logic Controller)或采用 DCS 控制保护一体化系统实现。TSI 采用专用采集装置实现,一般不与 DEH 和 ETS 进行一体化集成。

从软件层面,开发人员通常使用组态软件对具体电厂的 DEH、ETS 等控制保护系统进行组态,完成控制保护逻辑的编写、下装、执行。组态软件是一套功能强大的控制系统配置工具,支持控制器状

态读取、状态切换、系统配置、逻辑组态、逻辑下装、图形组态、变量强制等多种功能,拥有操作控制系统的最高权限。DCS 常用类似 SAMA 图的图形化逻辑组态环境,PLC 常用符合 IEC61131 - 3 标准编程语言的编程配置环境。

组态是指“用户根据系统要求对不同的功能模块进行适当组合与连接的过程”。功能模块是指“按规定格式编制成的具有某种输入/输出、运算、处理、调节控制、报警等功能的程序模块”^[5]。工程上的控制保护逻辑常采用程序或配置的形态。逻辑中包含了大量的功能模块,例如 PID 运算块、输入/输出块、高限/低限块等等。系统组态的主要过程如图 1 所示,具体如下:

(1)配置控制器。对控制器进行初始化配置,设置控制周期、通信模式、任务优先级等基本配置,具有部分安全功能的控制器支持设置登录认证等访问控制机制。

(2)配置 I/O 卡件和硬件输入输出点。在控制器中配置用于采集输入和信号输出的 I/O 卡件,设置信号类型、采样滤波时间、输出保持时间等 I/O 配置,配置相应的硬件输入输出点。

(3)编写控制保护逻辑。利用组态软件提供的各类功能模块,建立逻辑页,在每个逻辑页中搭建具体的运算逻辑,设置功能模块的参数,设置逻辑页之间的页入页出点,关联硬件输入输出点,完成汽轮机的控制和保护逻辑的编写。

(4)编译检查。通过组态软件的编译功能,自动化检查每个逻辑页的控制逻辑合理性,避免出现变量重名、硬件输入输出点错用、功能模块错用、功能模块未连线等问题,最后生成控制器可以执行或读取的二进制文件或配置文件。

(5)逻辑下装。利用组态软件的下装功能,将编译完成的二进制文件或配置文件通过以太网或其它通信手段传到控制器内部。控制器内一般具备实时操作系统,例如 Vxworks、QNX 等等,支持这些文件的读取和动态加载。组态软件与控制器之间的通信规约常采用私有协议,一些控制系统厂商的私有协议缺乏完善的认证机制,采用明文进行传输。

(6)控制器运行。在组态软件完成下装后,切换控制器状态,运行新的控制和保护逻辑。部分

DCS 厂商的控制器支持在线下装功能,下装后不需要切换控制器状态即可运行新逻辑。

从以上步骤可以看出,汽轮机控制保护系统的组态过程依赖于现代计算机和网络通信技术。组态软件对于控制系统而言具有极高的权限,组态下装的通信过程缺乏鉴权机制,整个组态过程存在极大的网络安全隐患。

1.3 逻辑组态过程的典型实现分析

汽轮机控制保护系统的逻辑组态软件因开发厂商不同而各不相同,但组态软件的功能均类似,组态过程均符合图 1 所示过程。本文以 TD6000 系统和 Ovation 系统为例,具体介绍汽轮机逻辑组态过程的实现。

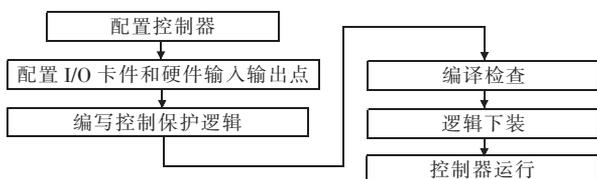


图 1 控制系统逻辑组态过程

TD6000 系统组态软件采用微软公司的 Visual C++ 语言编写,运行在 Windows 操作系统上,如图 2 所示,并由 TD Builder、TD Supervisor 等多个子软件组成,见表 1。TD6000 的逻辑组态过程是:工程师利用 TD Builder 建立工程,增加控制器、操作员站、数据点,配置系统硬件 I/O,分配控制区,并编写控制保护逻辑,关联数据点;利用 TD Supervisor 绘制操作员所用的图形界面并关联数据点,最后在 TD Builder 上统一向控制器下装控制保护逻辑,向操作员站下装图形界面。

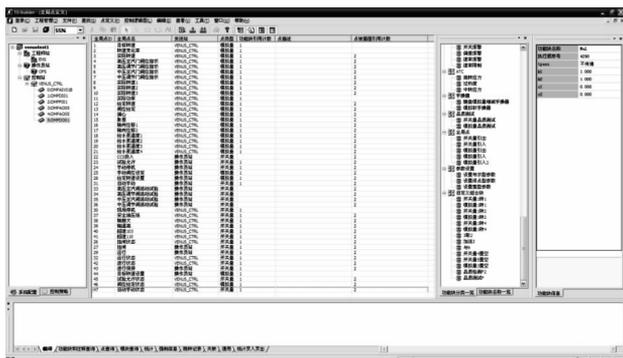


图 2 TD6000 逻辑组态软件

Ovation 系统组态软件由 Ovation Engineering Tools、Ovation Applications、Ovation Utilities 三大部分构成,可运行在 Windows 或 Unix 操作系统上,如图 3

所示。

表 1 TD6000 系统组态软件功能说明

软件名称	软件功能	操作权限
TD Builder	查看、配置控制系统,删除逻辑,下装逻辑,重启控制器,初始化控制器,编写控制保护逻辑,关联数据点	工程师站
TD Supervisor	人机交互界面(HMI),关联 HMI 画面与控制保护逻辑的数据。工程师站权限可以编写界面,操作员站仅能查看界面	操作员站/ 工程师站
TD Monitor Plus	监控控制保护系统控制器和 I/O 卡件故障状态	操作员站/ 工程师站
TD User Manager	管理组态软件用户操作权限	工程师站

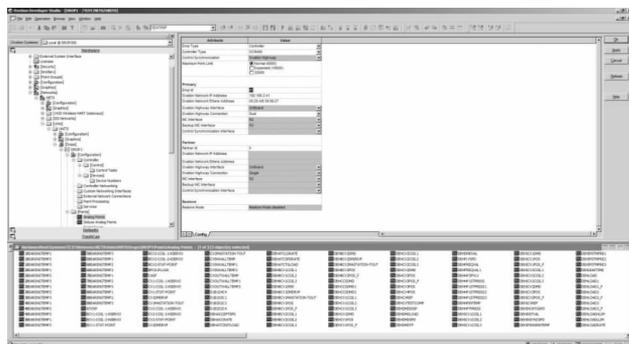


图 3 Ovation 系统组态软件

Ovation 系统的逻辑组态过程是:工程师利用 Ovation Developer Studio 建立工程,增加控制器、操作员站、数据点,配置系统硬件 I/O,分配控制区,利用 OvationControl Builder 编写控制保护逻辑,关联数据点,利用 Ovation Graphics Builder 绘制操作员所用的图形界面并关联数据点,最后在 Ovation Developer Studio 上统一向控制器下装控制保护逻辑,向操作员站下装图形界面。该系统组态软件的具体功能如表 2 所示。

表 2 Ovation 系统组态软件功能说明

软件名称	软件功能	操作权限
Ovation Developer Studio	查看、配置控制系统,清空逻辑,下装逻辑,重启控制器,初始化控制器等	工程师站
OvationControl Builder	编写控制保护逻辑,关联数据点	工程师站
Ovation Graphics Builder	编写人机交互界面(HMI),关联 HMI 画面与控制保护逻辑的数据	工程师站
Graphics	显示控制保护逻辑的运行画面,实现人机交互操作	操作员站/ 工程师站
SignalDiagram	显示控制保护逻辑,查看逻辑内部的实时运行数据	操作员站/ 工程师站

TD6000 系统和 Ovation 系统的逻辑下装、逻辑清空等关键功能均利用了基于 TCP/IP 的以太网通信技术实现。TD6000 的通信协议是 TFTP 协议, Ovation 的通信协议是厂商自定义的私有协议。TD6000 系统和 Ovation 系统的逻辑下装、逻辑清空过程如图 4 所示。

2 网络安全攻击方法及危害

2.1 控制保护逻辑的网络安全攻击

针对 DEH 控制保护逻辑的网络安全攻击可以针对工程师/操作员站、通信网络、控制器三者之中的任意一个或多个。工程师站具有直接向控制器下发逻辑操作指令的权限;操作员站虽然没有直接操作权限,但可以作为攻击跳板^[6];通信网络是逻辑操作功能的载体,当通信协议未做好安全防护时,攻击者可直接利用通信网络发动攻击^[7];作为网络安全攻击的最终目标,控制器本体是执行控制保护逻辑的实际对象,其嵌入式操作系统和应用层软件也可能存在网络安全漏洞^[8]。

TD6000 系统的 TFTP 协议和 Ovation 系统的私有协议均采用明文传输方式,缺少鉴权机制,攻击者可以利用连入到系统所在网络的任意终端发动重放攻击,利用重放攻击可以实现对汽轮机控制保护系统控制保护逻辑的网络安全攻击。

2.2 网络安全攻击对汽轮机运行的危害分析

汽轮机控制保护逻辑实现了汽轮机的主要控

制功能和保护动作功能,因此,针对控制保护逻辑的网络安全攻击会对汽轮机的安全运行造成不良影响。表 3 简要分析了攻击者可能采取的具体攻击方法。

2.3 典型攻击过程

通过前述攻击方法的研究可以发现,无论攻击者要达到何种目的,其攻击目标主要是 DEH 和 ETS,所能采用的手段主要是破坏逻辑和篡改逻辑。一旦攻击者掌握足够多的汽轮机及其控制保护系统相关知识,就可能利用这两种手段实现组合攻击,从而达到危害性更大、隐蔽性更强的攻击效果。

针对先验知识不足的攻击者,其主要攻击手段是破坏原有控制保护逻辑。这种攻击方式的典型过程是直接清空 DEH、ETS 的控制保护逻辑,瘫痪 DEH 的监视、控制功能,瘫痪 ETS 的保护功能。但由于 DEH 和 ETS 具有卡件 I/O 保持或恢复默认状态的功能,因此这种攻击可能会导致汽轮机保护停机,很难进一步导致损坏汽轮机本体的恶性事故(如超速飞车)。同时攻击过程较容易被现场运行人员及时发现,从而触发手动停机。攻击过程如图 5 所示。

针对先验知识充足的攻击者,其主要攻击手段更多的依赖于篡改逻辑的方式实现,多数情况下表现为破坏逻辑和篡改逻辑相结合的组合攻击方式。其典型网络安全攻击过程是攻击者利用先验知识编写恶意逻辑,利用组态过程将恶意逻辑分别下装到 DEH 和 ETS 中,实现欺骗现场运行人员、操纵汽

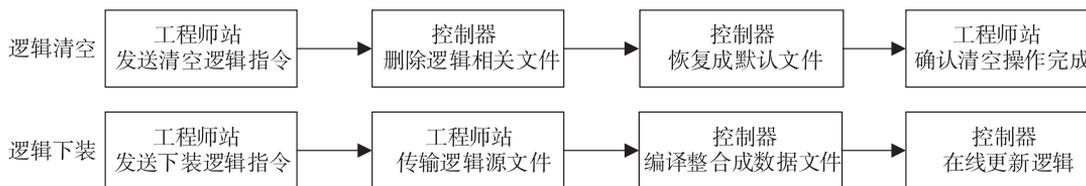


图 4 TD6000 系统和 Ovation 系统的逻辑清空和下装过程

表 3 针对汽轮机控制保护逻辑的网络安全攻击方法

攻击目的	攻击效果	攻击手段	预期危害
欺骗	运行人员被假数据欺骗	利用定值模块替换原有数据采集模块,令操作员站界面维持攻击前状态	运行人员无法获知汽轮机运行状态,但不会采取应急响应措施
中断	汽轮机跳闸	篡改汽轮机保护相关功能模块,或清空 DEH 所有逻辑	主汽阀关闭,汽轮机停止运行
降效	汽轮机输出功率减少	篡改目标功率、功率上升率或功率 PID 等相关功能模块,令目标转速无法达到目标功率	减少发电功率,无法满足电网要求

轮机调节阀、瘫痪汽轮机保护等目的,从而造成更加严重的危害。攻击过程如图 6 所示。

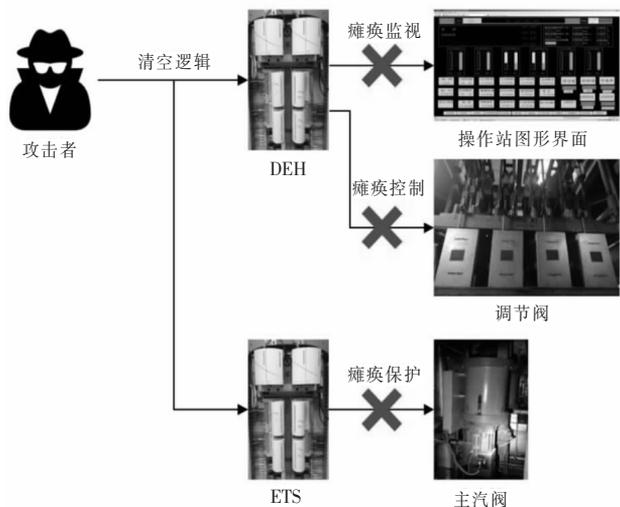


图 5 破坏汽轮机控制保护逻辑的典型网络安全攻击过程

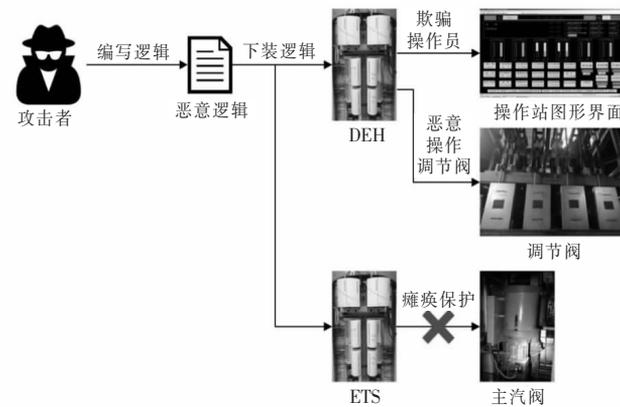
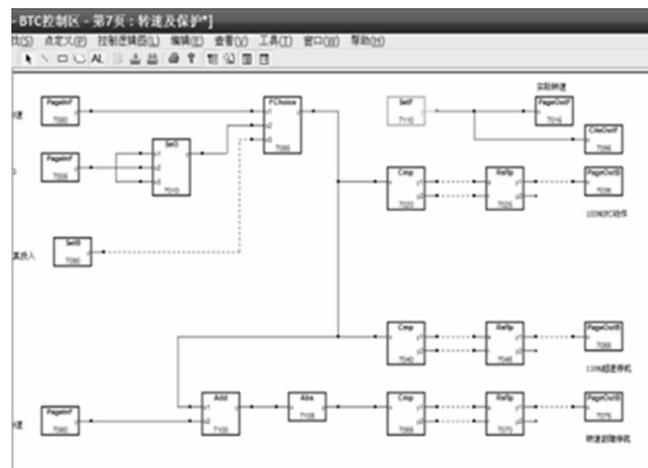
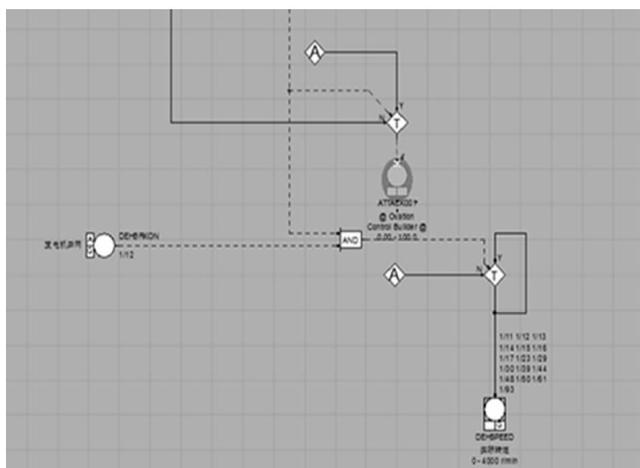


图 6 篡改汽轮机控制保护逻辑的典型网络安全攻击过程



(a) TD6000 系统恶意控制逻辑



(b) Ovation 系统恶意控制逻辑

图 7 运行人员欺骗实验恶意逻辑示意图

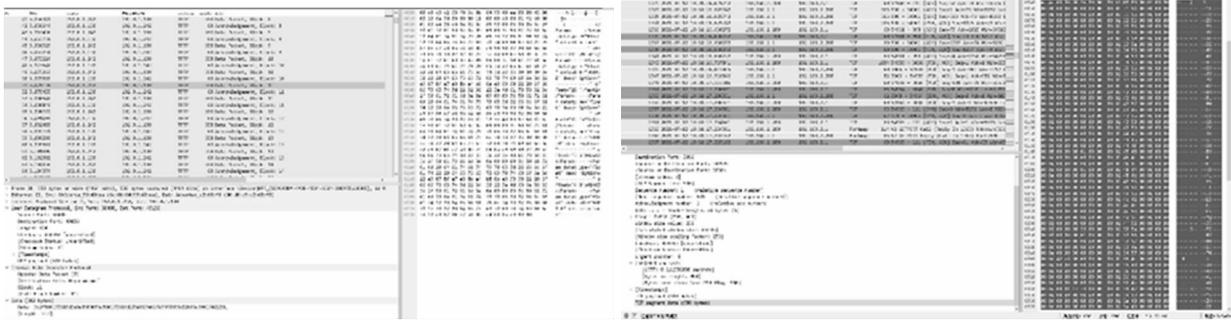
3 实验验证

为了验证网络安全攻击的效果及其对汽轮机运行的危害,本文利用半实物仿真实验平台分别在 TD6000 系统和 Ovation 系统上开展了逻辑破坏、逻辑篡改等多种实验。仿真实验平台采用文献[9]所述仿真测试方法搭建,能够实现汽轮机多种事故工况的模拟。在此基础上,采用篡改控制保护逻辑的攻击方式,分别开展运行人员欺骗、汽轮机跳闸、输出功率减少实验,验证针对控制保护逻辑的网络安全攻击对汽轮机运行的危害。

3.1 运行人员欺骗实验

电厂运行人员通过操作员站的图形界面查看机组运行情况,包括转速、功率、压力、阀位等运行参数以及汽轮机振动、偏心、轴向位移等安全参数。运行人员欺骗实验将通过网络安全攻击改变汽轮机运行参数的输出结果,向运行人员发送假数据,让运行人员误认为汽轮机处于正常运行状态。

实验的恶意逻辑设计思路是破坏 DEH 原有转速逻辑,将 DEH 采集的实际转速信号送到构造的输出点上,并构造一个 3 000 RPM 的常值送到原有的输出点上,如图 7 所示。恶意逻辑的重放攻击过程如图 8 所示。实验结果显示,在汽轮机启动升速工况下发动攻击,攻击后操作员站画面上的转速显示被篡改成 3 000 RPM,实际转速依然在上升过程中,运行人员无法获得实际转速值,如图 9 所示。



(a) 对 TD6000 系统的重放报文

(b) 对 Ovation 系统的重放报文

图 8 运行人员欺骗实验攻击过程

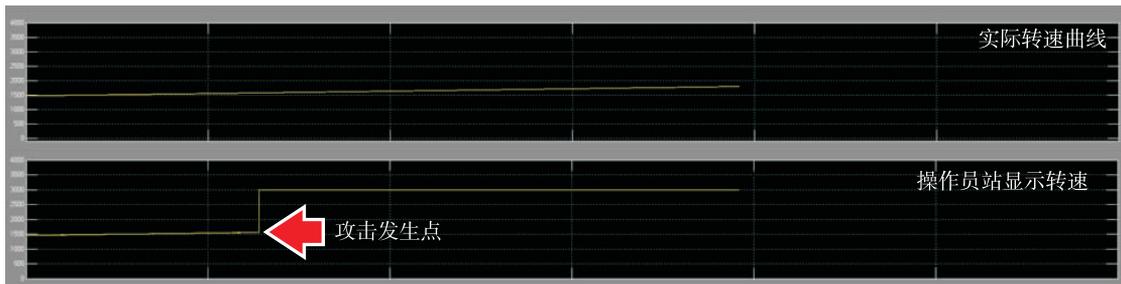


图 9 运行人员欺骗实验仿真结果

3.2 汽轮机跳闸实验

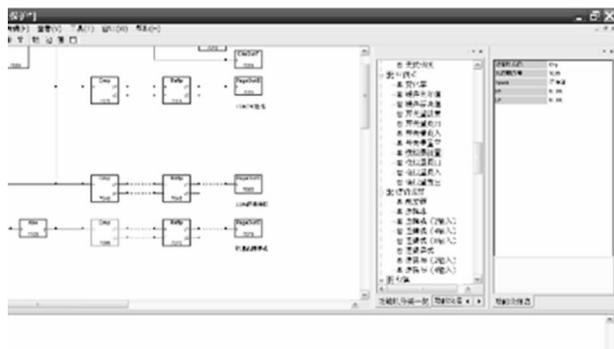
利用 DEH 转速相关的控制逻辑可以进一步实现汽轮机跳闸停机的效果。汽轮机跳闸实验通过控制保护逻辑重放攻击改变汽轮机转速故障的判断条件,诱发汽轮机转速故障,触发汽轮机保护动作,从而实现汽轮机跳闸停机。

实验的恶意逻辑设计思路是在 DEH 原有转速逻辑上将给定转速和实际转速的差值比较阈值从 400 篡改为 0,由于实际转速和给定转速存在一定的偏差,因此将触发转速故障,如图 10 所示。控制保护逻辑重放攻击过程如图 11 所示。实验结果显示,攻击后仿真系统模拟的汽轮机触发跳闸保护,主汽阀关闭,汽轮机转速惯性下降,逐步停机,如图 12 所示。

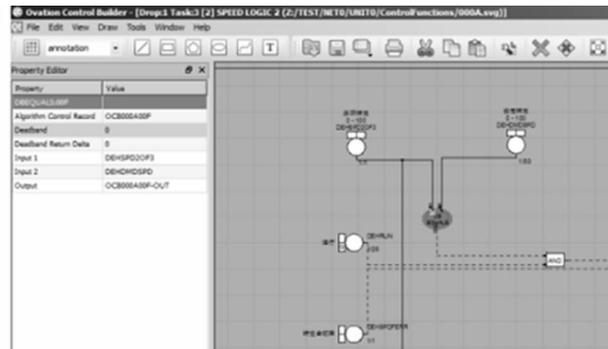
3.3 汽轮机输出功率减少实验

在汽轮机并网运行后,汽轮机转速跟随电网频率。汽轮机输出功率减少控制保护逻辑重放攻击将利用汽轮机并网后的功率控制逻辑,令汽轮机给定功率减少,令汽轮机功率 PID 控制跟踪错误的给定功率,从而减少汽轮机输出功率。

实验的恶意逻辑设计思路是在功率 PID 模块之前,将给定功率的比例模块设置值减半,令实际功率跟随减半后的给定功率,如图 13 所示。控制保护逻辑攻击过程如图 14 所示。实验结果显示,攻击后给定功率大幅度减少,导致功率 PID 运算得到的总阀位指令减少,仿真系统模拟的汽轮机输出功率减少,如图 15 所示。

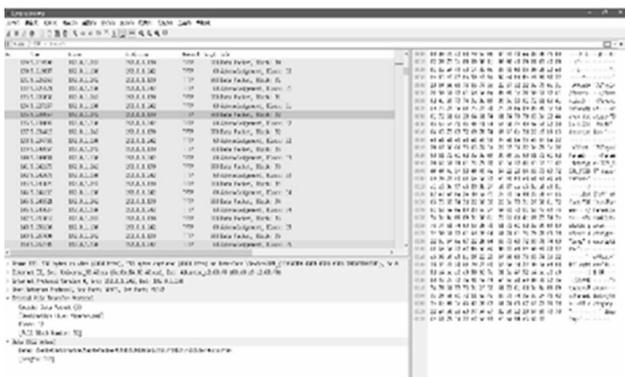


(a) TD6000 系统恶意控制逻辑

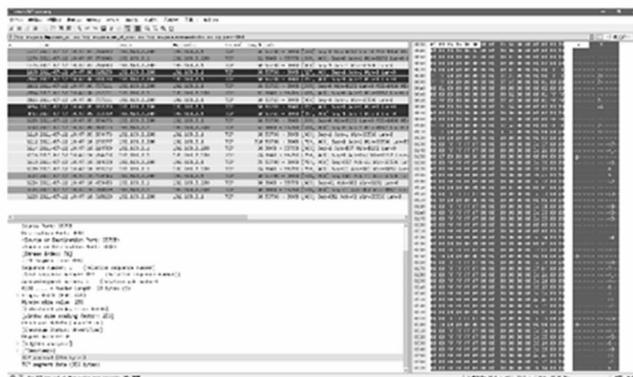


(b) Ovation 系统恶意控制逻辑

图 10 汽轮机跳闸实验恶意逻辑示意图



(a)对 TD6000 系统的重放报文



(b)对 Ovation 系统的重放报文

图 11 汽轮机跳闸实验攻击过程

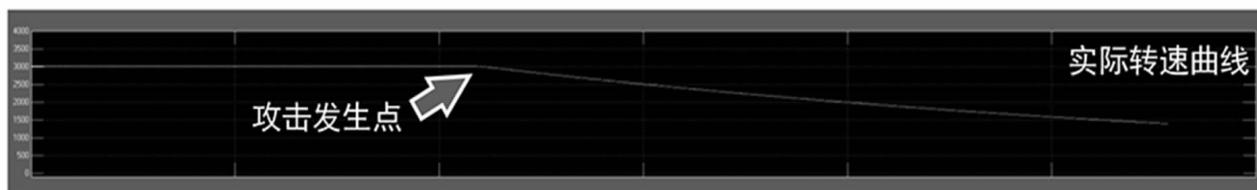
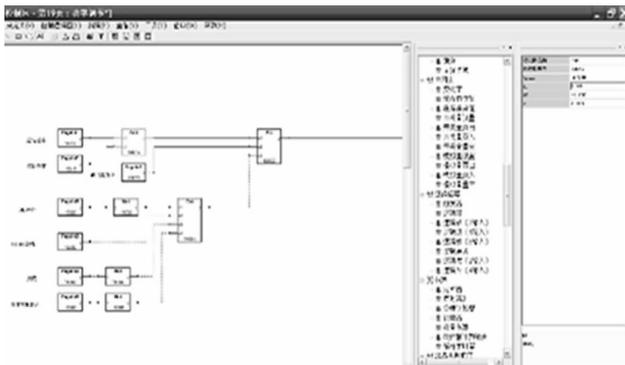
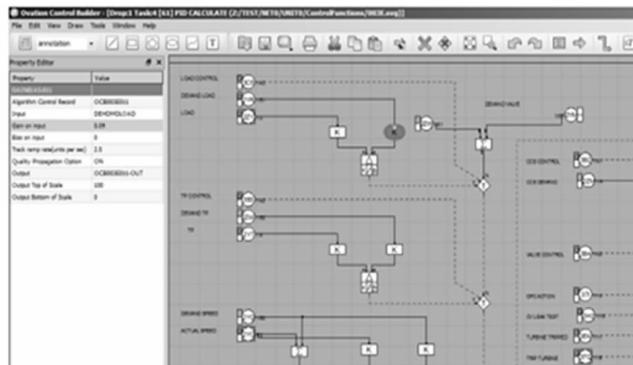


图 12 汽轮机跳闸实验仿真结果

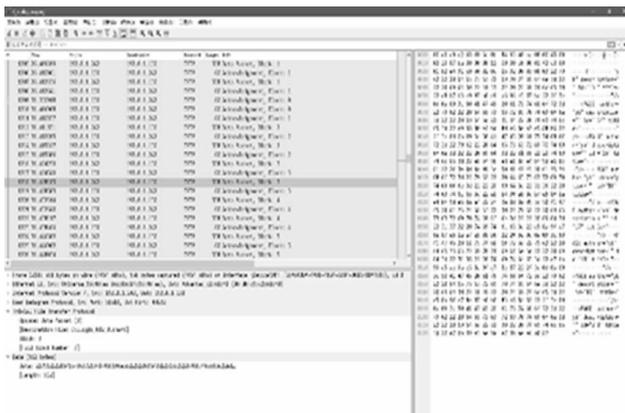


(a)TD6000 系统恶意控制逻辑

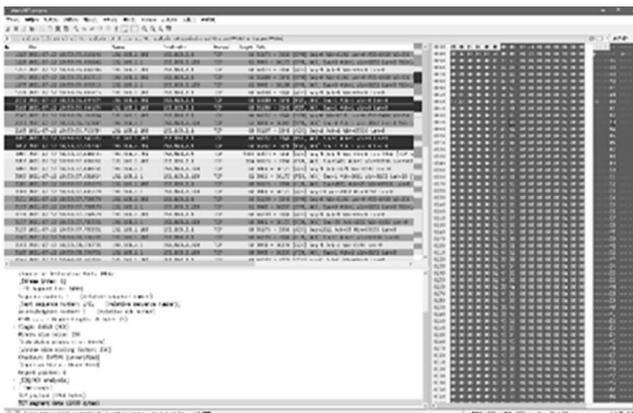


(b)Ovation 系统恶意控制逻辑

图 13 汽轮机输出功率减少实验恶意逻辑示意图



(a)对 TD6000 系统的重放报文



(b)对 Ovation 系统的重放报文

图 14 汽轮机输出功率减少实验攻击过程

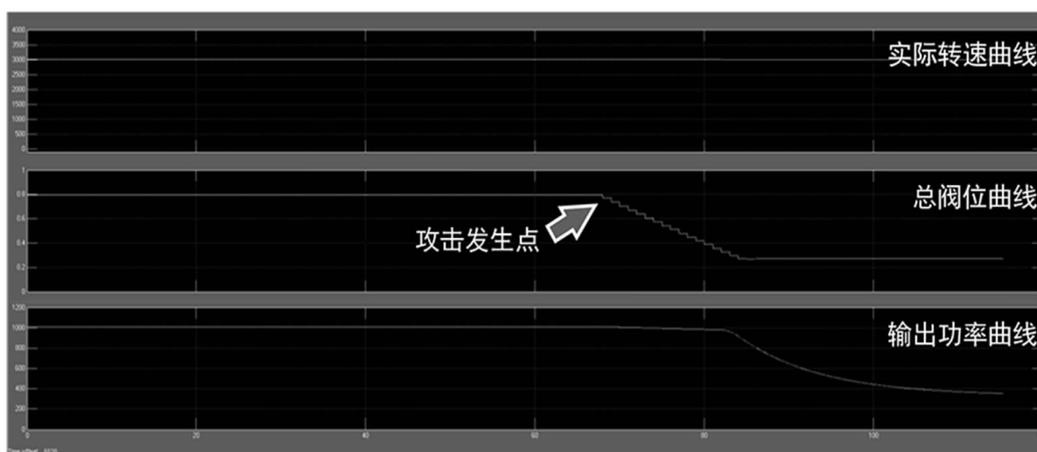


图 15 汽轮机输出功率减少实验仿真结果

4 结语

本文以汽轮机为研究对象,介绍了汽轮机控制保护逻辑及其工程实现,初步分析了针对控制保护逻辑的网络安全攻击方法及其对汽轮机运行的危害,进一步在仿真实验平台上分别开展了以运行人员欺骗、汽轮机跳闸、汽轮机输出功率减少、汽轮机超速为目标的网络安全攻击实验,实验结果验证了在 DEH 采用通信协议鉴权机制不足的控制系統场景下,利用控制保护逻辑的重放攻击能够对汽轮机的正常运行造成严重的不良影响,控制系统的通信协议设计和逻辑下装过程应当充分考虑鉴权机制和认证强度,避免由于鉴权不足给控制系统带来的网络安全危害。

电厂的实际控制系統更为复杂多样,汽轮机的运行监控和保护手段更为完备。本文研究所使用的实验环境及其控制保护逻辑已尽量接近现场真实环境,但部分逻辑仍与实际现场逻辑存在一定差异,因此,实验结果有待进一步在电厂实际运行环境中进行验证。

参考文献:

- [1] Stouffer K, Falco J, Scarfone K. Guide to industrial control systems (ICS) security[J]. NIST special publication, 2011: 800 - 82
- [2] 岳妍琪, 王彬. 油田工业控制系统信息安全浅析[J]. 自动化博览, 2013, 30(3): 38 - 42
- [3] 罗耀锋. 面向工业控制系统的入侵检测方法的研究与设计[D]. 浙江大学, 2013
- [4] 钟梁高. 基于可信计算的工业控制系统信息安全解决方案研究[D]. 大连理工大学, 2015
- [5] GB/T 26863 - 2011 火电站监控系统术语[S]. 全国电站过程监控及信息标准化技术委员会, 北京: 中国标准出版社, 2011
- [6] 罗彩君. 基于 Linux 系统的网络安全策略研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(17): 50 - 52 + 59
- [7] D. Dzung, M. Naedele, T. P. Von Hoff and M. Crevatin. Security for industrial communication systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(6): 1152 - 1177, doi: 10.1109/JPROC.2005.849714
- [8] 江维. 嵌入式操作系统安全机制研究与扩展实现[D]. 电子科技大学, 2006
- [9] 桑梓. 基于物理信息融合的汽轮机数字电液控制系统信息安全仿真测试方法研究[J]. 东方电气评论, 2018, 32(2): 15 - 20 + 28

欢迎投稿, 欢迎订阅!

工业控制系统可编程逻辑控制器形式化建模

马海迎¹ 袁晓舒^{2*} 桑梓^{2*} 何立栋¹

1. 南京理工大学, 南京 210094; 2. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要:近年来,工业控制系统面临的安全威胁引起了人们的广泛重视。不同于以往针对通信协议的攻击,攻击者逐渐将目标转移到控制器本身上来。为了应对这种新的威胁,人们开始研究如何对控制器建立有效的模型去刻画、分析这种攻击对系统运行的影响,进而设计及时、有效的防御策略。以微分方程、差分方程为代表的传统控制器模型难以刻画系统整体的控制逻辑,无法分析工业控制系统中存在的安全威胁。本文在总结相应研究的基础上,介绍了形式化建模方法、通用的工业控制系统以及常用PLC的结构;提出了一种采用形式化方法建立的PLC硬件以及控制逻辑模型,并通过简单案例阐述形式化方法中几种重要特性。

关键词:工业控制系统安全; PLC; 形式化方法

中图分类号: TP393.08

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0009-08

Formal Modeling for Programmable Logic Controller of Industrial Control Systems

MA Haiying¹, YUAN Xiaoshu^{2*}, SANG Zi^{2*}, HE Lidong¹

(1. Nanjing University of Science and Technology, 210094, Nanjing, China;

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

Abstract: In recent years, the security threats of industrial control systems attract widely attention. Unlike the traditional attacks against communication protocols, attackers gradually shift their focus to the controller itself. In order to deal with this new threat, scholars begin to study the model of the controller to describe and analyze this attack, and then to defend against the attack in time. However, traditional model as differential equation or difference equation is difficult to describe the overall control logic of the system, and it is difficult to analyze the security threats in the industrial control system. In summarizing the corresponding research, this paper briefly introduces the formal methods used to build the model, and the general industrial control system and the structure of the commonly used PLC. A PLC hardware and control logic model established by a formal method is proposed, and various common characteristics in the formal method are expounded through a simple PLC control case.

Key words: industrial control system; PLC; formal method

水利、交通、电力等关键基础设施都在工业控制系统 (Industrial control system, ICS) 主导下运行^[1], 而随着无线通信技术与工业控制系统的深度融合, 针对无线通信的恶意攻击也随之出现在 ICS

中。与传统的网络攻击不同, ICS 攻击可以对物理设备造成严重危害, 对电力、交通等关键基础设施的安全构成严重威胁, 甚至影响经济社会稳定^[2]。因此, 如何保障工业控制系统的安全运行逐渐引起

收稿日期: 2021-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目资助: 欺骗攻击下网络化控制系统防御对策研究; 项目编号: 61973163。四川省科技厅重点研发项目资助: 汽轮机网络安全一体化保护系统关键技术与开发; 项目编号: 2019YFG0534。

作者简介: 马海迎 (1998-), 男, 2016年毕业于山东科技大学, 工学学士。现在南京理工大学自动化学院攻读硕士学位, 主要从事工业控制系统安全的理论研究。

袁晓舒 (1973-), 男, 东方研究院工控实验室副主任。邮箱: yuanxs@dongfang.com。

桑梓 (1985-), 男, 东方研究院工控实验室高级工程师。邮箱: sangzi@dongfang.com。

各国政府的高度关注。

随着网络安全技术的不断发展,攻击者们逐渐将攻击目标从网络通信转移到控制器本身上来。可编程逻辑控制器(PLC)在ICS中有着重要应用,可以同时控制多个过程,它接收来自传感器的输入信号,对其进行处理并产生控制信号。针对PLC的恶意攻击给ICS带来了前所未有的安全威胁。为了防御这种针对控制器本身的攻击,人们开始研究如何建立合适的模型去刻画、分析攻击过程。相关研究表明形式化方法可以较好地刻画控制系统的控制逻辑,是分析ICS安全的有效手段。

在系统控制的理论研究和工程实践中,人们通常采用微分方程来描述连续时间系统的动态变化过程,相应的离散时间系统采用差分方程。基于此,可以探讨系统的能控性、能观性,以及如何设计控制律使得系统镇定进而满足一定性能指标的问题。在工业现场,除了面向设备的信息物理动态过程,人们还面临决策、规划等与逻辑相关的进程。譬如说,工厂上下普遍反应某车间管理混乱,生产调度部指派一位调度员去优化整个生产车间的生产流程。对于调度员而言,他所搜集到的意见都用自然语言描述,而相应的解决方案也依赖于其各自的经验,因而很难保证方案的正确性和严格性。由于需要反复地测试迭代,设计周期也往往相当冗长。那么,如何组织几十、上百位工程师进行整个厂区的改造?在任务实施之前,能否采用数理逻辑语言,精确地描述任务,从而消除歧义?能否合理地设计算法从而避免测试迭代结果的正确性如何加以验证?上述问题很难用微分方程或差分方程来刻画。形式化方法(Formal method)或许是一种可能的途径。

形式化方法是一种特殊的数学分析方法,它可以通过严格的逻辑推理去分析、验证系统特性。形式化方法为系统的设计、开发和验证提供保障,确保系统逻辑的正确性和功能的有效性。用于工业控制系统形式化建模和验证分析的方式有:Petri网^[3]、有限状态机^[4]、攻击树^[5]以及时间自动机^[6]等。建模完成后,可通过模型检测或者定理证明两种方式对系统模型进行形式化验证分析,以检验如下特性:①功能安全,即避免逻辑误差;②活性:最

终顺利完成某个任务;③信息安全:不会泄露关键信息。后文中将会详细阐述。

对于PLC的形式化建模,粉状自动机^[7]和XML语言用作程序和验证工具输入之间的中间格式,Petri网和定时自动机都用PL程序的建模。一个PLC程序翻译工具在文献[8]中给出,它将IL语言转换为可以由Uppaal检查的定时自动机,但数据类型仅限于布尔值,不包括功能块调用。Heiner和Menzel在文献[9]中定义了IL的Petri网语义,但不包括验证阶段。在文献[10-11]中,采用信号解释Petri网(SIPN)来对PLC系统进行建模,它扩展了带有输入和输出信号的Petri网。

本文通过对现有研究的分析,提出了一种以PLC为例,面向ICS设备安全的形式化方法。该方法针对ICS安全性的不足,能够有效检测PLC攻击,从而提升系统安全性。通过对PLC控制过程的形式化建模,可以准确地模拟出系统的状态,从而有助于检测PLC恶意攻击的规律性,限制系统的行为。论文第二部分基于模型的形式化方法,以及标签转移系统的基础知识点介绍,主要参考上海交通大学殷翔教授的《动态系统的形式化分析与控制》在线课程^[12],第四部分PLC的硬件形式化模型建立参考Wang等人^[13]的研究成果。

1 形式化方法简介

1.1 形式化方法基本含义

在动态系统中,一般以连续或离散时间描述的动态方程刻画系统的模型以及受到的干扰,进而考虑性能的优化。但为了更好地刻画系统的控制逻辑,动态模型显然已不再适用,而形式化方法可以较好地解决这样的问题。形式化方法可以针对设定的任务要求,对系统建模并且对特定属性进行验证。形式化方法主要包括形式化模型和形式化规约的过程(图1),主要解决模型验证和综合设计两类问题。

模型验证是利用逻辑推理证明系统是否满足指定要求的环节。若满足,则验证系统会颁发一个证书(类似于返回一个数字证明满足特定属性);若不满足,会提供一个反例。而综合设计则是指设计控制逻辑使形式化模型满足形式化规约(目标)。

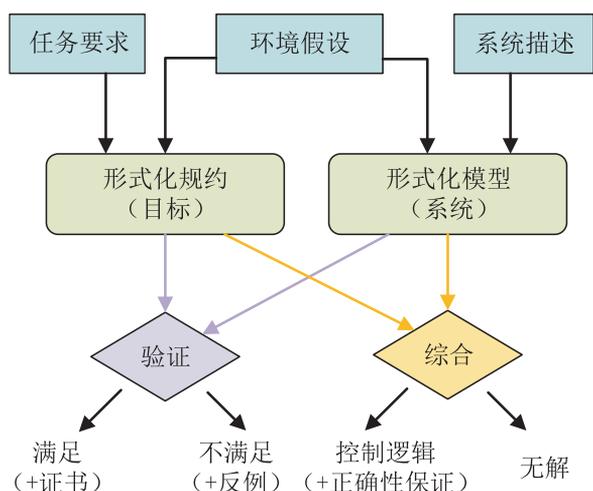


图1 基于模型的形式化方法^[12]

1.2 形式化方法刻画系统:标签转移系统

在形式化方法中,通常以标签转移系统(labeled transition system, LTS)来刻画一个系统的逻辑变化过程,这可用如下的元组(tuple)表示:

$$T = (X, U, \rightarrow, X_0, AP, L) \quad (1)$$

其中, X 为系统状态集; U 为(控制或决策)输入集; $\rightarrow \subseteq X \times U \times X$ 表示系统的演化规律; $X_0 \subseteq X$ 为演化的初始状态集; AP 为原子命题集(atomic propositions),用于刻画整个系统具备的所有特性,如交通灯不同时刻亮起的颜色; $L: X \rightarrow 2^{AP}$ 为标签函数,即在某个状态所具有的原子属性。需要指出的是,在形式化方法中,我们关心的并非系统的状态,而是状态具有何种属性。

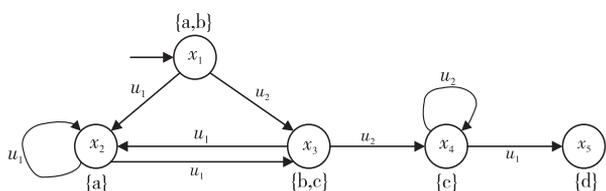


图2 标签转移系统

对一个实际系统而言,通常具有大量的状态,这个时候就可以考虑用有向图来表示LTS。对于图2所示的系统,系统状态为 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$,初始状态为 $X_0 = \{x_1\} \subseteq X$;控制输入为 $U = \{u_1, u_2\}$;原子命题为 $AP = \{a, b, c, d\}$;系统的部分演化规律为:

$$\rightarrow = \left\{ \begin{aligned} &(x_1, u_1, x_2), (x_1, u_2, x_3), (x_2, u_1, x_2), (x_2, u_1, x_3), \\ &(x_3, u_1, x_2), (x_3, u_2, x_4), (x_4, u_1, x_4), (x_4, u_2, x_4) \end{aligned} \right\} \subseteq X \times U \times X$$

标签函数为:

$$\begin{aligned} L(x_1) &= \{a, b\}, L(x_2) = \{a\}, L(x_3) \\ &= \{b, c\}, L(x_4) = \{c\}, L(x_5) = \{d\} \end{aligned}$$

对于一个演化系统而言,我们同样可以定义先导状态 $Pre(x, u)$ 和后续状态 $Post(x, u)$:

$$\begin{aligned} Pre(x, u) &= \{x' \in X; x \xrightarrow{u} x'\}; \\ Post(x, u) &= \{x' \in X; x' \xrightarrow{u} x\} \end{aligned} \quad (2)$$

先导状态代表的是哪一个状态(x)在该控制信号(u)作用下演变到给定状态(x');后续状态代表给定状态(x)在给定控制信号(u)作用下,转移到的下一状态(x')。

鉴于系统模型的不确定,以及潜在的安全威胁,系统的运行动态通常是不确定的。一个不确定系统可通过其基数(初始状态及其后续状态不唯一)来刻画,例如:

$$X_0 > 1 \text{ 或 } Post(x, u) > 1 \quad (3)$$

确定系统则意味着对于任意 $x \in X$ 及 $u \in U$,我们有:

$$X_0 = 1 \text{ 且 } Post(x, u) = 1 \quad (4)$$

1.3 形式化方法基本特性

1.3.1 标签转移系统的构成

对一个复杂的实际系统而言,直接对整个系统建模是非常困难的。我们可以将整个系统划分成若干子系统,同时刻画各个子系统之间的交互规律,从而完成对整个系统的建模。各子系统间通过私人行动(private action)和公共行动(common action)进行协调。其中,私人行动代表单独组件的功能,可由各组件按照异步的方式独自运行;公共行动代表每个组件的同步功能,需多个组件同步协作。而所谓的统一化模型是局部模块和同步化规则的组合,这种组合主要通过乘积运算实现。

1.3.2 标签转移系统的积

定义:设 T_1, T_2 为两个LTSs,其中, $T_i = (X_i, U_i, \rightarrow_i, X_{0,i}, AP_i, L_i)$ 。那么两者的积(笛卡尔积,用 \otimes 表示)为另一个LTS:

$$T_1 \otimes T_2 = (X, U, \rightarrow, X_0, AP, L) \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} X &= X_1 \times X_2, AP = AP_1 \cup AP_2, \\ U &= U_1 \cup U_2, L(x_1, x_2) = L(x_1) \cup L(x_2) \end{aligned} \quad (6)$$

系统的演化规律为:

(1)同时给两个系统施加控制信号 U ,则两个

系统状态变换分别为 $x_1 \xrightarrow{u} x'_1, x_2 \xrightarrow{u} x'_2$;

$$u \in U_1 \cap U_2: (x_1, x_2) \xrightarrow{u} (x'_1, x'_2) \text{ iff } x_1 \xrightarrow{u} x'_1 \text{ and } x_2 \xrightarrow{u} x'_2 \quad (7)$$

