

ISSN 1001-9006  
CN 51-1333/TM

4

2021

第35卷 总第140期

# 東方電氣評論

## DONG FANG DIAN QI PING LUN

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

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



东方电气评论

第三十五卷第四期

二〇二一年十二月

公开 ISSN 1001-9006  
发行 CN 51-1333/TM

第35卷第4期(总第140期)  
出版日期:2021年12月25日

国内邮发代号:62-187  
国内定价:8.00元

ISSN 1001-9006



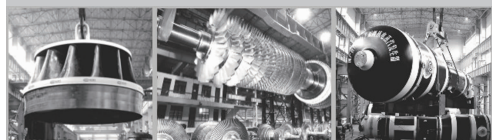
中国东方电气集团有限公司 主办  
四川省动力工程学会



2021

第 35 卷第 4 期 (卷终) 总第 140 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

某燃料电池动力系统支架随机振动寿命分析

..... 罗仁超 张昊 蒲守武等(1)

能源装备的网络安全要素分析 ..... 袁晓舒 吴桐 刘杨等(6)

基于时间自动机的汽轮机控制保护系统建模

..... 马海迎 李奕彤 袁晓舒等(12)

大型发电机定子线棒主绝缘复合材料多工况老化特性研究

..... 裴景克 李愿杰 胡波等(18)

高换热系数疏水性石墨烯/铜镍合金材料制备及其性能研究

..... 张中伟 杨大帅 何坪(23)

### 风力发电

永磁直驱式风力发电机整机装配动力特性研究分析

..... 王世建 何启源 段志强等(29)

VPN 在风电机组异地集中监控中的应用 ..... 李盛儒 王明军(34)

智慧风电变流器 CANopen 通信开发 ..... 贺生鹏 吴小田 边晓光等(38)

### 燃煤发电

发电装备焊接自动化发展研究 ..... 董娜 陈弈 张媛等(42)

锅炉行业进口大口径管采购困境及对策 ..... 罗伶俐(47)

东方超高温亚临界燃气锅炉简介 ..... 郑刚 冉桑铭 曾洁等(49)

搭接成型盘铣刀铣削减小薄壁类零件变形和振动的方法 ..... 王应明(55)

关于 ASME 规范热应力棘轮分析要求的探讨 ..... 李亭(59)

定子线棒受力三维有限元分析 ..... 任盼秋(62)

东方电机“十三五”创新驱动发展综述 ..... 余小波 尹国军(66)

### 汽轮机

基于高频电磁换向阀控制的汽轮机危急遮断装置研究分析

..... 李庆 刘炯 邵毅等(72)

大型水氢氢汽轮发电机定子空心股线优化设计

..... 刘传坤 周光厚 张海波等(76)

### 核能发电

项目管理在核电涉外分包项目中的应用 ..... 王志坚(81)

核电小堆发展现状及前景展望 ..... 罗晓秋 刘伟东 王放(85)

简讯 ..... (28)(46)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM\*1987\*q\*A4\*88\*zh\*p\*¥8.00\*750\*19\*2021-04

# DONGFANG ELECTRIC REVIEW



2021

2021-12-25 Vol. 35 No. 4  
(Quarterly, since 1987)

## CONTENTS



### BASIC RESEARCH

- Random Vibration Life Analysis of A Fuel Cell Power System Support Structure  
..... LUO Renchao, ZHANG Hao, PU Shouwu, et al(1)
- Analysis of Network Security Elements of Energy Equipment  
..... YUAN Xiaoshu, WU Tong, LIU Yang, et al(6)
- Modeling of Steam Turbine Control and Protection System Based on Time Automata  
..... MA Haiying, LI Yitong, YUAN Xiaoshu, et al(12)
- Study on the Aging Characteristics of the Main Insulation Composite Material of the Large Generator Stator Bar under Multiple Working Conditions  
..... PEI Jingke, LI Yuanjie, HU Bo, et al(18)
- Preparation and Properties of Hydrophobic Graphene/Cu-Ni Alloy with High Heat Transfer Coefficient  
..... ZHANG Zhongwei, YANG Dashuai, HE Ping(23)

### WIND POWER

- Research and Analysis on Assembly Dynamic Characteristics of Permanent Magnet Direct Drive Wind Turbine  
..... WANG Shijian, HE Qiyuan, DUAN Zhiqiang, et al(29)
- Application of VPN in Centralized Monitoring of WTCs  
..... LI Shengru, WANG Mingjun(34)
- Development of CANopen Communication Function for Wind Power Converter Control System  
..... HE Shengpeng, WU Xiaotian, BIAN Xiaoguang, et al(38)

### THERMAL POWER/COAL-FIRED POWER

- Research on Development of Welding Automation of Power Generation Equipment  
..... DONG Na, CHEN Yi, ZHANG Yuan, et al(42)
- Boiler Industry Import Large-calibre Pipe Procurement Dilemma and Countermeasures  
..... LUO Lingli(47)
- Brief Introduction of Dongfang Ultra High Temperature Subcritical Blast Furnace Gas Fired Boiler  
..... ZHENG Gang, RAN Shenming, ZENG Jie, et al(49)
- Method of Using Lapped Joint Profile Disk Milling Cutter to Decrease Deformation and Vibration of Thin Wall Part  
..... WANG Yingming(55)
- Analysis on the Requirements of Thermal Stress Ratcheting of ASME Code  
..... LI Ting(59)
- 3D FEM Analysis about Stator Winding Force  
..... REN Panqiu(62)
- Overview of the Innovation-driven Development of Dongfang Electric in the 13th Five-Year Plan  
..... YU Xiaobo, YIN Guojun(66)

### TURBINE

- Research and Analysis of Steam Turbine Crisis Trip Device Based on High Frequency Solenoid Valve Control  
..... LI Qing, LIU Jiong, SHAO Yi, et al(72)
- Advantages of Evaporative Cooling Technology in Large Generator-motor and Its Simulated Test  
..... LIU Chuankun, ZHOU Guanghou, ZHANG Haibo, et al(76)

### NUCLEAR POWER

- Project Management in Foreign Subcontracting Project  
..... WANG Zhijian(81)
- Development Status and Prospect of Small Modular Reactors  
..... LUO Xiaoqiu, LIU Weidong, WANG Fang(85)
- NEWS IN BRIEF  
..... (28)(46)

### EDITORIAL BOARD

Chairman: WANG Weimin

Vice Chairmen: DONG Na, YANG Yong

Members: MA Qingtian, WANG Xiaoliang, WANG Yu, WANG Jianlu, WANG Zhengyuan, 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. )

# 某燃料电池动力系统支架随机振动寿命分析

罗仁超<sup>1</sup> 张昊<sup>1</sup> 蒲守武<sup>2</sup> 张庭华<sup>1</sup> 刘彦萍<sup>1</sup> 王亮<sup>1</sup> 程友星<sup>1</sup>

1. 东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司,成都 611731;2. 东方电气东方汽轮有限公司,四川 德阳 618000

**摘要:**近年来燃料电池以其零排放,受到人们的关注。车用燃料电池动力系统支架与车架固定在一起,系统支架承载着整个燃料电池的静、动载荷,其结构性能决定着燃料电池系统在车载条件下的稳定性。本文应用 Workbench 分析了某燃料电池系统支架的随机振动,分析表明该燃料电池系统支架可以通过耐久性随机振动试验。通过基于高斯分布和 Miner 线性累计损伤定律的三区间法评估其损伤满足车载耐久性。