(2) 单独给系统 1 施加控制信号 U , 则系统 1 状态变换分别为 $x_1 \xrightarrow{u} x'_1$;

$$u \in U_1 \setminus U_2: (x_1, x_2) \xrightarrow{u} (x'_1, x_2) \text{ iff } x_1 \xrightarrow{u} x'_1 \quad (8)$$

(3) 单独给系统 2 施加控制信号 U , 则系统 2 状态变换分别为 $x_2 \xrightarrow{u} x'_2$;

$$u \in U_2 \setminus U_1: (x_1, x_2) \xrightarrow{u} (x_1, x'_2) \text{ iff } x_2 \xrightarrow{u} x'_2 \quad (9)$$

其中值得注意的是, 标签转移系统本质是同步的, 也就是说这两者的公共事件需要同时发生。因为每个子系统的控制作用和原子特性是不同的, 所以对于整个系统而言, 系统的控制信号和原子特性是每个子系统的并集。

1.3.3 线性时间特性

对于一个 LTS 系统来说, 线性时间是基本的性质。需要注意, 与控制模型不同, 这里的线性所对应的并不是非线性, 而是分支。即 LTS 所研究的是每一条路径是否满足某个特性, 而非是否存在一条路径满足该特性。

系统在演变过程中会产生一个特性集, 即系统在每个状态具有的特性 (AP):

$$Trace(T) \subseteq (2^{AP})^\omega \quad (10)$$

而线性时间特性 P 代表不同特性的其中一个子集, 如果一个系统满足这样的特性, 则:

$$T \models P, \text{ if } Trace(T) \subseteq P \quad (11)$$

其中 \models 表示属于。

1.3.4 安全性

一般来说, 安全性本质上是一种有限路径上的特性。我们可用这样的方式来定义, 安全性是一旦被违反就不可挽回, 即不可逆的特性。

通常将一些特性定义为坏的特性 (σ), 系统具有安全性代表在演化过程中不存在坏的特性, 即与坏的特性交集为空:

$$P_{\text{safe}} \cap \{ \sigma' \in (2^{AP})^\omega : \hat{\sigma} \text{ is a finite prefix of } \sigma' \} = \emptyset \quad (12)$$

1.3.5 活性

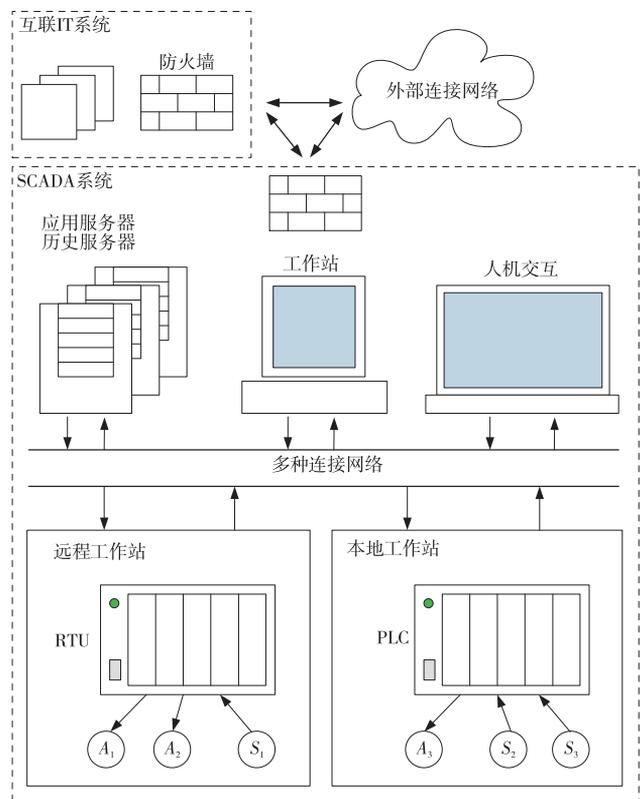
安全性意味着永不发生坏的事情; 而活性意味着

好的事情将会发生。活性代表系统在无限时间处特性的优劣。即在有限时间内, 系统存在的特性是任意的, 但在某个时间节点之后, 系统所呈现的特性均为好的特性。这样, 我们可以称该系统具有活性。

2 工业控制系统及 PLC

2.1 工业控制系统

工业控制系统是由实施各种不同功能的自动化组件和采集信息、监测系统的控制组件构成的系统, 它的主要目标是确保工业基础设施可以按照设定的目标正常工作。工业控制系统由数据采集系统、分布式控制系统、可编程逻辑控制器、远程终端、人机交互界面设备及各种通讯端口组成 (图 3)。



2.2 PLC 简介

可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 是工业控制系统中常用的控制器, 是一种将控制指令加载到存储器中存储, 使用时从存储器中调用运行的数字逻辑控制器。因为 PLC 可以接收多种类型的信号, 因此 PLC 在现代工业领域广泛使用, 并且主要用来控制整个系统的正常工作。

2.3 PLC 的基本组成

PLC 内部包含一个微处理器,通常作为自动控制的数字逻辑控制器来使用。PLC 的主要部件包括电源模块、CPU、内部存储器 (RAM, ROM)、输入输出等^[12]。硬件结构图如图 4 所示。

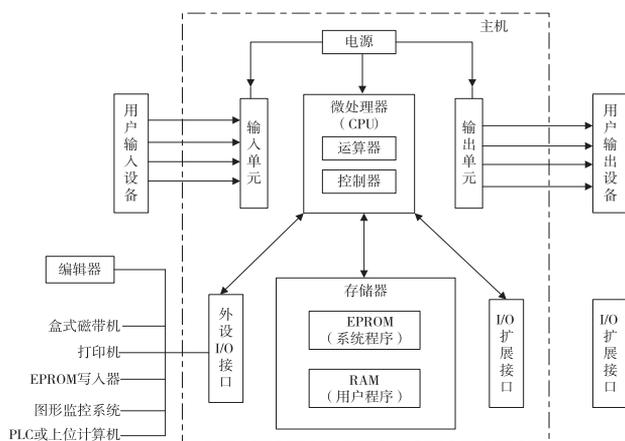


图 4 PLC 硬件结构体

2.4 PLC 的工作原理

PLC 以轮询的方式进行工作,具体表现为“集

中输入、循环扫描、集中输出”。通过输入部件接收外部传感器的输入信号,并且经过内部微处理器的处理操作后,通过输出部件向外部输出控制信号,控制执行器的动作。

工作周期分为输入采样、程序执行和输出刷新三个阶段,如图 5 所示^[14]。

3 PLC 的形式化模型

3.1 PLC 硬件形式化模型

在 PLC 硬件模型建立的部分,我们主要参考了 Wang 等人的研究^[13]。3.1 部分主要描述了 PLC 的基本架构以及架构中每一部分的形式化模型。

3.1.1 PLC 的基本架构

PLC 的基本架构主要由 3 层构成,分别是包含所有应用程序的软件层、包含 PLC 基本工作方式的硬件层和传感器、执行器所在的环境层(图 6)。

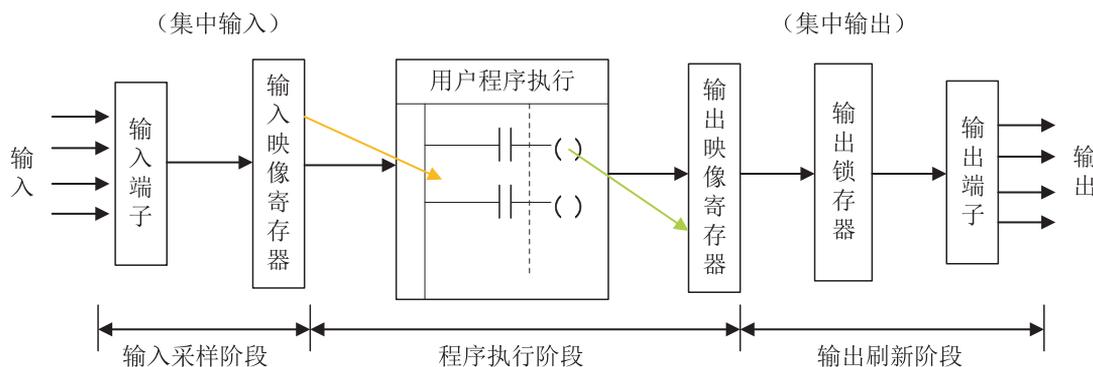


图 5 PLC 工作方式

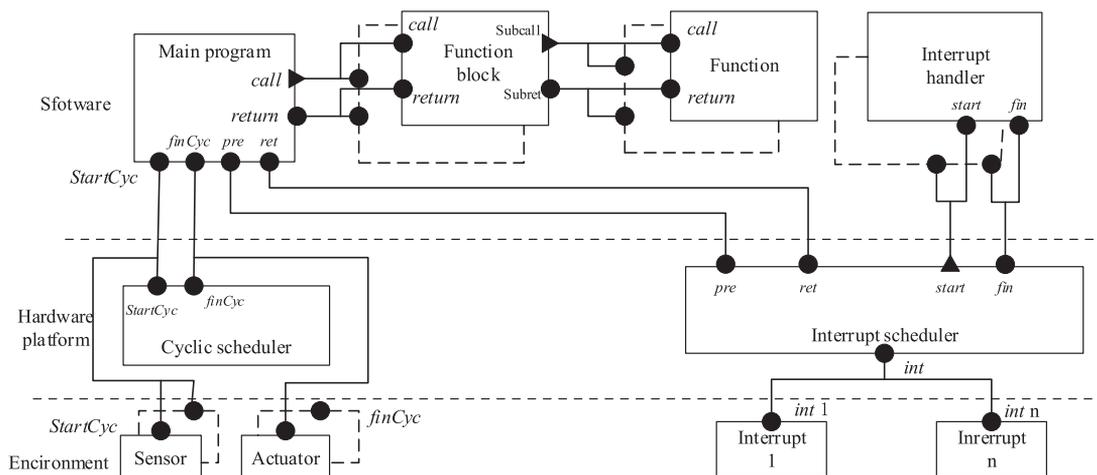


图 6 PLC 基本架构图^[13]

环境层接收来自传感器的输入数据、PLC 的输出数据以及外部的中断信号等。硬件层模拟 PLC 的循环扫描工作方式以及中断程序处理的过程。软件层主要包括编写的 PLC 主程序以及主程序要用到的功能函数。每层之间的交互信息主要通过 startCyc(开始)和 finCyc(结束)两个信号完成。

3.1.2 PLC 的工作方式

PLC 的工作方式主要由“集中输入、循环扫描、集中输出”三个基本过程组成,接收输入信号存储到输入寄存器中,在扫描周期内不断读取并执行内存中的指令,把输出结果存放在输出寄存器中,集中输出(图7)。

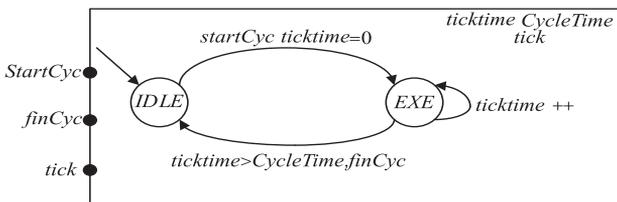


图7 循环调度模型^[13]

在循环调度即 PLC 的工作过程中,一开始 PLC 处于 IDLE(空闲)状态,到达循环扫描阶段的开始即开始信号输入,PLC 的状态就由 IDLE 转换到 EXE(执行阶段),直到整个扫描周期的结束(运行时间大于扫描时间),PLC 的状态再次变化到 IDLE 状态。

3.1.3 功能函数模块

PLC 的控制逻辑主要由用户编写的程序完成,而 PLC 要实现整体功能需要调用各种不同的函数,因此对函数模块进行形式化建模也必不可少(图8)。

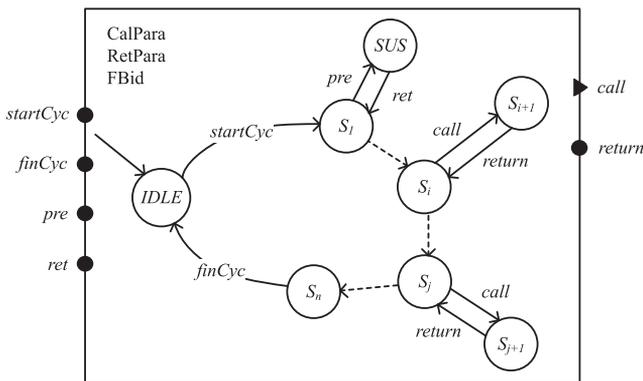


图8 函数功能调用模块^[13]

功能组件一开始处于 IDLE 状态,当主程序调

用这个模块时, startCyc 信号变为 1, 功能函数由 S1 状态开始发生变化, 沿着程序执行的顺序, 一直变化到 Sn 状态, 此时程序结束, 在 finCyc 信号作用下, 重新回到 IDLE 状态, 而函数的返回值可以通过 ret 端口返回。值得注意的是, 在一个功能函数中可以不断调用新的功能子程序, 即函数的嵌套。

3.1.4 定时器/计数器

实时性是 PLC 的一项重要特征, 主要通过内部的定时器来实现的。定时器的内部有一个固定频率的时钟计数器, 定时功能主要通过设定计数器数值来实现(图9)。

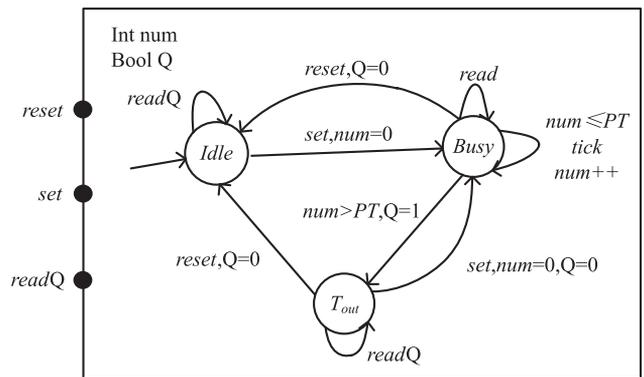


图9 定时器模块^[13]

在没有使用定时器功能时, 定时器一直处于 IDLE 状态, 需要使用定时器的功能时, 我们首先需要给定一个设定值, 此时定时器状态开始转换到 Busy(计数)状态, num 从 0 开始计数。在没到达设定值时, 定时器一直计数, 直到到达设定值。设定值到达之后, num 清零, 同属转换到 TOUT 输出状态, 输出一个布尔值(Q=1)。定时器功能使用完毕后会产一个复位(reset)信号, 将 Q 清零, 同时返回 IDLE 状态。

3.1.5 中断模块

在 PLC 的整个工作过程中, 总会遇到各种各样的突发事件, 所以程序不可避免地需要添加中断过程去应对这样的紧急情况。一个完整的 PLC 允许存在各种不同类型的中断出现, 如外部 I/O 中断、通讯中断和时基中断等, 并且各个中断的优先级也各有不同。基于此, 对中断进行形式化建模可以参考 Wang 等人^[13]的工作, 这里不再赘述。

3.2 PLC 中的形式化特性

3.2.1 乘积特性

对一个复杂的实际系统而言, 直接对整个系统

建模是非常困难的。我们可以将整个系统划分成若干子系统,同时刻画各个子系统之间的交互规律,通过建立统一化模型来完成对整个系统的建模。统一化模型是局部模块和同步化规则的组合,这种组合通过乘积运算实现。以简单的交通灯控制程序为例,进行简单讲解(图10)。

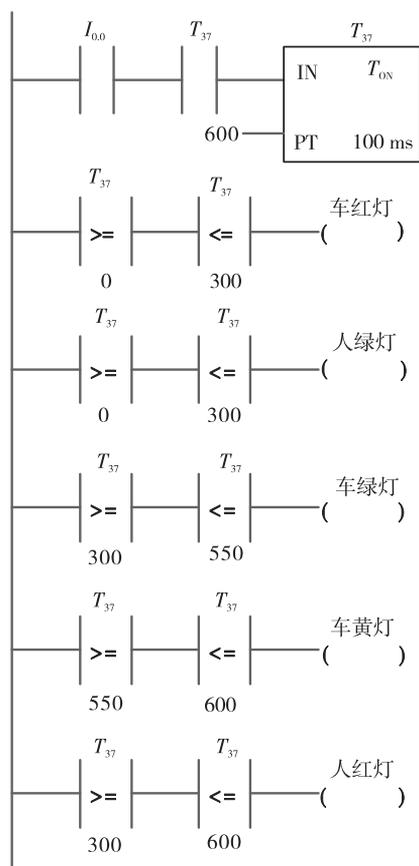


图10 简单交通灯控制

交通灯通过一个计时器进行控制,主要分为两部分,人行道交通灯和车辆交通灯。现设定定时器共计时6 s,6 s后自动复位,重新计数。

对于车辆交通灯来说,前3 s 车辆红灯长亮,后2.5 s, 车辆绿灯亮,最后0.5 s 车辆黄灯亮,定时器复位,红灯亮起。

对于人行道交通灯,前3 s 人行道绿灯长亮,后3 s 人行道红灯常亮,6 s 后定时器复位,绿灯亮起(图11)。

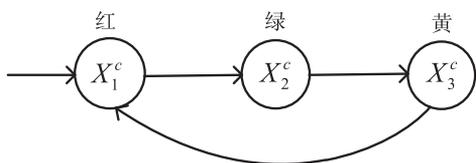


图11 车辆交通灯

本文简单介绍采用 LTS 方法建立交通灯系统的基本组成。系统的初始状态选作 X_1 , 在 X_1 状态, 系统的原子命题(属性)表现为, 交通灯红色常亮; 当计时时间到达3 s 时, 状态从 X_1 转移到 X_2 , 此时具有的特性为交通灯绿色常亮, 在这个过程中, 状态转移所发生的条件, 我们称之为控制信号是定时器定时到3 s 这样的条件。同理继续施加这样的控制信号 - 定时器计时2.5 s, 状态由 X_2 转换到 X_3 , 属性变为黄灯亮起。最后0.5 s 后施加复位控制信号, 定时器重新计数, 状态由 X_3 转换到 X_1 , 属性重新变回红灯常亮。

因此整个系统的状态为 $\{X_1, X_2, X_3\}$; 控制信号为定时器定时3 s, 2.5 s, 0.5 s; 原子属性为 $\{\text{红灯常亮, 绿灯常亮, 黄灯常亮}\}$, 演变过程前文提及, 这里不再赘述。后文同样可以依照这样的方法进行对照, 也不再详细说明。

两者虽然工作状态的数目和特性在结构上是不同的, 但在时间上来说, 两者必须是同步的, 即只有交通灯是红色的时候, 人行道的路灯才会亮起, 提醒车辆停止, 行人通过。而并不是将两者按照状态变化趋势简单叠加(图12~13)。

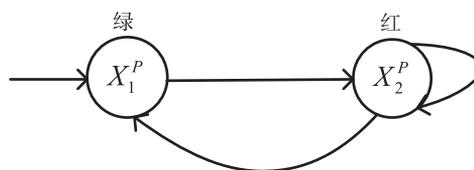


图12 人行道交通灯

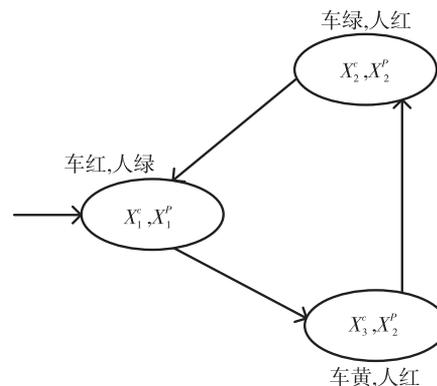


图13 乘积形式

3.2.2 安全性

在形式化语言中, 安全性被定义为一种有限路径上的特性。安全性是一旦被违反就不可挽回, 在 PLC 中, 我们要实现某种功能, 需要编写对应的程

序,即控制逻辑,安全性则对应一个具体逻辑是否正确,可以正确实施。接下来以 IL 语言为例简单介绍 PLC 的安全性(图 14~15)。

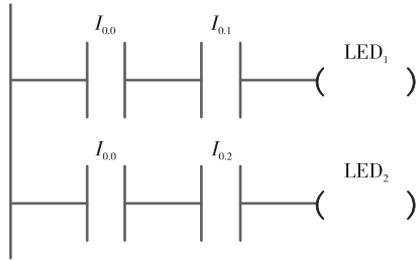


图 14 点亮 LED₁

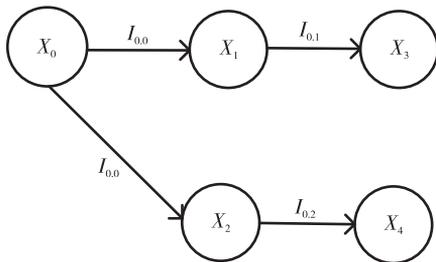


图 15 LED₁ 形式化模型

其中, $I_{0.0}$ 、 $I_{0.1}$ 、 $I_{0.2}$ 分别代表了三个不同的开关,按下不同的开关,所点亮的 LED 灯是不同的,比如按下, $I_{0.0}$ 、 $I_{0.1}$ 时,LED₁ 会被点亮,同理按下, $I_{0.0}$ 、 $I_{0.2}$ 时,LED₂ 会被点亮。

规定点亮 LED₁ 为要实现的控制逻辑,即形式化方法的好的特性为 LED₁ 点亮。此时可以称 $X_0 \rightarrow X_1 \rightarrow X_3$ 具有安全性,而 $X_0 \rightarrow X_2 \rightarrow X_4$ 则不具备安全性。

3.2.3 活性

在形式化语言中,安全性意味着永不发生坏的事情;而活性意味着好的事情将会发生。安全性代表了整个系统的暂态特性,而活性则是系统的稳态特性。因此对应到 PLC 中,活性代表在操作过程中,按照不同的方式启动设备,虽然不同的方式对设备影响不同,但最终设备都会被启动(图 16~17)。

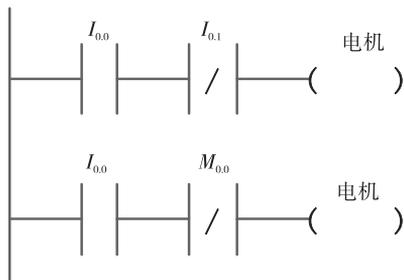


图 16 关闭电机

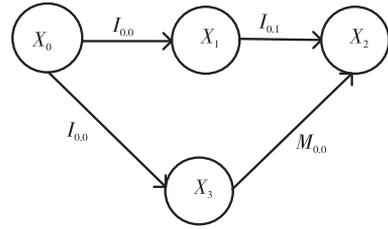


图 17 关闭电机的形式化模型

其中 $I_{0.0}$ 代表启动按钮, $I_{0.1}$ 代表关闭按钮, $M_{0.0}$ 代表出现突然断电的情况。控制的最终目标是让电机停止旋转。因为正常电机通过两个开关按钮控制启停,所以具有安全性的路径是 $X_0 \rightarrow X_1 \rightarrow X_2$ 而 $X_0 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$ 则不具备这样的安全性。但两条路径最终都会到达 X_2 (电机停止)状态,所以称两条路径都具有活性。

4 结语

现代工业控制系统变得越来越复杂,控制系统的安全性对于提高系统的整体可靠性起着至关重要的作用。而形式化方法是分析和保证复杂系统高可靠性的有效方法,在描述系统功能时使用严格的数学模型构系统,为系统的设计、开发和验证提供保障,保障系统功能逻辑的正确性和有效性。因此采用形式化方法对 PLC 进行建模也显得愈发重要。本文分析总结了一些相应的研究,并提出了新的 PLC 形式化模型,并且将形式化方法中的特性映射到了 PLC 的控制逻辑中,进行简单解释。

参考文献:

- [1] Zhou Y, Mo Z, Xiao Q, et al. Privacy-Preserving Transportation Traffic Measurement in Intelligent Cyber-physical Road Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3749-3759
- [2] McLaughlin S, et al. The Cybersecurity Landscape in Industrial Control Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(5): 1039-1057
- [3] Jin Qi, Jie Hu, et al. AGFSM: An new FSM based on adapted Gaussian membership in case retrieval model for customer-driven design [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(1): 894-905
- [4] M A B Ahmadon, S Yamaguchi. On service orchestration of cyber physical system and its verification based on Petri net [C]. 2016 IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics, 2016: 1-4
- [5] Schneier B. Attack Trees [J]. Doctor Dobbs journal, 1999, 12(24): 21-29

(下转第 24 页)

基于虚假数据注入的发电厂汽轮机 网络安全攻击研究

袁晓舒^{1*} 张愉菲¹ 杨波¹ 桑梓¹ 谢云云²

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 南京理工大学, 南京 210094

摘要:近年来随着电力网络安全事件的频发和智慧能源技术的发展,电力系统及其控制系统正在面临越来越大的网络安全威胁。针对电力系统特别是电网的网络安全攻击中虚假数据注入攻击被认为是一种主要的攻击模式,在以往的研究中,网络安全攻击通常被认为是对控制系统的一种扰动。本文基于虚假数据注入攻击对以往研究较少的发电厂汽轮机网络安全攻击进行了分析和验证,验证了虚假数据注入攻击能够威胁发电厂汽轮机运行安全,同时提出了应将网络安全攻击视为对控制系统的输入而不是扰动这一观点。

关键词:虚假数据注入攻击; 控制系统; 网络安全; 汽轮机

中图分类号: TM73; TP393.08

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0017-08

Research on False Data Injection Attack of Power Plant Steam Turbine

YUAN Xiaoshu^{1*}, ZHANG Yufei¹, YANG Bo¹, SANG Zi¹, XIE Yunyun²

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

2. Nanjing University of Science and Technology, 210094, Nanjing, China)

Abstract: In recent years, with the frequent occurrence of power network security incidents and the development of smart energy technology, power system and its control system are facing more and more network security threats. In the network security attacks of power system, especially power grid, the false data injection attack is considered as a main attack mode. In previous studies, the network security attack is usually considered as a disturbance to the control system. Based on the false data injection attack, this paper analyzes and verifies the network security attack of steam turbine in power plant which is less studied in the past, and verified that the false data injection attack can threaten the safety of steam turbine operation in power plant. An idea is proposed that network security attack is considered as input to control system rather than disturbance.

Key words: false data injection; attack control system; network security; steam turbine

近年来,电力系统网络安全事件频发,2015年12月23日乌克兰发生大停电事故,被认为是第一起网络安全攻击直接导致停电事故的案例^[1]。2019年3月7日-3月9日,委内瑞拉电力系统遭到网络攻击出现3次大范围停电事件,委内瑞拉官方认为本次事故是由于委内瑞拉古里水电站受到网

络攻击导致机组停机所致。这些事件说明,通过网络安全攻击可以导致电力系统事故和电力装备损坏。

汽轮发电机组由汽轮机、发电机、励磁机、锅炉等组成,汽轮机毁机事故对电厂和电网运行会产生巨大威胁。伴随着智慧能源技术的发展,汽轮发电

收稿日期: 2021-07-19

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目资助: 汽轮机网络安全一体化保护系统关键技术研究与开发; 项目编号: 2019YFG0534。

作者简介: 袁晓舒(1973-),男,2013年毕业于电子科技大学软件工程专业,硕士,高级工程师。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司能源装备工控网络安全实验室主要从事网络安全研究工作。邮箱: yuanxs@dongfang.com。

机组作为一种典型的信息物理融合能源系统,其运行环境正在从相对隔离和封闭变得开放和互联,这在提高效率的同时,也给攻击者提供了新的攻击通道^[2]。攻击者可以从信息域发动攻击直达物理域,汽轮机面临新的网络安全威胁。

针对电力 CPS 的网络攻击可分为破坏信息可用性、完整性和保密性^[3]。虚假数据攻击(false data injection attacks FDIAs)作为信息物理能源系统的主要网络安全攻击方式^[4],通过向量测值中注入虚假数据,从而达到修改电力系统量测值和状态变量、控制电力系统运行状态等目的。目前对于虚假数据攻击的研究多从攻击者或者保护者的角度展开。对于攻击者而言,攻击目标是以最小的成本高效地构建最优攻击向量^[5]。攻击者仅获得系统的部分参数信息,而不需要知道电力系统的完整参数,也可以成功发动 FDIAs^[6-8]。虚假数据攻击对电力系统的影响主要体现在两个方面,一是对电力系统的安全稳定运行造成严重的破坏,二是通过对电力系统的影响非法获得经济利益^[9]。在电力系统的安全稳定运行控制方面,被攻击者伪造的假象会使电力控制中心误以为系统进入紧急状态,做出切机、切负荷等保护操作,电力系统拓扑发生变化而引发连锁反应,导致某些线路真正过负荷,引发严重电力事故^[10]。在对电力系统的经济调度方面,攻击者通过修改负荷数据,导致系统误判负荷平衡条件,增加了网损与设备损耗;或是通过伪造线路阻塞进行电力市场竞价,利用电价差实现经济套利^[10]。

FDLAs 在电网领域的网络安全攻击研究较多,在发电领域 FDLAs 的危害研究相对较少,本文选取汽轮发电机组中的汽轮机这一关键设备作为对象,研究了 FDLAs 这一网络安全攻击对汽轮机的危害,提出应将 FDLAs 视为输入而不是扰动的观点,并提出了建议。

1 汽轮机信息物理网络安全分析

1.1 汽轮机及其控制保护系统

汽轮发电机组的汽轮机一般由气缸、阀门、转子、轴承、隔板、连通管、汽封等部分构成。阀门控制汽轮机进气,阀门分为:主汽阀、高压调节阀、补汽阀、中压联合汽阀。高压主汽阀的主要功能是在

危急情况下,迅速关闭进汽,避免引起汽轮机超速,是汽轮机主蒸汽进口前的最后一个截止阀。

汽轮机控制保护系统主要由汽轮机数字电液控制系统(DEH)、汽轮机危急遮断系统(ETS)和汽轮机监视系统(TSI)构成。

DEH 主要实现汽机复位;自动升速;摩擦检查;超速试验;同期控制;自动带初负荷;自动调节负荷;主汽压控制及限制;低真空保护;快速减负荷;超速 OPC 功能;一次调频限制;机炉协调控制;阀门试验功能;多阀控制功能;中压缸启动控制;手操控制;工况监视功能;故障诊断报警;对象模拟试验等功能。

EST 在 DEH 无法控制汽轮机系统在正常运行时,为防止损害汽轮发电机系统,ETS 使汽轮机跳闸,关闭所有的汽轮机进汽阀。

TSI 对汽轮机运行状态参数进行长期连续多路监视,对被检测的参数超出预设的值发出报警和停机信号,也能提供故障诊断的各种测量数据。

1.2 汽轮机本体损坏和常见事故

汽轮机作为一个在高温、高压条件下工作的高速转动部件,可能由于各种原因造成事故和设备本体损坏,如:缸体变形、转子断裂、叶片断裂等。汽轮发电机组由于事故造成不可恢复并丧失发电能力一般称为毁机,毁机事故对发电厂和电网安全造成极大威胁。我国汽轮发电机组毁机事故主要由:异常振动、材料缺陷、低温蒸汽进入汽轮机、汽轮机严重超速以及其他一些原因造成,其中由汽轮机严重超速直接或间接引发的汽轮机事故在我国占有较大比例,因而超速引发的汽轮机本体损坏是我国汽轮机事故的特点^[11],汽轮机超速是汽轮机事故中汽轮机本体安全、汽轮发电机组安全、发电厂安全和电网安全的主要威胁。

除了汽轮机本体损坏,汽轮机停止运行或汽轮机转速、输出功率不稳定,也会对电力系统的安全稳定造成不良影响。

1.3 汽轮机信息物理融合网络安全攻击

汽轮机及其控制保护系统如图 1 所示,汽轮机的运行和安全受到汽轮机控制保护系统的控制保护。在发电厂中位于生产控制大区,和电力调度系统以及发电厂管理信息系统通过网络连接。通过

攻击者可以通过多种攻击通道对汽轮机控制保护系统发动网络安全攻击:①通过电厂管理信息系统互联网入口渗透到汽轮机控制保护系统;②通过电力通信网从电力调度系统渗透到汽轮机控制保护系统;③通过违规外连通道渗透到汽轮机控制保护

系统;④通过运维或物流等供应链通道渗透到汽轮机控制保护系统;⑤通过开源软件、开源框架、产品部件、软件升级补丁等通道渗透到汽轮机控制保护系统;⑥通过其他隐蔽通道渗透到汽轮机控制保护系统。

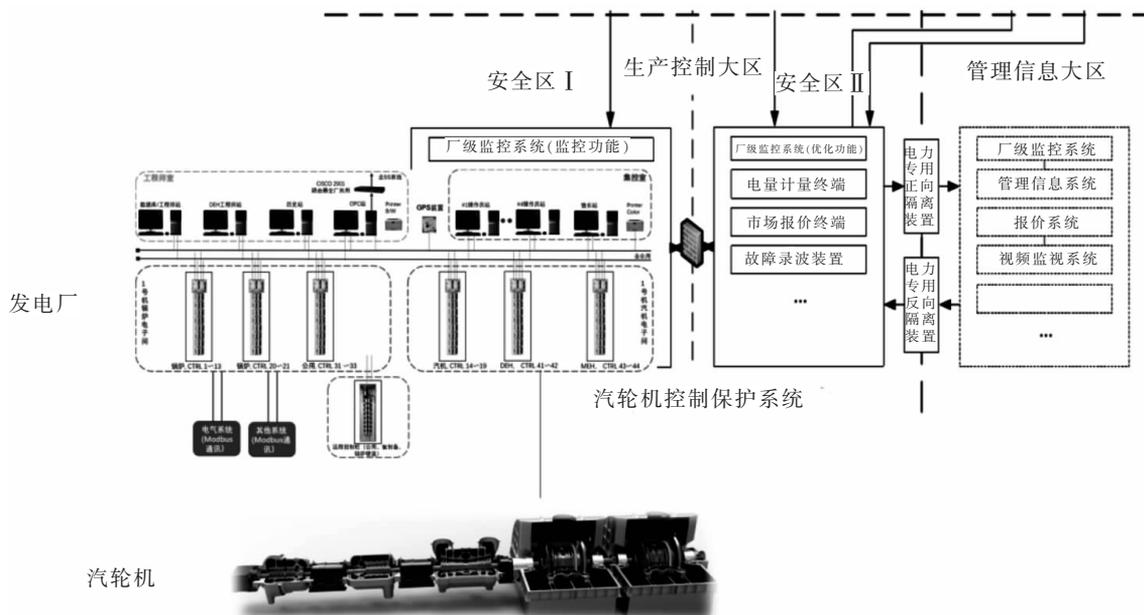


图1 汽轮机及其控制保护系统

攻击者在渗透到汽轮机控制保护系统后,可以采用多种攻击方式:①篡改汽轮机控制保护系统文件;②修改汽轮机控制保护系统逻辑;③修改汽轮机控制保护系统参数;④修改汽轮机控制保护系统输入;⑤修改汽轮机控制保护系统输出;⑥其他攻击方式。

2 现有虚假数据注入攻击方法对汽轮机发电厂攻击中的适用性分析

2.1 虚假数据注入攻击理论

FDIAs 是电力系统网络安全攻击的一种重要攻击理论。这种理论认为,电力系统由大量发电机、输电线路、断路器和负荷组成,电力系统的调度依赖于数据采集、能量管理和网络分析等基本功能。调度中心通过调度算法、负荷建模信息和发电量信息等进行负荷和发电量的分配,电力系统状态估计是进行分配的基础^[12]。

电力系统状态估计依靠能量管理系统(EMS)和广域测量系统(WAMS)中的远程终端单元(RTU)和相量测量单元(PMU)所提供的数据。由

于 RTU 和 PMU 容易受到随机干扰和偶然故障的影响,有可能会输出不良数据进而影响到状态估计的精度,为了消除这些不良数据的影响,采用残差方程消除不良数据的检测方法得到了广泛的应用,由于残差方程无法发现测量数据中的虚假数据,攻击者可以把测量值和状态变量更改为任意数据,进而达到对电力系统进行网络安全攻击的目的。

2.1.1 状态估计模型

以直流模型线性化为基础的状态估计模型可表示为

$$z = Hx + e \quad (1)$$

式中: z 为量测量; H 为系统参数矩阵,是常数矩阵,由电力系统的拓扑和线路阻抗决定; x 为有待估计的状态量; e 为测量时的误差。

通过加权最小二乘法(Weighted Least Squares, WLS)或其他算法求解函数得到估计表达式。估计表达式与阈值的关系是衡量系统是否存在不良数据的标准。即

$$J(x)_{\min} = (z - Hx)^T \cdot W(z - Hx) \quad (2)$$

式中: W 为加权矩阵。

测量值中可能带有坏数据。为了避免可能源自故障传感器或拓扑误差等原因的不良测量,需要将 $J(x)$ 与阈值 τ 进行比较。如果 $J(x)$ 小于阈值 τ , 则认为没有不良数据,反之要剔除相应的坏数据对系统重新进行状态估计。

2.1.2 攻击原理

上述机制被引入 FDIA 后遭到破坏。攻击可以躲避残差检测,使状态估计器误认为这些测量数据仍然是好数据,达到操纵状态估计准确性的目的,破坏电网稳定运行甚至从中谋取非法的经济利益^[13]。

在原始量测量中加入非零攻击矢量 \mathbf{a}

$$\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_m)^T \quad (3)$$

导致新的量测量 $z_a = z + \mathbf{a}$ 产生偏差。 z_a 发送到状态估计器将导致状态估计结果带有偏差,即

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{bad}} = \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{c} \quad (4)$$

式中: \mathbf{c} 为非零的向量; $\hat{\mathbf{x}}$ 为使用原始测量数据得出的状态估计结果。

将攻击矢量构造为 $\mathbf{a} = \mathbf{H}\mathbf{c}$, 则

$$J(\hat{\mathbf{x}}_{\text{bad}}) = z_a + \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{\text{bad}} = z - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}} = J(\hat{\mathbf{x}}) \quad (5)$$

式中: $J(\hat{\mathbf{x}}_{\text{bad}})$ 为含有虚假数据的估计表达式,即 $J(\hat{\mathbf{x}}_{\text{bad}}) = J(\hat{\mathbf{x}})$, 使检测失效^[14]。

2.2 汽轮机控制系统和电力调度自动化系统的差异

电力调度自动化系统中 EMS 和 DMS 依赖于 RTU 构成的数据采集与监控系统(SCADA), WAMS 依赖于 PMU。EMS 和 WAMS 是输电网重要的电力信息通信系统,主要包括数据采集、能量管理和网络分析等基本功能,对电力系统安全稳定运行起着重要作用,电力调度自动化系统体系架构如图 2 所示。

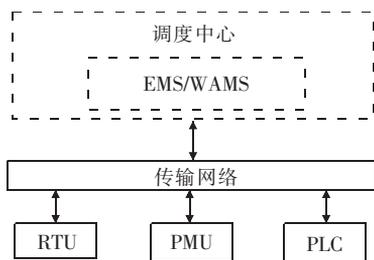


图 2 电力调度自动化系统体系

汽轮机控制系统和电力调度自动化系统的差异在于:①汽轮机控制系统基本部署在同一个机房内,地理上处于一个较小的范围内;②汽轮机控制

系统信号输入主要来自下层的硬接线或现场通信网络;③汽轮机控制系统可以接收来自上层的工业以太网通信所传来的信息;④下层网络的信号可能被现场其他信号干扰,汽轮机控制系统具备消除信号干扰的机制,但对于来自上层的以太网信号没有类似消除信号干扰的机制。

3 汽轮机虚假数据注入网络安全攻击研究

3.1 汽轮机控制系统信号强制

发电机组汽轮机运行受汽轮机控制保护系统的控制,按照电网负荷指令,由分散控制系统给出给出汽轮机的运行参数,汽轮机控制保护系统接受传感器传来的汽轮机运行数据输入预先设定的控制逻辑算法,根据运算结果向执行机构发出控制指令。

汽轮机控制系统除了接收来自下层网络的信号输入,还可以采用信号强制和逻辑强制的方式对控制逻辑和信号值进行强制修改,以 TD6000 和 OvationOCR400 为例,正常运行工况下汽轮机转速为 3 000 转/分钟,如图 3、4 所示。

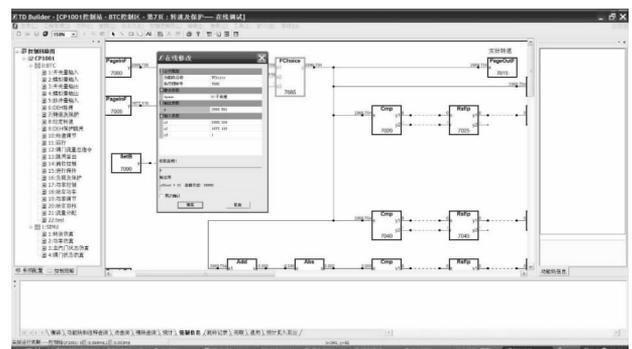


图 3 汽轮机控制系统(TD6000)转速量测值

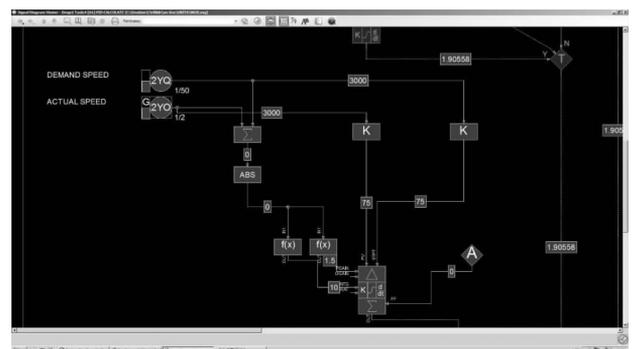


图 4 汽轮机控制系统(OvationOCR 400)转速量测值

一般来说,强制逻辑和强制信号需要在工程师站完成,可以强制将转速改为 3 080 转/分钟如图 5、

6 所示。

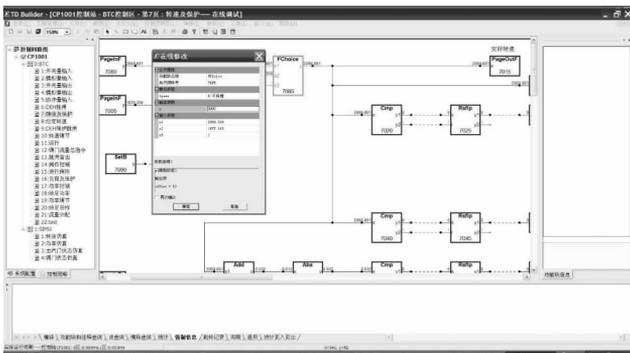


图5 强制修改控制系统 (TD6000) 汽轮机转速量测值

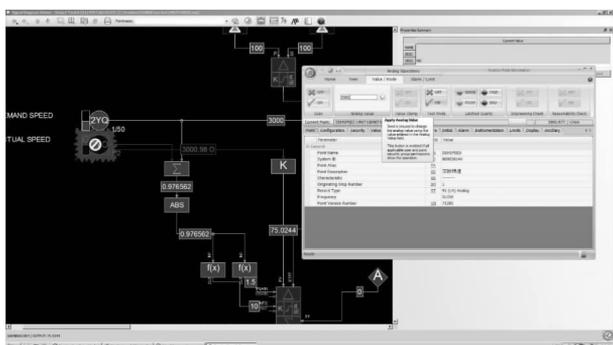


图6 强制修改控制系统 (OvationOCR 400) 汽轮机转速量测值
可以看到,强制后转速变为 3 080 转/分钟如图 7、8 所示。

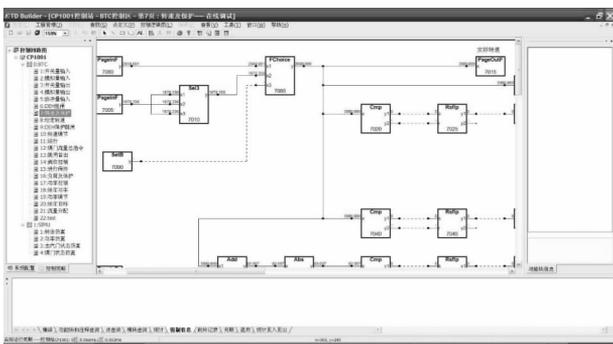


图7 强制修改后的汽轮机控制系统 (TD6000) 转速量测值

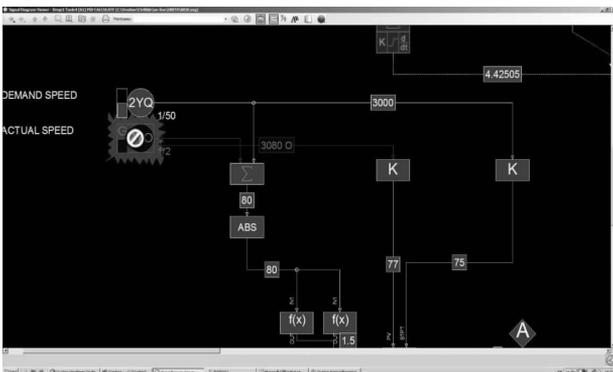


图8 强制修改后的汽轮机控制系统 (OvationOCR 400) 转速量测值

由于一些控制系统在设计中并未对强制逻辑和强制信号进行较强的信息安全鉴权设计,攻击者可以直接利用强制逻辑和强制信号对汽轮机发送虚假数据进行 FDIA s。

3.2 汽轮机虚假数据注入攻击

汽轮机控制系统的传感器在接受信号的过程中,有可能收到现场的电磁干扰等,但控制系统会进行滤波消除干扰。在上层以太网层面,没有对不良数据的检测。通过汽轮机控制系统所采用的强制信号和逻辑可以从网络上接收注入并覆盖特定的控制器的数据,对控制系统进行 FDIA s,如图 9 所示。