**关键词:**碳中和; 燃料电池; 随机振动; PSD; Miner; 损伤

中图分类号:U469.72;TM911.4

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)04-0001-05

## Random Vibration Life Analysis of A Fuel Cell Power System Support Structure

LUO Renchao<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, PU Shouwu<sup>2</sup>, ZHANG Tinghua<sup>1</sup>, LIU Yanping<sup>1</sup>,  
WANG Liang<sup>1</sup>, CHENG Youxing<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** In recent years, fuel cell attracts people's attention with its zero emission. The vehicle fuel cell power system support structure is fixed together with the vehicle frame. The system support structure carries the static and dynamic loads of the entire fuel cell, so its structural performance determines the stability of the fuel cell system under on-board conditions. This paper uses Workbench to analyze the random vibration of a fuel cell system support structure. The analysis shows that the fuel cell system can pass the durability random vibration test. The system support structure meets the vehicle durability requirements which damage assessment is based on with Gaussian distribution and miner's linear cumulative damage law.

**Key words:** carbon neutrality; fuel cell power system; random vibration; PSD; Miner; damage

2020年9月22日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话强调,中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,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。这是中国在巴黎协定之后第一个长期气候目标,也是第一次提到碳中和。碳中和是指企业、团体或个人测算在一定

时间内,直接或间接产生的温室气体排放总量,通过植树造林、节能减排等形式,抵消自身产生的二氧化碳排放量,实现二氧化碳“零排放”。碳中和对中国而言并非实现“绝对的零排放”,而是到2060年前,要将人为活动排放对自然的影响通过技术创新降低到几乎可以忽略的程度,达到人为排放源和自然新的平衡,真正实现人和自然的和谐共生。基

收稿日期:2021-09-24

基金项目:四川省科技厅项目:氢燃料电池客车关键技术研究与应用(氢燃料电池客车及关联产业关键技术研究与示范);项目编号:2019ZDZX0002。

作者简介:罗仁超(1987-),男,2017年毕业于成都电子科技大学控制工程专业,工程硕士,工程师。现在东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司主要从事燃料电池系统开发工作。



于碳中和的远景目标国务院办公厅印发了《新能源汽车产业发展规划(2021-2035年)》，规划提出到2025年新能源汽车新车销量达到汽车新车销售总量的20%，到2035年，公共领域用车全面电动化，燃料电池汽车实现商业化应用，氢燃料供给体系建设稳步推进，有效促进节能减排水平和社会运行效率的提升。国际能源转型一直沿着从高碳到低碳、从低密度到高密度的路径进行，而氢气是目前公认的最为理想的能量载体和清洁能源提供者。氢气无毒无害，反应物为水，绿色清洁，热值高，相当于汽油的三倍，被誉为“21世纪的终极能源”。

目前，我国在政府主导下氢燃料电池公交车等公共特殊车辆已在多个城市投入运营。随着技术进步、规模增长，氢燃料电池产业链的成本将明显降低，燃料电池将逐步实现商业化应用。要实现商业化应用，得到市场和人们的进一步接受，目前面临着燃料电池系统的稳定性和耐久性问题。车用

燃料电池动力系统支架与车架固定在一起，系统支架承载着整个燃料电池的静、动载荷，其结构可靠性决定着燃料电池系统在车载运行条件下的稳定性。而燃料电池作为汽车的一部分，必须满足在长期路面随机载荷激励下的可靠性和耐久性。

本文通过基于GB 38031-2020《电动汽车用动力蓄电池安全要求》中功率谱密度进行随机振动有限元模拟，分析了系统支架的耐久性和安全性，为燃料电池零部件的耐久性设计提供了思路。

### 1 随机振动疲劳求解过程

车辆在行驶过程中，持续承受着来自路面的随机载荷激励，燃料电池作为汽车的动力源，其零部件的可靠性至关重要，因此需在设计阶段预测零部件的动力学性能，其可通过结构的随机振动分析来获得。汽车行业常采用损伤理论对车载零部件的耐久性进行设计和评估，燃料电池零部件基于模态叠加法的随机振动损伤求解流程见图1。

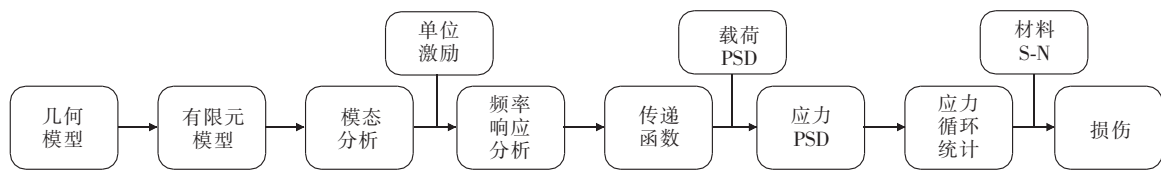


图1 随机振动损伤求解流程图

结构的运动控制方程为：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

$[M]$ 为结构质量矩阵； $[C]$ 为结构阻尼矩阵； $[K]$ 为结构刚度矩阵； $\{F(t)\}$ 为随时间变化的载荷函数； $\{u\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{\ddot{u}\}$ 分别对应节点位移、速度和加速度矢量。

模态叠加法的求解方法，首先假定结构的自由振动  $F(t) = 0$ ，而阻尼矩阵 $[C]$ 对结构频率影响较小，所以忽略，得到式(2)，通过式(2)求解结构的频率和振型。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (2)$$

式(2)为自由振动，即简谐振动，所以假设：

$$\{u\} = \{\varphi\}_i \sin(\omega_i + \theta_i) \quad (3)$$

$$\{\ddot{u}\} = -\omega_i^2 \{\varphi\}_i \sin(\omega_i + \theta_i) \quad (4)$$

将式(3)、式(4)带入方程(2)，可以得到式(5)。

$$([K] - \omega_i^2[M])\{\varphi\}_i = \{0\} \quad (5)$$

方程(5)的根为  $\omega_i^2$ ，其平方根是  $\omega_i$ ，即可由式(6)得到自然频率。

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (6)$$

$\{\varphi\}_i$ 为结构自然频率为  $f_i$  时的振型。

每阶模态在整体响应某方向的参与程度用参与因子表示，参与因子可由式(7)计算得到。

$$\gamma_i = \{\varphi\}_i^T [M] \{D\} \quad (7)$$

其中 $\{D\}$ 为单位位移频谱。

各阶模态的响应通过式(8)计算得到。

$$\{u_i\} = A_i \{\varphi\}_i \quad (8)$$

式中  $A_i$  为模态系数。

一般情况下，各阶模态的响应 $\{u_i\}$ 不能同时达到最大，且彼此之间不完全同相位，要得到结构在随机振动条件下整体响应，需进行模态叠加。

在输入随机振动 PSD 后，可通过式(9)得到系

统的响应。

$$S_{out}(\omega) = \left(\frac{a_{out}}{a_{in}}\right)^2 S_{in}(\omega) \quad (9)$$

其中  $S_{out}(\omega)$  为谱密度响应;  $S_{in}(\omega)$  为谱密度输入;  $a_{in}$  为单自由度输入;  $a_{out}$  为单自由度输出;  $\left(\frac{a_{out}}{a_{in}}\right)^2$  为传递函数的幅值。

随机振动应力/应变响应不能用确定性的时间和空间坐标函数来描述,功率谱密度函数(式10)表示随机振动过程的均方值(总能量)在频率域内的分布情况,频域的求解方式可大幅度降低随机振动求解时间成本和资源成本。

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) \cdot e^{-i\pi f\tau} d\tau \quad (10)$$

其中  $R_{xx}(\tau)$  为自相关函数。

## 2 随机载荷谱

汽车行业常采用基于加速度的功率谱密度随机载荷谱进行耐久性试验验证车载零部件的耐久性性能,该频域功率谱密度随机载荷谱通过综合国内各类路况的时域载荷谱,通过近似等损伤处理得到,国标 GB 38031 - 2020《电动汽车用动力蓄电池安全要求》<sup>[1]</sup> 提供了功率谱密度函数(图2)。