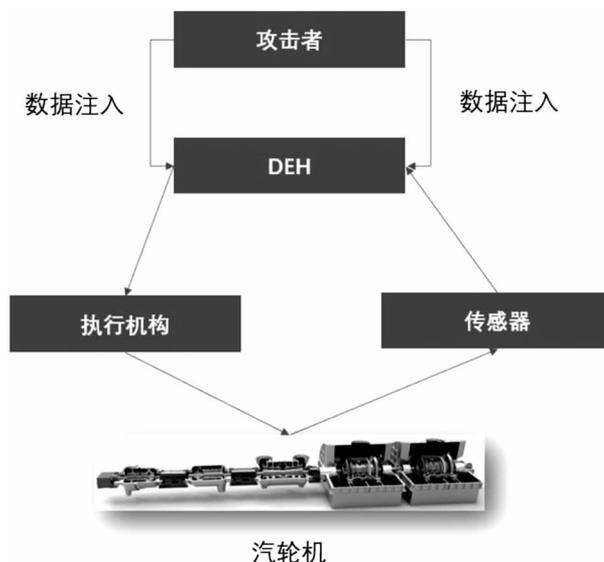


图9 汽轮机 FDIA s

控制系统对于在正常值范围内的数据注入都会作为正常输入进行处理,因此注入虚假的传感器数据、参数设定数据和执行机构动作数据会造成控制系统发出错误的控制和保护指令,对汽轮机正常运行造成影响和危害。因此,汽轮机 FDIA s 可以通过强制,直接向汽轮机控制保护系统注入虚假的:
①汽轮机运行状态数据;②汽轮机控制保护参数;③汽轮机控制保护指令;④其他虚假数据。

4 仿真实验分析

4.1 仿真实验环境

仿真实验环境由信息安全测试系统、1 000 MW 火力发电机组 DEH、汽轮机半实物仿真系统 3 个部分组成,如图 10 所示。

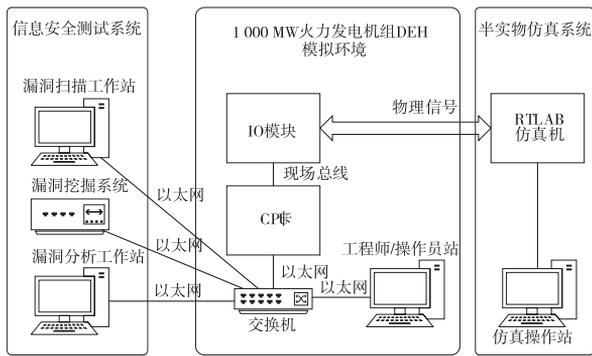


图 10 汽轮机网络安全仿真实验环境

DEH 采用 TD6000 和 OvationOCR400 分别进行实验,为了简化实验环境,没有部署 ETS、TSI 等系统。汽轮机仿真数学模型采用基于东方汽轮机设计参数的 MATLAB 建模,转速模型以汽轮机额定转速作为系统输入,经过阀门、气缸、发电机环节,输出转速。

4.2 正常工况汽轮机转速虚假数据注入攻击

在汽轮机仿真环境的正常运行工况,汽轮机运行仿真曲线如图 11 所示。

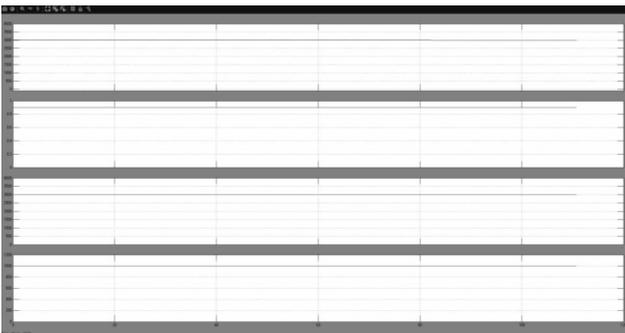


图 11 汽轮机正常运行工况仿真曲线

从上到下四个坐标轴:汽轮机仿真系统转速实际值 3 000 转/分钟,总阀位指令 90%,DEH 转速量测值 3 000 转/分钟,汽轮机输出功率 1 000 MW。

攻击者通过控制系统网络采用强制信号的方式修改输入信号如图 12、13 所示。

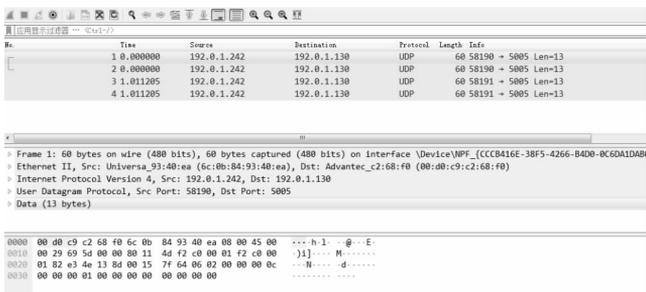


图 12 注入转速数据攻击 (TD6000)

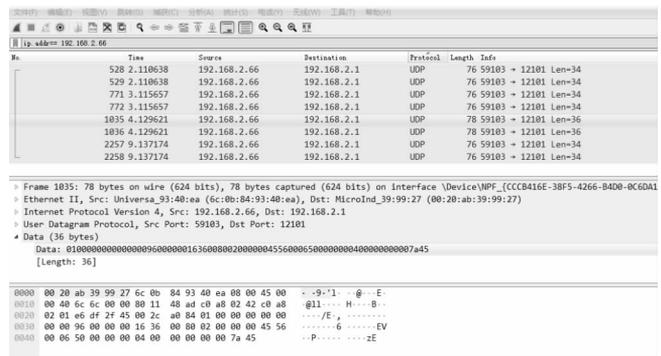


图 13 注入转速数据攻击 (OvationOCR 400)

将汽轮机转速信号从正常的 3 000 转/分钟修改为 4 000 转/分钟。

DEH 在收到虚假的转速信号之后认为汽轮机超速,触发超速保护汽轮机停机,功率降为 0。攻击后仿真曲线如图 14、15 所示。

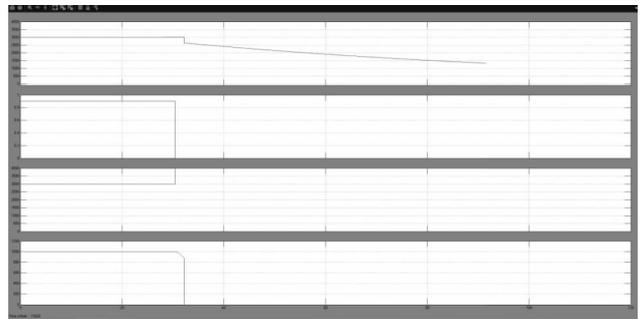


图 14 攻击后汽轮机运行仿真曲线 (TD6000)



图 15 攻击后汽轮机运行仿真曲线 (OvationOCR 400)

可以看到汽轮机实际转速逐渐下降至 0 转/分钟,总阀位指令突变为 0,汽轮机转速量测值由于虚假信号升高到 4 000 转/分钟,汽轮机功率输出降为 0 MW。

4.3 正常工况汽轮机控制保护参数虚假数据注入攻击

在汽轮机仿真环境的正常运行工况,汽轮机正常转速 3 000 转/分钟,汽轮机运行仿真曲线如图 16 所示。

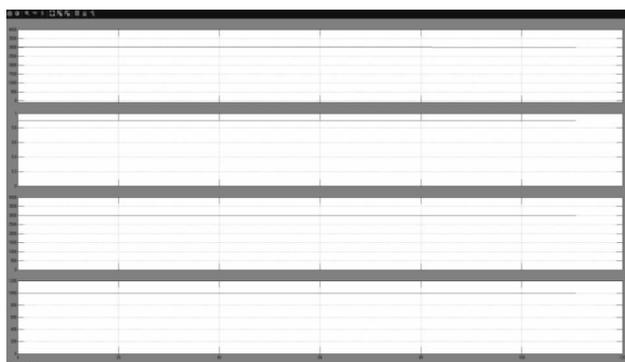


图 16 汽轮机正常运行工况仿真曲线

从上到下四个坐标轴:汽轮机转速实际值 3 000 转/分钟,总阀位指令 90%,汽轮机转速量测值 3 000 转/分钟,汽轮机输出功率 1 000 MW。

正常运行工况修改参数、修改保护整定值为 1 000,如图 17、18 所示。

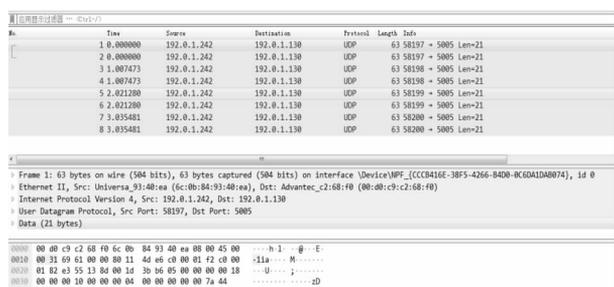


图 17 注入虚假保护整定值(TD6000)

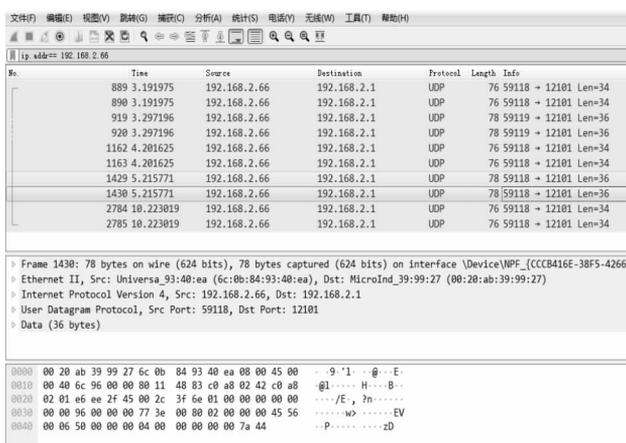


图 18 注入虚假保护整定值(OvationOCR 400)

设置 DEH 保护整定值 1 000 后会触发 DEH 超速保护,下达停机指令触发保护动作如图 19、20 所示。

可以看到汽轮机实际转速逐渐下降至 0 转/分钟,总阀位指令突变为 0,汽轮机转速量测值逐渐降至 0 转/分钟,汽轮机功率输出降为 0 MW。

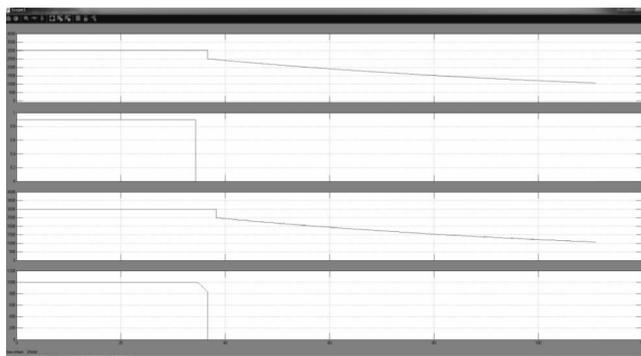


图 19 攻击后汽轮机运行仿真曲线(TD6000)



图 20 攻击后汽轮机运行仿真曲线(Ovation OCR 400)

5 结语

由于汽轮机控制保护系统会将所有正常范围内的输入数据进行正常的处理,虚假数据攻击会造成汽轮机控制系统发出错误的控制保护指令,进而对汽轮机运行造成危害,进一步构造隐蔽的高级 FDLAs 不仅能够对汽轮机运行造成危害,还能够危害汽轮机本体,这说明从信息域发动的攻击能够直接对物理域造成危害。

控制系统不应将 FDLAs 视为一种对控制系统的干扰,来自信息域的网络安全攻击应当和来自信息域的其他输入一样视之作为一种输入,汽轮机控制保护系统作为信息物理融合能源系统的一部分应当能够处理来自信息域的所有输入;由于 FDLA 这种来自信息域的输入是当前控制系统无法正确处理的输入,因而导致控制系统对这种输入进行给出了错误的输出,进而对汽轮机运行造成了危害,汽轮机控制保护系统的设计应当进行改进以实现信息域和物理域数据的正确处理,保证汽轮机运行的安全。最后,由于控制系统对于输入的认证机制不足,对非法输入的数据也会进行处理,应当在保证性能的前提下改进控制保护系统对关键数据的

输入认证机制。

参考文献:

[1] 郭庆来,辛蜀骏,王剑辉等.由乌克兰停电事件看信息能源系统综合安全评估[J].电力系统自动化,2016,40(5):145-147

[2] 刘焱,田决,王稼舟等.信息物理融合系统综合安全威胁与防御研究[J].自动化学报,2019,45(1):5-24

[3] 汤奕,陈倩,李梦雅等.电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J].电力系统自动化,2016,40(17):59-69

[4] Li F, Yan X, Xie Y, et al. A Review of Cyber-Attack Methods in Cyber-physical Power System [C]. 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2019:1335-1339

[5] 王先培,田猛,董政呈等.输电网虚假数据攻击研究综述[J].电网技术,2016,40(11):3406-3414

[6] M A Rahman, H Mohsenian-Rad. False Data Injection Attacks with Incomplete Information against Smart Power Grids [C]. 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012:3153-3158

[7] X Liu, Z Li. Local Load Redistribution Attacks in Power Systems With Incomplete Network Information [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 5(4):1665-1676

[8] X Liu, Z Bao, D Lu, et al. Modeling of Local False Data Injection Attacks With Reduced Network Information [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 6(4):1686-1696

[9] 赵亚东.智能电网虚假数据攻击检测方法研究[D].华北电力大学,2018

[10] 吴迪.虚假数据攻击下电力系统安全检测技术研究[D].燕山大学,2020

[11] 房德明.汽轮发电机组毁机事故及其失效分析

[12] 王先培,田猛,董政呈等.输电网虚假数据攻击研究综述[J].电网技术,2016,40(11):3406-3414

[13] Liu X, Li Z, Liu X, et al. Masking Transmission Line Outages via False Data Injection Attacks [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 11(7):1592-1602

[14] 王勇,武津园,陈雪鸿等.基于卡尔曼滤波的电力虚假数据注入攻击检测方法[J].上海电力大学学报,2021,37(2):205-210

(上接第16页)

[6] Rajeev Alur, David L. Dill. A theory of timed automata [J]. Theoretical computer science, 1994, 126(2):183-235

[7] M B Younis, G Frey. Formalization of PLC programs to sustain reliability [C]. IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2004(2):613-618

[8] Willems H. Compact Timed Automata for PLC Programs. 1999. <https://pms.cs.ru.nl/iris-diglib/src/getContent.php?id=2006-Willems-CompactAutomata>

[9] Heiner M, Menzel T. A Petri Net Semantics for the PLC Language Instruction List [J]. Wodes, 1998

[10] T. Mertke, G. Frey. Formal verification of PLC programs generated from signal interpreted Petri nets [C]. 2001 IEEE International

Conference on Systems, 2001(4):2700-2705

[11] X. Weng, L. Litz. Verification of logic control design using SIPN and model checking: methods and case study [C]. Proceedings of the 2000 American Control Conference, 2000(6):4072-4076

[12] 殷翔.动态系统的形式化分析与控制-上海交通大学, <https://www.bilibili.com/video/BV12r4y1w7DF?from=search&seid=16915408343621234652>

[13] Rui Wang, Yong Guan, Luo Liming, et al. Component - Based Formal Modeling of PLC Systems [J]. Journal of Applied Mathematics, 2013

[14] 黄宋魏,邹金慧.电气控制与PLC应用技术[M].北京:电子工业出版社,2015

集团要闻

风“豫”同“州”东方电气集团向河南灾区捐款 500 万元

7月23日报道。近日,中原大地持续遭遇强降雨,汛情造成重大人员伤亡和财产损失,防汛形势异常严峻。河南汛情牵动全国人民的心,习近平总书记对防汛救灾工作做出重要指示,要求始终把保障人民群众生命财产安全放在第一位,抓细抓实各项防汛救灾措施。东方电气集团党组坚决贯彻落实习近平总书记关于防汛救灾工作的重要指示精神,落实党中央、国务院决策部署,提高政治站位,决定捐款500万元用于支援受灾地区抢险救灾和灾后重建工作,同时积极组织在豫企业开展防汛工作。

位于焦作市的所属企业河南东方锅炉城发环保装备有限公司第一时间启动应急响应,迅速组建以支部党员为主力的临时防汛抢险突击队,团结动员青年团员、职工群众力量投入抗洪防汛第一线,用纪律和忠诚筑起一道坚固的“抢险保障线”。

来源:东方电气网

某燃料电池动力系统管道密封性能分析

蒲守武¹ 罗仁超² 刘彦萍² 张昊² 王亮² 张庭华²

1. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川德阳 618000; 2. 东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司, 成都 611731

摘要: 车用燃料电池动力系统采用大量的硅橡胶管路系统, 为了提升车用燃料电池动力系统管路的密封性能可靠性, 本文基于 Rivlin 模型对硅橡胶管路接头处进行了有限元分析, 并进行了密封性试验验证, 建立了保证硅橡胶管路接头密封性的设计方法。试验结果表明, 采用此设计方法, 可以满足硅橡胶管路接头的密封性要求。

关键词: 燃料电池系统; 硅橡胶; Rivlin

中图分类号: TM911.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0025-04

Analysis of Pipeline Sealing Performance of A Fuel Cell Power System

PU Shouwu¹, LUO Renchao², LIU Yanping², ZHANG Hao², WANG Liang², ZHANG Tinghua²

(1. Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China;

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

Abstract: There are a large number of silicone rubber pipings in fuel cell power systems. In order to improve the sealing performance reliability of fuel cell power system pipeline, this paper introduces a method to ensure the sealing reliability of silicone rubber pipe joints based on Rivlin model. The finite element analysis and the sealing test is carried. The test results show that using this design method, the sealing requirement of silicone rubber pipe joints is guaranteed.

Key words: fuel cell power system; silicone rubber; Rivlin

“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。”2020 年 9 月 22 日, 在第七十五届联合国大会上, 中国首次提出碳中和目标, 这项硬指标引起国内外广泛关注。面对当下的气候危机, 中国主动提升《巴黎协定》的减排承诺并呼吁世界经济绿色复苏。推动包括绿色清洁的氢能作为传统能源向可再生能源转型的主要替代方式势在必行。

氢作为清洁、高效、可持续的能源载体, 是应对气候变化和环境危机的关键抓手之一。质子交换膜燃料电池动力系统通过电化学反应将氢气和氧气的化学能高效地转化为电能, 能量转化效率可达 60%, 排放零污染, 被大家认为是最绿色最理想的电

池。车用燃料电池技术目前面临的急迫问题是系统的稳定性和耐久性, 燃料电池动力系统内的氢气、空气和水系统管路均采用硅橡胶管联通, 管路的接头是最容易发生泄漏的位置, 接头的密封性均采用卡箍紧扎。因此为了保证系统的可靠性, 必须保证管路接头处的密封性能。

本文提出了一种依靠试验和基于 Rivlin 模型的有限元分析的硅橡胶管接头密封性设计方法, 为硅橡胶管路接头密封性的设计提供参考。

1 燃料电池管路接头卡箍连接形式

由于燃料电池中的硅橡胶管路中硅橡胶管与接头都是通过卡箍固定和密封(图 1)。硬接头在端部

收稿日期: 2020-12-15

基金项目: 四川省科技厅资助: 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: 蒲守武(1987-), 男, 2012 年毕业于哈尔滨工业大学力学系工程力学专业, 硕士, 工程师。现在东方汽轮机有限公司产品研发中心主要从事结构可靠性设计工作。

一般设计有竹节头,在结合卡箍的挤压作用下,保证硅胶管不与硬接头滑脱。硅胶管名义内径相对于硬接头外径一般采用过盈设计,同时通过拧紧卡箍的螺钉(图2),减小卡箍有效周长和直径,卡箍挤压硅胶管变形,因此硅胶管内壁和接头外壁将产生挤压应力,从而达到密封管道内流质的效果。由于燃料电池中各种流质的内压不同,需要不同的挤压应力保障管路系统的密封性。

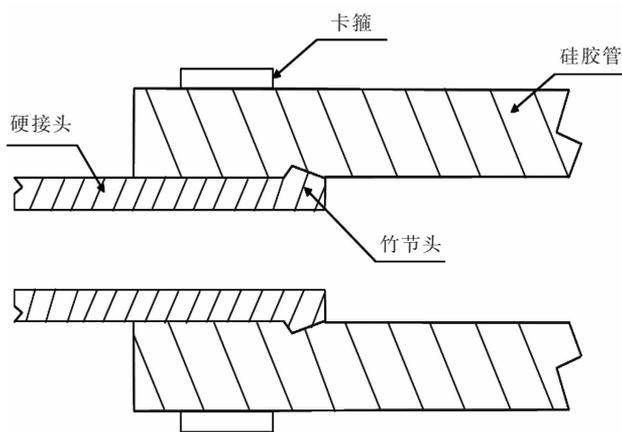


图1 卡箍连接示意图

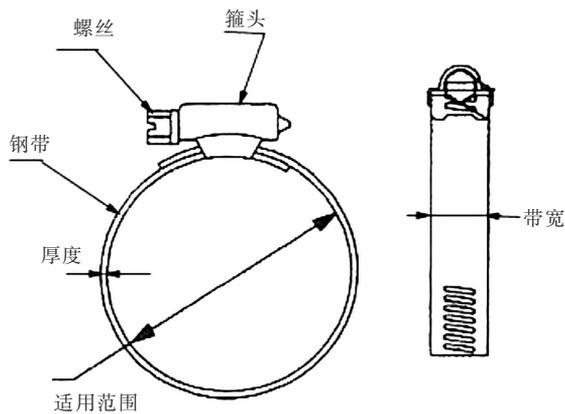


图2 卡箍

2 硅橡胶本构模型

硅橡胶属于超弹性材料,其多项式形式的应变势能式(1)^[1]是常用形式之一。

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (1)$$

式中: U 为应变势能; J_{el} 为弹性体积比; I_1 为应变第一不变量; I_2 为应变第二不变量; C_{ij} 为材料剪切特性参数; D_i 为可压缩性参数。

在工程应用和研究领域,人们常用基于各向同性且不可压缩假设的 Mooney-Rivlin 模型进行研究, Mooney-Rivlin 模型假设材料为不可压缩,所以,不考虑式1中的第二部分;假设只考虑线性部分,则 $N=1$,式(1)应变能密度表达式可简化为式(2),该模型在橡胶应变小于150%的范围内能够较好的表征材料的性能。

$$U = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3) \quad (2)$$

材料参数的确定

其中 C_1 、 C_2 与初始拉伸模量满足关系式(3):

$$E = 6(C_1 + C_2) \quad (3)$$

在邵氏硬度 30 ~ 80 范围内, E 可以通过式(4)^[2]得到:

$$E = 6.72 \times 10^{-3} \sqrt{H^3} \quad (4)$$

式中 H 为邵氏硬度,可由试验测定。 C_2/C_1 与邵氏硬度的关系见图3。

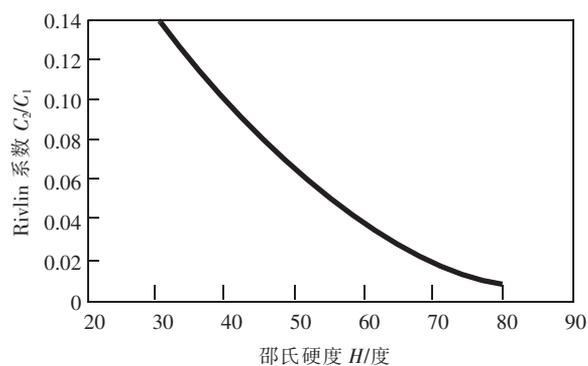


图3 C_2/C_1 与邵氏硬度的关系

根据试验测得管路系统硅橡胶的邵氏硬度为79,从而可以由式(4)计算出 $E = 4.7186$ MPa,通过图3和式(2)可以计算得到 $C_1 = 0.7786$, $C_2 = 0.0078$ 。

3 硅胶管的应力求解

接头位置的硅胶管几何形状和载荷分布均与周向坐标无关,该力学模型为平面轴对称问题,硅胶管内的微元在柱坐标系下的应力状态如图4所示。微元在径向和周向满足平衡方程式(5)和式(6)^[3]。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{r \partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + f_r = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\theta}{r \partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + f_\theta = 0 \quad (6)$$

式中： σ_r 为径向应力； $\tau_{r\theta}$ 为剪切应力； σ_θ 为周向应力； r 为微元相对于轴的径向坐标； θ 为微元相对于轴的周向坐标； f_r 为微元所受径向外力； f_θ 为微元所受周向外力。

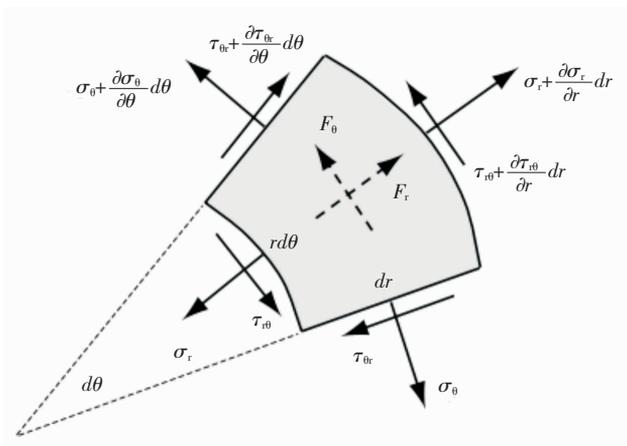


图4 柱坐标系下微元应力状态

硅胶管的受力模型见图5,其内壁面受到硬接头的挤压应力 P_1 ,外壁面受到卡箍的挤压应力 P_2 ,其边界条件如下:

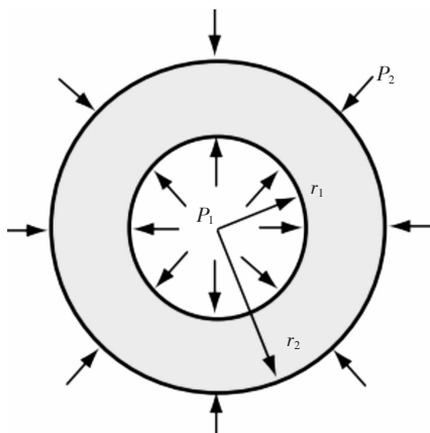


图5 硅胶管受力模型

在内外壁边界上： $r=r_1$ 时， $\sigma_r = -P_1, \tau_{r\theta} = 0$ ； $r=r_2$ 时， $\sigma_r = -P_2, \tau_{r\theta} = 0$ 。

在此边界条件下，基于拉梅解，可得到硅胶管内部点在径向和周向的应力解表达式，见式(7)和式(8)：

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 r_2^2 (P_2 - P_1)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2} + \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{r_1^2 r_2^2 (P_2 - P_1)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2} + \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (8)$$

4 卡箍拧紧力矩与硅胶管径向位移的关系

由于在拧紧过程中卡箍与硅胶管的接触状态

非常复杂，不能准确给出拧紧扭矩与卡箍对硅胶管径向压力之间的关系。因此，通过试验测得拧紧扭矩与对应拧紧状态下卡箍外径数据(图6)，从而得到卡箍拧紧力矩与硅胶管外径径向位移关系图(图7)。可以看出，在1.5~3 N·m段，拧紧力矩和硅胶管外径径向位移呈近似线性关系，超过3 N·m之后，曲线趋于平缓，这主要是因为随着拧紧力矩的增加，卡箍和硅胶管外壁摩擦消耗的拧紧力矩更多，所以拧紧力矩转化为径向力比例更小，另外由于硅胶管内增强纤维对硅胶管变形的约束，使得硅胶管更难被压缩。



图6 拧紧力矩-硅胶管外径试验

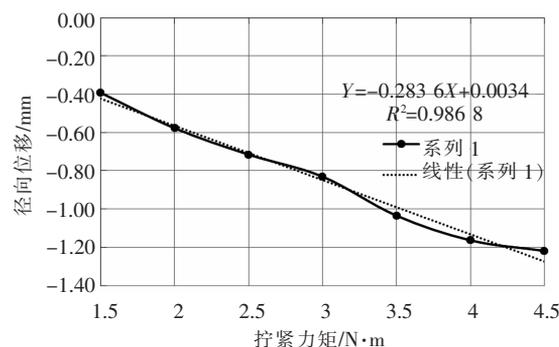


图7 拧紧力矩-硅胶管外径径向位移关系

5 计算分析

由于重点研究接头与硅胶管的密封性，在有限元分析模型中仅考虑接头和硅胶管作为分析对象，未考虑卡箍实体模型，而是将卡箍对硅胶管的作用转化为对硅胶管施加径向位移的边界条件等效(图8)。选用大型商业软件 ABAQUS 进行模拟分析，应用专业分析超弹性材质的六面体单元对分析模型进行离散，由于硅胶管的变形较大，为保证分析结果的准确性，将卡箍作用附近的硅胶管和硬接头进行网格细化(图9)。拧紧力矩-硅胶管与接头的挤压应力的分析结果见表1和图10~13，可以看出随着拧紧力矩增加，挤压应力近似线性快速增加。

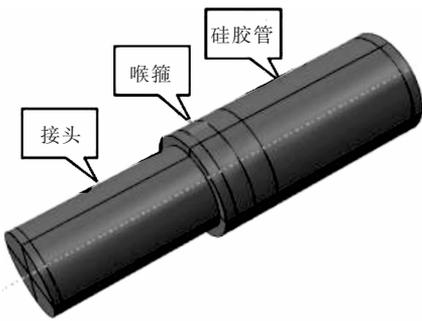


图8 有限元分析几何模型



图9 网格模型

表1 拧紧力矩-挤压应力关系

拧紧力矩/N·m	2	2.5	3	3.5	4	4.5
挤压应力/MPa	0.598	0.884	1.158	1.777	2.267	2.491

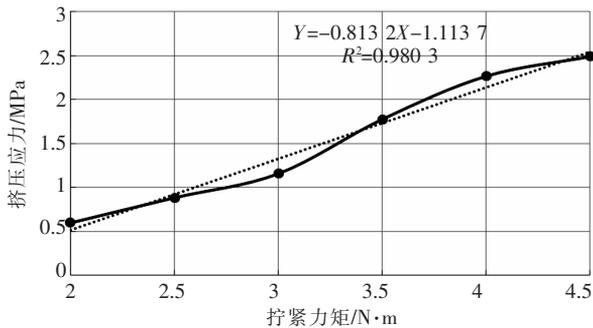


图10 拧紧力矩-挤压应力关系



图11 接头外壁挤压应力分布



图12 硅胶管内壁挤压应力分布

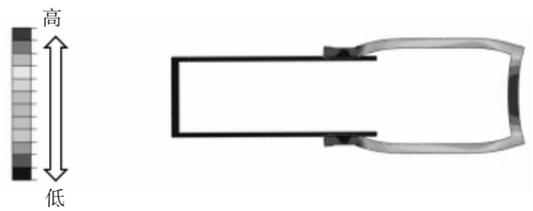


图13 接头和硅胶管中心剖面位移分布

6 接头密封试验

根据接头实际使用情况,选择内压最高的水系统接头做密封试验(图14),验证设计的可靠性。对卡箍螺钉施加拧紧扭矩 $3 \text{ N}\cdot\text{m}$,一次性拧紧 1 min 后复拧一次,保证拧紧力矩。管道压力为 270 kPa (1.5 倍水系统压力)。在 40 分钟保压密封试验过程中,未发现漏气,系统密封性良好。

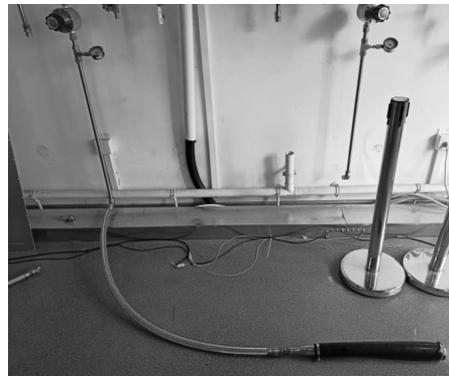


图14 密封性试验

7 其他管径接头的密封性

将卡箍等效为二维问题,其受力状态如图15所示。卡箍切向应力 σ_θ ,卡箍内壁压力 P ,和卡箍平均半径及厚度的关系见式(9)^[4]。

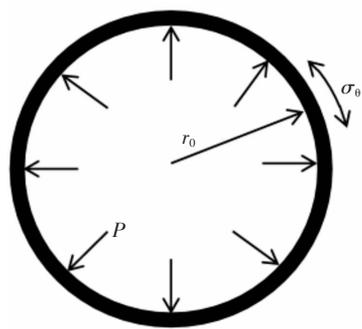


图15 卡箍力学模型

$$\sigma_\theta \approx \frac{P \times r_0}{t} \quad (9)$$

(下转第32页)

蓄电池供电的三相 PWM 变流器直流电容设计

刘静波 王多平 田军 杨嘉伟 唐健

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要: 电池供电的三相 PWM 变流器应用广泛,但是直流电容的设计一般凭借经验估算或是通过试验测试,经验估算存在偏差,试验测试设计效率不高实施不方便。本文根据拓扑与调制的原理,分析了直流侧的电流情况,推导出直流电流的有效值及平均值。依据直流侧电流的传递函数,提出了较为精确的设计直流电容的方法,并对提出的设计方法进行了仿真验证。

关键词: 直流电容; 变流器; SVPWM; 蓄电池

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0029-04

DC Capacitance Design of Battery-powered Three-phase PWM Converter

LIU Jingbo, WANG Duoping, TIAN Jun, YANG Jiawei, TANG Jian

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

Abstract: Battery-powered three-phase PWM converter are widely used, but the design of DC capacitor generally relies on experience to estimate or through test, which empirical estimation is biased, and test design efficiency is not high implementation and is not convenient. Based on the principle of topology and modulation, the current situation of DC side is analyzed, the RMS value and average value of DC current are derived. According to the transfer function of the dc side current, a more accurate design method of DC current capacity is proposed, and the proposed design method is verified by simulation.

Key words: DC capacity; converter; SVPWM; battery

蓄电池供电的三相 PWM 变流器拓扑结构如图 1 所示,主要应用在电动汽车控制器、储能逆变器等场所。电动汽车是以车载电源为动力,用电动机驱动车辆行驶,且满足道路安全法规对汽车的各项要求的车辆,电动汽车的发展是石油危机及人们对环境要求的必然产物。与内燃机汽车相比,电动汽车具有高效、方便、无污染、低噪声等优点^[1]。储能逆变器一般应用于智能电网、分布式发电场,能有效调控电力资源,能很好地平衡昼夜用电差异,平抑分布式能源发电功率波动,是可再生能源应用的重要前提和实现电网智能管理的有效手段。

如图 1 所示,三相 PWM 变流器直流输入电流 i_{dc} 为脉冲形式的高频电流,在蓄电池供电情况下,如

果不在变流器直流侧并联电容,则高频脉冲电流 i_{dc} 全部由蓄电池提供。直流电容起到能量缓冲,并抑制直流侧谐波电压的作用^[2-3]。蓄电池并非理想的电压源,都有一等效的内阻 r ,并且在实际应用中,蓄电池与变流器有一定距离,需要电缆连接,电缆的电阻 R_s 与电感 L_s 对于高频脉冲电流均不能忽略。这样,蓄电池的电压会出现高频脉动,变流器直流侧电压会出现电压尖峰,严重影响系统的性能。电容的选取包括容值与纹波电流能力的选取,容值选的过大会增加装置体积,提高装置成本,选的太小达不到滤波需求^[4]。纹波电流能力越大成本越高,若纹波电流能力不够,则会大大影响电容寿命,降低装置的可靠性。

收稿日期: 2021-04-02

基金项目: 四川省科技计划项目资助: 电厂智能化关键技术研究; 项目编号: 2020YFG0350。

作者简介: 刘静波(1984-),男,2011年毕业于四川大学电力电子与电力传动专业,硕士研究生,工程师。研究方向为智慧火电、电力电子功率变换及控制等领域。

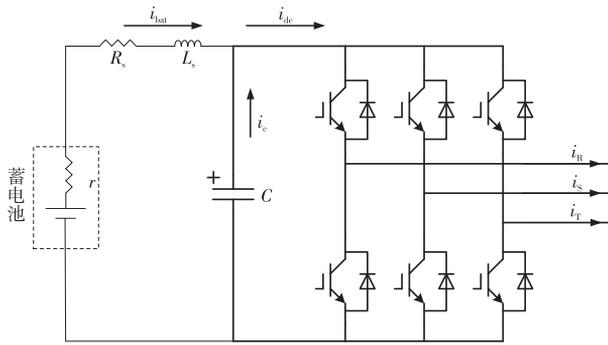


图1 蓄电池供电的三相 PWM 变流器拓扑

1 三相 PWM 变流器直流输入电流分析

三相 PWM 变流器直流输入电流 i_{dc} 由交流输出电流 i_R 、 i_S 、 i_T 的片段组成^[5],如图2所示。

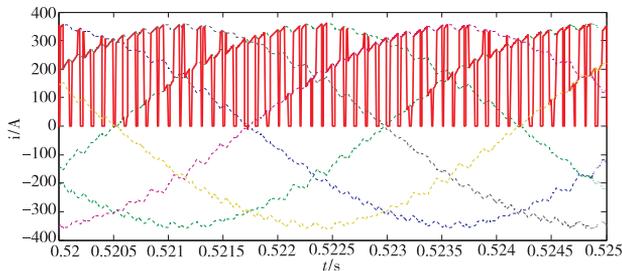


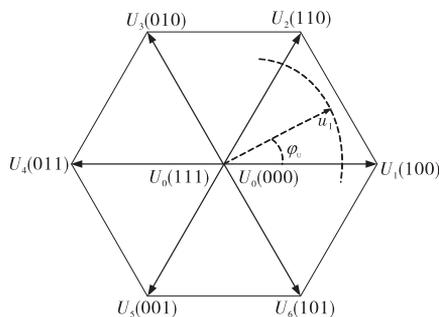
图2 三相 PWM 变流器直流电流 i_{dc}

$$i_{dc} = S_R i_R + S_S i_S + S_T i_T \quad (1)$$

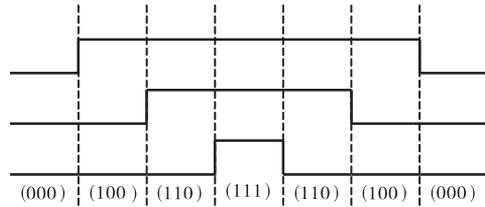
式(1)中, S_i ($i=R, S, T$) 为三个桥臂开关状态, 上管开通 $S_i=1$, 反之 $S_i=0$ 。 i_R 、 i_S 、 i_T 为三相输出电流, 见式(2):

$$\left. \begin{aligned} i_R &= I_m \cos(\varphi_U - \varphi) \\ i_S &= I_m \cos(\varphi_U - \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ i_T &= I_m \cos(\varphi_U - \varphi + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

变流器采用 SVPWM 调制, 如图3所示, 空间矢量包括六个非零矢量以及 (000) 和 (111) 两个零矢量。



(a) 空间电压矢量



(b) I 区间矢量合成

图3 SVPWM 调制

当调制电压矢量 u_1 处于第一区间时, 两个非零矢量的占空比有如式(3)表达式:

$$\left. \begin{aligned} d_{(100)} &= \frac{\sqrt{3}M}{2} \sin(\frac{\pi}{3} - \varphi_U) \\ d_{(110)} &= \frac{\sqrt{3}M}{2} \sin \varphi_U \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中, M 为调制比, 定义为式(4):

$$M = \frac{U_m}{0.5U_{dc}} \quad 0 \leq M \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

式(4)中, U_m 为交流相电压峰值。

当零矢量 (000) 和 (111) 作用时, $i_{dc} = 0$; 当 (100) 作用时, $i_{dc} = i_R$; 当 (110) 作用时, $i_{dc} = -i_T$ 。 在一个开关周期 i_{dc} 的平均值为式(5):

$$I_{dc_avg} = T_s \int_0^{T_s} i_{dc} dt \quad (5)$$

假设开关频率足够高, 在每个矢量作用时, 电流可以看做恒定值, 则有式(6):

$$I_{dc_avg} = d_{(100)} i_R - d_{(110)} i_T \quad (6)$$

将式(2)、(3)代入式(6)中, 可得式(7):

$$I_{dc_avg} = \frac{3}{4} I_m M \cos \varphi \quad (7)$$

同理, 在每个电压矢量区间对 i_{dc} 的平均值进行计算, 式(6)均成立。 i_{dc} 的有效值有式(8)~(9)成立:

$$i_{dc_rms}^2 = d_{(100)}^2 i_R^2 + d_{(110)}^2 i_T^2 \quad (8)$$

$$I_{dc_rms}^2 = \frac{3}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} i_{dc_rms}^2 d\varphi_U \quad (9)$$

在电压矢量 I 区间时 i_{dc} 的总有效值为式(10)^[6]:

$$I_{dc_rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{\pi}} M \left(\frac{1}{4} + \cos^2 \varphi \right) \quad (10)$$

在其他区间时, 直流电流有效值与 I 区间有效值相同。

2 直流电容电流分析

在稳态运行时, 变流器电流为受控状态, 于是

考虑将变流器在直流侧等效为受控电流源,并考虑直流电容的内部电感及电阻(ESR),如图4所示。

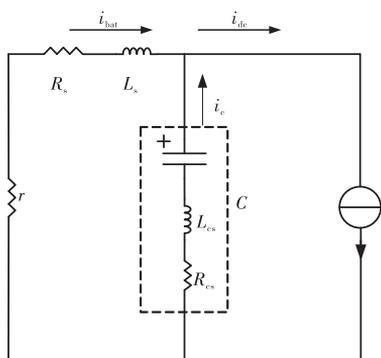


图4 直流侧等效电路

则由图4可得直流电容电流 $I_c(s)$ 与变流器输入电流 $I_{dc}(s)$ 的传递函数 $G(s)$ 为式(11):

$$G(s) = \frac{s^2 CL_s + sC(r + R_s)}{s^2 C(L_s + L_{cs}) + sC(r + R_s + R_{cs}) + 1} \quad (11)$$

变流器开关频率 $T_s = 6$ kHz 以某品牌薄膜电容为例,单只电容容值 $300 \mu\text{F}$,纹波电流 45 A,寄生电感 $L_{cs} = 50$ nH,寄生电阻(ESR) $R_{cs} = 2$ m Ω 。电缆的杂散参数经有限元软件提取,在 6 kHz 得到交流值 $R_s = 1.74$ m Ω , $L_s = 761.06$ nH,电池的内阻 $r = 0.05$ Ω 。当直流电容分别为 $300 \mu\text{F}$ 、 $600 \mu\text{F}$ 、 $900 \mu\text{F}$ 时, $G(s)$ 的 bode 图如图5所示。

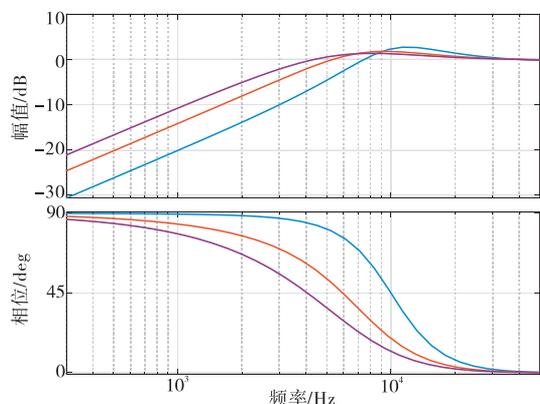


图5 直流电容电流比变流器输入电流传递函数 bode 图

直流电容容值为 $300 \mu\text{F}$ 时,频率大于 7.5 kHz 增益才为 0 ,即直流电容只能滤掉 7.5 kHz 以上的高频谐波,而开关频率为 6 kHz,谐波的主要频率也是开关频率及整数倍的频率,所以 $300 \mu\text{F}$ 的电容偏小。直流电容容值为 $600 \mu\text{F}$ 时,频率大于 6 kHz 增益为 0 。直流电容容值为 $900 \mu\text{F}$ 时,频率大于

4 kHz 增益为 0 。直流电容容值越大,滤波效果越好,但是容值越大成本越高。

由图5可以注意到,由于寄生电感的存在,在某段频率范围,增益还会大于 0 ,也就是说直流电容电流被放大。因此,蓄电池到变流器开关器件模块线缆的长度不能过大,并且直流电容容值不能太小。

由于寄生电阻与寄生电感的值较小,在进行容值估算时可以采用式(12)计算,可满足精度要求。

$$C = \frac{1}{2\pi f Cr} \quad (12)$$

3 直流电容设计

为了便于计算高频纹波电流 I_{dchf} 的有效值,由式(7)与式(10)可得式(13):

$$I_{dchf} = \sqrt{\frac{I_m^2 2\sqrt{3}}{2\pi} M \left(\frac{1}{4} + \cos^2 \varphi \right) - \frac{9}{16} I_m^2 M^2 \cos^2 \varphi} \quad (13)$$

设 $I_m = 100$ A, I_{dchf} 与调制比 M 、功率因数 $\cos \varphi$ 的关系,如图6所示。

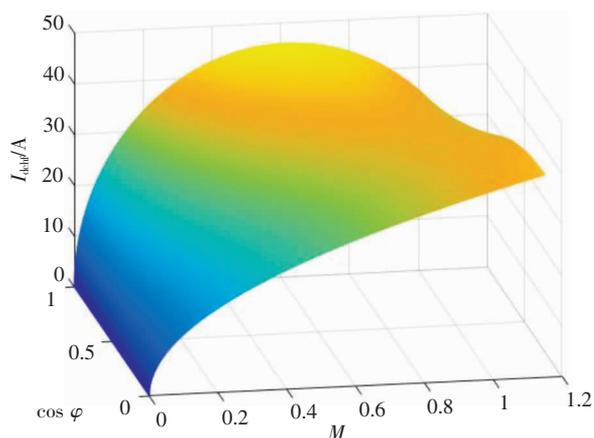


图6 高频纹波电流 I_{dchf} 与调制比 M 、功率因数 $\cos \varphi$ 的特性曲面

由图6可得出,当功率因数 $\cos \varphi$ 为 1 且调制比 M 为 0.6 时,高频纹波电流 I_{dchf} 最大,校核直流电容纹波电流能力时便以此工况进行计算。开关频率为 6 kHz,设计截止频率为 5 kHz,根据式(12)计算可得 $C = 636 \mu\text{F}$,取一定裕量,选择 3 只电容并联。当 $I_m = 100$ A 时, I_{dchf} 最大值为 45.9 A, 3 只电容并联时,纹波电流能力可达 135 A,满足设计要求。

对蓄电池供电的三相 PWM 变流器进行仿真建模,验证计算方法的正确性,参数设置如前文所述。

控制 $I_m = 100 \text{ A}$, 功率因数为 1, 如图 7 所示。

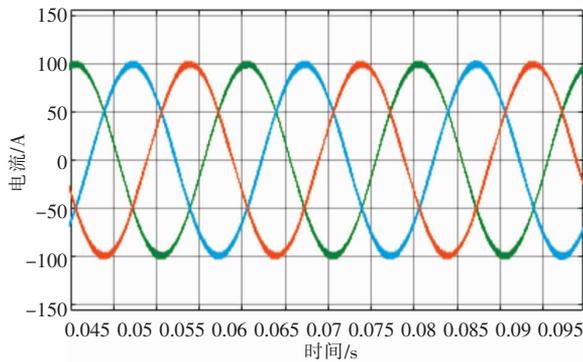


图 7 变流器三相电流

调制比 M 分别为 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 时的直流电容电流有效值如表 1 所示, 可以验证功率因数为 1 时, 调制比 $M = 0.6$ 时, 高频纹波电流最大。并且当 $M = 0.6$ 时, 直流电容电流为 44.01 A 与高频纹波电流 I_{dchr} 计算值 45.9 A 基本一致。

表 1 不同调制比直流电容电流

M	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
I_c (A)	40.76	43.11	44.01	43.79	42.17

4 结语

蓄电池供电的 PWM 变流器应用广泛, 为了提

(上接第 28 页)

式中: σ_θ 为周向应力; P 为卡箍内壁压力; r_0 为卡箍平均半径; t 为卡箍厚度。

由式(9), 可以看出在相同 σ_θ 条件下, 随着平均半径 r_0 增加, 卡箍内壁压力 P 减小。因此, 随着接头外径增加, 若在保证卡箍对硅胶管的挤压应力 P 不降低, 则需更大的切向应力, 即需要更大的拧紧力矩。

8 结语

硅胶管接头卡箍拧紧力矩需基于硅胶管材质、被密封流质的内压和卡箍的强度综合确定, 本文以依靠试验和基于 Rivlin 模型的有限元分析, 提出以下硅胶管接头密封性设计方法, 为硅橡胶管路接头密封性的设计提供参考。

(1) 在其他条件不变的情况下, 拧紧力矩增加, 卡箍径向变形近似线性增加, 且硅胶管与接头的挤压应力也近似线性增加。

高功率组件设计的效率、准确性及可靠性, 本文提出通过交流电流峰值、调制比、功率因数计算直流电流的高频纹波有效值, 据此可以准确设计直流电容的纹波电流有效值。根据直流侧电流传函的波特图或者简化计算公式, 能够得出满足滤波要求的最小容值。准确严谨的计算, 对直流电容的最优设计具有重要的意义, 不仅能够满足变流器可靠性的要求, 同时具备成本优势。

参考文献:

- [1] Xia Changliang, Song Zhanfeng. Wind energy in China: current scenario and future perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(8): 1966 - 1974
- [2] Zhang S, Tseng King Jet, Vilathgamuwa D M, et al. Design of a robust grid interface system for PMSG-based wind turbine generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 316 - 328
- [3] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风电系统变流器拓扑分析 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 77 - 81
- [4] 应婷, 张宇, 王坚等. 直流母线支撑电容纹波电流研究 [J]. 大功率变流技术, 2015(1): 15 - 19 + 48
- [5] 张加胜, 张磊. PWM 逆变器的直流侧等效模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007(4): 103 - 107
- [6] 吴志红, 陈国强, 朱元. 永磁电机矢量控制下逆变器母线电流频谱分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 116 - 121

(2) 由于卡箍对硅胶管的挤压应力实际沿周向分布不均匀, 通过分析和试验, 对于燃料电池系统管路卡箍螺钉拧紧力矩在 3 ~ 3.5 N·m 较合适。

(3) 卡箍规格一致, 在相同的拧紧力矩作用下, 直径越大, 径向挤压应力越小。

(4) 随着时间的推移, 硅胶在受力及环境温度等条件影响, 存在蠕变和松弛现象, 硅胶管将产生永久变形, 使得接头处挤压应力逐步降低, 因此需间隔一定时间对卡箍进行复拧, 以保障系统的密封性。

参考文献:

- [1] 庄苗等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 252 - 253
- [2] 王锐等. 橡胶隔振器系列化设计方法研究 [J]. 噪声与振动控制, 2006, 4: 11 - 25
- [3] 陆明万. 弹性理论基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001
- [4] Martin H. Sadd. Elasticity-Theory, Application and Numerics [M]. ELSEVIER, 2005

直流式换热器壳侧流阻特性分析

任毅¹ 王晓丁² 李琼¹ 莫堃¹

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 东方电气股份有限公司, 成都 611731

摘要: 直流式换热器是动力和化工行业关键设备之一。本文基于小型直流式换热器热工水力试验结果, 拟合壳侧单组支撑板区域压损和雷诺数函数关系, 并通过试验数据分析扩大到表征壳侧沿程压损; 通过对比试验数据, 发现修正后 Rehme 棒束通道模型在系统和一维分析计算中更准确; CFD 仿真计算结果在试验数据误差带内, 且详细准确的支撑板间速度和压力分布能为换热器安全性和热工分析等提供更准确的理论依据。

关键词: 单组支撑板; 压降模型; 棒束通道; CFD 仿真

中图分类号: TK172

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0033-06

Analysis of Flow Resistance Characteristics for Once-through Heat Exchanger

REN Yi¹, WANG Xiaoding², LI Qiong¹, MO Kun¹

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

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

Abstract: Once-through exchanger is a key facility for power and chemical industries. In this paper, a fitted formulas between pressure loss and the Reynolds numbers is proposed based on thermal-hydraulic experimental results of once-through heat exchanger. By contrasting experimental data, the post-correction Rehme's rod bundle channel model is more accurate in one-dimensional calculation. The CFD simulation results are in agreement with experimental data, and the detail velocity and pressure distribution between support plates provides evidence for safety and thermal analysis of heat exchanger.