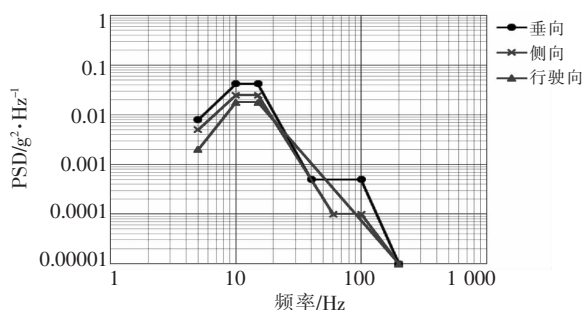


图2 功率谱密度随机载荷谱

## 3 损伤评估方法

在随机载荷作用下,燃料电池系统支架的应力幅和平均应力都是随机变化的,这样使随机疲劳计算变得很复杂。本文采用 Steinberg 提出的基于高斯分布和 Miner 线性累计损伤定律的三区间法<sup>[2]</sup> 评估燃料电池系统支架的随机振动疲劳性能。

三区间法应力区间如图3,即在整个振动历程中,结构的应力在  $1\sigma$  的区间占比为 68.3%,应力在

$1\sigma \sim 2\sigma$  的区间占比为 27.1%,应力在  $2\sigma \sim 3\sigma$  的区间占比为 4.33%。该方法假设大于  $3\sigma$  区间的应力仅仅发生在  $100\% - 99.73\% = 0.27\%$  的时间内,且它们不构成任何损伤。设计要求  $3\sigma$  应力的均方根值应小于材料的屈服强度<sup>[3]</sup>。

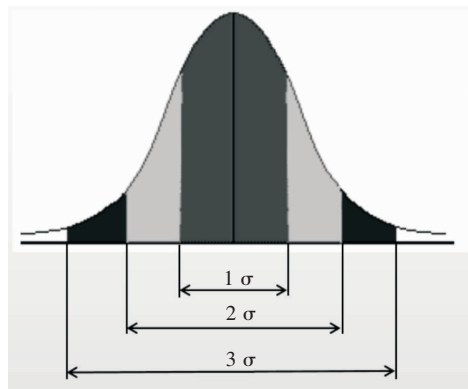


图3 三区间法应力区间

基于应力计算结果,结合材料的抗疲劳性能,利用 Miner 定律进行疲劳计算,总体损伤的计算公式为:

$$D = \frac{n_{1\sigma}}{N_{1\sigma}} + \frac{n_{2\sigma}}{N_{2\sigma}} + \frac{n_{3\sigma}}{N_{3\sigma}} \quad (11)$$

## 4 计算模型

燃料电池系统支架由方形钢管焊接成型,燃料电池底板和侧板采用铝合金,电堆采用质量点等效,并固定于底板,燃料电池系统底板通过螺栓连接固定在系统支架上。分析模型见图4。采用 10 节点 4 面体实体单元对整个分析模型进行离散。由于主要关注系统支架的强度和寿命,因此对系统支架的薄弱区域进行了网格细化。