Key words: a set of support plate; pressure drop model; rod bundle channel; CFD simulation

直流式换热器作为蒸汽发生器广泛应用于动力与化工行业, 一般而言其流体质一侧由上向下流动, 一侧由下向上流动, 进行逆流换热。本文所述直流式换热器高温介质在换热器壳侧流动, 水/水蒸汽介质在换热管内流动, 两者流动方向相反, 高温侧热量传递到水/水蒸汽介质中形成过热蒸汽。该型换热器换热管采用直管式结构, 其传热情况比自然循环蒸汽发生器复杂, 二次侧包含了过冷单相水、过冷沸腾、饱和泡核沸腾、强制对流蒸发、缺液区(传热恶化区)和过热蒸汽区等多种传热工

况。因此, 现阶段国内大部分研究都集中于直流式换热器的热工水力特性分析计算^[1-2]和给水控制^[3]等理论仿真工作。徐帅等人在直流换热器介质反应现象敏感性分析中提出不同壳侧压力对反应产物的扩散和分布有很大影响^[4]。本文基于小型直流式换热器热工水力试验数据, 为一维理论计算模型确定和验证三维 CFD 仿真结果提供数据支撑, 并通过换热器壳侧沿程压力和各向速度变化情况为壳侧安全性分析和换热器换热特性分析等提供更准确的壳侧参数。

收稿日期: 2021-01-20

作者简介: 任毅(1988-), 男, 2013年毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业, 硕士, 工程师。现在东方电气集团科学技术研究院公司机械系统与人工智能研究所从事热工流体分析设计工作。

1 试验和计算模型

本文所述小型直流式换热器换热管数量为7根,为三角形栅格的管束布置方式。换热器壳侧采用支撑板沿轴向约束固定管束,且各支撑板以3个一组的形式沿轴向重复布置。该小型直流式换热器热工水力试验本身是对小比例蒸发器热工水力特性进行研究,除去换热器两侧进出口参数的测量,在换热器壳侧(即高温侧)沿程还布置了多支温度传感器以确定沿程温度分布。同时还设置了两组压差变送器分别用于测量单组支撑板两侧压差和整个直流式换热器进出口压差。热工水力试验中根据各功率台阶整理形成多个稳态工况,涵盖了低功率、满功率和超功率工况等。因此,试验中壳侧温度和流量会随着换热器整体功率的增大而增大。

为确定换热器一维理论计算模型以及验证三维 CFD 仿真计算结果,理论计算和三维计算数据提取区域和试验中单组支撑板压差变送器安装位置相同,如图1所示,从中可以看到单组支撑板区域包含了3个支撑板,其中两个结构一样,但安装角度有区别。

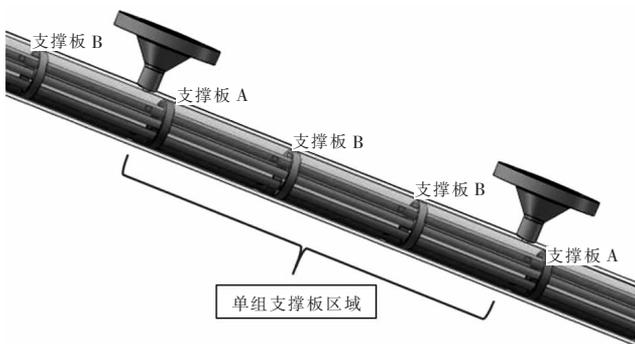


图1 直流式换热器壳侧三维示意图

在 CFD 计算中虽然提取数据截面和压差变送器位置相同,但计算中为尽量保证单组支撑板内流动特性和实际一致,因此 CFD 建模计算域如图1所示在单组支撑板两侧各增加了一个支撑板区域。直流式换热器热工水力试验中压差变送器在高温静置状态下进行了调零,消除了重力压降的影响,因此在理论计算和 CFD 仿真计算中总压损都不考虑重力作用。

2 计算方法

2.1 一维理论计算

流体在流动过程中压力损失主要包括重力压降、加速压降、摩擦压降和形阻压降。在剥离重力压降后,小型直流式换热器壳侧流阻理论上主要包括沿程摩擦阻力损失和局部阻力损失,即在计算区域内,壳侧高温介质流经换热管组成管束区的沿程压损和流经支撑板区域流道突然缩小和扩张的局部压损。

(1) 沿程压损计算

直流式换热器壳侧高温介质为单相流体流动,对于单相摩擦压降的计算通常采用 Darcy 公式如式(1):

$$\Delta p_f = f \frac{l \rho V^2}{D_e} \quad (1)$$

式中, f 为 Darcy 摩擦系数; l 为流道长度(m); D_e 为水力直径(m); ρ 为流体密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); V 为流体速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

由此可见,对于单相摩擦压降的计算关键在于摩擦系数 f 的计算,而 f 与流型以及通道类型等均有较大关系,而流体通道可以大致分为圆管通道和棒束通道。本章节介绍了多种圆管和棒束通道摩擦压降计算模型,其中棒束通道公式大部分适用于反应堆内燃料组件理论计算,其结构和文中换热器壳侧区域的区别在于换热管外不存在绕丝,因此需对下述棒束通道公式进行修正,即给定绕丝直径为0 m,绕丝螺距趋近于无穷大。

1) 圆管内单相摩擦压降模型

圆管内单相摩擦压降模型采用 Blasius 公式如式(2):

$$f = 0.3164 / Re^{0.25} \quad (2)$$

式中, Re 为来流雷诺数。

2) 棒束通道 Rehme 压降模型

K. Rehme 在研究六边形排列棒束压降^[5]时提出对于不可压缩流体在等温且充分发展湍流下棒束的摩擦系数计算公式如式(3)~(4):

$$f = \left(\frac{64}{Re} F^{0.5} + \frac{0.0816}{Re^{0.133}} F^{0.9335} \right) \frac{N_r \pi (D_r + D_w)}{S_i} \quad (3)$$

$$F = \left(\frac{P_1}{D_r} \right)^{0.5} + \left[7.6 \frac{(D_r + D_w)}{H} \left(\frac{P_1}{D_r} \right)^2 \right]^{2.16} \quad (4)$$

式中, D_r 为棒(换热管)外径(m); N_r 为棒(换热管和拉杆)个数; S_l 为总湿周长度(m); P_l 为棒(换热管)节距(m); D_w 为绕丝直径(m); H 为绕丝螺距(m)。

3) 棒束通道 Cheng-Todreas 压降模型

Cheng 和 Todreas 提出了不仅考虑流体流型和几何效应,同时适用于层流、过渡态以及湍流的棒束通道摩擦系数计算公式^[6]如式(5)~(10):

当 $Re \leq Re_L$ 时,

$$f = \frac{C_{fL}}{Re} \quad (5)$$

当 $Re \geq Re_T$ 时,

$$f = \frac{C_{fT}}{Re^{0.18}} \quad (6)$$

当 $Re_L \leq Re \leq Re_T$ 时,

$$f = \frac{C_{fL}}{Re} (1 - \psi)^{1/3} + \frac{C_{fT}}{Re^{0.18}} \psi^{1/3} \quad (7)$$

$$\log\left(\frac{Re_L}{300}\right) = 1.7\left(\frac{P_l}{D_r} - 1.0\right) \quad (8)$$

$$\log\left(\frac{Re_T}{10000}\right) = 0.7\left(\frac{P_l}{D_r} - 1.0\right) \quad (9)$$

$$\psi = \frac{\log(Re) - (1.7(P_l/D_r) + 0.78)}{2.52 - (P_l/D_r)} \quad (10)$$

式中, ψ 为间歇因子, C_{fL} 和 C_{fT} 可根据文献[6]中表4求出。

4) 棒束通道 Soblev 压降模型

Soblev 在文献[7]中给出棒束通道摩擦计算公式如式(11):

$$f = \left[1 + 600 \left(\frac{D_r}{H} \right)^2 \left(\frac{P_l}{D_r} - 1 \right) \right] \times \left\{ \frac{0.210}{Re^{0.25}} \left[1 + \left(\frac{P_l}{D_r} - 1 \right)^{0.32} \right] \right\} \quad (11)$$

(2) 局部压损计算

局部压损主要时由流体的相互碰撞和形成漩涡等原因造成的。通常局部压损可以通过速度头计算,如式(12):

$$\Delta p_j = \zeta \frac{\rho V^2}{2} \quad (12)$$

式中 ζ 为局部损失系数,其数值主要是由管件的几何形状和尺寸决定,同时也受到流体流动特性的影响。图1所示计算域可以看到高温介质在壳侧

流过支撑板时流动截面突然缩小,然后在突然扩大,因此局部损失系数可通过式(13)~(14)计算。

流动截面突然缩小,

$$\zeta = 0.5 \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right) \quad (13)$$

流动截面突然扩大,

$$\zeta = \left(\frac{S_1}{S_2} - 1 \right)^2 \quad (14)$$

式中, S_1 为无支撑板区域截面面积(m^2); S_2 为支撑板区域截面面积(m^2)。

2.2 CFD 仿真计算

(1) 网格模型

按前文所述,扩大单组支撑板流体区域作为 CFD 仿真计算域,如图2所示。

由于支撑板结构以及安装角度不一样导致的流体区域差异,使得全流场无法全部使用六面体网格,需在两支撑板中间位置建立小段过渡段,并在该区域划分四面体网格以连接上下两支撑板区域的六面体网格,如图3所示。

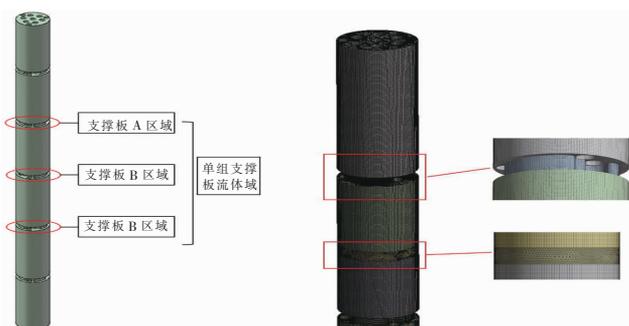


图2 CFD 仿真计算域

图3 流体域网格示意

(2) 物理模型

本文 CFD 计算仅针对直流式换热器壳侧流体介质,不考虑壳侧和管侧的热交换,且即使不同算例由于壳侧介质温度的不一样,其热物性参数也不一样,但对于每个单独的 CFD 算例热物性为常数。因此,CFD 计算需考虑连续性方程和动量方程如式(15)~(16):

$$\nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (15)$$

$$\nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = \nabla(\mu(\nabla \vec{V})) - \nabla p + \rho f + S_p \quad (16)$$

CFD 计算中采用 SST 剪切应力输运湍流模型^[8],该模型是在 $k-\omega$ 湍流模型基础上进行了改进,采用了壁面到自由剪切层的过渡函数,有利于处理

边界层湍流到自然剪切层湍流的过渡。 $k-\omega$ SST 湍流模型在近壁面采用 $k-\omega$ 模型,在边界层边缘和自由剪切层采用 $k-\varepsilon$ 模型,其间用一个混合函数来过渡。模型中求解湍动能 k 和湍频率 ω 的两个输运方程如式(17)~(18):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla g(\rho \vec{V}k) = p_k - \beta^* \rho \omega k + \nabla g \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] \quad (17)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla g(\rho \vec{V}\omega) = a \frac{\omega}{k} p_w - \beta \rho \omega^2 + \nabla g \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] \quad (18)$$

式中, ρ 、 \vec{V} 、 p 和 μ 分别为流体密度、速度、压力和动力粘度,其余参数为常数。

3 试验和计算结果分析

本文各计算工况是以直流式换热器热工水力试验测得的壳侧流体介质参数作为边界条件。为和试验条件更吻合,理论计算和 CFD 仿真中使用的壳侧高温介质密度和粘度参数是根据各试验工况测得的单组支撑板区域内壳侧介质平均温度通过函数关系分别计算得到。

3.1 计算和试验结果对比

不仅是沿程阻力损失,流经支撑板的局部阻力损失也和雷诺数息息相关。通过直流式换热器试验整理得到单组支撑板两侧压差数据和其随进口雷诺数变化曲线,如图4所示。

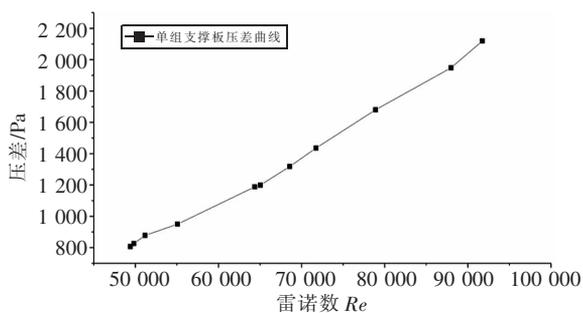


图4 单组支撑板压差试验曲线

随着雷诺数不断增大,单组支撑板两侧压差不断增大。通过对上述试验数据进行曲线拟合,得到单组支撑板压差和雷诺数之间的关系。

$$\Delta p = 4.09151 \times 10^{-5} \times Re^{1.55363} \quad (19)$$

小型直流式换热器热工水力试验不仅测得单

组支撑板两侧压差,还测得壳侧高温介质进出口压差。由于换热器壳侧是由单组支撑板区域重复22次组成,进出口压差应该是单组支撑板压差的22倍。但因为壳侧进出口压差的测量还包含了换热器进出口缓冲区域的流阻,且壳侧高温介质在进出口区域温差能达到200℃左右,其热物性受温度影响比单组支撑板区域大很多,因此,壳侧进出口压差和22组单组支撑板压差之和接近,有一定误差,如图5所示。

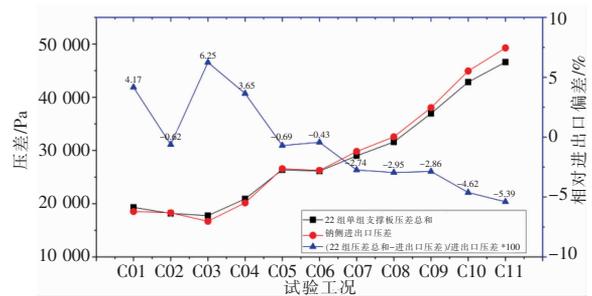


图5 壳侧进出口试验压差和22组单组支撑板压差对比曲线

剔除重位压降后的22组单组支撑板压差总和相对于壳侧整体进出口试验压差偏差在±6.5%以内,且两者随试验工况的变化趋势完全相同。因此,在换热器进出口缓冲区结构复杂难以测量情况下,可以使用单组支撑板压差数据表征换热器壳侧沿程整体状态。

本文采用圆管内流动模型和多种棒束通道内流动模型理论计算单组支撑板沿程压损和总压损,同时截取 CFD 仿真计算中相同轴向距离流体压损,并将上述结果和试验测得的单组支撑板压损进行对比分析,如图6所示,在单组支撑板压损理论计算、CFD 仿真计算以及试验值差异不大情况下,可将结果用于直流式换热器壳侧沿程的整体研究分析。

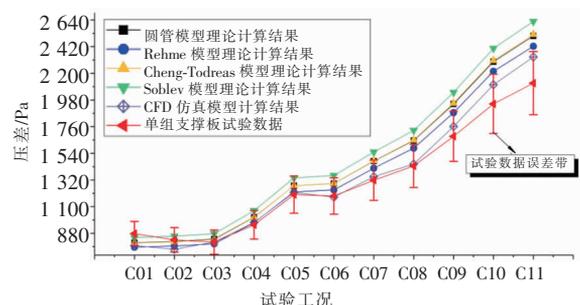


图6 计算和试验结果对比曲线

本文理论计算和 CFD 仿真计算给定的边界条件是根据试验采集数据确定的,而在直流式换热器热工水力试验中壳侧高温介质参数的最大不确定度在于流量计示数。根据前文拟合得到的单组支撑板流阻和雷诺数关系式(公式),通过误差传递计算方法得到单组支撑板压差试验数据在流量计误差下的误差带,如图 6 所示,从中发现 CFD 仿真模型计算结果的所有工况都包含在试验数据误差带以内,修正的 Rehme 理论计算模型相对于其他模型计算结果更接近 CFD 仿真和试验数据,且绝大部分工况也包含在试验数据误差带以内。

图 6 中曲线还显示所有计算模型的计算结果在大流量、大功率下和试验数据的绝对差值都增大。该现象的主要原因是壳侧高温介质的压差变送器在去除重位压降的调零作业时,介质温度约为 280 °C,而上述大流量、大功率试验工况下压差变送器附近温度最高可达 340 °C。温度升高导致介质密度降低,实际单组支撑板压降会比测量值略高。

3.2 直流式换热器壳侧流场分析

直流式换热器单组支撑板压差试验值和 CFD 仿真值差异很小,且换热器壳侧高温介质流动特性很难通过试验方式进行研究分析,因此可通过上述

CFD 仿真计算结果分析壳侧流场。

如前文所述,本文 CFD 仿真模型在单组支撑板前后根据换热器实际结构增加了两个支撑板以尽量保证在单组支撑板区域流场和实际一致,但 CFD 计算结果的提取依然以试验中压差变送器安装位置为准。因此,在压差变送器流体区域内,分别建立如图 7 所示的 $X=0$ 截面、 $Z=0$ 截面、 $X=-Z$ 截面和 $X=Z$ 截面,并显示各截面速度和压力云图,如图 8 所示。

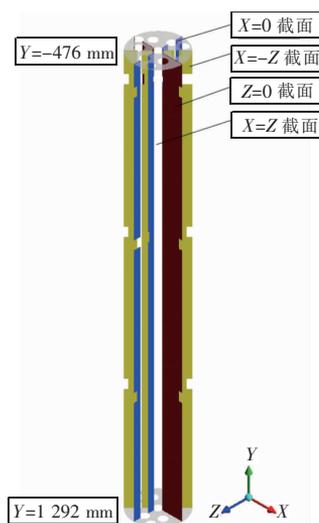


图 7 CFD 计算结果数据提取截面示意

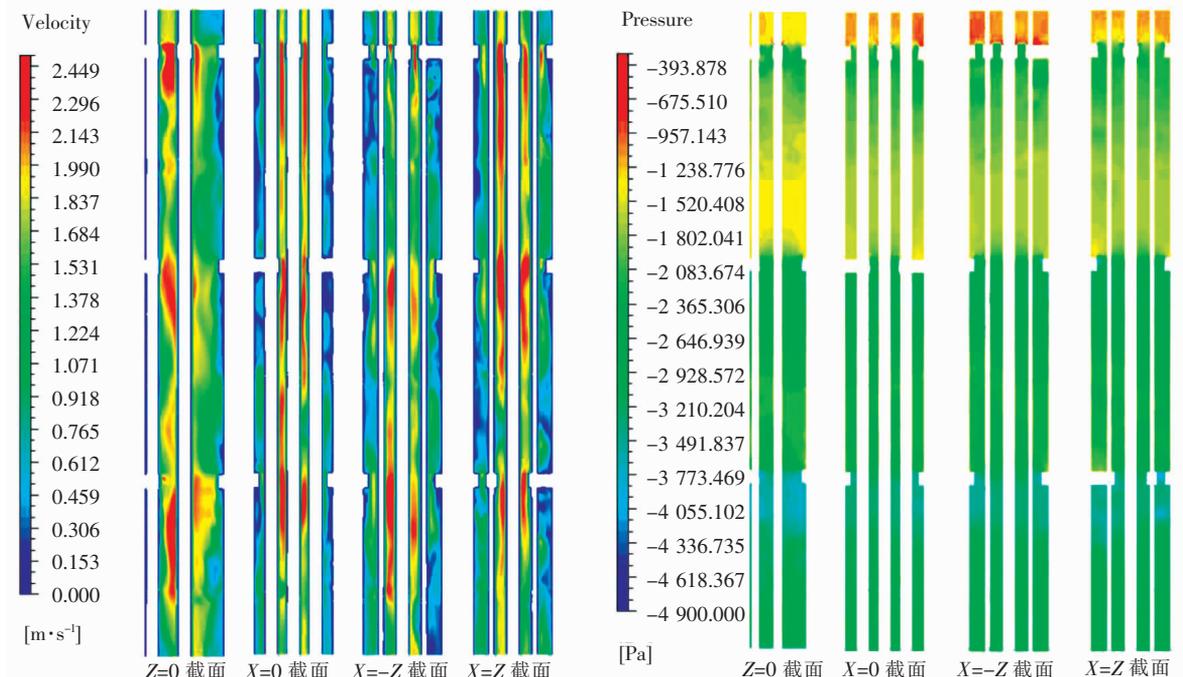


图 8 CFD 计算结果截面速度和压力云图

从速度和压力云图中发现高温介质在流入支撑板区域时由于截面缩小,导致速度突增,而在流出支

撑板区域后速度降低;以流动方向(-Y向)同一坐标截面来看,壳侧中心区域速度整体高于周边区

域,且支撑板外侧更容易形成速度“死区”。剔除重位压头作用的壳侧高温介质流入支撑板后压力会突降,在进入下一个支撑板前流体压力慢慢上升再略微下降,该现象在各支撑板之间不断重复,但沿着高温介质流动方向上压力是不断降低的。上述速度和压力的变化反映了流动过程中动能和压力势能之间的相互转化。

在图7所示的压差变送器流体域内建立多个横截面以提取沿流动方向不同截面压力和速度均值,如图9所示。

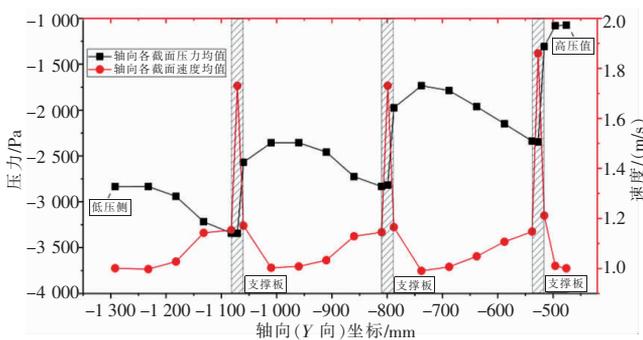


图9 流动方向不同截面速度和压力均值变化曲线

图中压力和速度沿轴向坐标的变化曲线进一步反映了各支撑板间动能和压力势能转化过程。根据质量守恒原理,上述各截面的Y向速度基本相同,但图中总速度在支撑板之间出现降低再升高现象,表明在支撑板前后横向冲刷速度较大,而横向冲刷速度的增大会较大影响壳侧和管侧流体之间的换热。

由CFD仿真计算结果得到单组支撑板区域沿程压力及支撑板之间各向速度分布情况,并根据前文结论和支撑板结构的重复性将压力和速度分布情况扩大到换热器壳侧沿程,以此为壳侧安全性分析和换热器换热特性分析等提供理论依据。

4 结语

本文基于小型直流式换热器热工水力试验结

果,通过对比多种圆管和棒束通道的一维理论计算模型和CFD三维仿真计算,得到如下结论。

(1) 直流式换热器壳侧单组支撑板压损是雷诺数的函数,且壳侧沿程总压损可通过单组支撑板压损近似得到,偏差在6.5%以内;

(2) 通过对比试验数据,圆管以及棒束通道内流动的理论计算结果,确定修正后的Rehme棒束通道模型可用于系统分析和一维仿真计算工作;

(3) 单组支撑板的CFD仿真计算结果在试验数据的误差带范围以内,可使用CFD仿真方法对直流式换热器壳侧压力、速度等进行分析,并为换热器整体热工分析和安全性分析等提供理论依据。

参考文献:

- [1] 解衡,张金玲,贾斗南等.直管式直流蒸汽发生器的热工水力特性分析与计算[J].核科学与工程,1997,17(2):97-102
- [2] 刘勇,徐海斌,陈林等.大型钠冷快堆核电站蒸汽发生器仿真模型开发与分析[J].中国仪器仪表,2019(5):71-75
- [3] 刘勇,段天英,张玮瑛.示范快堆直流式蒸汽发生器给水控制系统仿真研究[J].仪器仪表用户,2019,26(5):73-77
- [4] 徐帅,余华金,王冲等.快堆蒸汽发生器壳侧压力对小钠水反应现象的敏感性分析[J].产业与科技论坛,2018,17(9):55-56
- [5] Rehme K. Pressure-drop performance of rod bundles in hexagonal arrangements[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(12):2499-2517
- [6] Shih-Kuei C, Todreas NE. Hydrodynamic models and correlations for bare and wire-wrapped hexagonal rod bundles—bundle friction factors, subchannel friction factors and mixing parameters [J]. Nuclear Engineering and Design, 1986, 92(2):227-251
- [7] V Soblev. Fuel Rod and Assembly Proposal for XT-ADS Pre-design: Coordination meeting of WPI & WP2 IP EUROTRANS[C]. Bologna: 2006
- [8] 雷娟棉,谭朝明.基于Transition SST模型的高雷诺数圆柱绕流数值研究[J].北京航空航天大学学报,2017,43(2):207-217

欢迎投稿,欢迎订阅!

浅析海外燃气轮机电厂的首次检修策划

陈欣

东方电气集团国际合作有限公司，成都 611731

摘要:本文以巴基斯坦某燃气轮机电厂的首次检修情况为例,对海外燃气轮机项目检修工作所面临的问题和困难进行了简述和分析,并通过实际执行和完成首次检修,分享了相应的首次检修方案策划,为海外燃机项目的检修工作提供的参考和借鉴。

关键词:燃气轮机; 首次检修; 海外电厂项目; 检修策划

中图分类号:TK47

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)03-0039-04

A Brief Analysis of First Inspection Planning and Scheme for the Oversea Gas Turbine Power Plant

CHEN Xin

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

Abstract: Based on the first inspection of Pakistan's gas turbine project, this paper briefly describes and analyzes the similar issue and difficulty of the inspection for the oversea gas turbine power plant, shares the suggestion and planning after execution and completion the first inspection, and provides the experience and reference for the inspection planning and scheme of oversea gas turbine project.

Key words: gas turbine; first inspection; oversea power plant project; inspection planning and scheme

随着中国经济和世界经济深度关联以及国家“一带一路”倡议的推进,越来越多的我国企业从国内走向海外市场,进入设备成套出口、设计总包、工程总包等电力工程服务领域。目前世界上约20%的发电量来自燃气轮机(以下简称燃机)电厂^[1],在中东及北非等地区燃机电厂占到发电总量的约60%~70%^[2],面对日益增长的电力需求及全球对环保的重视,预计在未来的10年,28%的电厂项目将会是燃机电厂^[3]。

燃机电厂的设计、建造、安装、调试等方面与常规火电较为近似。然而,由于燃气轮机独特的技术特性,其检修需要专门的策划及安排。国内燃机的检修工作已经相对成熟,也成立了不少的燃机服务公司企业从事相关工作。但在亚非拉等欠发达国家,则缺少燃机运行和维护相关服务的公司。不少

燃机电厂项目在机组完成调试后,业主仍无法确定电厂的运行服务及运维合同,因此在合同中,项目质保期内往往包含有一次全厂的首次检修。如果对该检修不进行提前策划和充分准备,往往造成电厂检修期无法合理安排,检修工期延长、检修费用增加的不良后果,进而导致到项目最终移交的延误,承包商收款及项目收尾的推迟。

1 首次检修的主要问题和困难

以巴基斯坦二托一联合循环G项目和三托一联合循环N项目在质保期的首次检修为例,G项目计划于2015年11月至2016年2月进行检修,实际检修工作于2015年11月开始,到2016年5月结束;N项目计划于2016年6月至2016年9月,实际检修工作于2016年6月开始,到2017年1月结束。

收稿日期:2021-07-09

作者简介:陈欣(1982-),男,2008年毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业,硕士,工程师。现在东方电气集团国际合作有限公司从事火电业务市场及营销工作。

两个项目比原计划的检修工期延长3-4个月左右。造成这样的结果主要有以下几个方面。

1.1 维修计划难以确定

由于大部分项目所在国电力供应不足,所以电厂机组停机往往需要多个政府部门之间沟通和确认才行。当该国由于种种原因出现电力紧缺时,计划停机检修也往往不能得到批准,造成检修计划多次修改。由于目前国内公司在海外执行项目,骨干技术施工团队还是从国内寻找,所以检修计划无法最终确定,造成检修队伍人员无法最终确定,一定程度上影响检修工作的顺利开展。

此外由于部分或全部的检修工具从国内发运至海外项目现场,需要报关、清关、运输等过程,紧急用备件或工具从国内组织发货,大量人员赴国外的签证及行程安排,当地物资和材料采购周期长、交货慢等因素。整个检修工期普遍都会有在原计划工期的基础上有一定程度的延长。

1.2 技术准备难以完备

海外电力项目在完成调试及性能试验等过程后,便会进入质保期运行。在质保期运行过程中,国外业主方一般都会派出其自己的运行团队进行电厂的全部或部分运行。由于绝大多数业主运行团队并不具有成熟的电厂运行经验、问题的处理能力及合理的设备维护知识水平。所以在电厂运行过程中,经常出现设备运行故障及事故,并不能及时的合理处理,造成设备带病运行,设备所配套的特殊工器具(例如拆卸燃机主轴螺栓的液压扳手)不能正常保养导致其无法正常使用。

而国内的检修团队一般按照国内电厂的运维水平进行技术及检修准备。当海外项目检修开始后,经常发现一些特别的设备及特殊工器具损坏及无法使用的问题。

1.3 检修备件难以合理准备

在检修过程中,一些检修工作会造成一些或全部消耗性部件(例如锁片、滤网滤芯、螺栓螺母等)的损坏,必须通过更换新部件才能完成。所以在确定需要采购哪些备件范围时,就会出现备件采购数量的问题。

对于处在质保期内的检修工作,其检修所需要的备件都需要从原设备供应商采购,若完全按照燃

机厂家推荐的备件数量进行采购,备件费用昂贵且有很大部分的备件并未在检修中使用。对于项目承包商来说造成不小的经济损失。

若过于谨慎,在检修时则会出现更换备件不足的情况,造成检修工作推迟,严重的会影响整个检修工作的完成。

1.4 燃机的热部件翻修问题

由于燃机的技术特点,以GE燃机为例,当燃机运行到一定的运行小时后,必须对其进行检修,其检修分为3种:小修(即燃烧系统检修);中修(即热通道检修)和大修。其检修范围和工作量逐渐增加,以大修的工作范围最为全面^[4]。

在进行燃机检修时,当燃机运行到等效运行小时后,必须要对其相应的燃烧系统部件或热通道部件(以下简称热部件)进行更换,将换下的热部件进行翻新修复,以便在下一次检修时替换使用。

燃机热部件价格极其昂贵,且翻修费用高、翻修周期长,部件翻修还需要找燃机供应商或者专业的部件翻修厂家,若不能合理安排将造成检修成本急剧增加、检修工期大幅度延长。

2 检修的策划方案建议

2.1 检修计划的确定

检修计划是检修策划最重要的部分,是所有检修策划工作的基础,检修内容和范围都有可能因为检修计划的变化而相应调整。所以在制定检修计划时,需要注意以下几点:

2.1.1 尽早制定检修计划

一般情况检修计划的确定,除了要考虑技术层面的要求之外,还需要电厂业主方(以及该国电网、电力部委等多方面)的确定。因此需要越早通知业主方越有利。一般在项目进行系统调试及试运行即可开始着手准备检修的初步计划。

在理解电厂业主方要求的同时,及时与电厂业主方沟通,以达到能够尽早确定检修计划的目的。

2.1.2 考虑项目所在国的国情

由于我国公司所执行的电厂项目绝大多数处于第三世界国家,因此在制定检修计划时要综合考虑当地情况,例如全年电力需求趋势、重大节假日、电力构成、当地的气候特点等。尽量避开项目所在

地的雨季、夏季用电高峰、当地重要节假日(例如穆斯林的斋月、开斋节、国庆节、国家独立日、新年庆典等)。水电占比较高的国家,还应尽量避免冬季枯水季水电机组发电不足等情况。

2.1.3 适当增加检修工期

目前,电厂项目所在国的检修团队能力有限,并不能独立完成全厂的检修工作,需要从国内组织和选派检修团队赴国外执行检修任务。同时燃机电厂由于燃机设备的独特性,又必须安排燃机厂家的工代赴现场进行技术指导和工作见证等工作。人员安排的动员时间需要充分考虑并留足提前量。

国内电厂 A 级检修工期一般为 2 个半月至 3 个月,考虑到国外各种条件制约,根据每个项目的实际情况可以考虑按照国内检修工期的 1.5 倍至 2 倍时间准备并报予项目业主批准。

2.2 检修前的技术准备

在确定了检修计划后,检修工作的技术准备工作便可以按计划进行安排和落实。主要从以下几个方面着手:

2.2.1 项目现场调研

在检修前开展的项目现场调研可以从 3 个方面入手。

(1) 项目现场情况

项目现场情况主要指:燃机机组的运行参数,包含计划检修时燃机的运行小时数、点火次数、在运行中发生过哪些故障及事故、燃机机组设备的日常维护水平;燃机机组在计划检修时可用的备品备件数量及状态;燃机随机的专用工器具数量及状态;项目现场检修车间的工器具及机加工设备的数量和状态;检修场地、临时检修场地及临时堆场的规划和安排。

另外,检修人员的现场办公场所、起居食宿场所等必要的生活办公设施也需要进行了解、查看及安排准备。

(2) 项目当地情况

除了项目现场的机组状态及相关情况外,在检修过程中,不可避免的要在当地采购一定数量的常用工器具、检修易损件、消耗品,此外,还存在项目现场无法修复的一些设备部件的情况。

因此需要对当地的市场进行调研和摸底,提前接触和了解一些较有实力的当地供货商、公司及机加工厂,以便在检修工作开始后,能够及时在当地采购的所需的设备、材料、工器具等,能够及时将受损的设备部件修复。

(3) 燃机厂家当地的售后情况

由于燃机设备的特殊性和专业性,海外燃机项目在质保期内进行检修时,必须有燃机厂家工代在现场进行见证及技术指导。一般项目所在国的燃机厂家服务工代数量有限,经常需要跨区派员或者协调其他项目的服务工代,因此需提前与厂家进行交底沟通并签订技术服务合同,否则在检修开始时,燃机厂家的服务工代未必能够按照要求及时抵达现场进行技术支持服务,从而影响机组检修工序的正常进行。

2.2.2 国内相关单位的调研

由于我国近些年燃机机组装机数量也逐步增加,国内的燃机检修公司也具备了一定的燃机机组检修能力。同时,国内技术水平和实力远强于绝大部分的第三世界国家,在检修中用到的工器具、备品备件、耗材等也较方便采购和准备。所以在检修计划确定后,可以安排对国内的检修公司进行摸底和咨询,对燃机上下游相关企业(例如备件供应商、燃机热部件翻修公司等)进行联系和交流,以便当燃机检修工作出现问题时,及时从国内找到解决办法和途径,保证燃机检修工作的顺利进行和圆满完成。

2.3 检修备件准备

燃机电厂除燃机机组外的设备检修已经十分成熟,通常情况下,在电厂进行首次检修时,这些设备一般未达到正常要求的检修周期,除考虑项目的特殊情况外,采购常规的密封件、易损件、易耗品即可满足首次检修的要求。

而燃机的检修则存在较大量的更换件、由于首次检修仍处在项目的质保期,因此原则上需要从燃机厂商提供的备件清单中,根据检修的范围和等级选择采购检修用备品备件。以 GE 9E 机组单台机的备件清单为例,其推荐的一个大修的设备清单共需要超过 400 个项目,还不包括各种设备使用的滤芯、滤网、润滑油、润滑脂等消耗品。如果完全按照

清单购买一台机组的常规备件,其费用在 100 万美元左右。而通过实际检修工作发现,其清单中相当一部分备品备件并未在检修中使用。

因此通过与有丰富检修经验的技术团队进行交底,优化燃机检修用备品备件采购清单对于控制整个检修费用至关重要。可以考虑从以下几个方面着手:

(1)对于清单中的非消耗件(如螺栓、螺母、卡扣、接头等),采购数量可以酌情减少。

(2)部分检修备件虽然采购部件号不同,但可以通用的,也可以减少采购量。

(3)对于燃机配套辅机的备品备件,可以直接联系设备原产厂家供货。

(4)电控元器件、板卡等备件,可以从国内代理机构寻找。

2.4 热部件翻修的准备

当检修计划确定后,根据机组运行情况可以预计到燃机热部件的翻修程度,如果预测到项目的首次检修工作必须要对热部件就行翻修,便需要尽早展开翻修工作的调研和厂家筛选工作。表 1 是针对巴基斯坦市场 GE 9E 燃机一台机小修热部件翻修的询价情况比较。

表 1 询价情况对比表

厂家	燃机厂家	国外检修厂 A	国外检修厂 B	国内检修厂 A	国内检修厂 B	国内检修厂 C
翻修费用/万人民币	98	63	68	54	70	64
翻修交货期/周	16	6	9	5	6	8
往返运输及清关/周	2~3	1	2~3	7~10	7~10	7~10
地点	燃机厂家工厂	项目所在国	项目周边国	国内	国内	国内

可以发现,国内燃机热部件翻修厂家还是具有一定的价格和交货优势。然而在综合考虑运输成本、清关报关费用及交货时间等因素后,项目所在国及周边国的燃机热部件翻修厂家的优势就明显体现出来。

因此对于燃机热部件的翻修,要做多方调研和比较,不能局限于国内厂家和燃机厂家。最后经过综合比较,要立足于最优化的翻修方案实施,以便能够满足检修计划能够顺利进行,有效控制检修工期及检修费用。

3 检修风险的规避

3.1 尽早安排检修

一般情况,项目执行的合同并未明确具体的首次检修时间。所以项目承包商应尽早准备并开展项目的首次检修,争取在燃机所有热部件都处于正常状态时进行检修,以避免燃机机组在进行首次检修时,全部或部分机组的热部件已经达到运行寿命周期,必须要进行翻修的情况出现,从而造成检修难度升高、工作范围扩大、检修费用增加、检修周期延长等问题。

此外,如果必须进行热部件的翻修,还需合理规划热部件的送修次序,避免出现送修的热部件不

能及时返回项目而造成现场检修工作停工的情况出现。

3.2 合理利用合同条款

在合同规定的工作范围内,当检修工作出现与项目业主需求不一致的情况时,立足于合同中保护承包商的条款,从技术和商务角度与项目业主进行沟通并正式发文通知,必须做到每个重要节点的书面记录。

此外,还应该重视运行期间的运维记录,在检修开始前,从运维记录中找到有利于承包商的内容并留存。

以上这些文件资料的准备,除了在得到项目业主理解、配合和支持的同时,也为检修工作中所可能出现的部件损坏、设备故障、工期延长等情况时,能够及时给出合理的解释,并向项目业主索赔必要的额外损失时提供足够的文件支持。

4 结语

本文根据已经执行的海外燃机电厂首次检修,总结了检修中可能遇见的问题和困难,提出了一些对于检修准备工作、检修方案筹划及检修工作开展的建议和方法。由于海外燃机电厂项目的检修

(下转第 47 页)

铜引线冷弯成型工艺研究

杨宗明 杨军 尹襄

东方电气集团东方电机有限公司,四川 德阳 618000

摘要:铜材的冷弯成型工艺广泛应用于发电设备制造中,工件传统的制作流程是R值根据经验设定、手工操作弯型,产品质量的稳定性较差。本文就铜材冷弯成型R值设计、材料物理性能要求、弯型工艺方法、回弹现象进行了分析和试验探讨,提出了一套可靠性较高的铜材冷弯成型制造工艺方案。

关键词:铜引线;冷弯成型;R值设计;回弹

中图分类号: TG306

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0043-05

Study on the Cold-bending Forming Process of Copper Lead

YANG Zongming, YANG Jun, YIN Xiang

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

Abstract: The cold-bending forming of copper lead is widely used in power generation equipment manufacturing. The traditional producing process is that the R value of the workpiece set according to experience and manual bending. The stability of product quality is usually poor. In this paper, the design of R-value of copper cold-bending forming, the requirements of physical properties of materials, the bending process and the rebound phenomenon are analyzed and tested. A set of high-reliability copper cold-bending forming process scheme is proposed.

Key words: copper lead; cold-bending forming; design of R-value; rebound phenomenon

铜引线在大型发电设备制造中广泛应用,如定子引出线、转子引出线、磁极引线等,它们在电机运行中起传导电流的关键作用。但在传统的冷弯成型制作流程中,成型R值通常根据经验设定,手工操作弯型,产品质量的稳定性较差,给电机运行带来一定的质量隐患。本文重点以磁极引线(见图1)冷弯成型为例,就铜材冷弯成型R值的设计、材料物理性能的要求、弯型工艺方法、回弹现象进行分析和试验探讨,从而摸索出可靠性较高的铜材冷弯



图1 磁极引线示意图

成型制造工艺方案,提升产品质量稳定性,提高机组运行的安全性。

1 冷弯成型工艺研究的必要性

金属零部件的生产离不开冷弯成型,冷弯成型方法包括滚压、冲压、单道/多道辊轧等。由于冷弯成型本身具有的特点和规律尚未被人们完全掌握和认识,实际生产中往往通过一定的理论计算结合已有的生产经验进行制造^[1]。但R值的传统设计方法是根据生产经验来的,弯型过程中为保证弯曲角度常常存在反复折弯的现象(图2),这就导致材料在弯型过程中发生冷作硬化,使材料脆化甚至产生微裂纹,工件服役时提前失效。例如某电站发电机运行一年后,其某个磁极的磁极引线弯头部位完全断裂,导致极间放电,使极间绝缘熏黑、烧损,最

收稿日期:2021-07-09

作者简介:杨宗明(1976-),男,2001年毕业于西华大学焊接专业,学士学位,工程师。2015年在西南交通大学完成工业工程学习,获得工程硕士学位。现在东方电气集团东方电机有限公司焊接分厂工作,主要从事项目、生产等管理工作。

后迫使机组发生横差保护动作停机,给电站运行带来安全隐患。

这类事故往往造成巨大经济损失,因此,探索和研究科学、可靠的铜材弯型工艺,获得质量稳定的铜成型件,避免事故发生,具有较大经济和社会价值。目前,国内外已对不锈钢、碳钢、铝合金等的型材、板材在弯型过程中的模具设计、工艺参数、回弹现象进行过研究^[2-7],但对铜材工件的冷弯成型工艺几乎没有资料可循。本文从冷弯成型的 R 值设计、材料选择、弯型工艺、回弹现象几个方面展开分析,力求探索出一套安全性、可靠性较高的弯型制造方案。



图2 传统的磁极引线弯型

2 试验材料

原材料生产及检测标准为 EN 13601-2002,各项参数见表 1。

表 1 材料参数

材料牌号	材料规格/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率
Cu-ETP R300	4.8 × 110 × 500	310	315	15%

3 冷弯成型理论分析

3.1 R 值的设计

板材在弯曲过程中各部位受力情况如图 3,中性层不受力且不发生变形。中性层外侧材料受拉力、且拉力大小和材料与中性层的距离成正比,故最外层材料受拉力最大,此时拉伸变形最大,对材料塑性要求最高,发生开裂的几率也最大。中性层内侧材料受工件弯曲产生的压应力以及轧辊压力,Cu-ETP R300 属塑性材料,因为承受压力而发生开裂的几率较小。

根据上述分析,材料弯型时,以最外侧材料作

为分析的临界条件。

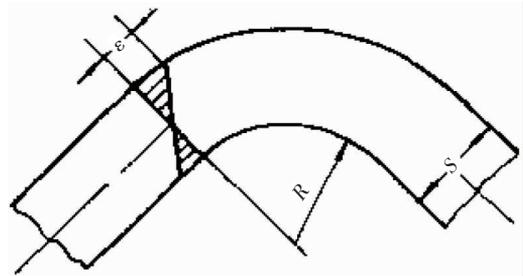


图3 板材弯型示意

假设弯型半径为 R ,材料板厚为 S ,材料延伸率为 ε ,可以得到:

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{4} \times 2\pi \times (R+S) - \frac{1}{4} \times 2\pi \times (R + \frac{S}{2})}{\frac{1}{4} \times 2\pi \times (R + \frac{S}{2})} \quad (1)$$

$$\text{将上式简化: } \varepsilon = \frac{S}{2R+S} \quad (2)$$

由于弯型时,材料一旦选定,其延伸率也就确定,将 R 作为因变量、 ε 作为自变量,得出式(3):

$$R_{\min} = \frac{S}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \quad (3)$$

将材料参数带入式(3),可得 4.8 mm 板厚 Cu-ETP R300 的 $R_{\min} = 13.6$ mm。

由于实际弯型时,工件发生塑性变形的邻近区域可进行补偿,故 R 值可稍小于理论计算结果。式(3)为弯型 R 值的设计、材料延伸率的选择提供了理论参考。

3.2 材料的选择

资料显示^[8],板材弯曲变形的回弹量与材料的屈服强度成正比,与弹性模量成反比,即 σ_s/E 值小的,回弹量小,反之成立,如图 4 所示。图 4(a)为屈服强度相同的两种材料,在弯曲变形相同时,弹性模量大的回弹量小;图 4(b)为弹性模量相同时,在弯曲变形程度相同的情况下,屈服强度高的材料回弹量大。

另外,如果材料的屈服强度比较大,当工件发生较大塑性变形时,由于塑性储备不足,很可能导致工件弯型开裂,或者更危险的情况:没有开裂但材料已至变形极限,为安全埋下隐患,这一点在采购材料时应该关注。

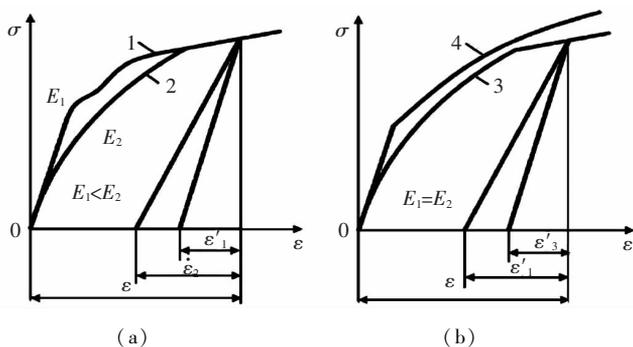


图4 材料力学性能对回弹的影响

3.3 弯型方法

当设备设计结构空间不允许时,需弯制较小的 R 值,或者高屈服比等塑性较差的材料弯型时,都必须防范工件开裂。为保证弯型的顺利进行,可考虑两个方面因素:第一,应力集中的影响,当弯型 R 较小时,如果一次弯制成型,工件与轧辊的起始接触为线接触,工件承受压强大、应力集中较大,工件易开裂,因此可采用大小轧辊、分多次弯型的方法,使工件起始弯型的 R 值增大,在轧辊 R 减小时保持较大接触面积,减小开裂几率;第二,热弯,材料在温度较高的状态下,硬度值下降,塑性提高,使材料可弯制较小 R 而不开裂。

3.4 回弹分析

工件在弯型过程中,中性层不发生变形,但工件内外侧距离中性层越远,受力越大,变形也越大。所以,中性层附近有一定厚度的材料只发生了弹性变形,这部分的弹性力与材料发生塑性变形后的形状相平衡,如果去掉内侧或外侧塑性层,未被平衡的弹性应力将引起变形,这可以解释弯型工件机加工后尺寸发生变化的现象。

除此外,压头施压时,工件发生弯曲(图5),有部分材料发生弹性变形与压头压力抵消。压头撤离后,这部分弹性力使工件尺寸发生变化,这就是

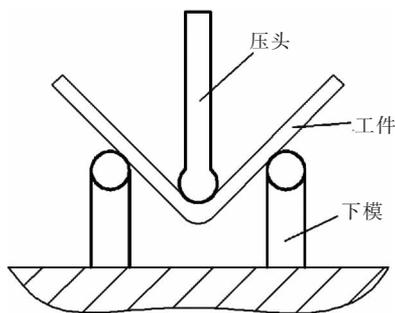


图5 弯型过程示意

我们所说的弹性回复,简称回弹。回弹现象的定量计算可通过建立力学模型进行,根据材料力学中的能量法,可得到图6及计算式(4)~(6)。

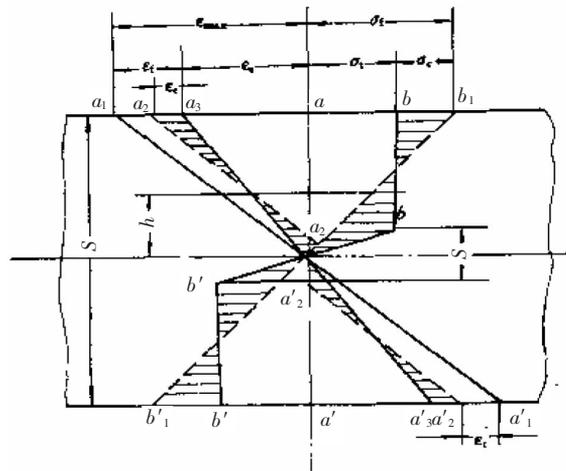


图6 板材弯型各部位受力及变形示意

由于单元宽度的弯矩与等效弹性回复弯矩相等,即 $M_f = M$ 。

$$M_f = 2 \int_0^{S/2} \frac{2\sigma_1}{S} h^2 dh = \frac{S^2}{6} \sigma_f \quad (4)$$

$$M = 2 \int_0^{S/2} \sigma h dh + 2 \int_{S/2}^S \sigma_1 h dh = \frac{S^2}{6} \sigma_1 (1.5 - 0.5 S_1^2 / S^2) \quad (5)$$

可得到弯曲处的弹性回复曲率如式(6):

$$C_f = \frac{M}{EI} = \frac{M_f}{EI} (1.5 - 0.5 \xi^2) = C_1 (1.5 - 0.5 \xi^2) \quad (6)$$

式(6)中:

$$C_1 = \frac{M_1}{EI} = \frac{2\sigma_1}{ES}, M_1 = \frac{S^2}{6} \sigma_1, I = \frac{S^3}{12}$$

$$\xi = \frac{S_1}{S} = 2 \frac{R_0 \sigma_1}{ES}, S_1 = 2R_0 \epsilon_1 = 2R_0 \frac{\sigma_1}{E}$$

已知试验材料各项参数如表2。

表2 磁极引线试验参数

厚度 /mm	抗拉强度 /MPa	弯曲角度	成型半径 /mm	磁极引线宽度/mm
4.8	315	90°	5	110

根据式(6),考虑回弹后计算出压头半径为4.9 mm。相对该工件成型后的尺寸公差,该回弹量可以接受。

4 试验过程

按选定的材料,同时兼顾产品结构,试验工件 R

值取 5 mm,回弹量经计算为 0.1 mm。采用两次弯曲成型工艺,制作 R8、R5 模具各一副。第一次用 R8 模具弯型,最终使用 R5 模具成型。对弯曲成型后试验件进行外观、尺寸检查均满足要求,同时按 ASME 标准进行 PT 探伤检查,无超标缺陷显示。大致过程如下:

(1)制作 R8、R5 的模具(图 7)。



(a) R8 压模 (b) R5 压模

图 7 弯型模具

(2)分两次弯曲成型,弯型过程见图 8。



(a) R8 弯型 (b) R5 弯型

图 8 弯型过程

(3)尺寸检查(图 9)合格。



图 9 尺寸检查

(4)PT 探伤(图 10)无超标显示(执行标准 ASME)。



图 10 R 部位 PT 探伤

试验结果表明,采用多次成型减小应力集中可减少工件弯制较小 R 的开裂风险;采用模压可避免手工操作对工件反复折弯带来的材料损伤,同时保

证了工件尺寸精度;PT 探伤可避免产生裂纹的工件参加服役,提高了机组运行的安全性。

5 弯型工艺方案制定

(1)对材料的物理性能参数如屈服强度、延伸率、弹性模量、屈强比等结合工件厚度、成型半径进行评估和选择。

(2)根据式(3)预估材料允许的弯型 R_{min} ,生产中可结合经验适当减小。

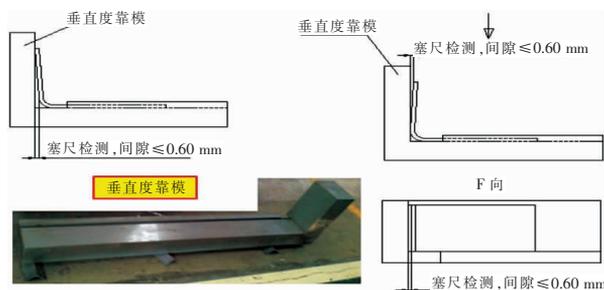
(3)根据式(6)预估弯型的回弹量,从而确定压模尺寸。

(4)选择一次或多次成型,制作相应的模具。

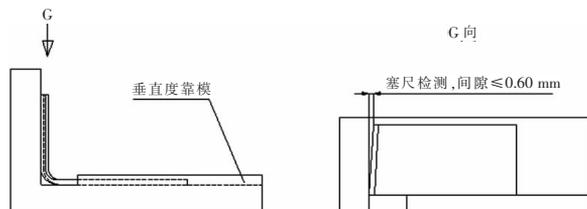
(5)按生产标准进行着色探伤检查。

6 产品验证与运用

按制定的工艺方案,本文又进行了一系列的试验验证。为保证数据的准确性,排除设备精度和检测手段对试验数据的影响,制作了设备精度辅助工装和检测工装(见图 11)。经过实际验证,通过设备精度辅助工装可将材料为 Cu-ETP R300 的磁极引线成型精度调整至 0.1~0.4 mm。通过检测工装来检测工件的最后尺寸均满足垂直度和扭曲度 0.6 mm 的设计要求。



(a)垂直度的检测



(b)扭斜检测

图 11 检测工装

通过一系列的试验验证,收集到了大量成功的试验数据,现大量应用到实际产品制造中,具体见表 3。

表3 产品应用统计

序号	项目	材料	规格/mm	成型半径/mm	检验结果符合性/mm(垂直度≤0.2,扭曲度≤0.4)
1	吉林敦化	CU-ETP-R300	5X100	20	完全符合
2	安徽绩溪	TU2Y	6X95	20	完全符合
3	印尼佳蒂格德	ASTMB187	5X71	15	完全符合
4	新疆阿尔塔什	SECUF25	8X105	15	完全符合
5	新疆阿尔塔什	SECUF25	8X105	50	完全符合

从上表可以看出,采用该成型工艺对不同材料和不同 R 值需求的产品进行生产,最终产品的尺寸要求均能满足设计需求,并且在材质、规格变化的情况下仍然能够保证产品的质量,也证明了方案的通用性和实用性。

7 结语

通过本文研究,彻底解决了传统冷弯成型带来的质量隐患风险,在实际制造应用中,产品质量稳定,制造效率较传统工艺大幅提升。本文从铜材冷弯成型 R 值设计、材料物理性能要求、弯型工艺方法、回弹现象几个方面进行分析、试验验证及产品推广应用,得出结论如下:

(1) 本文对铜类工件弯型的 R 值设计进行了分析,总结出了可供实际成型参考的理论计算公式。

(2) 从应力集中和材料热态性能两个方面总结了铜类工件弯型工艺方法。

(3) 对工件的回弹现象进行分析,找到了铜引线冷弯成型回弹量精确计算的方法。

(4) 对 Cu-ETP R300 的工件进行了冷弯成型试

验,提出了一套可靠性较高的制造工艺方案。

参考文献:

- [1] 岳崇峰,余万华,冯光宏.冷弯成型技术研究现状[C].第六届华北(扩大)塑型加工学术年会论文集,2009,7:49-55
- [2] 朱超强,舒晋军.1Cr18Ni9Ti管弯曲回弹影响因素的试验研究[J].技术与市场,2016,23(6):105-106
- [3] 陈如欣,许剑欧,邓立信.板材弯曲成型过程中的弹塑性应力、应变分析[J].重庆大学学报,1980(1):1-19
- [4] 刘文忠,王美,宋广彬.大厚度合金钢弯曲成型技术[J].机械制造,2011,49(4):75-76
- [5] 吴义江,赵耀.高强度钢厚板冷弯成型及回弹分析[J].中国造船,2014,55(4):33-47
- [6] HUANG Youmin, CHENTsungchia. Influence of blank profile on the V-die bending camber process of sheet metal [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005 (25): 668-677
- [7] 韩峰,赵亚夫.高速动车组铝合金零部件弯曲成型工艺研究[J].大连交通大学学报,2015,36(6):34-37
- [8] 王洪芬,王潇,关晓东.板料弯曲回弹分析与控制[J].吉林工程技术师范学院学报,2013,29(9):84-86

(上接第42页)

工作参与方较多,且有比较强势的燃机供货厂家及可能有海外公司参与,因此每个项目必须立足于项目本身、仔细筹划、合理安排,才能圆满顺利的完成检修工作。

参考文献:

- [1] Paul Burze. Gas Turbine Power Generation[M]. Elsevier. 2016:6-7
- [2] https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.NGAS.ZS?year_low_desc=false
- [3] GEA3319-2018 GE Product Catalog. 2017:8
- [4] GER3620M-Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations. 2014:22-26

启动扩容器的选型计算

隆琼 易广宙 邓科

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 611731

摘要: 启动扩容器的选型计算关乎设备的投入成本, 本文以某项目启动扩容器为计算模型, 进行了几种计算方法的对比, 最终得出合适的启动扩容器的选型计算方法。

关键词: 启动扩容器; 选型计算方法

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0048-02

The Selection Calculation Method of Start-up Expansion Tank

LONG Qiong, YI Guangzhou, DENG ke

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

Abstract: The selection calculation method of start-up expansion tank is closely related to the economic input cost in power plant. This article takes a certain project as a calculation model, and a suitable selection calculation method is obtained by comparing several selection calculation methods.

Key words: start-up expansion tank; the selection calculation method

启动扩容器(启扩)为锅炉辅机,属于锅炉水处理设备,有常压和带压容器之分,型式有分体式和一体式,一般600 MW及以下机组不采用分体式扩容器,本文计算模型为某项目小机组一体式扩容器。疏水通过启动降压调节阀引入启扩,经过扩容器扩容闪蒸成一定压力下的饱和汽和饱和水,汽水混合物经过疏扩上部汽水分离装置分离出一定干度的饱和汽,通过顶部排汽口排出,凝结水通过疏排水管路排入除氧器或凝汽器。扩容器蒸汽上升速度控制多少,设备直径及设备有效容积等如何选取等问题是启扩设计的难点。若扩容器扩容容积计算不够,会出现排汽口出口带水、设备振动等问题的发生;若扩容器计算选型裕量太大,投入成本太高,不经济。所以,选取合适的选型计算方法至关重要。

1 启动扩容器设备选型计算

1.1 扩容器内径D的计算

(1) 干度X

收稿日期: 2021-07-09

作者简介: 隆琼(1982-),女,2007年毕业于重庆大学热能与动力工程专业,本科,工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司技术中心工作。

$$X = \frac{H - H'}{H'' - H'} \quad (1)$$

式中: H 为入口疏水焓(kJ/kg), H' 为扩容器内饱和水焓(kJ/kg), H'' 为扩容器内饱和汽焓(kJ/kg)。

(2) 产生蒸汽量 W_s

$$W_s = WXa \quad (2)$$

式中: W_s 为蒸汽量(t/h), W 为蒸发器来的疏水(t/h), a 为裕度系数 1.03。

(3) 分离面的面积 A_{sd}

$$A_{sd} = \frac{W_s \times V_1}{3.6 \times v} \quad (3)$$

式中: A_{sd} 为扩容器的分离面的面积(m^2), V_1 为扩容器汽空间容积(m^3), v 为蒸汽上升速度(m/s)。

(4) 设备内径 D

$$D = \sqrt{\frac{4W_s \times V_1}{3.6\pi v}} \quad (4)$$

式中: D 为扩容器内径(mm)。

(1) 蒸汽上升流速值的选取:

<a> 按美国依巴斯公司标准, 蒸汽上升流速控制值定排 8 英尺/s (约 2.44 m/s), 连排 4 英尺/s (约 1.22 m/s);

 根据 HG/T 20570.8-1995《气-液分离器设计》中关于浮动液滴的平衡条件计算最佳汽水分离条件下气体上升流速:

$$v \leq V_t = \left[\frac{4g \times d \times (\rho_L - \rho_G)}{3C_w \rho_G} \right]^{0.5} \quad Re = \frac{d \times V_t' \times \rho_G}{\mu_G} \quad (5)$$

式中: ρ_G 为饱和汽密度 (kg/m^3), ρ_L 为饱和液密度 (kg/m^3), V_t 为浮动沉降流速 (m/s), d 为液滴直径 (μm), μ_G 为气体动力粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), g 为重力加速度 $9.81 (\text{m}/\text{s}^2)$, C_w 为阻力系数, Re 为雷诺数。

d 液滴直径, 按 200 μm 和 350 μm 分别计算, 假定 V_t' 为 10 m/s , $Re \approx 1135$, 查图得 C_w , 代入计算公式(5)算得 $V_t \approx 0.74 \text{ m}/\text{s}$, $V_t' - V_t = 9.26$, 假定流速与实际计算流速差距较大; 重新选取假定流速, 经过重复迭代试算直到 $V_t \approx V_t'$, 分析图 C_w 与 Re 关系, 假定流速越小, Re 越小, $C_w \approx 1$, $Re \approx 138.5$, $V_t \approx 0.49 \text{ m}/\text{s}$, $V_t' - V_t = 0.73 \text{ m}/\text{s}$ 。按 中公式对 <a> 中流速进行验算, 可见, 如果取蒸汽上升流速 1.22 m/s 时, 假定速度与实际速度差距最小, 1.22 m/s 为最佳汽水分离条件下的气体上升流速值。

2) 以如下项目实例数据输入计算选取不同蒸汽上升流速得出不同的扩容器直径:

疏水压力: 冷态启动时 10 MPa(a), 热态启动时 7 MPa(a), 疏水温度: 250 ~ 311 $^{\circ}\text{C}$, 疏水量: 634 t/h , 启扩运行参数: 压力 $1.8 \pm 0.2 \text{ MPa(a)}$, 温度 $\leq 207 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 计算结果比较如表 1 所示。

表 1 不同蒸汽上升流速对应扩容器直径

序号	蒸汽上升流速 $v(\text{m}/\text{s})$	设备内径 $D(\text{mm})$
1	10	835
2	2.44	1 695
3	1.22	2 390

可见, 选取蒸汽上升流速越低, 汽水分离效果越好, 但所需设备内径更大。

1.2 扩容器容积的确定

按原苏联标准推荐的扩容器容积蒸发强度要求(即单位气室体积允许发生的蒸汽量)计算汽空

间容积, 按容积蒸发强度连排 800 ~ 1 000 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$ ^[4], 定排 2 000 ~ 3 000 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$ ^[4]

汽空间容积 V_1 :

$$V_1 = \frac{1\ 000\ W_s}{R} \times v_1 \quad (6)$$

式中: R 为容积蒸发强度 ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$), v_1 为饱和汽比容 (m^3/kg)。

水空间容积 V_2 :

方法一: 参考锅炉启动疏水扩容器按 3 ~ 5 分钟的疏水量。

方法二: 按行业经验值^[4] 即汽空间的 30%。

总容积 $V = V_1 + V_2$, 封头容积不计入有效容积, 按计算余量计入。此论文涉及的计算项目启扩输入条件是否有突发工况需要储水多长时间未知, 所以按常规水空间为汽空间容积的 30% 计算。

按项目实例数据计算结果比较如表 2 所示。

表 2 计算结果比较

序号	容积蒸发强度 $R(\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^3))$	汽空间容积 $V_1(\text{m}^3)$	总容积 $V(\text{m}^3)$
1	800	24.6	32
2	1 000	19.7	25.6
3	2 000	9.86	12.8
4	3 000	6.58	8.55

2 计算结果分析

根据美国依巴斯公司标准中所推荐的控制流速计算并按 HG/T 20570.8-1995《气-液分离器设计》验算, 按蒸汽上升流速下限 1.22 m/s 计算, 设备直径为 2 390 mm , 流速低, 汽水分离效果好, 但设备直径较大; 而若按流速 10 m/s 计算, 设备直径 835 mm , 流速高, 直径较小, 不利于汽水分离, 会有排汽口带水隐患的发生; 选取中间值 2.44 m/s , 计算设备直径并圆整, 最终选定设备直径为 DN2100, 此时蒸汽上升流速为 1.58 m/s 。此流速可作为启扩选型计算蒸汽上升流速控制值。

选定设备直径后, 设计可根据蒸汽出口干度要求选定不同的容积蒸发强度计算, 因实例项目干度要求 0.99, 出口要求较高, 所以此项目取容积蒸发强度 800 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$, 可计算出扩容器的汽空间容积为 24.6 m^3 , 总容积为 32 m^3 , 由总容积 V 和设备直径 D 进而确定设备的高度为 9.24 m 。

(下转第 62 页)

交流电机 VPI 模具对线圈介质 损耗因数影响的研究

杨帅 黄泽 周进 程圣 左瑞 胡波

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文通过对交流电机圈式定子线圈及真空压力浸渍(VPI)模具的结构分析,建立了相应的电路模型,并采用 ANSYS 仿真软件计算了线圈低电阻防晕层表面漆膜的平均厚度、线圈低电阻防晕层与表面漆膜的相邻接触点之间的长度与线圈槽部表面电位之间的关系,并在此基础上进一步分析了线圈槽部表面电位对线圈实测介质损耗因数的影响。结果表明,线圈低电阻防晕层表面漆膜的平均厚度、线圈低电阻防晕层与表面漆膜的相邻接触点之间的长度、主绝缘厚度、主绝缘相对电容率等均与线圈实测介质损耗因数有关。

关键词: 交流电机; VPI 模具; 线圈; 介质损耗因数

中图分类号: TM31

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0050-04

The Study on the Influence of VPI Mock on Dielectric Loss of Stator Coil for AC Rotating Machine

YANG Shuai, HUANG Ze, ZHOU Jin, CHEN Sheng, ZUO Rui, HU Bo

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

Abstract: Through the structure analysis of stator coil and its mocks for vacuum press impregnation (VPI) of AC rotating machine, relative circuit model is established in this paper. The relationship including average thickness of varnish on the surface of conductive layer of coil, the length of neighborhood contact points between varnish and conductive layer, surface potential on the slot part of coil are simulated by ANSYS software. On the basis of results, the influence of surface potential on the slot part of coil on the measured value of dielectric loss of stator coil are analyzed. The results show that the measured value of dielectric loss of stator coil is affected by average thickness of varnish on the surface of conductive layer, the length of neighborhood contact points between varnish and conductive layer, the thickness of main insulation, dielectric constant of main insulation and so on.

Key words: AC rotating machine; VPI mock; stator coil; dielectric loss

随着国内外电力行业需求趋向饱和,世界发电设备制造行业竞争也日趋激烈,而各发电设备制造企业对产品经济性的控制也更加严格。近年来,随着节能环保产业、分布式能源、光热发电、海上风电等新型能源形式的逐渐发展,大量系列化和标准化的中小型发电机在设计与制造时也广泛采用定子绕组整体真空压力浸渍(GVPI)绝缘成型工艺,该工

艺以其整体性好、耐环境污染性能优良、温升高、工期短、能耗和成本低等优点已广泛用于大型、中型、小型、微型、特种交直流电动机^[1-3]。

尽管 GVPI 工艺能够很大程度上消除定子线圈绝缘内部或线圈槽部与铁心之间的微气隙,但仍然无法完全避免少量气隙在运行电压下的局部放电可能引起电、化学、机械、光、声等多因子老化,加速

收稿日期:2021-07-09

作者简介:杨帅(1988-),男,2015年毕业于西南交通大学控制科学与工程专业,工学硕士,工程师。现在东方电机有限公司从事高压电机绝缘技术研究与应用工作。

定子绕组在运行过程中的绝缘老化,进而缩短定子线圈绝缘的寿命。因此,整机定子绕组绝缘内部气隙放电量必须严格控制,而线圈绝缘内部气隙放电就是基础。

目前行业内一般采用模型线圈试制及相关绝缘质量考核为后续整机定子绕组设计与制造提供技术依据,其中模型线圈直线部位通常还配置带浸渍孔的VPI模具以尽量模拟真机定子绕组实际浸漆状态。JB/T 50133 和 JB/T 56085 等行业标准明确规定了模型线圈的各项绝缘性能技术指标,而介质损耗因数即针对绝缘内部气隙放电量进行考核^[4-5]。

因此,本文通过对交流电机圈式定子线圈及其VPI模具的实际结构与电路模型分析,采用 ANSYS 仿真软件计算了线圈表面低阻防晕层表面电位分布,线圈低电阻防晕层表面漆膜的平均厚度、线圈低电阻防晕层与表面漆膜的相邻接触点之间的长度与线圈槽部表面电位之间的关系,在此基础上获得了线圈槽部表面电位对线圈实测介质损耗因数的影响,为分析和解决模型线圈与定子绕组在介质损耗因数实测数据的差异提供了新思路。

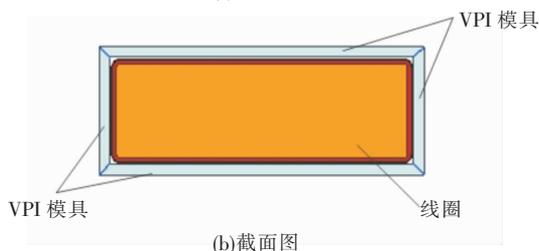
1 试验部分

1.1 试验样品及实际结构

带VPI模具模型线圈如图1所示。



(a)整体图



(b)截面图

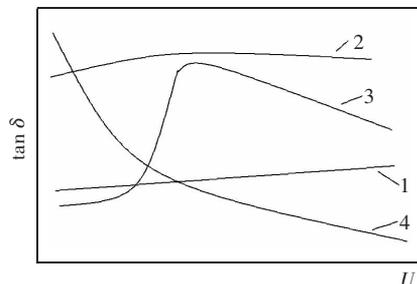
图1 带VPI模具模型线圈

1.2 测试方法

GB/T 34665 - 2017《电机线圈绕组绝缘介质损耗因数测量方法》中三电极方法。

1.3 介质损耗因数试验结果

带VPI模具模型线圈的介质损耗因数 $\tan \delta \sim U$ 试验电压 U 实测曲线如图2所示。



注:1 - 无VPI模具线圈A;2 - 带VPI模具线圈B;3 - 带VPI模具线圈C;4 - 带VPI模具线圈D。

图2 模型线圈 $\tan \delta \sim U$ 实测曲线示意图

同批次制造成型、相同设计结构的十余只圈式模型线圈的 $\tan \delta \sim U$ 的实测曲线可归纳为4类,如图2所示。具体情况如下:

曲线1:无VPI模具线圈A实测, $\tan \delta$ 起始值及增量满足技术要求。

曲线2:带VPI模具线圈B实测, $\tan \delta$ 起始值超过技术要求,而增量满足技术要求。

曲线3:带VPI模具线圈C实测, $\tan \delta$ 起始值满足技术要求,而增量超过技术要求。

曲线4:带VPI模具线圈D实测, $\tan \delta$ 起始值超过技术要求,而增量满足技术要求。

1.4 VPI模具脱模外观

带VPI模具线圈脱模后表面如图3所示。



(a)均匀漆膜

(b)间断漆膜

图3 带VPI模具线圈脱模后表面

因此,带VPI模具模型线圈成型后表面低电阻防晕层与VPI模具间通常存在一定厚度的漆膜,该漆膜与低电阻防晕层、VPI模具的接触面也具有多样性和随机性。

2 电路模型

根据带VPI模具模型线圈实际结构,建立相应的简化电路模型。

将线圈导线近似为整体铜导体,将股线绝缘或匝间绝缘归类于主绝缘,主绝缘外表面低电阻防晕层厚度不计,忽略线圈宽面和窄面差异,在理想情况下线圈截面结构可近似如图4所示。

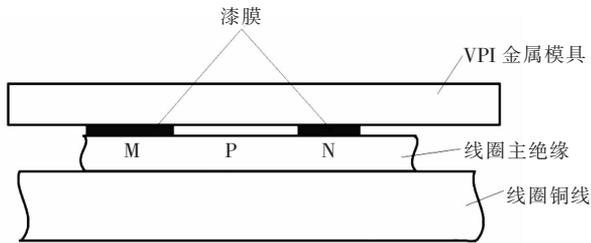


图4 线圈截面结构示意图

在理想情况下,线圈主绝缘和低电阻防晕层与VPI金属模具之间同时存在漆膜和空气隙。因为介质损耗测试电路中的输入阻抗很小(与测试样品相比),所以可考虑与测试电极相连的VPI金属模具为接地状态。

对于线圈低阻层与模具两点(M、N)接触的简单结构,胡波等^[6]研究表明,假设主绝缘的体积电阻、低阻防晕层的表面电容与漆膜的体积电阻均忽略不计,则图4实际结构示意图可以等效为图5(a)的分布参数等效电路图。同时当 R_i 足够小且其阻抗远小于 C_a 的阻抗时, C_a 可以看作被 R_i 短路而忽略不计。因此,图5(a)的分布参数电路可以简化为图5(b)的集中参数电路。

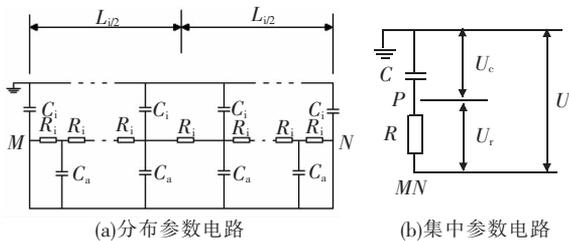


图5 线圈低阻层与模具两点MN接触式等效电路图

图中: C_i 为漆膜和空气的单位长度的电容, C_a 为主绝缘单位长度的电容, R_i 为漆膜表面电阻, C 为MP和NP两段主绝缘的并联等效电容, R 为MP和NP两段内均压层的并联等效电阻。

MN两点之间线圈低电阻防晕层沿轴向方向上的表面电位分布总体呈现两头低而中间高的趋势。假设中点P两侧的绝缘结构完全相同,则该段距离上的表面最高电位应出现在点P上,且其电压值可以由式(1)计算得到。显然,该电压值与表面电阻

层的表面电阻率、低阻层与模具两点接触的间距和主绝缘厚度有关。

$$|\vec{U}_p| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} |\vec{U}|$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r \rho_s L_i^2}{4d}\right)^2}} |\vec{U}| \quad (1)$$

式中, d 为主绝缘单面厚度, ϵ_r 为主绝缘相对电容率, ρ_s 为低电阻防晕层的表面电阻率, L_i 为线圈低阻层与模具两点接触的长度。

正是由于线圈低电阻防晕层及漆膜表面存在沿线圈长度方向上的不同电位分布,所以低电阻防晕层及漆膜表面将流过由该电位差产生的阻性电流。而线圈绝缘介质损耗因数测试电路中总阻性电流包括流过低电阻防晕层及漆膜表面的阻性电流与流过主绝缘的阻性电流。与低电阻防晕层及漆膜结构有关的各参数的变化,都将引起总电流中有功电流的变化,进而改变线圈的介质损耗因数实测值。

3 仿真研究

根据带VPI模具模型线圈实际结构与相应的简化电路模型,采用ANSYS仿真软件进行仿真研究。

3.1 仿真模型

二维简化仿真模型如图6所示。



图6 二维简化仿真模型图
仿真模型电位分布如图7所示。

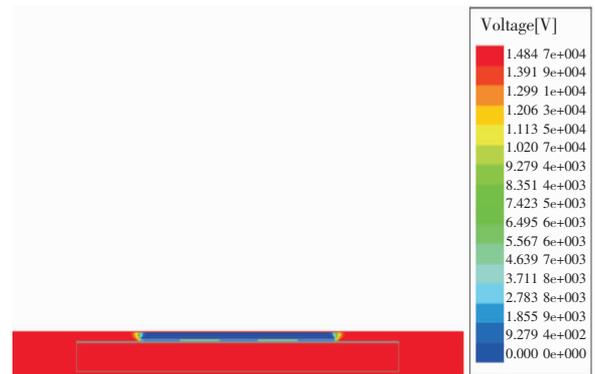


图7 仿真模型电位分布图

3.2 仿真结果

仿真参数设置如下:导体施加峰值电压 $10.5 \times$

1. 414 kV, 漆膜厚度变化范围为 0.1 mm ~ 1.0 mm, 低电阻防晕层与 VPI 金属模具之间两点接触距离的变化范围为 25 mm ~ 125 mm。

3.2.1 漆膜厚度对表面电位分布的影响

当漆膜与 VPI 金属模具之间两点接触距离为 75 mm 时, 漆膜厚度从 0.1 mm 变化至 1.0 mm, 沿线圈长度方向的表面电位分布如图 8 所示。

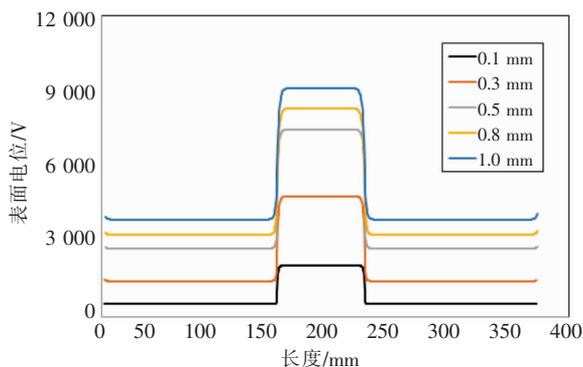


图 8 漆膜厚度对表面电位分布的影响图

由图可知, 表面电位从漆膜与 VPI 金属模具接触边缘位置开始急剧增大, 漆膜厚度越大, 表面电位也越高。

3.2.2 两点接触距离对表面电位分布的影响

当漆膜厚度为 0.3 mm 时, 漆膜与 VPI 金属模具之间两点接触距离从 25 mm 变化至 125 mm, 沿线圈长度方向的表面电位分布如图 9 所示。

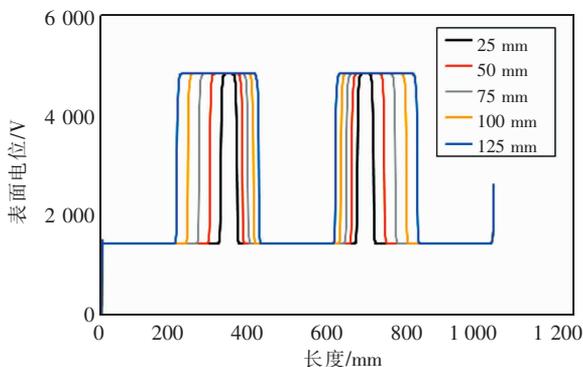


图 9 两点接触距离对表面电位分布的影响图

由图可知, 表面电位从漆膜与 VPI 金属模具接触边缘位置开始急剧增大, 低电阻防晕层与 VPI 金属模具之间两点接触距离越大, 表面电位也越高。

4 结果讨论

4.1 线圈 A

对于图 2 中曲线 1 的实测结果, 线圈脱去 VPI

模具并表面包裹导电铝箔, 只要线圈槽部表面并非完全被漆膜所覆盖, 即可在测试电路上短路局部漆膜, 大大减少漆膜引起的附加损耗, 所测结果接近线圈介质损耗因数的实际值。

4.2 线圈 B

对于图 2 中曲线 2 的实测结果, 在各电压下的介质损耗因数均增加, 并几乎与曲线 1 平行。此时实测介质损耗因数包括线圈本身损耗以及漆膜损耗, 两种固体电介质复合形成双层复合电介质, 与线圈某种测试状态(例如三电极测试方法中保护电极未完全屏蔽端部阻性电流等)引起线圈附加损耗^[7-8]相似。

4.3 线圈 C

对于图 2 中曲线 3 的实测结果, 在较低电压下介质损耗因数较小而增量很大。此时实测介质损耗因数包括线圈本身损耗、漆膜和空气混合损耗以及在较高电压下的空气间隙放电引起的损耗, 与线圈某种测试条件(例如无屏蔽的两电极测试方法所得结果等)引起线圈附加损耗^[9]类似。

4.4 线圈 D

对于图 2 中曲线 4 的实测结果, 在较低电压下介质损耗因数很大而后逐渐减小, $\tan \delta \sim U$ 曲线出现典型负增量现象。此时实测介质损耗因数包括线圈本身损耗、漆膜和含水空气混合损耗以及在较高电压下的介质-气隙界面极化损耗, 与胡波^[10]等研究的外在条件(例如主绝缘固化不良、外界环境相对湿度较大等)引起线圈介质损耗因数负增量现象类似。

5 结语

由上述结果可得以下结论:

(1) 线圈低阻层表面漆膜厚度、漆膜与 VPI 金属模具的接触点距离、主绝缘厚度和相对电容率等均与线圈实测介质损耗因数有关。

(2) 流过低阻层及漆膜表面的阻性电流是改变线圈介质损耗因数实测值的主因。

(3) 线圈表面电位从漆膜与 VPI 模具接触边缘位置开始急剧增大; 漆膜厚度越大、低阻层与 VPI 模具点之间距离越大, 表面电位也越高。

(4) 试验中 4 种实测 $\tan \delta \sim U$ 曲线均可采用以

(下转第 88 页)

回转式空气预热器波纹板换热元件片的三维设计及数值模拟计算探讨

黄雪飞 王筱箴

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 611731

摘要:本文介绍了回转式空气预热器波纹板换热元件片用 PROE 软件进行三维设计的方法,可用于花样繁多的波纹板换热元件片的设计。波纹板换热元件片的三维设计为数值模拟计算建立了模型基础,用 ANSYS 软件对波纹板换热元件片的传热系数和通风阻力系数进行计算和分析,可用于波纹板性能和结构的设计优化与研发。本文介绍了一种非封闭单元板型的数值模拟计算方法,计算精度与工程实际值比较接近。

关键词:回转式空气预热器; 波纹板; 三维设计; 数值计算

中图分类号: TM621; TK124

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0054-04

Discussion of the Three-dimensional Design and Numerical Simulation for Rotary Air Preheater Heating Elements

HUANG Xuefei, WANG Xiaozhen

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

Abstract: The paper discusses the three-dimensional design methods of corrugated heating elements of rotary air preheater by PROE software, for the purpose of the retrofits corrugated heating elements design. The three-dimensional models is used to the numerical simulation analysis by ANSYS software to evaluate the heat transfer coefficient and the fanning friction coefficient. It is also used to the structural optimize and the performance research of corrugated heating elements. The paper demonstrates the simulation analysis for not closed profiles, the calculation accuracy is approximate to the actual value.