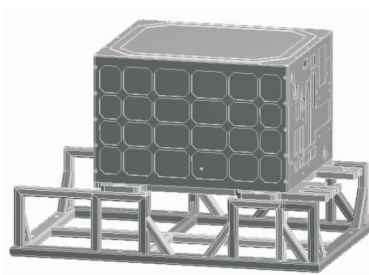


图4 分析模型

## 5 模态分析结果

模态分析可以得到结构的固有频率和对应振型,在此基础上,通过模态叠加法求解得到系统的

传递函数。通过模态求解,整个系统由支架主导的频率及振动方向见表1和图5~8,可以发现系统支架在行驶方向最薄弱,其频率为43.4 Hz。

表1 支架主导模态及频率

阶次	振动方向	频率/Hz
1阶	行驶向	43.4
2阶	侧向	74.2
3阶	垂向	98.2
4阶	扭转	205.6

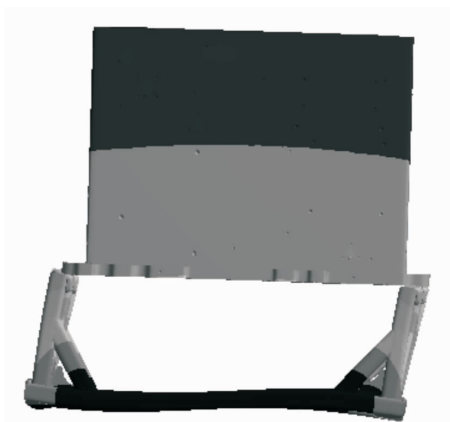


图5 1阶振型(行驶向)

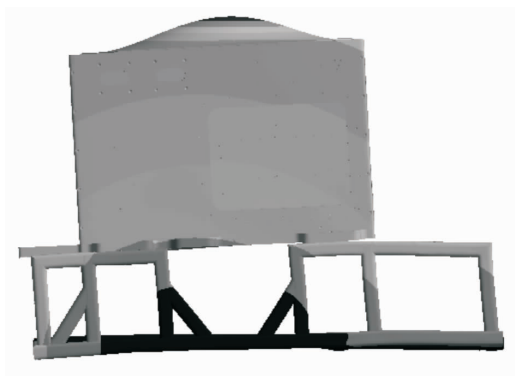


图6 2阶振型(侧向)

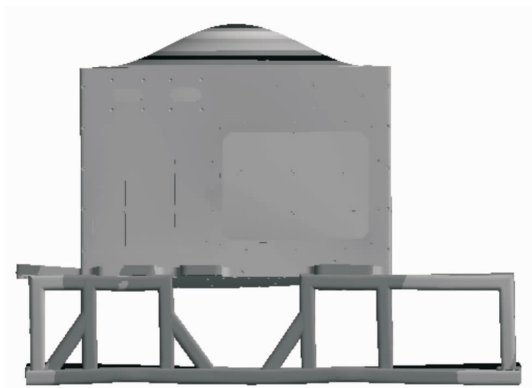


图7 3阶振型(垂向)

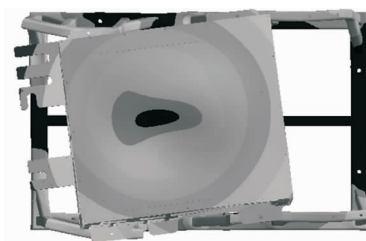


图8 4阶振型(扭转)

## 6 随机响应结果

通过对系统支架与车连接螺栓处施加 GB 38031-2020《电动汽车用动力蓄电池安全要求》提供的频域功率谱密度随机载荷谱,进行随机振动响应求解,监测燃料电池顶板角上一节点的位移响应,得到其在行驶向、侧向和垂向的位移响应分别见图9~11,可以得到以下结论:

(1) 燃料电池系统各方响应峰值频率系统支架的频率相关;