Key words: rotary air preheater; corrugated heating elements; three-dimensional design; numerical simulation

回转式空气预热器传热元件大多采用斜波纹型式的槽形板与波纹板配对,配对形成的具有相同结构特征的传热单元称为板型。波纹板采用流水线制作,经过波纹轧制、裁剪、包装等简单工艺过程即可得到成品,制造成本低廉,因此得到广泛的应用^[1]。

空气预热器换热元件传热强化主要采用增加斜波纹的办法,一方面扩展了受热面,另一方面斜波纹与主气流方向存在一定的夹角,可增强气流扰动。元

件片的结构参数包括直通槽的波纹高度/宽度、传热单元的节距、斜波纹的高度/节距/角度、水力直径等。大量的数值模拟计算和实验研究表明,元件片的结构参数对板型的对流传热系数、摩擦阻力系数产生相互关联的影响^[2-5]。上述研究推荐了合适的波纹结构参数以及与之相对应的性能参数指标。

用于换热元件传热与流动阻力计算的结构尺寸参数主要包括波纹板/平板的展开系数 α_n/α_u (无量纲)、波纹板/平板的高度 β_n/β_u (mm)、传热面积

收稿日期: 2021-07-09

作者简介: 黄雪飞(1972-),男,1995年毕业于湖南大学机械工程系机制专业,本科,高级工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司从事锅炉及空气预热器设计。

密度 $SHS(m^2/m^3)$ 、金属重量密度 $SD(kg/m^3)$ 、水力直径 $DE(mm)$ 、空隙率 σ (无量纲)等。

1 元件片的 PROE 三维设计方法

在 PROE 软件的零件图设计界面中定义坐标系,确定坐标系下元件片各分界面/位置点的尺寸,构造相关的辅助平面,包括元件片单元节距平面、元件片长度平面、斜波纹节距平面、斜波纹高度平面、斜波纹修剪面等。

以“FRONT”面为“草绘平面”,“RIGHT”面为“参照面”,绘制槽型板/平板的截面尺寸图,“拉伸”至元件片的长度平面。

以斜波纹草绘面为“草绘平面”,斜波纹角度面为“参照面”,绘制斜波纹的截面尺寸图(一个或若干个单元),“拉伸”的深度设置为元件片长度尺寸的三倍(便于修剪),然后按先前设置的斜波纹的修剪面“修剪”斜波纹,保留修剪面内的部分。

槽型板与斜波纹采用相互“修剪”方式,平板与斜波纹采用“边界混合”方式,完成不同面域之间相交连接,对相交线“倒圆角”,然后按设计厚度“加厚”元件片完成元件片的设计。元件片三维设计示例见图 1。

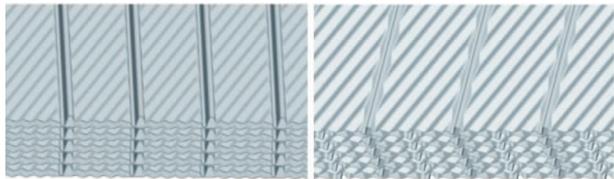


图 1 三维设计示例

2 封闭板型的数值模拟计算

以工程中得到大量应用的 D01 板型为计算精度的验证板型,用数值模拟计算分析单元节距值优化设计后对于传热系数和通风阻力系数的影响。节距值 Pitch 分别设定为 70 mm、56 mm、42 mm,相对于 D01 板型,优化设计板型减小了平板的长度,相应增加了中间的斜波纹长度以增加扩展传热面积。优化后的板型按展开系数计算的传热面积密度分别为 361.6、369.6、381.7 m^2/m^3 ,相比 D01 的传热面积密度 360.1 m^2/m^3 有所增加。板型设计图及数值计算的网格见图 2,图 3。

用空气预热器性能计算程序按工程实际数据

计算出热段 1 200 mm 的 DH 板型 + 冷段 1 200 mm 的 D01 板型的金属壁温和流体温度(本文为二次风),作为数值计算的温度边界条件。计算模型选择低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型计算传热系数,标准壁面方程计算阻力系数,采用速度入口、压力出口、恒温壁面的边界条件。由于是封闭板型,计算模型采用 1 个传热单元。按 400 mm 高度截取中间段的温度数据,使得数值计算的金属壁面温度与流体平均温度与工程实际值相同,以此确定不同工况下 inlet、outlet 及 wall 的边界条件。空气的物性参数按流体进出口的温度平均值计算,密度、导热系数、比热、动力粘度等按多项式计算。

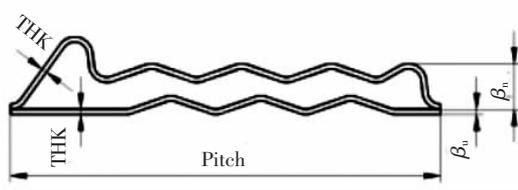


图 2 D01 结构图

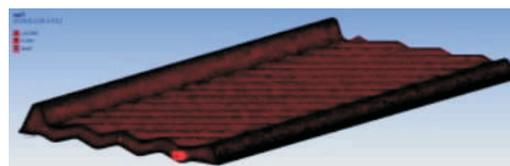


图 3 数值计算网格

数值计算结果显示,低雷诺数模型对于封闭板型的传热系数 J 值计算结果与工程实际值比较接近,而标准壁面方程模型计算的阻力系数比工程值小。增加斜波纹长度的三种板型,其扩展面积与全部换热面积的比值上升,传热得到强化。节距值越大传热系数越大,见图 4,图 5。

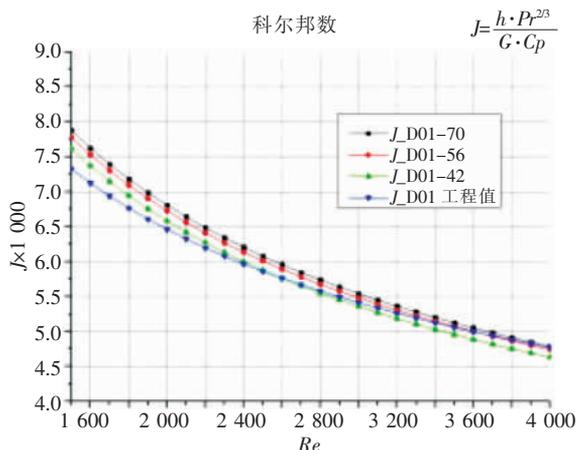


图 4 数值计算结果 J 值

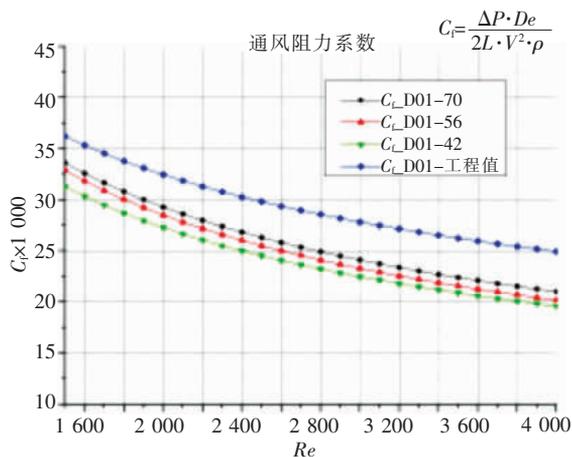


图5 数值计算结果 C_f

数值计算流线和 outlet 温度云图见图 6、图 7。从流线图可知,斜波纹形成斜向气流与直通槽内的气流混合,可强化直通槽内的传热。从 outlet 截面温度云图可以看出,斜直通槽型板内远离斜波纹的位置温度最低,说明此位置与斜向气流的混合尚不充分,可考虑采取进一步的优化措施,增加此处的斜波纹板宽度加强直通槽内的气流混合以强化传热。

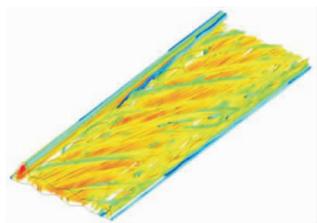


图6 数值计算流线图

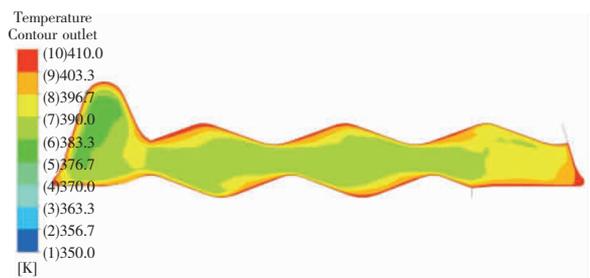


图7 outlet 截面温度云图

数值计算得到 J 、 C_f 值,再用空气预热器性能计算程序进行计算对比分析。本文采用热段 1 200 mm 的 DH 板型 + 冷段 1 200 mm 的 D01 板型方案,三种不同 Pitch 节距值的板型与工程实际的 D01 板型的性能计算结果见表 1,计算结果表明 70 mm 节距板型增加扩展传热面积后相对于 D01 板型传热

得到了强化,空气预热器的出口烟气温度的下降 2.3 ℃。56 mm、42 mm 节距板型的传热也得到了一定的强化,但传热系数 J 值低于 70 mm 节距板型。由于 Pitch 节距值小的板型换热面积密度相对更大,设备重量也相应增加,工程应用推荐采用优化后的 70 mm 节距板型,如布置空间受限,可采用 42 mm 节距板型。

表 1 D01 与传热优化后不同节距板型的性能对比

序号	名称	单位	数据			
			D01	P70	P56	P42
1	出口烟气温度	℃	121.7	119.4	119.4	118.9
2	一次风侧阻力	mmH ₂ O	30	33	33	33
3	二次风侧阻力	mmH ₂ O	87	96	96	98
4	烟气侧阻力	mmH ₂ O	93	103	102	104

3 非封闭板型的数值模拟计算

以工程中得到大量应用的 DH 板型为计算精度的验证板型,槽型板和波纹板的斜波纹角度 $\theta = 60^\circ$,本文增加了 θ 值分别为 50° 、 55° 、 65° 、 70° 四种元件片的结构型式,板型设计图及数值计算的网格见图 8,图 9。

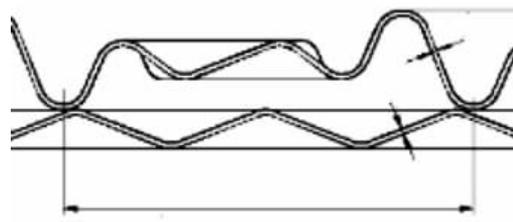


图8 DH 结构图

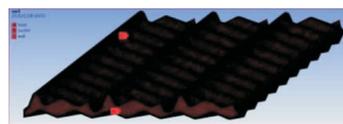


图9 数值计算网格

计算模型选择低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型,速度入口,压力出口,恒温壁面。由于是非封闭板型,需考虑斜向气流的影响,计算模型采用三个传热单元。

对于非封闭板型,槽型板与斜波纹板相搭形成“接触点”,造成流体域抽取困难且无法完成计算网格的划分,本文采用槽型板与斜波纹板之间保持 1 mm 间隙的方法解决。

两块元件板左右侧模拟空气预热器环向隔板存在的条件,两端构造两个面进行面域封闭。

用空气预热器性能计算程序按工程实际数据计算出热段 1 200 mmDH 板型 + 冷段 1 200 mmD01 板型的金属壁温和流体温度,作为数值计算的温度边界条件。

斜波纹与流体流向法向夹角 θ 值分别为 50° 、 55° 、 60° 、 65° 、 70° 的 J 、 C_f 值计算结果见图 10、图 11。在雷诺数区间 1 000 ~ 4 000 范围内科尔邦数 J 值与 θ 值成趋势性的递减关系, θ 值越小 J 值越大。在雷诺数区间 1 000 ~ 4 000 范围内, θ 值从 50° 到 60° 通风阻力系数 C_f 随 θ 值的增加而下降, $\theta = 65^\circ$ 时, C_f 值反而大于 $\theta = 60^\circ$ 。 $\theta = 70^\circ$ 时, 通风阻力系数小于 $50^\circ \sim 65^\circ$ 。数值计算验证了工程实际选用 $60^\circ \theta$ 值的合理性。进一步对 θ 值进行细分设计, 得到了更好的板型设计参数。

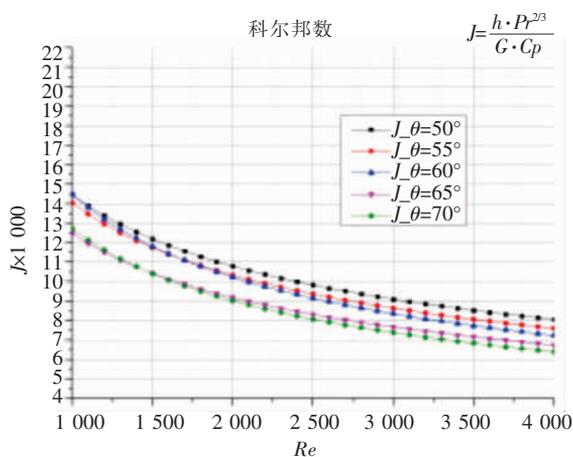


图 10 数值计算结果 J 值

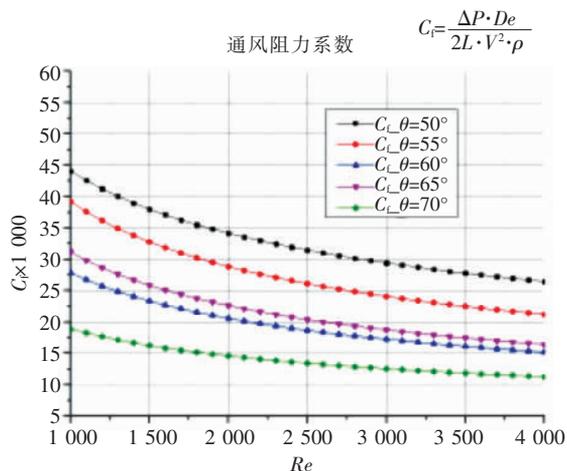


图 11 数值计算结果 C_f

数值计算流线和 outlet 温度云图见图 12、图

13。从流线图可知,斜波纹形成斜向气流与直通槽内的气流充分混合,强化了直通槽内的传热。从 outlet 截面温度云图看,传热单元内部的温度分布比较均衡,斜波纹与直通槽之间的 1 mm 窄缝位置出现传热强化的特征。

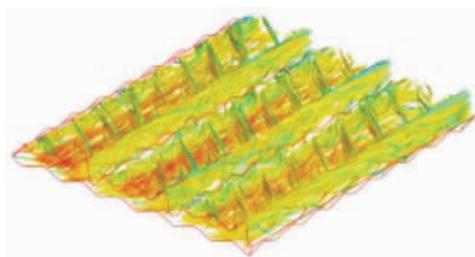


图 12 数值计算流线图

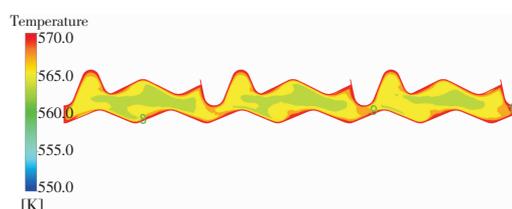


图 13 outlet 截面温度云图

4 结语

波纹板换热元件片的三维设计为数值模拟计算建立了模型基础,通过 ANSYS 软件对波纹板换热元件片的传热系数和流动阻力系数进行计算和分析,可用于波纹板性能和结构的设计优化与新产品研发。对于有接触点的板型,采用本文介绍的数值计算方法,计算结果与实验室数据有相近似的结果,为工程应用提供了相似性参考。

参考文献:

- [1] 陈亚平等. 波纹板式空气预热器的构想[J]. 锅炉技术, 2000 (10): 10 - 12
- [2] Muley A, Manglik R. Experimental study of turbulent flow heat transfer and pressure drop in a plate heat exchanger with chevron plates[J]. Journal of Heat Transfer, 1999, 121(1): 110 - 117
- [3] 陶文铨. 数值传热学(第 2 版), 西安交通大学出版社
- [4] 周志军等. 不同湍流模型在管道流动阻力计算中的应用和比较[J]. 热力发电, 2007(1): 18 - 23
- [5] 李明春等. 人字形波纹板传热与阻力特性的数值模拟和试验研究[J]. 能源工程, 2016(2): 8 - 14

东方 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉的开发

巩李明^{1,2} 邓启刚^{1,2} 刘杰^{1,2} 任燕丽^{1,2} 鲁佳易^{1,2} 苏虎^{1,2}

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

摘要: 本文根据 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉的设计条件, 充分吸收 350 MW ~ 660 MW 超临界 CFB 的设计、运行经验, 提出了 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉方案及整体布置。锅炉总体采用 M 型布置, 单炉膛单布风板结构, 炉膛内布置屏式受热面, 不设置外置式换热器, 炉后布置高温冷却式旋风分离器, 尾部采用双烟道挡板调温, 热力系统设计合理, 性能可靠性高, 可有效实现高效超超临界蒸汽参数与 CFB 锅炉燃烧技术相结合。

关键词: 700 MW; 超超临界; CFB; 开发

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0058-05

Development of 700 MW High Efficiency Ultra-supercritical CFB Boiler

GONG Liming^{1,2}, DENG Qigang^{1,2}, LIU Jie^{1,2}, REN Yanli^{1,2}, LU Jiayi^{1,2}, SU Hu^{1,2}

(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: According to the design conditions of 700 MW high efficiency ultra supercritical CFB boiler and fully absorbing the design and operation experience of 350 MW – 660 MW supercritical CFB boiler, this paper puts forward the scheme and overall layout of 700 MW high efficiency ultra supercritical CFB boiler. The overall arrangement of the boiler is M-type, with single furnace and single air distribution plate structure. The platen type heating surface is arranged in the furnace, without external heat exchanger. The high temperature cooling cyclones are arranged behind the furnace, and the temperature is adjusted by double flue baffle at the rear pass. The thermal system design is reasonable and the performance reliability is high, which effectively realizes the combination of high-efficiency ultra supercritical steam parameters and CFB boiler combustion technology.

Key words: 700 MW; ultra-supercritical; CFB; development

近年来,循环流化床(简称“CFB”)锅炉技术在我国迅速发展,机组容量从单机 50 MW 等级发展到目前最大单机 660 MW 等级。东方电气集团东方锅炉股份有限公司(简称“东方锅炉”)自主开发、设计制造的 350 MW 等级超临界 CFB 锅炉已经商业运行超过 5 年,600 MW 超临界 CFB 锅炉已经在四川白马示范电厂投入运行超过 8 年,世界最大容量的平朔 660 MW 超临界 CFB 锅炉也于 2020 年投入运行^[1]。国家电力示范项目贵州威赫 660 MW 高效超超临界 CFB 项目已进入工程设计阶段。提高 CFB 锅炉蒸汽

参数,建造更大单机容量的发电机组,对提高机组整体效率,减少温室气体排放,降低发电机组每千瓦造价都有促进作用^[2]。因此开发更大容量更高参数的高效超超临界 CFB 锅炉具有良好的市场前景^[3]。

随着锅炉容量的增加和蒸汽参数的提高,对锅炉整体方案布置也提出了更高的要求。目前在运的 600 ~ 660 MW 级 CFB 锅炉采用 H 型布置方案,双布风板带外置床结构。为满足市场多样化需求,丰富 CFB 锅炉产品种类,东方锅炉充分吸取 350 ~ 660 MW 超临界、660 MW 超超临界 CFB 的设计开

收稿日期:2021-06-15

作者简介: 巩李明(1980-),男,2003年毕业于西安交通大学核工程与核技术/法学专业,本科,高级工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司主要从事清洁燃烧技术及新能源技术研发与工程应用。

发经验,提出了700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉 M 型不带外置床布置方案。

本文对锅炉的整体布置方案进行了介绍,论述了热力系统设计、壁温安全性设计、主回路均匀性等关键技术研究。

1 锅炉方案

1.1 锅炉蒸汽参数

研究表明,超超临界机组的发电效率可达 45%~47%,比亚临界机组提高 6%~7%,比超临界机组高 3%~4%,经济性进一步提高。表 1 给出了 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉与常规 600 MW 超临界 CFB 锅炉主要蒸汽参数的对比。

表 1 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉主要蒸汽参数

名称	单位	700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉	常规 600 MW 超临界 CFB 锅炉
高过出口处蒸汽:			
流量	t/h	2 025	1 900
压力	MPa(g)	29.3	25.4
温度	℃	605	571
低再入口处蒸汽:			
压力	MPa(g)	6.12	4.73
温度	℃	367	347
高再出口处蒸汽:			
流量	t/h	1 661	1 553
压力	MPa(g)	5.88	4.51
温度	℃	623	569
省煤器进口处给水:			
温度	℃	311	287

由表 1 可以看出,与超临界 CFB 锅炉相比,高效超超临界 CFB 锅炉的温度、压力和锅炉给水温度均明显升高。各级受热面的吸热比例也将随着锅炉汽水参数的变化而调整,过热器及再热器吸热比例会相应增加,水冷壁和省煤器吸热比例相应降低^[4]。

锅炉典型燃用煤质如表 2 所示。

表 2 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉煤质参数

项目	符号	单位	设计煤	校核煤
全水分	Mt	%	8.69	8.3
空气干燥基水分	Mad	%	1.62	1.7
收到基灰分	Aar	%	44.44	37.27
干燥无灰基挥发分	Vdaf	%	14.13	10.42
收到基碳	Car	%	41.02	48.82
收到基氢	Har	%	1.64	1.32
收到基氮	Nar	%	0.70	0.75
收到基氧	Oar	%	0.54	0.68
全硫	St,ar	%	2.97	2.86
收到基低位发热量	Qnet,ar	kJ/kg	15 550	17 760

锅炉设计煤及校核煤均为低挥发分、低水分、中等热值、高硫分的无烟煤。

1.2 锅炉整体布置

结合高效超超临界蒸汽参数及入炉煤质特性,开发完成的 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉,锅炉为高效超超临界直流炉,单布风板单炉膛、M 型布置、平衡通风、一次中间再热、循环流化床燃烧方式,采用高温冷却式旋风分离器进行气固分离。锅炉整体呈左右对称布置,支吊在锅炉钢架上。

锅炉由三部分组成,第一部分布置主循环回路,包括炉膛、高温冷却式旋风分离器、回料器、冷渣器以及一、二次风系统等;第二部分布置尾部烟道,烟道内布置低温过热器、低温再热器和省煤器;第三部分为单独布置的两台四分仓回转式空气预热器。

为避免炉膛内高浓度灰的磨损,水冷壁采用全焊接的垂直上升膜式管屏。炉膛内布置水冷隔墙和屏式过热器,包括中温过热器、高温过热器及高温再热器管屏,管屏采用膜式壁结构,垂直布置,在屏式受热面下部转弯段及穿墙处的受热面管子上均敷设有耐磨材料,防止受热面管子的磨损。下炉膛采用单布风板,布风板之下为水冷壁管弯制围成的水冷等压风室。燃料从布置在下部炉膛前墙水冷壁的多个给煤口送入炉膛。石灰石采用气力输送,石灰石给料口布置在回料腿上。

锅炉设置有四个床下点火风道,分别从炉膛的后侧进入风室。每个床下点火风道配有足够出力的油燃烧器,能高效地加热一次流化风,进而加热床料。考虑到无烟煤难燃的特性,在炉膛下部密相区还设置有床上助燃油枪,用于锅炉启动点火和低负荷稳燃。滚筒式冷渣器均匀地布置在炉膛后墙,与点火风道间隔布置。

四台冷却式旋风分离器布置在炉膛与尾部包墙之间,每台旋风分离器下各布置一台回料器。旋风分离器分离下来的物料经回料器直接返回炉膛。

尾部烟道采用前后双烟道布置,前烟道布置有低温再热器,后烟道布置有低温过热器、高温级省煤器,然后前后烟道合并为一个烟道,里面从上到下依次布置有上级省煤器、SCR 脱硝装置,下级省煤器。

空气预热器采用两台四分仓回转式空气预

热器。

锅炉采用带再循环泵的内置式启动循环系统,由启动分离器、储水罐、再循环泵、再循环泵流量调节阀、储水罐水位控制阀、疏水扩容器、疏水泵等组成。

锅炉整体布置如图 1、2 所示。

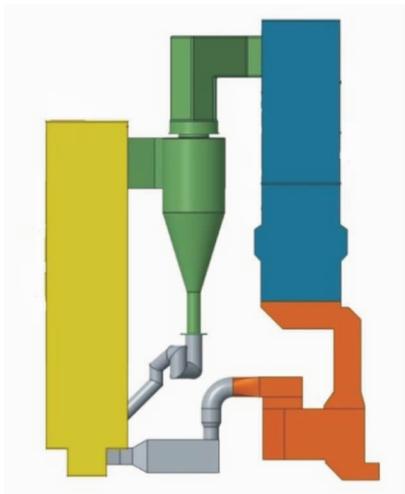


图 1 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉主视图

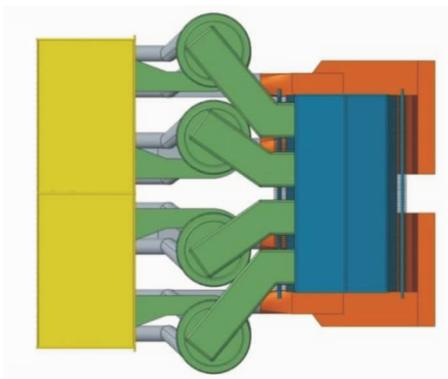


图 2 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉俯视图

锅炉方案需要重点考虑的是热力系统设计、高参数受热面的壁温偏差控制、大截面炉膛及炉后 4 分离器布置的主回路均匀性研究等。

2 锅炉关键技术研究

2.1 热力系统设计研究

高效超超临界参数相对于超临界参数,主蒸汽及再热蒸汽出口蒸汽参数进一步提升,需重点研究工质侧吸热量如何分配,即热力系统的布置及保证各负荷工况的带负荷能力、汽温及床温特性^[5]。本方案取消外置床后,热力系统的设计尤为重要,需合理进行工质侧的吸热分配,确保锅炉带负荷能力并保证高温级受热面的安全可靠使用。

热力系统设计中关键参数的选取和设计可借鉴 350 MW ~ 660 MW 超临界 CFB、700 MW 高效超超临界 PC 锅炉的开发和运行经验。本方案热力系统的设计原则如下:

(1) 热力系统的布置原则

为提高热力系统的保参数能力和保参数范围,有效增加锅炉主回路吸热,将高温级受热面布置在高烟温、高传热的主循环回路,其余受热面布置在烟温较低、以对流传热为主的尾部烟道中。锅炉低负荷运行时,当尾部受热面吸热量下降时,炉膛内布置受热面有利于汽温的调节,有利于提高锅炉保蒸汽温度参数能力。

(2) 受热面的划分原则

700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉主蒸汽温度和再热蒸汽温度均有提升,工质侧焓增与超临界相比增加较多,吸热量也增加较多,因此过热器和再热器受热面的设计主要考虑温度及焓增提升后高温级受热面的壁温安全性及热力系统在各负荷工况下的汽温特性,关键在于单级受热面的焓增控制。

通常,单级受热面焓增越大,吸热偏差越大,汽温调节能力也越差,这威胁到高温级受热面的壁温安全。而单级受热面焓增过小,会造成受热面的浪费。本方案通过合理划分低温级受热面和高温级受热面吸热比例,控制高温级受热面的吸热份额和温升,提高高温级受热面壁温安全性的同时,提高整个热力系统的汽温调节能力。

基于已投运 350 MW ~ 660 MW 等级超临界 CFB 锅炉和 700 MW 高效超超临界 PC 锅炉机组热力系统的成功开发与实际运行经验,通过对 700 MW 高效超超临界 CFB 锅炉受热面进行对应地调整和优化,本锅炉方案热力系统的可靠性可以得到保证。

2.2 壁温偏差控制技术

高效超超临界锅炉参数主蒸汽温度为 605 ℃,再热蒸汽温度为 623 ℃,锅炉方案设计中需要重点考虑高等级受热面管子的壁温安全性,重点是控制受热面的壁温偏差。考虑采用如下措施:

采用小宽度管屏结构,适当提升管屏内质量流速,可以降低单屏管间壁温偏差,从而减小应力。采用小宽度管屏上下流布置形式,通过设置中间混合集箱对蒸汽进行混合进一步提高工质温度均匀

性,避免因为单级过热器焓增较大引起的屏间及管间壁温偏差大。

根据壁温计算,合理选用受热面管子规格,在屏式受热面进口分配集箱增设节流孔,炉内屏式受热面靠近炉膛中心区域的管子局部敷设耐磨耐火材料,精确核算同屏管间流量偏差,使流量分配匹配热量分布。

通过采取以上措施,可减少炉内屏式受热面,尤其是高温级受热面的壁温偏差,提高受热面的运行可靠性,高过、高再采用已有成熟材料均可满足锅炉运行要求。

2.3 主回路均匀性技术

随着锅炉容量的增加,为保证炉膛内截面流化速度在合适的范围内,需要将炉膛断面增大。目前350 MW 及以下等级 CFB 锅炉普遍采用单布风板单炉膛结构,600 MW 及以上通常采用裤衩腿双布风板炉膛结构。本方案采用单布风板单炉膛结构,在满足炉膛深度方向上二次风穿透性的前提下,炉膛宽度将大幅增加,从常规 350 MW 超临界 CFB 锅炉等级的 30 m 增加到 40 m,炉膛的大宽深比更易引起炉内的物料流动不均匀,从而导致炉膛内温度场不均匀,带来水动力的安全问题及污染物排放增加问题^[6]。因此主循环回路的均匀性问题是需要着重考虑的。

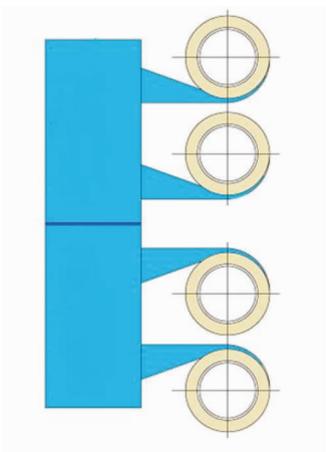


图3 主循环回路示意图

本方案的开发过程中,采取以下措施来提高主循环回路的均匀性。

(1) 给煤的均匀性

在炉膛下部密相区内,横向的物料混合强度远低于垂直方向,给煤在密相区内横向混合的强度直

接决定了密相区内的燃烧均匀性。采用炉前多点分布式给煤技术是提高给煤均匀性的有效措施。

(2) 布风的均匀性

良好的一次风布风均匀性是保证循环流化床锅炉床内流化质量的关键。在 CFB 锅炉中,由一次风送风管、一次风室、布风板及风帽组成的一次风布风系统承担着保证炉膛内床料充分均匀流化及促进稳定燃烧的重要任务。布风板及风帽的布风不均将导致炉内流化质量变差,影响燃料与脱硫剂的高效利用,甚至出现死床、结焦、风帽堵塞及风室漏渣等现象,严重影响锅炉机组的安全与经济运行,尤其是在当今深度节能减排及深度调峰要求下,对锅炉安全、经济运行的影响更加严重。随着循环流化床锅炉的大型化,炉膛截面积不断增大,这会使得炉内流化不均的风险提高。本方案采用单布风板结构,设计中更需考虑提高锅炉布风均匀性,提高流化质量,保证炉内气固混合及燃烧均匀性的措施。

在本方案中,通过对下炉膛结构、进风形式、风室结构、风帽的结构设计及阻力设计、布风板的分区设计等多方面对布风均匀性的影响进行了深入研究,采取了有效措施以提高布风均匀性。

(3) 二次风的均匀性

二次风对循环流化床炉内气固两相流动以及床内燃料的燃烧特性具有重要的影响。二次风对燃烧和炉内流场的促进作用主要表现为二次风的穿透和扰动能力。

在本方案中,由于炉膛床面增加,通过对下炉膛结构进行合理设计,采用大动量二次风喷口,沿宽度方向合理布置二次风等措施,能够达到提高二次风的均匀性。

(4) 回料的均匀性

目前炉后 3 台分离器并联结构形式已大量投入工程应用并取得了较好的运行效果,4 台分离器并联布置于炉膛两侧的结构已在早期 300 MW 亚临界 CFB 锅炉中得到应用,4 台分离器并联布置于炉膛单侧的结构也已应用于工程中。分离器并联数量越多,越容易造成各个回路间的流场分配不均。

本方案中,在炉膛内锅炉中心线位置设置一片水冷全隔墙,此隔墙沿炉膛宽度方向将原本单炉膛

分隔成左右两个相对独立的炉膛。从结构上看,每个独立的炉膛出口分别对应 2 台汽冷式旋风分离器,整个炉膛对应 4 台汽冷式旋风分离器。单侧炉膛对应 2 台分离器的结构布置已有大量工程采用,本方案是把两个单侧炉膛配 2 台分离器合并在一起的模块化组合。

由于并联分离器存在一定的阻力非单调特性,导致各并联回路可能存在一定不均匀性。为进一步研究 4 台分离器并联布置对均匀性的影响,通过数值计算方法,采用 barracuda 软件完成了该结构的数值模拟分析。从分离器出口流量分配曲线可以看出 4 台分离器的流量分配趋势是一致的,后续稳定运行阶段,各出口最大平均流量偏差小于 10%。由此可见 4 分离器并联布置形式的各回路流场比较均匀,采用炉后并联布置四分离器的结构形式是可行的。

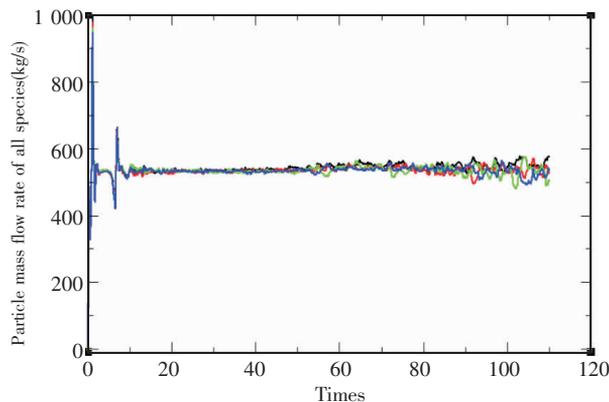


图 4 分离器出口气体流量分配曲线

(上接第 49 页)

3 结语

经过计算比较可见,用“美国依巴斯公司标准和 HG/T 20570.8-1995”选取合适的蒸汽上升流速确定启扩的直径,再由原苏联推荐^[4]的容积蒸发强度确定汽空间的容积,进而确定启扩的高度等设备尺寸的选型设计计算方法较为合理。另鉴于扩容器排汽带水问题,设计时除了考虑直径和扩容容积余量外,可以在出口管处增设汽水分离装置。扩容器(立式)高度也可 $A = (1.5 \sim 2)D + 1.5$ ^[5] 对高度

3 结语

东方锅炉在已投运的 350 MW ~ 660 MW 超临界 CFB 锅炉及 700 MW 高效超超临界 PC 锅炉设计、制造及运行经验基础上,开发完成了 700 MW 高效超超临界参数, M 型布置结构,单炉膛单布风板、不带外置床、炉后布置 4 台高效冷却式旋风分离器的 CFB 锅炉方案。东方锅炉对方案的热力系统设计、控制受热面壁温偏差、主回路均匀性等多个关键技术进行了深入研究,提出了一系列优化措施。总体来看,该锅炉方案具有系统简洁、可靠性高、经济性优的特点,为后续大容量、高参数 CFB 锅炉的设计开发提供了参考。

参考文献:

- [1] 蔡润夏,吕俊复,凌文等.超(超)临界循环流化床锅炉技术的发展[J].中国电力,2016,49(12):1-7
- [2] 巩李明,聂立,王鹏,苏虎等.东方锅炉 660 MW ~ 1 000 MW 超临界环形炉膛 CFB 锅炉开发[C].中国循环流化床发电生产运营管理(2013),2013:10
- [3] 黎懋亮,易广宙.东方 1 000 MW 高效超超临界锅炉设计方案[J].东方电气评论,2015,29(4):26-30
- [4] 冯俊凯,岳光溪,吕俊复.循环流化床燃烧锅炉[M].北京:中国电力出版社,2003
- [5] 聂立,巩李明,邓启刚等.东方 660 MW 高效超超临界 CFB 锅炉的设计[J].电站系统工程,2019,35(4):21-24
- [6] 李金晶,吕俊复,龚鹏等.大型循环流化床锅炉炉膛内床压摆动的机理[J].动力工程学报,2013,33(4):245-249

进行优化校核。

参考文献:

- [1] HG/T 20570.8-1995 气-液分离器设计
- [2] GB/T 150.1~150.4-2011 压力容器
- [3] 马子云,骆学军,徐鍊.快堆主热传输系统及辅助系统[M].中国原子能出版社,2011.10
- [4] 梁晓林.定期排污扩容器的选择[J].价值工程,2010,29(36):197
- [5] 骞宏伟,杨文泽,李晓明.2种大气式疏水扩容器容积设计方法比较[J].能源研究与管理,2012(3):74-76

重载滑动轴承顶轴设计

何江南 杨灵 陈洪炼 陈丹 马骏

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:本文介绍了一种周向布置的多顶轴油囊结构,计算了某重载轴承采用周向布置的多顶轴油囊结构时顶轴油压力分布及在一定的载荷下轴承顶轴油压力及流量随周向进油角的变化情况,并与实际工程进行了对比,结果表明,周向布置的多顶轴油囊结构的顶起性能良好,计算结果可为相关工程设计提供参考。

关键词:重载; 周向布置; 多顶轴油囊; 压力

中图分类号: TM311

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0063-03

Design of Jacking Oil for Heavy-duty Sliding Bearing

HE Jiangnan, YANG Ling, CHEN Honglian, CHEN Dan, MA Jun

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

Abstract: The structure features of circumferentially arranged multi-jacketed oil facility are introduced and the lifting oil pressure distribution of a heavy-duty sliding bearing adopted the structure is calculated, as well as the variation of lifting oil pressure and flow rate with the circumferential oil inlet angle under a certain load are analyzed. After comparing with the actual engineering, the results show that the lifting performance of the circumferentially arranged multi-jacketed oil facility is good, the calculation results provides reference for the relevant engineering design.

Key words: heavy-duty; circumferential arrangement; multi-jacketed oil; pressure

大型旋转机械如汽轮机中所采用的滑动轴承承载大,在启停过程低转速运行时不能建立足够的油膜,容易发生碾瓦问题。汽轮机顶轴系统的作用就是在汽轮机启停过程将转子顶起,在转子轴颈和径向支撑轴瓦承力面之间形成油膜,起到避免或减轻轴瓦磨损的作用并减少盘车力矩。

在结构上,带顶轴油装置的滑动轴承一般在下瓦底部设置静压油腔,油腔面积占整个瓦块面积的比例较小^[1]。目前国内专门介绍轴承顶轴油设计的文献较少,上海汽轮机厂的伍宙敏采用数值计算的方法求解了某轴承的顶轴油压力分布、承载力和流量等数据^[2]。此类顶轴油装置工作时,由于水平扰动的作用可使转子向一侧偏,因而达不到使转子和轴承完全被润滑油隔开的状态,从而使得摩擦系数加大,严重时造成转子和轴承磨损^[3]。顶轴系统

的顶轴油囊结构和布置直接影响到顶轴系统的工作效果,本文介绍了一种周向布置的多顶轴油囊结构,分析某轴承采用周向布置的多顶轴油囊结构时静压性能,并与实际工程进行了对比分析。

1 多顶轴油囊结构的设计特点

常规顶轴结构是在瓦块底部设置 2 个顶轴油囊,在轴向对称布置。为克服该种顶起方式的水平抗干扰能力弱的缺点,将底部单方向顶起,改为底部两侧方向顶起。

某半转速大功率汽轮机机组轴系由高中压转子、A 低压转子、B 低压转子和发电机转子组成,每根转子由两个轴承支撑,轴系简图如图 1 所示。该机组轴承的顶轴结构采用在轴承下方瓦面两侧上对称开四个长方形的顶轴油囊,各轴承顶轴油囊面

收稿日期: 2021-07-09

作者简介: 何江南(1981-),女,2007年毕业于西北工业大学航空宇宙推进理论与工程专业,硕士,高级工程师。现在东方电气集团东方汽轮机有限公司产品研发中心从事汽轮机转子轴承开发设计工作。

积的总和约为轴颈投影面积的 4.5%，油囊深度采用浅油囊结构^[2,4]。轴承结构图如图 2。

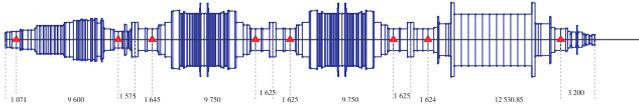


图 1 某半转速大功率汽轮机机组轴系简图

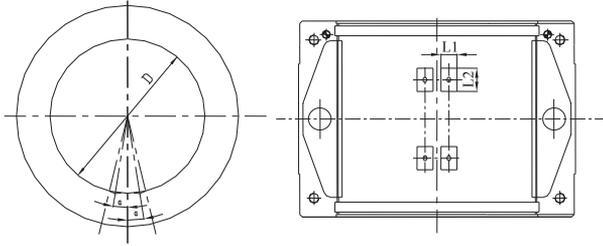


图 2 某半转速大功率汽轮机机组轴承顶轴油囊结构示意图

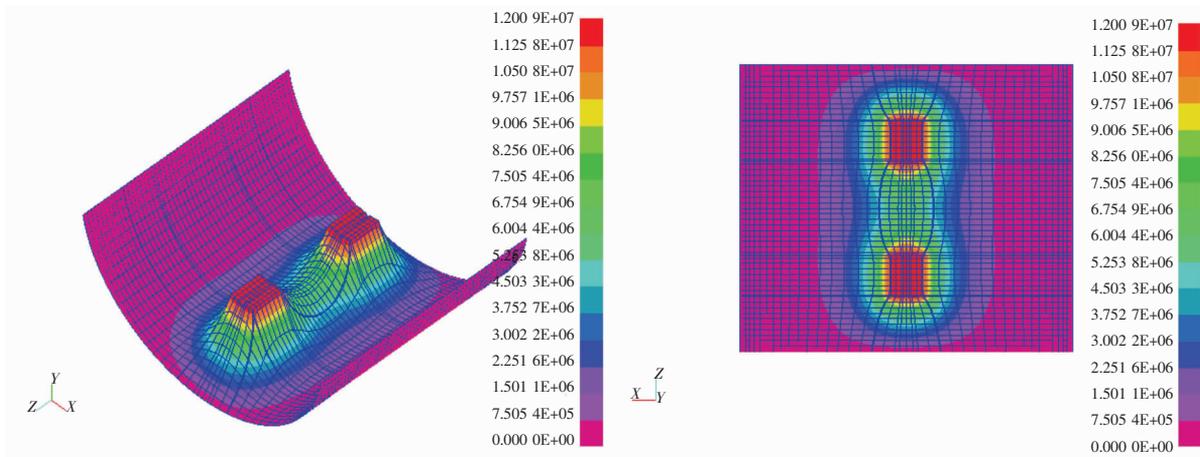


图 3 5#轴承(顶起高度 0.09 mm)顶轴压力分布

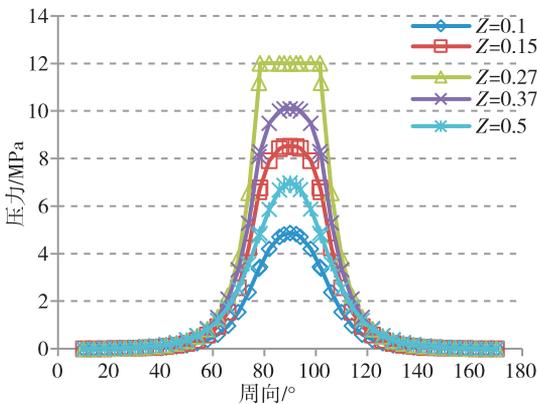


图 4 轴承周向截面压力分布

从图 4 至图 6 可以看出,该轴承的顶轴油压力分布情况与底部两个顶轴油囊的轴承压力分布类似^[2]。顶轴油压力从顶轴油腔向周围减小,直到在边界处减小之零。无论在周向还是在轴向,顶轴油膜在瓦块内部并未破裂。压力沿着轴向中分面及周向中分面分别对称分布。在周向上,在轴瓦中部

2 5#轴承静压承载性能

为了解多顶轴油囊结构轴承的静压承载性能,采用 ARMD 计算了 5#轴承的静压承载性能。计算后得到 5#轴承的顶轴油压力分布如图 3 所示。

从图 3 中可以看出该轴承顶轴油压力在周向布置的两个油囊之间区域未发生泄漏,周向对称布置的两个油囊处压力汇成一个高油压区,整个下半瓦块的顶轴油压力分布成纺锤形,形成了两个高油压区。顶轴油压力不仅分布在顶轴油囊内部,在油囊外相当大的区域都存在压力分布,可分担部分载荷。对轴瓦压力分布进一步按截面展开,如图 4 至图 6 所示。

压力最高,在距离轴瓦两端 40°左右,压力线非常平滑。在轴向上,轴承顶轴压力分布呈“M”型,在油腔区域压力达到最大,油腔两侧压力逐渐变小。

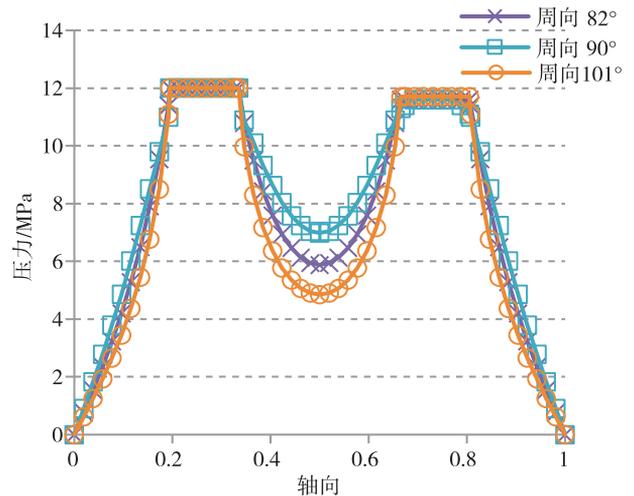


图 5 轴承轴向截面(过顶轴油腔)压力分布

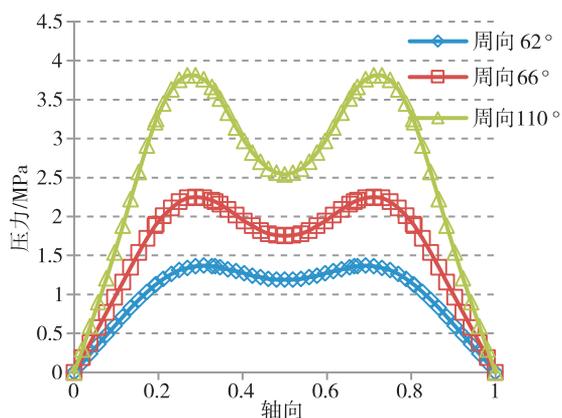


图6 轴承轴向截面(不过顶轴油腔)压力分布

对于该种顶轴系统而言,底部两侧顶起面临的首要问题是流量大。改变5#轴承高压油的进油角度 α ,在转子顶起高度相同,载荷也相同的情况下,计算了不同进油角度下轴承的顶轴油流量及顶轴油压力,如图7所示。

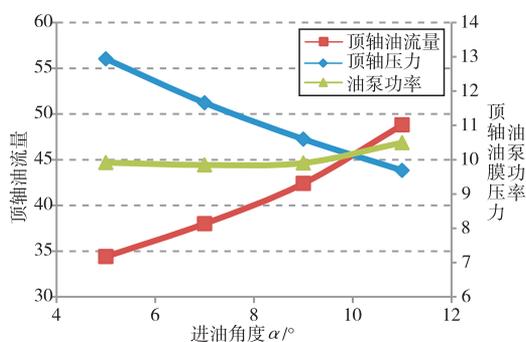


图7 5#轴承顶轴油流量、油膜压力及油泵功率随进油角度变化情况

从图7中可以看出,在顶起高度相同的情况下,高压油进油角度越大,所需的顶轴油流量越大,相应的顶轴油压力越低,油泵功率在进油角度7°时最低。采用泵送功率最优原则,5#轴承进油角度建议选取在7°是比较合适的。

3 工程运用

某半转速大功率机组顶轴系统配置两台100%容量的顶轴油泵,一台运行一台备用。顶轴油泵出口配置过滤器、泄压安全阀、液压集成块,油泵出口的高压油通过油分配器调节流量后,分别进入汽轮发电机组各个支持轴承,最后通过回油管回到油箱中。顶轴油系统简图如图8所示。收集了该项目5#轴承启机时顶轴油分配器压力值及顶起高度,并与计算结果进行了对比。详见表1。

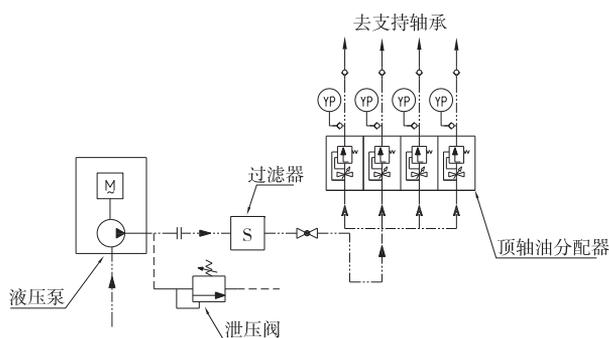


图8 某半转速大功率机组顶轴油系统简图

表1 某半转速大功率机组5#轴承顶轴数据

轴颈 mm	顶起高度 mm	计算顶轴 压力 MPa	顶轴油分配器压力 MPa				
			1	2	3	4	
5#	D800	0.09	12.01	12.5	13	13	13

从计算结果来看,考虑到分配器后管道的压损,计算出的顶轴油压力对现场实际所需的顶轴油压控制是有指导意义的,本项目顶轴油囊的设计完全满足工程需求。

4 结语

本文采用 ARMD 计算分析某项目轴承采用周向布置的多顶轴油囊结构的静压性能,计算了不同进油角度下轴承的顶轴油压力及流量,结论如下:

(1)顶轴油压力在周向布置的两个油腔之间区域未发生泄漏,周向对称布置的两个油腔处压力汇成一个高油压区。

(2)在同一载荷下,高压油进油角度越大,所需的顶轴油流量越大,过油腔处的顶轴油压力越低,采用泵送功率最优原则,5#轴承进油角度建议选取在7°是比较合适的。

(3)根据与现场实测数据的对比,计算出的顶轴油压力对现场实际所需的顶轴压力控制是有指导意义的。

参考文献:

[1]钟洪,张冠坤.液体静压轴承设计使用手册[M].北京:电子工业出版社,2007
 [2]伍迪敏.滑动轴承顶轴油设计[J].热力透平,2013,42(2):100-103
 [3]温诗铸,黄平,田煜.摩擦学原理[M].北京:清华大学出版社,2018
 [4]杨灵,陈赤,何显富.顶轴系统设计[J].东方电气评论,2003,17(2):103-108

筒形汽缸隔板结构对其变形特性的影响研究

章艳 刘东旗 赵仕志 陈铁宁

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文首先介绍了隔板与汽缸、转子配合结构, 并对隔板设计要素以及动静间间隙控制做了阐述。并采用三维有限元法对筒形汽缸包括其内部4级典型级次隔板装配结构建立有限元分析模型, 分别计算了其在机械载荷作用下以及稳定运行工况时, 隔板的变形、隔板径向汽封变形, 隔板与汽缸贴合面接触状态, 并与独立隔板模型分析结果进行对比, 提出独立隔板分析模型满足工程隔板挠度分析要求, 整体计算结果来看, 隔板与汽缸贴合面接触较好, 并且隔板汽封齿不会与转子发生碰磨。

关键词: 筒形缸; 隔板; 汽封间隙; 汽密性; 有限元

中图分类号: TK263

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0066-04

Study on the Influence of Diaphragm Structure of Cylindrical Casing on Its Deformation Characteristics

ZHANG Yan, LIU Dongqi, ZHAO Shizhi, CHEN Tiening

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

Abstract: Firstly, this paper introduces the matching structure of diaphragm, cylinder and rotor, and expounds the design elements of diaphragm and the gap control between dynamic and static. The three-dimensional finite element method is used to establish the finite element analysis model of the cylindrical cylinder, including its internal 4-stage typical diaphragm assembly structure. Under the action of mechanical load and stable operation conditions, the deformation of diaphragm, the deformation of diaphragm radial steam seal and the contact state between diaphragm and cylinder are calculated respectively, and compared with the analysis results of independent diaphragm model. The independent diaphragm analysis model is proposed to meet the requirements of Engineering diaphragm deflection analysis. According to the overall calculation results, the contact between diaphragm and cylinder is good, and the diaphragm steam seal teeth will not collide with the rotor.

Key words: cylindrical casing; diaphragm; steam seal clearance; steam tightness; finite element

汽缸和隔板均是汽轮机的重要静子部件, 对冲动式汽轮机而言, 隔板通常通过悬挂装置安装在汽缸内。安装状态时对各静子部件间以及汽封与转子的间隙进行测量、调整以达到要求^[1]。机组运行时受蒸汽压力、温度等载荷的作用, 汽缸、隔板间相互变形对动静汽封间隙以及隔板与汽缸贴合面接触状态产生影响。基于独立的汽缸或隔板已有较多分析, 该类分析无法反映汽缸与隔板之间运行时

由于温度差异、局部刚性不匹配等因素引起的变形相互影响作用^[2]。本文选取我公司某项目高压筒形缸及其内部典型级次隔板装配模型整体进行计算分析, 研究隔板与汽缸贴合面接触状态以及隔板与转子间汽封间隙变化规律。

1 隔板与汽缸、转子安装状态综述

隔板与汽缸配合部分: 隔板外环出汽边与汽缸

收稿日期: 2021-07-09

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

贴合,外环进汽边沿周向安装有周向定位销,装配
时与汽缸配准间隙,名义间隙值一般为0.1 mm。该
轴向定位销在机组运行时考虑热胀以及隔板挠度
的影响后,与汽缸壁面不接触,在受较大气流扰动
时,起轴向定位的作用。隔板悬挂销与汽缸水平中
分面名义间隙值为0.13 mm。

隔板与转子配合部分:高压叶顶汽封间隙值为
1.3 mm~1.9 mm,径向汽封名义间隙值为1.5 mm,
隔板汽封名义间隙值为0.8 mm~1.1 mm。

隔板与汽缸、转子配合结构示意图如图1所示。

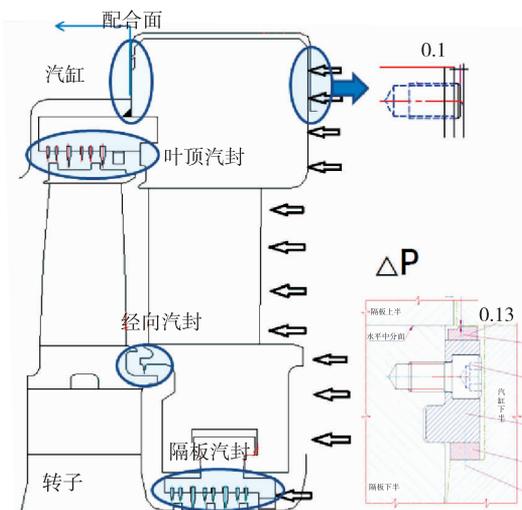


图1 隔板与汽缸、转子配合结构示意图

2 有限元分析模型

本次计算采用大型结构分析软件 ABAQUS。根
据结构和受力特点,建立力学模型基于以下考虑:
汽缸及隔板均采用整体模型,汽缸与红套环间过盈
装配,汽缸上下半接触连接,隔板上下半接触连接
并通过中分面螺栓把紧,隔板外环出汽侧与汽缸接
触连接,螺栓其螺纹端与汽缸刚性连接,螺母与法
兰面接触连接,力学模型均采用三维实体单元。

2.1 力的边界条件

汽缸:①隔板、轴封及汽缸本身的重力作用;②
各级蒸汽压力的作用以及各级隔板对隔板持环的
推力作用;③红套环的过盈以及中分面螺栓的预紧
力;④热载荷作用,即由冷态运行至稳态运行状
态下汽缸壁面受到的热载荷。

隔板:①各级隔板前后压差;②中分面螺栓的
预紧力;③热载荷作用,即由冷态运行至稳态运行

状态下隔板受到的热载荷。

2.2 位移边界条件

①筒形缸搭子定义天地向、轴向约束,横向键
定义横向约束。②隔板通过定义外环与汽缸轴
向配合面给定轴向约束;定义隔板悬挂销与汽缸上
下半接触给定天地向约束;定义隔板下半垂直中分
面定位销处接触给定横向约束。

选取计算的隔板在汽缸中装配关系见图2,分
析三维整体模型如图3所示。

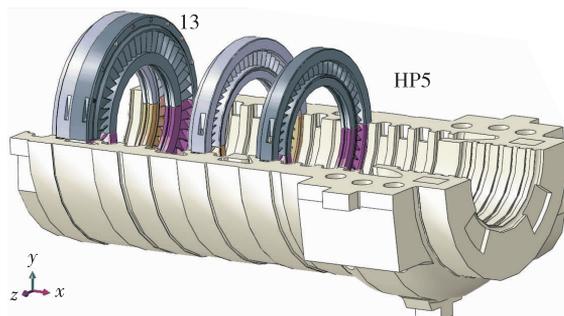


图2 典型级次隔板与汽缸装配关系示意图

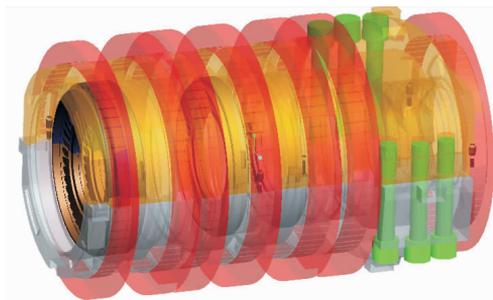


图3 整体三维分析模型

3 机械载荷作用下隔板的变形

3.1 隔板与汽缸整体装配模型与独立隔板模型分 析比较

隔板变形主要是进出汽侧压差引起的。为了
更直观的反映隔板与汽缸变形相互影响作用,提取
了机械载荷作用下,隔板独立分析模型以及汽缸与
隔板整体装配分析模型的结果,如表1所示。HP5、
HP7 隔板与汽缸装配分析模型以及独立分析模型
机械载荷作用下隔板轴向变形云图如图4、5。可以
看出,隔板与汽缸装配分析模型计算的轴向变形较
独立隔板分析模型小,这是由于与隔板贴合的汽缸
定位面不是完全刚性的,而独立隔板分析时存在隔
板沿刚性配合面的转动。从另一方面来说,工程中

就隔板独立模型予以分析,结果是偏安全的^[3]。HP12、13级隔板偏差较大是因为这两级隔板是双胞

胎隔板,其轴向变形受两者间配合面影响较大,与独立隔板分析偏差比较意义不大。

表1 汽缸及隔板在机械载荷作用下的变形

(mm)

轴向挠度	HP5	HP7	HP12	HP13
独立隔板分析	0.068 ~ -0.34	0.068 ~ -0.443	0.021 ~ -0.431	0.015 ~ -0.416
隔板与汽缸整体装配分析	0.048 ~ -0.282	0.014 ~ -0.342	-0.013 ~ -0.272	0.014 ~ -0.407
两者偏差	17%	22%		

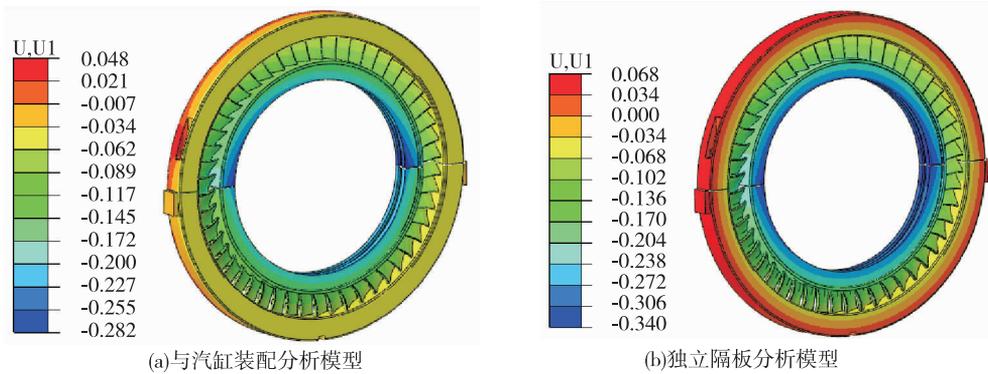


图4 HP5 隔板轴向变形

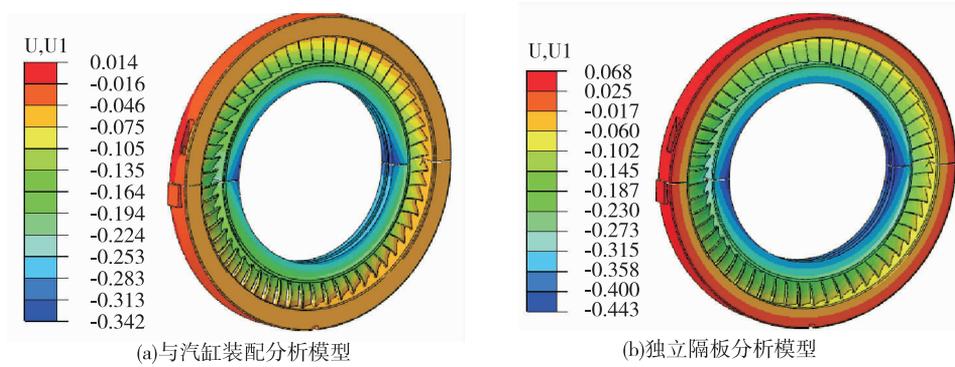


图5 HP7 隔板轴向变形

表2 汽缸及隔板在机械载荷作用下的变形

(mm)

		中分面	垂直中分面		中分面	垂直中分面		中分面	垂直中分面
HP5	汽缸点1	-0.034	-0.03	隔板点1	-0.038	-0.027	隔板点4	-0.278	-0.207
上半	汽缸点2	0.047	0.059	隔板点2	0.012	0.019	隔板点3	-0.266	-0.196
	轴向差	0.081	0.089	轴向差	0.05	0.046	轴向差	0.012	0.011
	HP5	汽缸点1	-0.052	-0.026	隔板点1	-0.044	-0.026	隔板点4	-0.223
下半	汽缸点2	0.02	0.06	隔板点2	-0.013	0.022	隔板点3	-0.213	-0.192
	轴向差	0.072	0.086	轴向差	0.031	0.048	轴向差	0.01	0.01
	HP7	汽缸点1	-0.034	-0.039	隔板点1	-0.043	-0.038	隔板点4	-0.332
上半	汽缸点2	0.032	0.018	隔板点2	-0.005	-0.014	隔板点3	-0.318	-0.25
	轴向差	0.066	0.057	轴向差	0.038	0.024	轴向差	0.014	0.013
	HP7	汽缸点1	-0.054	-0.038	隔板点1	-0.047	-0.036	隔板点4	-0.309
下半	汽缸点2	0.007	0.023	隔板点2	-0.025	-0.01	隔板点3	-0.296	-0.255
	轴向差	0.061	0.061	轴向差	0.022	0.026	轴向差	0.013	0.013

3.2 隔板与汽缸整体装配分析变形结果

对于隔板与汽缸整体装配分析模型在机械载

荷作用下,提取隔板与汽缸贴合面上下各两点以及隔板汽封处两点的轴向变形值,见表2。变形提取

点如图6所示。为了直观的体现表格中变形数值的方向,将HP5中分面位置变形大小及方向标识在图7中,其余方向与之一致。从分析结果来看:①每一级隔板沿圆周方向,各配合面轴向变形基本一致,即沿周向没有发生翘曲;②隔板与汽缸贴合面变形趋势是一致的,隔板与汽缸贴合面接触状态较好;③隔板汽封处轴向贴合面轴向变形较小,设计隔板汽封左右间隙0.6~0.9,上下0.8~1.1,蒸汽压力作用下隔板汽封处变形不会使得汽封齿与转子碰磨,且有较大余量。

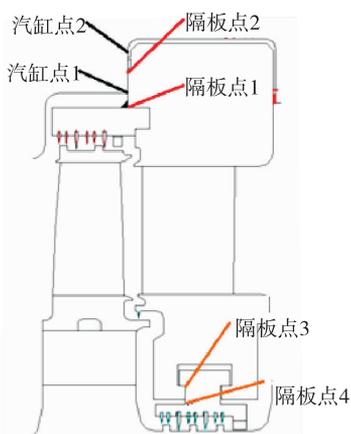


图6 隔板、汽缸轴向变形值提取点示意

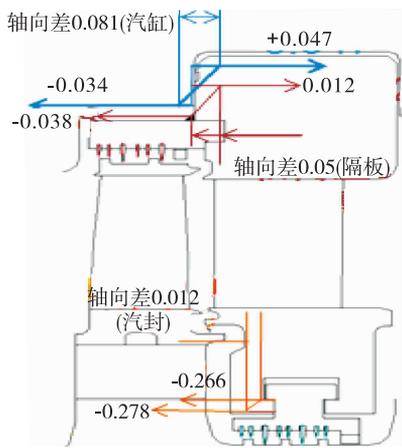


图7 HP5中分面处轴向变形值示意

4 考虑温度场的隔板与汽缸整体装配分析

对于考虑机组稳定运行时温度载荷的隔板与汽缸整体装配分析结果,各部件变形主要由热膨胀引起,该工况分析主要看隔板与汽缸两者贴合面的一个接触状态。考虑隔板与汽缸贴合面的热传导

作用,稳态时隔板与汽缸配合面接触压力基本为15 MPa左右,在中分面处接触压力较大。即机组稳定运行时,隔板与汽缸沿周向均贴合较好(图8~9)。

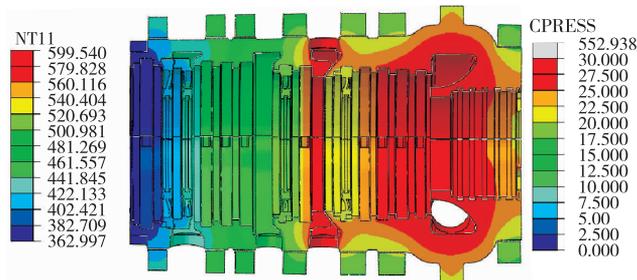


图8 稳定运行时隔板与汽缸整体温度场

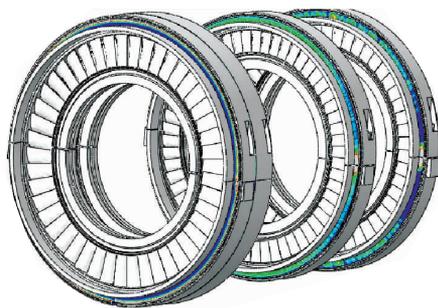


图9 各级隔板贴合面接触压力

5 结语

(1)采用隔板与汽缸整体装配分析模型所得隔板轴向变形较采用独立隔板分析模型所得隔板轴向变形小,两者偏差在20%左右。

(2)由隔板与汽缸整体装配分析结果来看,隔板与汽缸贴合面接触状态在机组稳定运行时较好,并且沿周向没有发生翘曲。隔板汽封、叶顶汽封处受蒸汽压力作用沿轴向及径向变形均较小,与设计间隙相比仍有较大余量。

参考文献:

[1]中国动力工程协会. 火力发电设备技术手册:第2卷,汽轮机[M]. 北京:机械工业出版社,2007
[2]史月涛,丁兴武,盖永光. 汽轮机设备与运行[M]. 北京:中国电力出版社,2009
[3]吴厚钰. 透平零件结构和强度计算[M]. 北京:机械工业出版社,1982

350 MW 水氢氢汽轮发电机定子水路漏氢分析与处理

靳旭亮 李锋 宋清松

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文介绍某电厂 QFSN-350-2-20 型汽轮发电机定子水路漏氢问题的检查、漏点处理, 并提出了预防措施, 为后续机组处理同类问题提供了参考。

关键词: 350 MW 汽轮发电机; 定子水路; 漏氢; 绝缘引水管

中图分类号: TM311

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0070-04

Analysis and Treatment of Hydrogen Leakage from Water Cooled Stator Windings Circuit of 350 MW

JIN Xuliang, LI Feng, SONG Qingsong

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

Abstract: This paper introduces the check and treatment of hydrogen leakage of stator of type QFSN-350-2-20 turbine generator in a power plant, and puts forward the preventive measures, which provides a reference for subsequent units to deal with similar problems.

Key words: 350 MW turbine generator; water cooled stator windings circuit; hydrogen leakage; insulated water piping

某电厂 350 MW 汽轮发电机采用 QFSN-350-2-20 型三相两极同步发电机, 由汽轮机直接拖动。发电机的冷却采用“水氢氢”冷却方式, 即定子线圈(包括定子引线、定子过渡引线和出线瓷套管)采用水内冷, 转子线圈采用氢内冷, 定子铁心及端部结构件采用氢气表面冷却, 集电环采用空气冷却。机座内部的氢气由转子两端的轴流式风扇驱动, 在机内进行密闭循环。发电机励磁采用机端变压器静止整流的自并励励磁系统。发电机主要辅助系统包括定子绕组水系统、密封油系统、氢气系统。

氢气的比重小, 流动扩散性强, 作为冷却介质,

能大幅提高机组的散热能力。但同时氢气渗透能力极强, 发电机运行时机内充满了氢气, 发电机内的氢气压力高于大气压力, 所以氢气很容易泄漏, 漏氢问题是大型氢冷发电机运行过程中普遍存在的现象。氢气泄漏, 会增加发电机耗氢量, 影响发电机冷却效果, 导致机组出力受到限制; 若大量氢气泄漏还可能造成着火、爆炸危险。因此, 漏氢量一直是电厂作为考核机组运行情况的重要指标。

1 发电机结构介绍

该发电机定子结构为三段式, 即定子中段、汽

收稿日期: 2021-04-19

作者简介: 靳旭亮(1987-), 男, 2012年毕业于西安理工大学电气工程及其自动化专业, 本科, 工学学士, 工程师。现在东方电机有限公司从事热能发电机安装、调试技术服务工作。

李锋(1971-), 男, 1996年毕业于湖南大学电机电器及其控制专业, 本科, 工学学士, 高级工程师。现在东方电机有限公司从事热能发电机安装、调试技术服务管理工作。

宋清松(1980-), 男, 2003年毕业于沈阳工业大学电气工程及其自动化专业, 2014年获华中科技大学电机与电器专业硕士学位, 高级工程师。现在东方电机有限公司从事热能发电机安装、调试技术服务工作。

端端罩和励端端罩。四组氢气冷却器水平安装于汽、励端端罩顶部的冷却器包中。发电机轴承采用端盖式轴承,端盖与端罩之间采用橡皮圆密封。油密封装配采用单流环式密封结构,沿轴向分为氢侧和空侧,氢侧和空侧密封瓦均由4瓣组成,装配在端盖内腔的密封座内。图1为350 MW汽轮发电机发电机总体布置图。

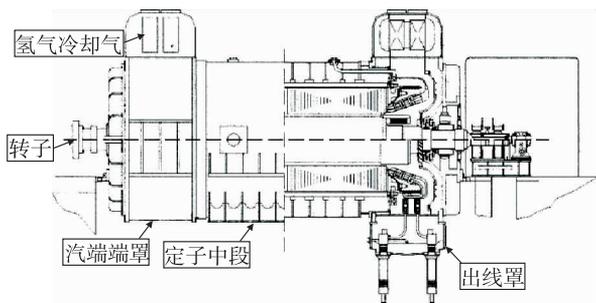


图1 350 MW 汽轮发电机发电机总体布置图

该发电机定子槽数为54槽,分上下层各有54根线棒,线棒采用空心股线和实心股线混合编织而成,空心股线中通有定子冷却水,对线棒进行冷却。定子线棒在端头有一个水接头,水接头通过绝缘引水管与汽、励端定子端部面的汇流管连通。冷却水从定子冷却水系统进入置于发电机机座励端定子端面的汇流管,然后经过聚四氟乙烯绝缘引水管,分别进入各定子线棒。冷却定子线棒后的冷却水,自线棒汽端的绝缘引水管汇集与机座汽端定子端面的汇流管,然后返回定子冷却水系统,进行热交换并完成循环。

定子出线具有独立的冷却水路,冷却水自水系统进入出线罩底部的汇流管,冷却定子出线装配的过渡引线、出线套管后进入出线罩底部的出水汇流管,并返回定子冷却水系统,以完成循环。

2 问题描述

某电厂发电机运行期间发现每日补氢量较大,经过多日统计观察,发现每日补氢量在 20 m^3 以上,远高于制造厂规定为 $10\text{ m}^3/24\text{ h}$ 。同时,氢气在线监测仪界面显示定子冷却水箱处漏氢测点出现高位报警。现场按照厂家指导将定冷水箱顶部的排气阀门全部打开,排气15 min后直接用漏氢检测仪在阀门口检查仍显示高位报警。经过多次检查,排除检测仪器误报警。

为减少定子绕组冷却水系统的漏水事故,运行中发电机的氢压大于定冷水压力,以防止水漏入发电机引发事故。定子水箱处检测出漏氢量高位报警,说明发电机定子水路可能存在漏点,由于机内运行氢压高于水路水压,导致氢气从漏点进入定冷水水路,最终积累在定冷水箱上部。长期的微渗漏会使定子绝缘受潮,导致定子绝缘性能下降,给机组安全运行造成了较大隐患。

3 定子水路可能的漏氢部位

发电机定子水路主要包括定子线棒水路和定子出线水路。理论上来说,定子水路可能的漏氢部位包括以下几部分:

3.1 定子线棒的接头封焊处

焊接工艺不良,有虚焊和砂眼等缺陷。

3.2 定子线棒空心导线

若空心铜线材质差,绕组端部处固定不牢,运行中产生100 Hz高频振动,致使导线换位加工时产生的裂纹进一步扩大和发展,最终会导致端部和槽内直线换位处断裂。另外,若定子水路水压试验结束后,未及时排干,在定子防冻措施不到位时,可能造成定子空心导线冻裂。

3.3 聚四氟乙烯绝缘引水管

导致聚四氟乙烯绝缘引水管漏氢的原因有:①引水管材质差,有砂眼;②绝缘引水管安装不规范,运行时绝缘引水管与机内金属部分产生摩擦,导致绝缘引水管磨破漏水;③绝缘引水管接头处螺母松动或锥形垫圈损坏;④绝缘引水管金属压接接头存在制造缺陷。

4 处理过程

4.1 现场检查情况

发电机停机小修期间,现场对定子线圈水路和定子出线水路分别进行了水压试验,查找漏点。

定子线圈水路试验压力0.75 MPa,历时8小时,检查定子端部绝缘引水管接头、线圈等处未发现渗漏点,压力表表压无变化。定子出线水路试验压力0.75 MPa,试验过程发现压力无法保持稳定,出现持续下降现象。经分析,认为定子出线水路存

在漏点。

该 350 MW 汽轮发电机定子出线装配结构如图 2 所示,由软连接、过渡引线、出线套管组成。过渡引线下端与出线套管连接,上端通过软连接与定子线圈的出线端子连接。出线套管、过渡引线内部设置有水路通道,通过绝缘引水管将过渡引线、出线套管、与出线罩汇流管管路连接在一起,形成了一个独立的循环水路。

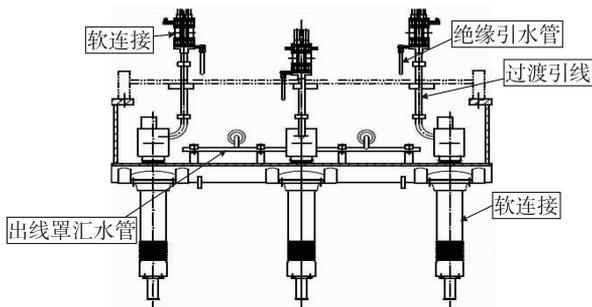


图 2 定子出线装配结构

定子出线装配安装完成后,需要做水压试验,试验压力 0.75 MPa,历时 8 小时,要求各处无渗漏。水压试验合格后,对过渡引线、软连接、绝缘引水管接头要进行手包绝缘工作,绝缘桶安装后,桶内浇灌环氧树脂。绝缘处理工作完成后,绝缘表面晾干后,涂刷聚酯红瓷漆。现场绝缘处理部位要做局部泄漏电流试验。启机前,发电机还需要做三相交流耐压试验。

定子出线水路的漏点可能存在于过渡引线、绝缘引水管接头、绝缘桶、出线罩内汇水管的把合法兰等部位。经现场人员仔细检查,发现一处绝缘桶筒内有积水。

4.2 现场处理过程

该发电机定子出线套管装配结构如图 3。过渡引线、U 型引水管、出线套管、绝缘引水管、定子出线汇水路共同组成了定子出线冷却水路。U 型引水管与出线套管连接接头、U 型引水管与过渡引线连接接头、出线套管与绝缘引水管连接接头,此三处接头处结构相同,均采用锥形铜垫圈密封。

为了确定漏点位置,现场首先拆开 U 型引水管处的绝缘盒,检查 U 型引水管与出线套管连接接头、U 型引水管与过渡引线连接接头两处位置,未发现漏水痕迹。清理掉绝缘桶内的积水,再次打水压检查漏点,发现水是从下部往上渗出,基本可以确

认水是从绝缘引水管与出线套管接头处渗漏。由于现场安装期间,按照施工要求,绝缘桶内浇灌了环氧树脂,绝缘桶的拆除工作较为困难。现场决定在不损伤绝缘引水管、出线套管的前提下,破坏拆除绝缘桶。现场切开绝缘桶,铲掉环氧树脂,最终发现漏水位置就是出线套管与绝缘引水管连接接头处,如图 4 所示。

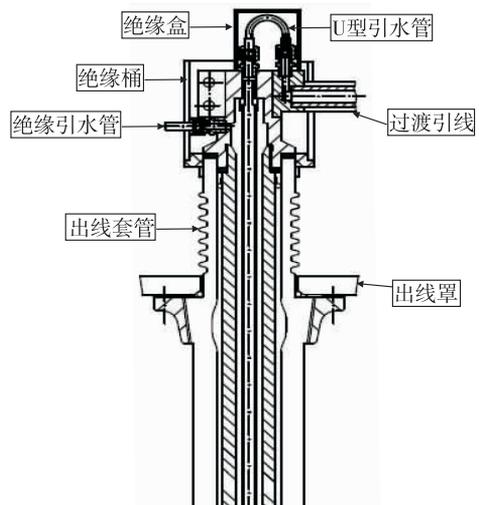


图 3 定子出线套管装配



图 4 某 A 电厂绝缘筒处漏水

现场铲除绝缘引水管接头处手包绝缘层,发现接头内的锥形铜垫圈已破损。现场使用备品锥形铜垫圈更换,重新对定子出线水路做水压试验,0.75 MPa,历时 8 小时,表压无变化,检查各处接头无渗漏。定子出线水压试验合格后,现场对该处绝缘引水管接头重新进行了手包绝缘工作,使用新的绝缘桶安装,并完成灌胶、刷漆工作。绝缘表面晾干后,电厂联系电科院对该相定子线圈做了交直流耐压试验。

该发电机小修结束后,现场按照按照厂家提供的气密性试验方法,进行了一次 24 小时发电机整体气密试验。泄漏量计算公式如式(1):

$$\text{泄漏量 } L = V \left(\frac{T_0}{P_0} \right) \frac{24}{\Delta t} \left(\frac{P_1 + B_1}{t_1 + 273} - \frac{P_2 + B_2}{t_2 + 273} \right) \text{ m}^3 \quad (1)$$

L 为气体泄漏量换算到给定状态 ($P_0 = 0.1$ MPa, $t_0 = 20^\circ\text{C}$) 下的值 (m^3), T_0 为给定状态下大气绝对温度 $T_0 = 273 + t_0 = 293$ (K), P_0 为给定状态下大气绝对压力, $P_0 = 0.1$ (MPa), Δt 为试验连续进行的时间 (小时 h), P_1 为试验开始时机内气体压力 (表压) (MPa), P_2 为试验结束时机内气体压力 (表压) (MPa), B_1 为试验开始时当地大气绝对压力 (MPa), B_2 为试验开始时当地大气绝对压力 (MPa), t_1 为试验开始时机内气体的平均温度 ($^\circ\text{C}$), t_2 为试验结束时机内气体的平均温度 ($^\circ\text{C}$), V 为发电机的充气容积: 定子容积 (未穿转子) 78 (m^3); 总装后定子容积 (不包括系统管路) 为 72 (m^3)。

经过试验计算, 24 小时漏空气量为 0.9 m^3 , 满足要求。再次启机后, 运行期间, 额定工况下, 现场运行人员按照气密试验方法进行了漏氢量计算, 结果为 $7 \text{ m}^3/24 \text{ h}$, 满足制造厂要求。

5 发电机漏氢预防措施

此次电厂定冷水箱漏氢问题的处理, 可以看出, 由于漏点位置比较特殊, 表面有绝缘处理, 查找漏点处理难度较大, 处理时需要先破坏原来处理的绝缘层, 处理后还需要再次进行绝缘处理, 并进行耐压试验, 处理的成本比较高。为了提高机组的可靠性, 减少漏氢问题造成机组的安全隐患, 需要在发电机生产制造和安装运行阶段, 采取相关预防措施。

5.1 生产制造环节预防

制造过程中, 应严格按照设计图纸, 执行相关制造装配工艺要求。厂内的焊缝检查, 定子单独气密试验, 定子绕组水路的水压试验, 转子的气密试验都应做好质量控制。产品在包装、运输过程要做好防护, 避免运输过程造成损坏。

5.2 现场安装环节预防

1、开箱过程中做好防护, 特别是对定子拆除保护罩时, 注意防止碰伤定子端部绝缘引水管。

2、安装过程要严格按照厂家提供的图纸和说明书要求进行安装。

(1) 端罩和冷却器包、出线罩焊接采用气密焊接, 焊完后要做着色探伤检查; 气密罩焊完后要做气密试验刷肥皂水查漏。

(2) 端盖、人孔门。测温接线板及发电机所有接口法兰的把合面的密封条、密封垫都要安装好, 确保密封性。

(3) 密封瓦安装时一定要确保安装间隙符合厂家要求, 并确保密封瓦正确安装。

(4) 定子水路水压试验、定子出线水路水压试验、转子气密试验要严格执行, 对条件允许的电厂, 最好现场做定子单独气密试验, 及早发现漏点并处理。所有的氢气相关管道焊接过程都要保证气密焊接。

(5) 定子出线水路的装配工作是在电厂完成, 绝缘引水管与出线套管接头处, U 型引水管与出线套管接头处、绝缘引水管与过渡引线接头处、绝缘引水管与出线罩汇水管接头处, 均采用锥形铜垫圈密封, 是定子出线水路的薄弱点。现场安装时, 需要确认锥形铜垫圈表面无损伤, 必要时对铜垫圈现场退火处理, 把合时要按要求力矩把合。定子出线水路做水压试验时, 这些部位都应该重点查漏。

(6) 氢气系统设备和管路安装和焊接施工完毕后, 建议单独进行气密试验。试验合格后再与发电机连通, 做整体气密试验, 以减少发电机整体气密试验时查漏工作量。

(7) 现场整体气密试验, 该试验是安装过程对发电机漏氢点的最重要的一次控制, 现场必须高度重视, 仔细检查漏点, 确保气密试验数据合格并真实可靠。

5.3 运行期间预防

机组运行期间, 运行人员应注意收集 24 小时的补氢量数据, 如遇补氢量突然增加应查明原因并处理。同时, 电厂的运行人员应密切关注氢气监测装置的测点状态, 如有异常应及时查找原因并处理。

6 结语

目前, 常规火电、核电发电机机组大部分都采用氢气冷却结构, 电厂在运行过程中也暴露出好多漏氢相关问题。由于氢气的特殊性, 大量泄漏会引起爆炸, 造成安全事故, 因此发电机漏氢问题应引起各方的重视。本文介绍 350 MW 汽轮发电机定子水路漏氢问题的检查、漏点处理, 并提出了预防措施, 为后续同类型机组运行检修提供了参考经验。

东电“十三五”水电技术发展 与“十四五”前景展望

余小波

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要:经过“十三五”持续的技术进步,东方电机(东电)水电机组研发、制造已经实现了巨大的技术跨越和提升,大型水电产品的研制达到了世界领先水平。本文简要回顾了东电“十三五”水电技术发展取得的成效,分析了“十四五”面临的形势,并对发展前景进行了展望。

关键词:水电; 技术; 发展; 展望

中图分类号:F426

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)03-0074-06

The Development of Hydropower Technology in the 13th Five-Year Plan and the Prospect of the 14th Five-Year Plan of Dongfang Electric

YU Xiaobo

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

Abstract: After continuous technological progress during the 13th Five-Year Plan period, Dongfang Electric makes great technological leaps and improvements in the R&D and manufacturing of hydropower units, and the development of large-scale hydropower products reaches the world's leading level. This paper briefly reviews the achievements of the hydropower technology development of Dongfang Electric during the 13th Five-Year Plan period, analyzes the situation of the 14th Five-Year Plan period, and looks forward to the development prospect.

Key words: hydropower; technology; development; looking forward to

“十三五”期间,东方电气集团东方电机有限公司(以下称“东电”)坚持实施创新驱动发展战略,坚持把创新作为引领企业发展的第一动力,牢牢掌握水力发电设备核心技术和核心研制能力,研制出了精品机组,打造了大国重器,服务于国家战略。在水电机组关键核心技术攻关、重大产品研制等方面取得了优良业绩,充分发挥了科技创新在企业水电机组技术发展中的支撑和引领作用。

东电通过单机容量世界第一的白鹤滩1 000 MW水电机组的自主研发,引领了世界水电技术发展;通过国内第一高水头的长龙山抽水蓄能机

组研制,迈入了世界抽水蓄能机组的领先行列;通过单机容量世界最大的巴西杰瑞75 MW巨型贯流式水电机组、柬埔寨桑河二级、巴基斯坦卡洛特为代表的海外项目的高效执行,在服务“一带一路”国家战略的同时,打造了中国水电装备“走出去”的崭新名片。

1 产业规模持续增长,发展质量稳步提升

水电是我国清洁、低成本、技术成熟的可再生能源,其核心设备——水电机组一直是东电的核心产业。

收稿日期:2021-05-11

作者简介:余小波(1964-),男,1996年毕业于四川省委党校经济管理专业,大学本科,高级经济师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事技术管理工作。研究方向:科技情报,科技管理,科技开发管理工程,科技战略、规划、政策研究。

“十三五”期间,东电水电产业自主创新能力快速提升,总体技术能力达到了国际先进水平,部分技术达到了国际领先水平,实现了巨型混流式水电机组和大型贯流式水电机组的行业领跑,大型抽水蓄能机组迈入了国际领先行列,水电机组主导产品全面跨入了国际发电设备高端领域。

“十三五”期间,东电产出水电机组 100 组 1 579.65 万 kW,水电机组产量总体上保持持续增长,市场占有率保持国内领先。总产量全球领先,为国家清洁能源的发展做出了积极贡献。

东电参与的、在中国水电发展史上具有里程碑

意义的“三峡电站枢纽工程”荣获 2019 年度国家科技进步特等奖,这是东电继自主研发的葛洲坝 170 兆瓦水轮发电机组获得国家科技进步奖特等奖之后,再次获得国家最高科技殊荣,进一步彰显了东电求实图强研制精品机组、砥砺奋进打造大国重器的使命和担当。

东电独立完成的“巨型贯流式水轮发电机组关键技术研究及杰瑞机组研制”成果荣获水力发电科学技术奖一等奖、四川省科技进步特等奖,参与的“800 兆瓦级巨型水电机组关键技术及应用”项目获得中国电力科学技术奖一等奖(表 1)。

表 1 “十三五”水电成果获奖明细

成果名称	颁奖单位	奖励名称	奖励等级	获奖时间
巨型贯流式水轮发电机组关键技术研究及杰瑞机组研制	中国水力发电工程学会	水力发电科学技术奖	一等奖	2016
巨型贯流式水轮发电机组关键技术研究及杰瑞机组研制	四川省人民政府	四川省科技进步奖	特等奖	2016
新型 06Cr16Ni5Mo 不锈钢的研制	四川省人民政府	四川省科技进步奖	三等奖	2016
400 MW 级大型抽水蓄能机组关键技术研究与应用	中国水力发电工程学会	水力发电科学技术奖	一等奖	2017
溪洛渡 770 MW 巨型水轮发电机组自主研发	中国创新设计产业战略联盟	好设计	银奖	2017
大型轴流转桨式水轮发电机组更新改造技术	中国水力发电工程学会	水力发电科学技术奖	三等奖	2017
600 MW 级混流水轮发电机组关键技术研究及工程应用	中国水力发电工程学会	水力发电科学技术奖	二等奖	2019
600 MW 级混流水轮发电机组关键技术研究及工程应用	中国机械工业联合会	中国机械工业科学技术奖	三等奖	2019
800 MW 级巨型水电机组关键技术及应用	中国电机工程学会	中国电力科学技术奖	一等奖	2019
长江三峡枢纽工程	中华人民共和国国务院	国家科技进步奖	特等奖	2019
深圳抽水蓄能电站 300 MW 水泵水轮机研制及整组调试技术研究	四川省水力发电工程学会	四川省水力发电科学技术奖	二等奖	2019
溪洛渡 770 MW 巨型水轮发电机组自主研发	中国电工技术学会	中国电工技术学会科学技术奖	二等奖	2019
800 MW 级巨型水电机组关键技术及应用	中国长江三峡集团有限公司	中国长江三峡集团有限公司科技进步奖	一等奖	2019
溪洛渡 770 MW 巨型水轮发电机组自主研发	四川省人民政府	四川省科技进步奖	二等奖	2020
葛洲坝巨型轴流式水轮发电机组扩容改造关键技术研究	中国机械工业联合会	中国机械工业科学技术奖	三等奖	2020
柬埔寨桑河二级高水头灯泡贯流式水轮发电机组开发及应用	中国水力发电工程学会	水力发电科学技术奖	二等奖	2020
深圳抽水蓄能电站 300 MW 水泵水轮机研制及整组调试技术研究	中国水力发电工程学会	水力发电科学技术奖	二等奖	2020
700 兆瓦级水轮发电机组安全高效运行关键技术及应用	湖北省人民政府	湖北省科技进步奖	三等奖	2020
薄弱电网高水头大型灯泡机组关键技术	中国施工企业管理协会	工程建设科学技术进步奖	一等奖	2020

1.1 混流式水电机组领域

白鹤滩电站是全球在建规模最大的水电站,设计安装 16 台世界上单机容量最大的 1 000 MW 水电机组,东电承担了白鹤滩左岸全部 8 台超巨型水电机组的研制任务。

白鹤滩 1 000 MW 水电机组的研制难度远大于

世界在建和已投运的任何机组,代表了目前世界水电研制的最高水平。为研制出全球巨型水电技术进步的“标杆机组”,东电在水力、电磁、冷却、轴承、绝缘、材料、结构、刚强度分析等技术领域开展了大量的核心技术攻关,攻克了水力设计、电压等级确定、电磁通风设计、绝缘技术、材料选择及稳定性研究等多项世界性技术难题,完成了机组的设计开发

工作,机组全面进入到制造和安装阶段。

目前,8台机组中所有的产出部件均一次性通过验收,实现了精品交付;水轮发电机高压绝缘核心技术取得突破,定子线棒型式试验通过了业主见证;800 MPa 高强钢焊接技术在白鹤滩机组蜗壳上实现了成功应用。定、转子高效散热技术、低损耗轴承技术及电磁、通风、绝缘等一系列新技术、新结构、新工艺的创新应用,确保了精品机组目标的实现。发电机效率在世界水电史上首次超越 99%,标志着“白鹤滩百万千瓦级水电机组”这一大国重器实现了自主可控,引领了世界水电技术的发展。

东电凭借强大的技术能力,积极拓展海外市场,2020年成功中标坦桑尼亚朱利诺9台235 MW混流式水电机组项目,继埃塞俄比亚吉布3后,再次刷新了中国水电设备出口的记录。

1.2 贯流式水电机组领域

巴西杰瑞75 MW贯流式水电机组是世界上单机容量最大的巨型灯泡贯流式水电机组,技术性能及稳定性要求高,其设计技术难度系数和制造难度系数均达到目前灯泡贯流式水电机组的世界最高水平。

通过在水力开发、轴系支撑、防“飞车”、关键部件制造工艺、焊接工艺等一系列技术创新和突破,东电研制的22台机组的各项性能指标全面达到国际领先水平,获得了业主方、投资方、国际顶尖咨询公司多方的认可和高度评价,为杰瑞业主带来巨大的经济效益,获得了业主颁发的唯一优质供货商奖。

达到国际先进水平的8台50 MW桑河二级水电站灯泡贯流式机组的自主研发,是继巴西杰瑞项目之后东电在“一带一路”战略落地国家打造的又一座精品工程,获得柬埔寨业主的高度评价,打造了中国水电的崭新名片。

新干、邕宁等三叶片超低水头贯流式水电机组的成功开发,拓展了东电贯流式水电机组技术优势领域。

1.3 抽水蓄能机组领域

通过攻克高水头大容量水泵水轮机安全性、稳定性、高效率相互制约和水头变幅大等行业难题,东电大容量、高水头抽水蓄能水泵水轮机水力开发接连成功,各项性能指标满足合同要求,并达到了国际先进水平。尤其是世界第二、亚洲第一水头的

长龙山水泵水轮机综合水力性能优异,在与国际知名企业的同台竞技中荣获技术第一标;球阀一次性通过验收,创造了抽蓄机组球阀“四零泄漏”的行业纪录;推动了东电抽水蓄能水力开发技术从世界先进走向世界领先。绩溪、敦化、丰宁等一批高水头抽蓄机组,在原有高效率的基础上,运行稳定性又取得长足进步,巩固了东电抽水蓄能机组技术的行业领先地位。

高水头、大容量、高转速绩溪抽水蓄能电站“一年五投六并网”,机组关键核心技术取得全面突破,创造了安装调试新纪录。世界首台“6+6”长短叶片转轮成功应用于黑麋峰国内首个抽水蓄能改造项目,调试试验结果表明:改造后的机组运行平稳、各项参数优秀。同时,困扰电站多年的“特定水头限负荷”“非同步导叶”等一系列问题得以彻底解决,开辟了水泵水轮机设计全新技术路线,被行业专家誉为“抽水蓄能技术国产化的里程碑”。

丰宁二期变速水泵水轮机水力开发技术成果顺利通过了中立试验台模型验收,这是国内企业首家完成该技术的成功案例,也是向国外输出技术的典范。

1.4 轴流式水电机组领域

凭借技术优势,持续拓展轴流式水电机组改造市场,成功中标世界上转轮直径最大的2台170 MW葛洲坝轴流式水电机组水轮机改造项目。巩固了东电轴流式水电机组在行业中的领先地位。“葛洲坝巨型轴流式水轮发电机组增容改造关键技术研究”荣获中国机械工业科学技术进步三等奖。

1.5 冲击式水电机组领域

采用最新计算机测控技术和智能化数据采集技术的DF-300冲击式水力试验台自主建设成功,实现了智能化、无人化试验模式,整体试验能力和试验精度达到了国内领先、国际先进水平。高水头大容量冲击式水电机组研发的“卡脖子”技术也取得了突破,开启了高水头大容量冲击式水电机组国产化、服务国家水电开发战略、打造中国水电产业新“增长极”的新篇章。

2 数字化车间建设取得成效,智能诊断能力初步形成

在全国同行业中,东电以承担国家工信部“大

型清洁高效发电装备智能制造数字化车间建设项目”为依托,率先选定大型清洁高效发电设备的共性核心零件——定子冲片、转子线圈、定子线圈作为智能制造新模式的突破点,并在国内行业首家大量采用国产核心关键装备,形成具有自主知识产权可复制可推广的数字化解决方案,成为行业智能制造数字化车间建设的示范引领工程。

与此同时,以水电机组状态健康评估和故障诊断为核心,开发了一套 VR 体验场景,实现 VR 与智能诊断系统的数据互通和故障诊断功能融合,初步建立了设备运行状态评估方法体系,为后续数据孪生机组、数字化电站等产品开发奠定了良好基础。按规划持续推进了故障诊断模型的研发,成功开发了水电机组智能诊断系统和首批全息监测产品,开启了水电产品智慧化和服务智能化升级进程。

3 开拓国际水电市场 服务国家战略

“十三五”期间,东电积极响应国家“一带一路”倡议,积极开拓国际水电市场。2016 年至 2020 年签订水电合同共 9 个,出口国家集中在东南亚、非洲等“一带一路”沿线国家,表 2 为项目概况。

表 2 “十三五”国际水电中标项目

序号	电站名称	机组容量及型式	出口国家
1	成山	3 × 10 MW 贯流式水轮发电机组	越南
2	佳蒂格德	2 × 56 MW 混流式水轮发电机组	印度尼西亚
3	波索 1 二期	2 × 35 MW 混流式水轮发电机组	印度尼西亚
4	卡洛特	4 × 180 MW 混流式水轮发电机组	巴基斯坦
5	卡普琳	2 × 30 MW 混流式水轮发电机组	哥斯达黎加
6	南俄 4	3 × 80 MW 混流式水轮发电机组	老挝
7	南公 1	2 × 80 MW 混流式水轮发电机组	老挝
8	莫拉戈拉	2 × 15 MW 混流式水轮发电机组	斯里兰卡
9	朱利诺	9 × 235 MW 混流式水轮发电机组	坦桑尼亚

此外,巴西杰瑞、埃塞俄比亚吉布 3、柬埔寨桑河二级等项目在“十三五”期间完美竣工。巴西杰瑞、埃塞俄比亚吉布 3、柬埔寨桑河二级、巴基斯坦卡洛特、坦桑尼亚朱利诺项目是东电“十三五”期间打造的国际市场的五大典范。

3.1 巴西杰瑞项目

杰瑞水电站位于巴西北部朗多尼亚州境内的马德拉河流域上。水电站共装设 50 台单机容量世界最大的 75 MW 的灯泡贯流式水电机组,总装机容量

3 750 MW,在巴西电力系统中占据非常重要的地位。经过激烈的国际竞争,由法国阿尔斯通、德国伏伊特、奥地利安德列兹三家公司组成的西方发达国家联营体和中国发电设备制造的骨干企业东电中标,东电获得了其中 22 台机组的供货合同。