(2) 燃料电池系统在行驶向的响应大于其他方向。

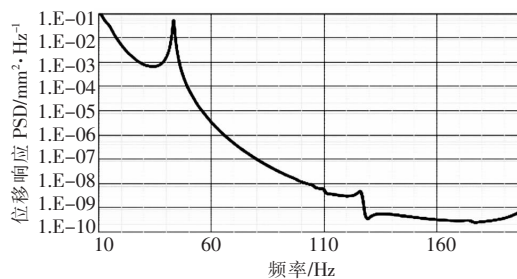


图9 行驶向随机振动响应

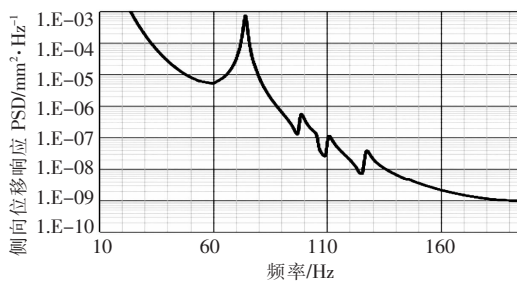


图10 侧向随机振动响应

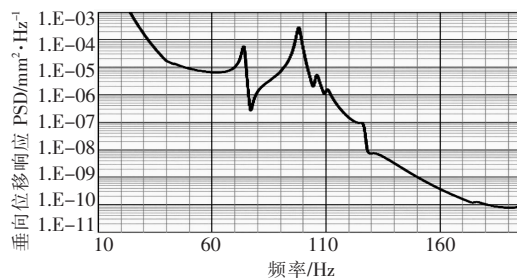


图11 垂向随机振动响应

提取随机振动响应求解得到的系统支架在各方向上的应力均方根值(表2),可以看出系统支架在行驶向的应力响应均方根值  $3\sigma$  大于其他方向,和位移响应趋势一致。通过三个方向的应力响应均方根值  $3\sigma$  云图,可以看出,在系统支架行驶方向薄弱位置为中间梁与立架连接位置,在侧向和垂向的薄弱位置均为左侧立架中间立柱与底梁焊接位置。系统支架在三个方向的应力响应均方根值  $3\sigma$  均小于 Q235 材料的屈服强度,系统支架能够通过耐久性随机振动试验。