2016 年 11 月,东电为巴西杰瑞水电站研制的 22 台 75 MW 贯流式水电机组全部投产发电并稳定运行,性能指标达到了国际领先水平标志着以东电为代表的中国发电装备企业已跻身世界发电装备一流行列,堪称中国企业实践“一带一路”“走出去”国家战略的成功范例。

3.2 埃塞俄比亚吉布 3 项目

在开拓南美洲市场的同时,东电也没有放松对非洲市场的关注。埃塞俄比亚地处非洲东北部,因其丰富的水资源,又被称为“东非水塔”。吉布 3 水电项目是埃塞俄比亚奥姆河梯级开发中的第 3 级电站,距离首都亚的斯亚贝巴约 360 km,共 10 台单机容量为 187 MW 的混流式水电机组,是非洲当期在建最大水电项目,也是埃塞俄比亚最大的电站。

针对吉布 3 电站超低水头工作的需要,尾水高度相对不足的情况,东电采用先进的技术手段,因地制宜地对模型水轮机流道进行了调整,对尾水管等进行了新方案设计,并成功中标项目。2016 年 9 月,东电自主研发的 10 台机组全部投产发电,为埃塞俄比亚的经济发展提供了强大动力。

3.3 巴基斯坦卡洛特项目

巴基斯坦卡洛特水电站项目是首个被载入中国和巴基斯坦联合声明的水电投资项目,已被列入“中巴经济走廊”优先实施能源合作项目和“一带一路”重点项目,是迄今为止三峡集团在海外投资在建的最大绿地水电项目,也是巴基斯坦首个完全使用中国技术和中国标准建设的水电投资项目,总装机容量 720 MW,4 台 180 MW 水轮发电机组及其附属设备全部由东电研制。首台机组计划于 2021 年投产发电。卡洛特水电站建成后将为巴基斯坦带来高效清洁能源,助力其经济发展。

3.4 柬埔寨桑河二级项目

桑河二级水电站位于柬埔寨东北部的上丁省,电站总装机容量 400 MW,是柬埔寨最大的水电工程,装机容量约占柬埔寨全国总发电装机容量的五

分之一,年均发电量约为19.7亿千瓦时,被誉为柬埔寨的“三峡工程”。8台50 MW灯泡贯流式机组全部由东电供货。桑河二级水电站额定水头21.7 m,最高水头27.2 m,极限最高水头达到27.9 m,单机容量50 MW,属于高水头大容量贯流式机组,机组运行水头和单机容量在同类型水电机组中均处于世界前列。桑河二级水电站于2013年10月开工,2017年12月9日,首台机发电,2018年10月21日,最后一台机投产发电,比原合同规定投产发电时间提前了70天。2018年内实现“一年六投”目标,8台机组在11个月内全部投产发电,堪称新的“中国速度”。机组运行至今,稳定可靠,具有较强的超出力能力,各项参数均满足国际标准要求,主要技术指标已达到国际先进水平,获得了业主的认可,为柬埔寨经济社会发展注入强大的能源支撑,是东电拓展海外市场、践行“一带一路”倡议的又一闪亮名片,也是中柬能源合作的典范。

3.5 坦桑尼亚朱利诺项目

坦桑尼亚朱利诺水电站位于坦桑尼亚鲁菲吉河下游,距印度洋入海口东约230 km,距坦赞铁路福嘎站约35 km,总装机容量为2 115 MW,9台235 MW水轮发电机组及其配套设备全部由东电供货。这是迄今为止中国自主品牌一次性出口容量最大的水电设备合同,刷新了此前由东电创造的巴西杰瑞水电项目(1 650 MW)和埃塞俄比亚吉布3水电项目(1 870 MW)水电出口中国之最,创下中国水电出口新纪录。

朱利诺水电站建成后,坦桑尼亚电力装机容量将提高1.4倍,将大大改善其电力供应状况,降低用电成本,促进国家社会经济发展。

4 “十四五”水电发展面临的形势

4.1 水电仍然是中国可再生能源的主力

据国家能源局新能源和可再生能源司发布的信息:2017年,中国可再生能源发电量1.7万亿千瓦时,水电达11 945亿千瓦时,同比增长1.7%;风电3 057亿千瓦时,同比增长26.3%;光伏发电1 182亿千瓦时,同比增长78.6%;生物质发电794亿千瓦时,同比增长22.7%。

2017—2020年,水电装机从3.41增加到3.7

亿千瓦,增长8.5%;风电从1.64增加到2.81亿千瓦,增幅71.3%;光伏从1.3增加到2.53亿千瓦,增长94.6%。由于环保、移民、成本、政策等限制,水电增幅仅有8.5%,年平均仅增长2%。光伏、风电增幅迅猛。水电装机占可再生能源的比例从52.5%下降到39.6%,降幅12.9%,但发电量占比从70.4%降至61.2%,降幅仅为9.2%。

从2020年数据分析:水电仍然是中国可再生能源的主力,发电量仍占可再生能源电量61%。水电是效率最高、最经济的可再生能源,装机是风电1.3倍,光伏的1.46倍;发电量是风电2.9倍,光伏的5.2倍;水电是最经济的可再生能源,上网电价约是风电一半多,光伏的三分之一多。水电是可再生能源中具有防洪、灌溉、供水、水资源调控、旅游等综合利用效益的工程。

4.2 国内水电市场有机遇,“走出去”是必然趋势

国内水电市场长期以来是国内水电装备制造企业的主要支撑,由于资源和政策所限,国内水电市场新增增量日益减少,但不可阻挡的以清洁高效可持续为目标的能源技术加速发展将引发全球能源变革的趋势和国家2030年碳达峰、2060年碳中和减排的目标又为中国水电装备制造企业的发展带来了新的机遇。“十四五”乃至今后相当长的时期,水电仍是可再生能源体系中不可或缺的重要组成部分。风电、光伏越发展,越需要水电的调节作用。千年水利百年水电,时间足以证明水电对环境的友好性。

国内未来常规水电产品主要市场将集中在四川、云南、西藏等有限的区域,竞争将更加激烈。2035年前,国内主要流域可能开发的大型水电站共计52座,装机规模约为1.1亿千瓦,而西藏占约8 000万千瓦,其它地方约3 000万千瓦。

受制于国内市场,在国家节能减排和“一带一路”战略的推动下,国际水电市场将大有可为。东南亚、南亚区域水电资源开发正逐步进入规模性开发阶段,保守预计未来10—20年该地区新增装机6 100万千瓦以上,且基本为单机300 MW以下的中型水电机组;南美洲、非洲中西部水电资源丰富的国家和地区在目前和今后一段时期将迎来水电站建设的高潮,国际水电市场将成为新的经济增长

点。“走出去”也成为未来一段时间国内水电企业的必然趋势。但国际水电项目招标范围越来越大,成套供货能力尤为重要。行业间实现客户资源共享、优势互补、资源整合,共担风险,合力“抱团出海”,将成为一个新的趋势。

4.3 国际发电装备巨头正在规划构建核心竞争优势

GE以工业互联网技术为支撑,大力推进信息技术和制造技术的融合,进一步提升了产品智慧化水平。福伊特以水电站运行智能诊断与全生命周期服务为抓手,着力发展了设备智能化控制技术,设备远程服务和预防性维护技术。GE、福伊特等国际发电装备巨头已在智能诊断技术等方面抢占了先机,正在规划构建新的核心竞争优势。

随着市场重心的转移,国内企业与国际发电装备巨头的国际竞争逐步加剧,同时由于环境、法律、社会、文化等的差异,国际市场也蕴含着巨大的风险,要在合法合规的情况下规避风险,保证风险可控。

5 “十四五”水电发展主要任务

5.1 提升水电机组设计研发水平

以白鹤滩等项目为依托,夯实大水电技术体系,促使大型混流式机组稳定性、运行可靠性、综合效率等性能稳居行业领先水平

以绩溪、敦化、长龙山等项目为载体,打造抽水蓄能技术体系,实现产品效率、安全性、稳定性、可靠性和环境友好性等性能的全面提升,确保抽水蓄能技术国内最好。开展可变速抽水蓄能机组研发,突破可变速发电电动机、可变速水泵水轮机及其调速系统、可变速抽水蓄能控制策略等关键技术,填补国内大型可变速抽水蓄能电站空白。

5.2 推行“智慧水电”技术,实现产品全生命周期运维管理

以三维设计为龙头,打通设计、制造、试验、运行数字化技术通道,全面推进水电产品实现数字映射和数字孪生。

加快推进水电产品智慧化,发展安全可靠的远程诊断分析技术,为用户提供诊断分析服务,维保服务、备件管理等全生命周期管理。

5.3 加强水力发电新技术发展研究,提升产品质量

加大符合绿色水电站的评价标准的机组转轮研发,研发适合各种水头段、各种机型的高效转轮,完善混流式、轴流式、贯流式水轮机转轮型谱,填补技术和产品空白,扩大水力模型优势水头段范围,并推进优势逐步向全水头段发展。

促进现有水电制造体系与信息化技术深度融合,形成水电产品智能制造、绿色制造的新模式,提升制造技术标准化水平,确保产品质量全面达到行业领先水平。

加强系统集成技术研究,发展定制化服务业务,改造提升众多中小水电站发电设备自动化水平,实现与用户的双赢目标。

6 结语

根据中国水电“十四五”发展面临的形势和主要任务,东电必须要顺应国际可再生能源发展的大势,抓住国家2030年碳达峰、2060年碳中和减排目标带来的机遇,尽快消除技术短板,全面掌握冲击式水轮机、大型变转速抽水蓄能、200米水头段水泵水轮机关键核心技术。推行“智慧水电”技术,实现产品全寿命周期运维管理,促进常规水电产品关键核心技术全面达到世界一流水平,稳步提升大水电及抽水蓄能技术差异化竞争优势,确保行业领先,真正掌握水电市场竞争和发展的主动权。必须要坚持以国内市场为基础,国外市场为主攻。坚持“一带一路”走出去发展战略,通过技术研发,开发一系列适用于海外市场客户需求的产品机型和技术,并加快由设备制造领域向制造服务领域的转型升级。

国内市场,要通过技术升级和品质提升,发挥高端产品的技术优势,在预计到2025年全国水电装机容量将达到4.7亿千瓦(其中常规水电3.8亿千瓦,抽水蓄能约9000万千瓦)的目标中争取到最大的份额。

国际市场,未来的30年国外市场预计每年增长1000-1500万千瓦。要抓住国家推动“一带一路”建设的机遇,加强国际合作,大力发展国际业务,在服务国家战略的同时,壮大自己。

小型模块化核反应堆集成供货的项目管理

杨品铮

东方电气股份有限公司,成都 611731

摘要:本文研究了小型模块化核反应堆的发展趋势和特点,重点探讨了小型模块化核反应堆集成供货项目的管理组织机构,并介绍了集成供货管理在接口管理、计划编制、进度管控、资源共享、分供方管理等方面的具体方法。

关键词:小型模块化核反应堆;集成供货;项目管理

中图分类号:TL3

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)03-0080-04

Project Management for Integrated Supply of Modular Miniature Nuclear Power Reactor

YANG Pinzheng

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

Abstract: This paper researches the development prospect of the modular miniature nuclear power reactor, and then analyses its characteristics. The paper focuses on the management model of the integrated supply project of modular miniature nuclear power reactor, introduces some specific management method.

Key words: modular miniature nuclear power reactor; integrated supply; project management

根据国际原子能机构(IAEA)的定义,功率在300 MWe以下的核电机组为“小型”机组^[1]。小型核反应堆主要有压水堆、高温气冷堆、钠冷快堆和铅铋堆等技术路线^[2]。小型核反应堆的开发运用已有几十年历史,早期主要用于船舶动力装置。二十一世纪以来,小型核反应堆越来越受到国际高度重视。美国、俄罗斯、中国、韩国等在小型反应堆的研发、设计和建造领域走在世界前列,积累了大量工程技术经验。

模块化是小型核反应堆的重要发展趋势,模块化是指系统构筑物可以在工厂进行加工制造,在现场快速安装,具有显著缩小建造周期和成本的特点^[3]。美国 B&W 公司设计开发的 mPower 小型核反应堆、美国通用电气公司和帕杜大学联合开发的 MSBWR 小型沸水堆、美国西屋公司开发的 IRIS - 50 小型反应堆、美国 LLC 公司设计的 NuScale Power

小型模块化反应堆、俄罗斯 Afrikantov OKBM 公司设计的 KLT - 40S 小型核反应堆、韩国原子能院研开发的 SMART 一体化模块式先进反应堆等都具有模块化的特征^[2,4]。

中国在小型模块化核反应堆研发和推广方面也在走在世界前列。“模块化小型堆示范工程”被纳入到我国能源创新“十三五”规划,重点进行模块化建造技术研究。近年来,我国核电企业在小型模块化核反应堆的研发核和广方面做了大量工作,中核集团,中广核集团,国电投集团,清华大学,中船重工等都在开展小型模块化核反应堆的相关工作。

小型模块化反应堆已成为世界核能发展的一大趋势,其未来的应用场景不仅局限于船舶动力,在海上发电、城市供热,海水淡化等领域也有很大潜力,此外,还可以与其它新能源,比如风电、太阳能等组成联合能源系统,成为能源体系的重要组成

收稿日期:2021 - 07 - 09

作者简介:杨品铮(1985 -),男,2010年毕业于上海交通大学材料科学与工程专业,硕士,工程师。现在东方电气股份有限公司核能事业部核岛项目室主要从事项目管理工作。

部分^[5]。

1 小型模块化反应堆的特点

目前,世界各国开发的小型化反应堆普遍采用了紧凑型、模块化、一体化的设计方案。相比于传统核反应堆,小型模块化反应堆主要有以下几个特点^[6]。

(1)采取紧凑式布置。设备之间采取直接连接的方式,减少了管道、阀门等零部件。降低了 LOCA 事件的概率,提升了运营安全性。

(2)大量采用非能动设计,通过自然循环系统对堆芯进行冷却,有效降低了 LOCA 事件后堆芯熔损的可能性。

(3)采用一体化设计,设备集成度高。因布置紧凑,小型模块化反应堆各设备集成度较高。目前世界上大部分小型核反应堆采用了压力容器内置蒸汽供应系统的设计,比如俄罗斯的 ABV,美国的 ITIS 以及我国自主研发的 NHR-200 等。

(4)模块化建造缩短建造周期,降低建造成本。小型模块化核反应堆通常在设备制造厂进行总装,可以缩短现场安装、施工的周期,还具有实现批量化生产的可能,将极大的降低建造成本。

(5)模块化建造要求设备供应商具备核岛设备集成供货能力。设备供应商除了能够制造各类核岛一回路主设备外,还应具备核岛设备集成供货管理能力,建立符合国家核安全法规的集成供货项目管理体系。

小型模块化核反应堆项目对核电设备项目管理提出了更高的要求,本文将某项目为例对核电设备集成供货项目管理的模式和方法进行探讨。

2 集成供货项目管理的组织模式

小型模块化核反应堆设备主要包括反应堆压力容器、蒸发器、堆内构件、控制棒驱动机构、稳压器、主泵、重型支承等,通常由一个集团公司下属的多家子公司分别负责制造。集成供货主合同由集团公司与业主签订,集团公司与下属子公司签订内部分工协议。

集团公司和子公司共同建立集成供货项目管理组织机构,并按照《民用核安全设备监督管理条

例》及其配套规章,和 HAF003《核电厂质量保证安全规定》及其导则和国家核安全监管有关规定的要求建立核岛主设备集成供货质量保证体系。

核岛主设备集成供货项目采用矩阵式组织机构,通常如图 1 所示。

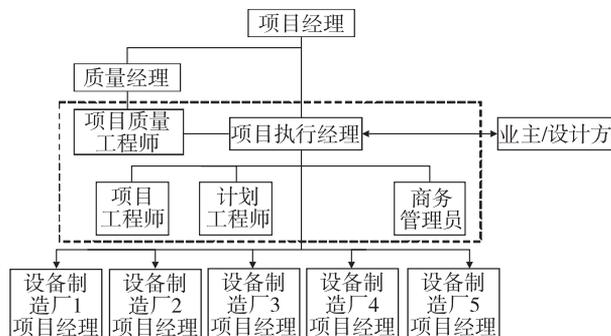


图 1 小型模块化核反应堆集成供货项目组织结构

集团公司作为项目领导方,指定一名项目经理,对项目进行统筹协调和管理,其主要职责包括:负责制定项目总体策划,编制项目总体计划;负责项目质量管理体系的建立和维护;负责与业主之间的外部接口;组织制定项目质量目标并贯彻执行;负责建立内部沟通渠道,确保信息传递、处理、关闭受控等。子公司也要指定各自的项目经理,主要职责包括:代表子公司与领导方项目经理接口,并汇报本单位项目的执行情况;负责其所在子公司分工范围内的设备项目策划及项目计划的编制;协助领导方项目经理开展工作,负责其所在子公司分工范围内的各项事宜的协调、落实和完成;在领导方项目经理授权下,代表其所在子公司与业主(设计方)就单个设备技术问题进行联络和接口等。领导方还需指派一名质量经理,主要职责包括:根据合同要求编制项目质保大纲(PQAP)和程序文件;负责对重要分供方的资质进行管理;负责与核安全监管单位接口;参与业主对子公司的质保监察等。

集团公司的项目团队主要包括项目经理、项目执行经理、项目工程师、计划工程师和商务管理员。一般情况下,项目经理应由一定职级的领导人员担任,获得充分授权协调处理项目存在的问题,在这种情况下,可以设置一名项目执行经理,协助项目经理负责具体项目管理日常事务。

子公司负责其分工范围内的设备制造具体工作,核电设备制造流程主要包括设计转化、材料采

购、工艺准备、生产制造、验收发运等环节。子公司内部按照业务分为项目管理、设计、工艺、质保、质检、生产、采购、装备、综合管理等部门,在执行某个

项目时,按照矩阵式管理,各部门指定专人参与,成立项目攻关团队,由项目经理统筹协调。子公司项目团队组织机构图如图2所示。

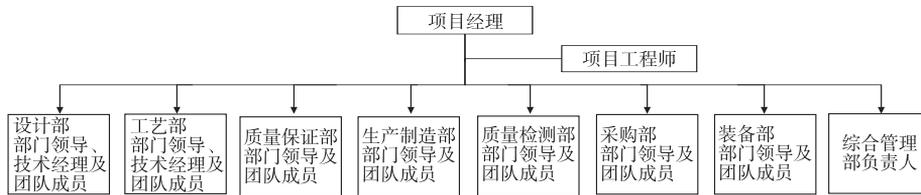


图2 子公司项目团队组织机构图

集成供货项目管理团队分为集团公司和子公司两个层面,按照各项管理制度规定各司其职,共同推动项目工作。

3 集成供货项目管理的关注重点

3.1 设备间接口识别与管理

小型模块化核反应堆设备采取紧凑式布局,一体化设计,模块化建造,各设备间紧密配合接口较多,而集成供货管理的优势之一在设备间接口的管理。在项目启动之初,领导方项目经理组织各子公司共同梳理设备间的接口关系,明确接口分工,制定接口交互计划,初步制定接口管理清单。

小型模块化核反应堆各设备间的接口主要包括反应堆压力容器与控制棒驱动机构的接口,即RPV顶盖与CRDM贯穿件配合,需保证压力边界的密封性;反应堆压力容器与堆内构件尺寸配合,精

度要求极高。取消连接管道以后对总装焊缝的变形控制是一大课题。在狭窄空间全手工焊接尺寸变形控制都是一个巨大挑战。必须要预先做好指导和策划。

在项目执行过程中,接口清单需进行动态管理。针对识别出的接口关系,需制定接口管理专题计划,严格执行。

3.2 梳理总装流程

小型模块化核反应堆的总装通常在制造厂内进行,要在项目初期对总装流程进行梳理,明确各设备投入总装的顺序及需求时间,作为各设备制订生产制造计划的输入。核反应堆的总装流程与百万千瓦级核电站现场核岛设备安装过程类似,但由于其紧凑布置的特点大大增加了难度。典型的总装流程如图3所示,预计厂内总装周期为12~14个月。

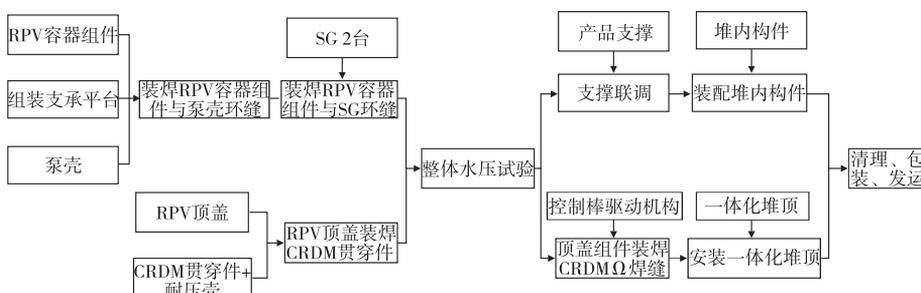


图3 小型模块化核反应堆的总装流程

3.3 计划编制与进度管控

计划是项目管理的纲领性文件,集成供货管理模式在小型模块化核反应堆项目计划编制过程中可以更好的从全局性统筹考虑。计划由领导方项目经理牵头编制,计划编制流程为首先依据合同交货期即总装流程倒排出各设备的完工时间;其次编制各设备单独的进度计划,得出初始计划完工时

间;然后再将各设备初始计划完工时间与总装时间进行对比,如果设备完工时间有提前,则计划可行,如果设备完工时间较总装需求时间滞后,则需要优化总装或单独设备的计划,以确保单个设备的计划与总装计划相匹配。因为总装过程涉及多台设备,且设备之间也存在接口交互,因此进度匹配工作可能需要经过多次迭代。

在项目执行过程中,如果发生特殊情况,导致某个设备的进度产生偏差,需要对计划升版时,同样需要进行单个设备计划与总装计划进行匹配。这个时候,领导方项目经理要统筹考虑总体计划,通过单个设备进度追赶,总装工艺流程优化等方式尽量减小对总装完工期的影响。

在项目初期,除了制造计划外,还应编制材料采购及文件准备等方面的专题计划。如果存在一些重要的影响到项目关键技术攻关项次,也需要编制专题计划。

在项目执行过程中,项目经理团队依据计划对项目进度进行管控。当项目进展产生偏差时,项目经理团队依据偏差的天数及重要性制定分类措施,针对重要性高且偏差较大的情况,要制定专门的追赶措施,尽量在后续环节消除偏差。

3.4 设计与制造匹配

目前,国内大部分小型模块化核反应堆仍处于研发阶段,往往是设计与制造同步开展,在项目执行过程中,做好设计进度与制造需求的匹配非常重要。而国内的核岛设备设计由各大核电集团专门的设计院进行。项目执行过程中,需特别注重与上游设计院密切配合,除通常的设计联络会、协调会以外,可以采取与研究院联合办公等多种方式,从设计源头提升设备工艺性。

作为研发项目,上游设计文件的发布往往不能满足设备制造进展需求,面对这一难题,需要尽早与设计院对照设计文件清单就文件出版计划达成一致,以便评估进度计划。有时,为了推进项目前期工作,设计院可以提供非正式版文件用于技术准备工作,提供 CFC 版文件用于材料采购,再通过宣布 Work Ready 来控制制造厂内开工。设备制造厂与设计院要就设计关键控制节点进行充分交流,明确上游设计控制意图,细化受到控制点影响的具体工序,尽量降低设计控制节点的影响。

3.5 资源调配管理

众所周知,核岛设备制造活动需要符合核安全法规的规定。目前,国内装备制造集团在国家核安全监管部门的支持下,已向核岛集成供货方向迈出了一步。小型模块化反应堆集成供货管理可以在

满足核安全法规的前提下,根据项目情况、子公司各自的许可范围核资源情况对民用核安全设备制造资源进行统筹安排和协调。制造集团内的各子公司可以共享民用和安全设备制造资源,并可以在子公司之间开展关键工艺分包、焊工/焊接操作工和无损检验人员借用等。

集成供货管理的领导方要制定资源共享的专用程序,规定各项资源共享活动的具体流程,并将其纳入到集成供货项目质量保证大纲之中。各子公司之间可以就资源情况进行沟通,领导方也可以在子公司之间进行协调,根据项目总体情况促成子公司之间达成一致。

通过子公司之间的资源共享,可以有效的推动项目进展,共享研制经验,提高产品质量核安全性。

3.6 分供方管理

由于其结构特点和性能要求,其原材料和零部件与以往成熟产品的要求有很大区别,原有供应商都没有供货业绩和经验,必须做好分供方管理。

小型模块化核反应堆集成供货项目中,各子公司之间存在较多相似的需采购的物项和服务,即锻件、铸件、板材、圆钢、镀铬处理、机加工等。采用目录供方进行统一管理,按统一的管理流程,统一的技术要求,统一开展供应商评价,从而避免技术和管理要求传递不到位带来的诸多问题,很大程度上节省资源和时间,保证供货质量。集成供货管理领导方负责组织相关子公司的质保和技术人员对目录供方进行评价并形成结论,建立“成套供货合格目录供方名单”。各子公司根据自身采购范围在合格目录供方名单中选择采购对象。

4 结语

当前,核能产业市场格局逐渐由百万千瓦等级的大型堆转向小型堆,而小型核反应堆普遍采用模块化设计,小型模块化核反应堆集成供货项目将会增多。集成供货管理可以有效的将各设备制造子公司整合为一个整体,在项目策划,进度管控,资源共享,供方管理等各方面发挥重要作用。有利于保证项目的顺利推进和提供高质量、高可靠性的产品。

(下转第 88 页)

CAP1000 核电堆内构件出口管嘴焊接 防变形控制技术

董明亮 舒华安 李莹 郝磊 魏煌臻

东方电气(武汉)核设备有限公司,武汉 430223

摘要:吊篮筒体是核反应堆堆内构件的重要组成部分,设计尺寸精度要求高,其出口管嘴的焊接是影响吊篮筒体尺寸精度的重要工序。本文根据焊接变形机理,理论分析了出口管嘴焊接结构的变形规律,提出了焊前、焊接过程中及焊后的变形控制方法,设计了焊接防变形工装和焊后校形工装,确定了合理的焊接顺序,形成了完整的出口管嘴焊接防变形控制技术。该技术在 CAP1000 堆型产品上得到了成功应用,达到了防变形效果。

关键词:核电; 吊篮筒体; 焊接变形; 变形控制

中图分类号: TM623

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)03-0084-05

Deformation Control Technology for Nozzle Welding of Internals Outlet in CAP1000 Nuclear Power Plant

DONG Mingliang, SHU Huaan, LI Ying, HAO Lei, WEI Huangzhen

(Dongfang Electric (Wuhan) Nuclear Equipment Co., Ltd., 430223, Wuhan, China)

Abstract: Core barrel is an important part of the reactor internals, and the design requirements are strict. The welding of the outlet nozzle is an important process in the manufacturing process of the barrel. According to the welding deformation mechanism, this paper analyzes the deformation law of the welding structure of the outlet nozzle, puts forward the deformation control method before, during and after welding, designs the welding anti deformation tooling and post welding sizing tooling, determines the reasonable welding sequence, and forms the complete anti deformation control technology of the outlet nozzle welding. The technology is successfully applied to CAP1000 stack products, and the effect of deformation prevention is achieved.

Key words: nuclear power; core barrel; welding deformation; control of deformation

堆内构件是核反应堆内部重要的组成部分,属于 SC-3 级(非承压设备)、质保 QSA1 级、抗震 I 级部件。而吊篮筒体又是反应堆堆内构件的主要承压部件,包括堆芯部件的重量和自重、堆芯部件的压紧力、冷却剂流动带来的载荷、地震载荷和失水

情况下带来的载荷等所有的重量与载荷,都是通过法兰传到压力容器支承台肩上。

核反应堆堆内构件吊篮筒体的内径达 3 m 以上,壁厚仅 50 mm,高度大于 8 m,有 4 道全焊透环缝和 3 道全焊透纵缝,同时设计公差与尺寸精度要

收稿日期:2021-07-09

作者简介:董明亮(1988-),女,2010年毕业于华中科技大学材料学院材料成型及控制工程,本科,工程师。现在东方电气(武汉)核设备有限公司技术部主要从事堆内构件的制造技术的研究。

舒华安(1973-),男,1997年毕业于武汉化工学院机械系,本科,高级工程师。现在东方电气(武汉)核设备有限公司主要从事堆内构件的制造技术的研究。

李莹(1988-),女,2010年毕业于武汉理工大学机械科学与工程学院,本科,工程师。现在东方电气(武汉)核设备有限公司主要从事堆内构件的制造技术的研究。

求严格。吊篮筒体的材料为 Z2CN19 - 10 + N2 (控氮) 奥氏体不锈钢, 由于奥氏体不锈钢的导热系数小 (约为低碳钢的 1/3), 线膨胀系数大 (比低碳钢大 50%), 在自由状态下焊接时, 容易发生焊接变形。特别是出口管嘴的焊接, 筒体上开了管嘴孔, 筒体本身就容易变形, 加上焊接的局部加热的影响, 筒体更容易变形。

控制大型结构件的焊接变形是一项复杂的课题, 尤其对于精度要求较高的核电产品更是如此。控制了出口管嘴焊接变形对于整个堆内构件的制造是一个重大突破。上部堆芯吊篮是整个堆内构件的半个生命, 处理好管嘴变形问题, 不仅完成了产品的顺利制造, 使企业掌握管嘴焊接防变形的核心技术, 更树立了本企业在行业中的声望。

1 焊接变形原理

焊接件由于受到不均匀地局部加热与冷却, 是产生焊接应力与变形的的主要原因。焊接时, 由于电弧的热作用, 电弧附近的金属温度显著提高, 离电弧较远的金属温度低, 焊接件出现不均匀的热膨胀, 导致焊接变形。焊接变形分为纵向收缩变形、横向收缩变形、弯曲变形、角变形、波浪变形^[1], 如图 1 所示。

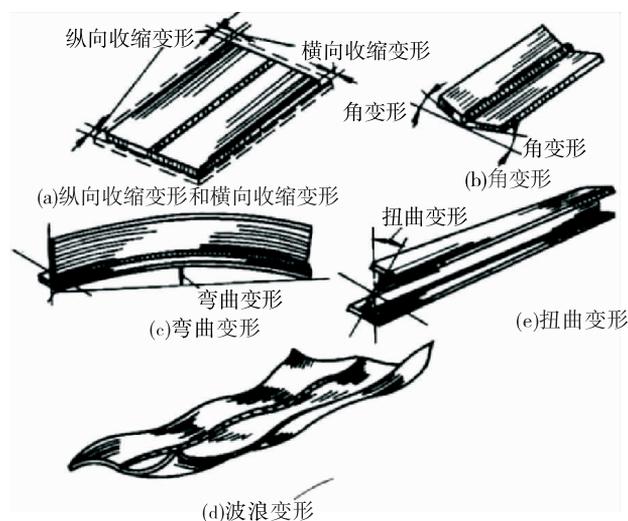


图 1 焊接变形种类

2 焊接变形控制措施

焊接变形可以从设计和工艺上来控制, 下面主要从工艺角度来分析。

工艺措施是指在焊接构件生产制造过程中所采用的一系列措施, 将其分为焊前预防措施、焊接过程中的控制措施和焊后校正措施。

2.1 焊前的预防控制措施

焊前预防方式主要有预反变形法和刚性固定法。

反变形法是首先预测焊接变形的大小和方向, 在待焊工件装配时, 施加与焊接残余变形作用力大小相当、方向相反的反变形量, 焊接之后焊接残余变形量抵消了反变形量, 让工件恢复到设计要求的几何形状和尺寸要求。

刚性固定法是采用刚性胎膜或者工装夹具将被焊工件尽可能地固定, 来控制待焊工件的弯曲变形与角变形等。

2.2 焊接过程中的控制措施

焊接过程中的控制措施主要有合理的焊接顺序和焊接规范参数, 焊接顺序会对焊接残余应力和变形的产生较大影响, 采用不同的焊接顺序可以改变残余应力的分布规律, 但对残余应力整体幅值的降低作用不大, 在多道焊中, 控制焊接顺序对控制焊接变形有较大影响。

采用线能量较低的焊接方法和使用合适的焊接规范参数可以有效地控制焊接变形。

2.3 焊后校正的措施

当工件焊接后, 可以通过校正来减小已产生的残余变形。焊后校正措施主要有加热校正法和机械校正法。加热校正法又分为整体加热和局部加热。

本课题针对奥氏体不锈钢, 主要采用机械校正法, 机械校正法利用机械力或冲击能等对焊接变形进行校正, 主要有静力加压校正法、焊缝滚压法和锤击法等。

3 结构分析

陆丰项目 CAP1000 堆内构件吊篮筒体属于大型薄壁不锈钢筒体, 由吊篮法兰、上筒节和两个出口管嘴焊接而成, 上部吊篮筒体有两个出口接管。内径要求 $D 3 397 \pm 3 \text{ mm}$, 壁厚 $51 (-0.3, +1.5) \text{ mm}$, 圆柱度要求 5 mm , 影响内径和圆柱度的主要因素有吊篮法兰与筒体的焊缝焊接变形、筒体卷制的

圆度、出口管嘴孔的焊接变形,其中出口管嘴的焊接变形控制难度最大。

用有限元分析分析上筒体与出口接管焊接的径向变形,分布如图2所示,出口管嘴焊缝处呈现向内收缩趋势。

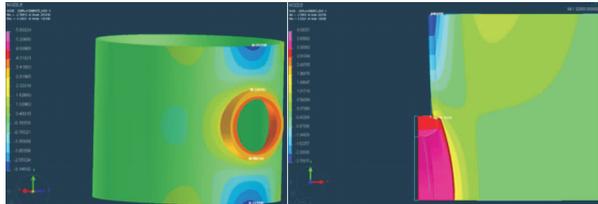


图2 出口管嘴焊接变形有限元分析图

4 出口管嘴焊接变形控制方法

核反应堆堆内构件吊篮筒体焊接过程中,最难控制的是上部吊篮筒体与出口管嘴的横向收缩变形,秦山二期扩建工程3号吊篮筒体在焊接过程中,产生了严重的焊接变形,上部吊篮筒体与出口管嘴焊接完成后,筒体尺寸严重超差,长、短轴差距达26.5 mm。筒体半径与设计要求的 $(1\ 540 \pm 3.2)$ mm相比,最大偏离达5.03 mm,整个上部筒体成了椭圆形^[2]。

由于秦山二期扩建工程3号吊篮筒体焊接变形,结合前期二代加的焊接变形经验,本课题针对CAP1000项目出口管嘴焊接变形控制,结合理论分析制定了一套工艺方法,内容主要从焊前控制、焊接过程控制和焊后校正三个方面来控制。焊前控制包括出口管嘴的焊接时机,开孔方式,反变形措施,焊接过程中采用合理的焊接参数和焊接顺序,焊后采取校正的方式进行。

4.1 焊接变形控制措施

(1) 焊前控制

结合前期项目的出口管嘴焊接变形经验,本课题调整了装焊顺序,原来项目的工艺顺序为吊篮法兰和上筒节焊接,然后开管嘴孔,焊接出口管嘴,再与下部吊篮进行对接,如图3所示。

本课题调整后的工艺顺序为吊篮法兰和上筒节焊接,然后与中筒节进行对接,再开出口管嘴孔,焊接出口管嘴,再与下部吊篮进行对接,如图4所示。

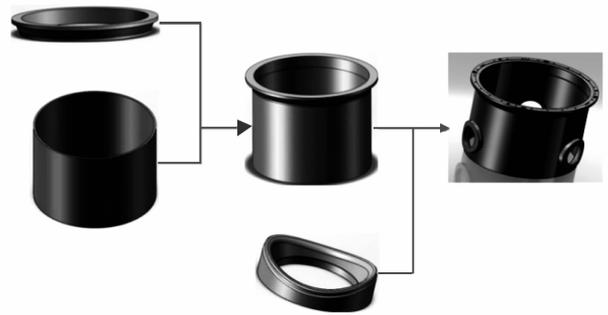


图3 原出口管嘴装焊顺序

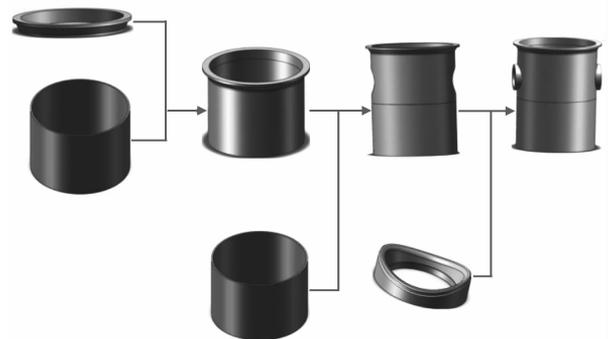


图4 改进后出口管嘴装焊顺序

该顺序的调整增加了出口管嘴焊接之前上筒节的刚性,可有效地控制出口管嘴与上筒节的角变形与弯曲变形等。

同时开孔时传统工艺是用马鞍形等离子切割机割掉中间的余料,然后镗管嘴孔至尺寸。用常规的马鞍形等离子切割机切割会有热应力,导致变形,容易使筒体椭圆度严重超差。

采用传统的冷加工的方式加工筒体管嘴孔,得到合理的加工方案和加工参数,既能缩短加工周期,又能防止热加工导致的变形。

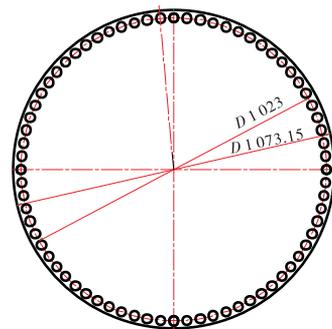


图5 管嘴孔钻孔钻一半示意图

如图5所示,管嘴孔直径为 $D\ 1\ 073.15$,在直径为 $D\ 1\ 023$ 的圆上钻一圈大小为 $D\ 30$ 、互不相交的孔。然后在各相交的孔之间再钻一圈 $D\ 30$ 的孔,如图6所示。

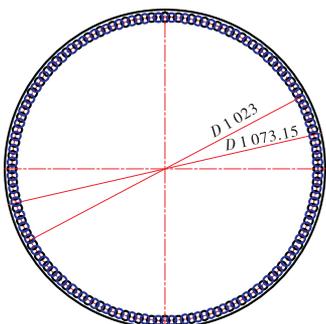


图6 管嘴孔钻孔钻完示意图

另外在焊接之前采用图7的工装在筒体内部进行刚性固定,在出口管嘴外圆处使用百分表监测筒体加压导致的变形量,撑至反变形。

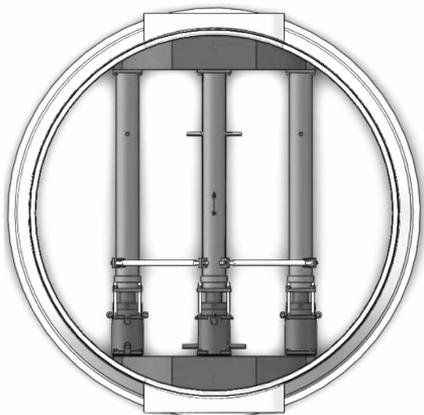


图7 管嘴焊接防变形工装

该管嘴防变形支撑采用带千斤顶的撑杆结构,撑杆两头采用圆弧块顶住出口管嘴的焊接区域,并在焊接之前撑至反变形,防止管嘴焊接时焊接部位向下塌陷。在焊接过程中监控焊接变形情况,根据情况调整进行工装调整。

(2) 焊接过程控制

出口接管装配位置确认后,进行出口接管焊缝的定位焊,采用氩弧焊进行焊接,总共焊接8段,每段长40mm,焊接位置分布及顺序如图8所示,先焊外侧再焊内侧。

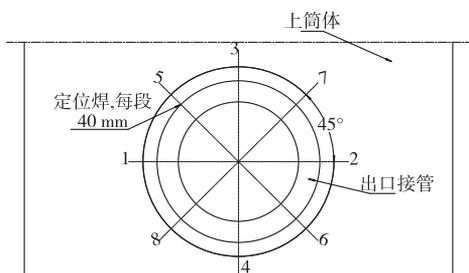


图8 管嘴焊接顺序

用手工氩弧焊进行出口管嘴与筒体坡口内外侧打底焊,两管嘴焊接同时进行,即焊接上侧管嘴的外侧时进行下部管嘴内部的焊接,打底焊完成后对出口管嘴与筒体坡口内外侧焊缝表面进行PT,PT合格后执行后续焊接。用焊条电弧焊进行出口管嘴与筒体焊缝的填充盖面焊,先焊接内侧焊缝,两管嘴交替进行,即每焊完一圈焊接另一侧管嘴,焊接过程中每焊接1/3厚度进行一次PT直至焊满,焊接时非焊接面应做好防护防止飞溅。内侧焊满后进行外侧的焊接,外侧焊缝两管嘴也交替进行,每焊接1/3厚度进行一次PT,先将焊缝坡口焊平,对焊缝修磨平整后,再进行外侧角焊缝的焊接,焊接时使用模板实时测量焊高是否满足要求,尽量减少焊后打磨量。整个焊接过程中,采用较小的焊接电流、电压,较大的焊接速度来减少焊接热输入,减少焊接变形。

(3) 焊后校正

本课题在该项目上设计了焊后校正工装,用来对焊后热处理后产生的变形进行校正,由于该项目筒体内径控制较好,没有下塌变形,所以焊后校正工装未使用。

4.2 变形控制效果

我司焊接热处理之后内径为3 394.34~3 404.54mm,圆柱度控制在5mm,变形控制较好,没有超过设计下差,我司采取的焊接变形控制措施达到了预期效果。内半径分布图如图9所示。

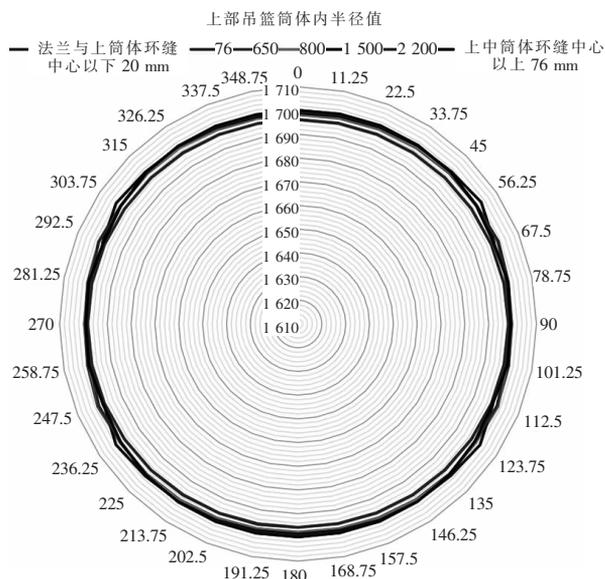


图9 出口管嘴焊后上部吊篮内半径图

5 结语

焊接变形控制是一项比较复杂的课题,特别是核电用大型不锈钢结构件,尺寸大、焊缝分布复杂、精度要求高,控制焊接变形变得尤为困难。此外,大型核电焊接结构件的生产成本高,生产周期长,一旦焊接变形超出设计范围限制,处理起来相当复杂,校正周期较长,因此控制大型核电焊接结构件的焊接变形就成为必须要解决的课题。

结合焊接变形常用的控制方法,对陆丰项目

(上接第 53 页)

上电路模型及仿真结果进行解释,并利用两相复合电介质理论及界面极化效应进行估算。

参考文献:

- [1] 顾家华. 电机绕组真空连续浸渍绝缘工艺简析[J]. 微特电机, 2002(5):37-38+40
- [2] 曾谦, 漆临生. 东方绝缘技术的发展[J]. 绝缘材料通讯, 1999(2):32-37
- [3] 胡义, 田建辉, 张赞等. 超高速防爆变频调速同步电动机绝缘系统研究[C]. 十三届全国绝缘材料与绝缘技术学术会议论文集, 2017, 许昌:328-332
- [4] 何景彦, 吴广宁, 高波等. 基于介质损耗分析研究变频电机绝缘

(上接第 83 页)

参考文献:

- [1] IAEA-TECDOC-1451. Innovative small and medium sized reactors: Design features, safety approaches and R&D trends [R]. Vienna. 2005
- [2] 陈培培, 周赞. 世界先进小型压水堆发展状况[J]. 核动力工程, 2012, 33(5):136-139

CAP1000 出口管嘴焊接的变形进行了控制,尺寸测量结果在设计要求的误差范围之内,液体渗透以及射线检测结果无缺陷显示,满足设计要求。该工艺方法为国内首创,实现了出口管嘴焊后一次合格。

参考文献:

- [1] 王元良. 焊接及焊接结构[M]. 北京:中国铁道出版社,1986
- [2] 王庆田等. 核反应堆堆内构件吊篮筒体焊接变形的分析与控制[C]. 中国核科学技术进展报告(第一卷·第3册),2009:6

老化特性[J]. 高压电器, 2008(3):243-245

- [5] 侯海波, 郭亮, 裴海帆等. 定子线棒介质损耗检测影响因素的研究[C]. 十三届全国绝缘材料与绝缘技术学术会议论文集, 2017, 许昌:389-394
- [6] 胡波, 梁智明, 漆临生等. 大型水轮发电机定子线棒的局部内均压层结构研究[J]. 绝缘材料, 2010, 43(2):54-56
- [7] 胡波, 梁智明, 周进. 发电机定子线棒端部介质损耗因数和电容的电压特性研究[J]. 东方电机, 2014(3):53-56
- [8] 金维芳. 电介质物理[M]. 北京:机械工业出版社, 1995:70-75
- [9] 胡波, 梁智明, 漆临生等. 高压电机定子线棒两电极介质损耗因数和电容的关系研究[J]. 上海大中型电机, 2014(4):25-31
- [10] 胡波, 谢志辉, 何明鹏等. 电机定子线棒绝缘介质损耗特性研究[J]. 防爆电机, 2012, 47(2):25-29

[3] 熊厚华, 杜继富, 曾正魁等. 模块式小型反应堆研发现状及前景分析[J]. 价值工程, 2015, 34(2):30-31

- [4] 张国旭, 解衡, 谢菲. 小型模块式压水堆设计综述[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(增刊1):40-47
- [5] 陈文军, 姜胜耀. 中国发展小型堆核能系统的可行性研究[J]. 核动力工程, 2013, 34(2):153-156
- [6] 张宇. 我国小型堆项目开发前景分析和探讨[J]. 能源工程, 2012(6):14-17

欢迎投稿, 欢迎订阅!