表2 系统支架随机振动应力响应均方根值  $3\sigma$

振动方向	$3\sigma/\text{MPa}$	$\sigma_{0.2}$
行驶向	183.3	235
侧向	57.1	235
垂向	69.3	235

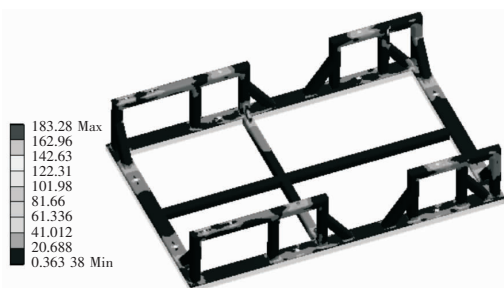


图12 行驶向随机振动应力响应均方根值  $3\sigma$

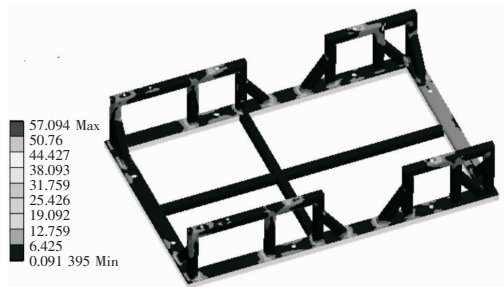


图13 侧向随机振动应力响应均方根值  $3\sigma$

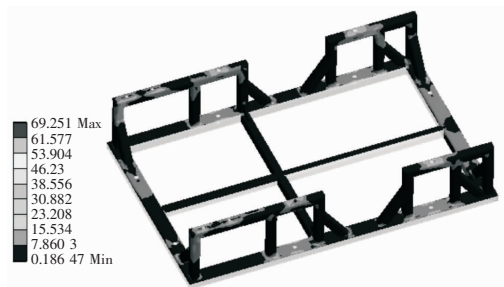


图14 垂向随机振动应力响应均方根值  $3\sigma$

## 7 材料疲劳参数

系统支架材料为 Q235,其在室温条件下存活率

为 50% 和 99% 时,应力寿命曲线分别见图 15,本文按存活率为 99% 的 S - N 应力寿命曲线(式 12)进行寿命损伤评估。

$$\lg(N) = -8.8115 \lg(S) + 26.1602 \quad (12)$$

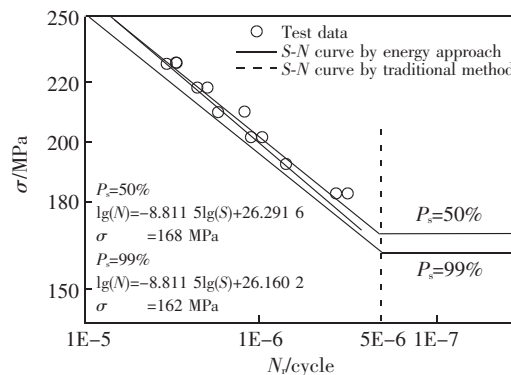


图15 Q235 材料 S-N 曲线<sup>[4]</sup>

## 8 损伤评估

燃料电池系统支架在车载条件下的振动时间(期望寿命)假设为  $T = 4 \times 10^6$  次,振动的平均频率为  $V_0^+ = 5$  Hz,则可以得到三区间寿命期望。

$$n_{1\sigma} = 0.683 \times T \times V_0^+ = 1.366 \times 10^7$$

$$n_{2\sigma} = 0.271 \times T \times V_0^+ = 5.42 \times 10^6$$

$$n_{3\sigma} = 0.0433 \times T \times V_0^+ = 8.66 \times 10^5$$

由随机振动响应计算结果得到的三个方向应力响应均方根值,通过式(12)分别计算得到三个方向随机振动对应的寿命(当寿命大于  $10^7$  及等同于无限寿命),从而可通过式(11)可以得到系统支架的损伤,详细数据见表3。可以看出系统支架在行驶向相对薄弱,但损伤为 0.52 小于 0.75,满足燃料电池车载运营耐久性寿命要求,且仍有一定的余量。

表3 三个方向耐久性损伤计算

方向	$1\sigma$	$N_{1\sigma}$	$2\sigma$	$N_{2\sigma}$	$3\sigma$	$N_{3\sigma}$	损伤
行驶向	61.1	$+\infty$	122.2	$+\infty$	183.3	$1.65 \times 10^5$	0.52
侧向	19.1	$+\infty$	38.1	$+\infty$	57.1	$+\infty$	0
垂向	23.1	$+\infty$	46.2	$+\infty$	69.3	$+\infty$	0

## 9 结语

为节约燃料电池系统支架的设计时间和成本,同时需保证系统支架的耐久性和可靠性,本文基于国标 GB 38031 - 2020《电动汽车用动力蓄电池安全

(下转第 11 页)



# 能源装备的网络安全要素分析

袁晓舒<sup>1\*</sup> 吴桐<sup>2</sup> 刘杨<sup>3</sup> 管晓宏<sup>3</sup>

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 国家能源局信息中心, 北京 100824; 3. 西安交通大学, 西安 710049

**摘要:**网络空间安全对抗的加剧逐渐将网络安全攻击从信息域延伸到物理域,网络攻击从危害能源领域的信息系统延伸到控制系统并最终延伸到能源装备。信息系统和控制系统的网络安全要素是比较清晰的,而能源装备的网络安全研究还相对缺乏。本文以保障能源装备可用性为目标分析了能源装备网络安全要素,讨论能源装备安全与信息系统安全、控制系统安全之间的差异和关系。

**关键词:**能源装备;信息物理融合系统;机密性;完整性;可用性;网络安全

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)04-0006-06

## Analysis of Network Security Elements of Energy Equipment

YUAN Xiaoshu<sup>1\*</sup>, WU Tong<sup>2</sup>, LIU Yang<sup>3</sup>, GUAN Xiaohong<sup>3</sup>

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

2. National Energy Administration Information Center, 100824, Beijing, China;

3. Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an, China)

**Abstract:** The intensification of cyberspace security confrontation gradually extends network security attacks from information domain to physical domain, network attacks from information systems to control systems and finally to energy equipment. The security elements of information system and control system are relatively clear, while the network security research of energy equipment is still relatively lacking. This paper analyzes the network security elements of energy equipment with the goal of ensuring the availability of energy equipment, and discusses the differences and relationships between energy equipment security and information system security and control system security.

**Key words:** energy equipment; cyber-physical systems; confidentiality; integrity; availability; network security

随着网络空间对抗的加剧,能源关键基础设施面临的网络安全威胁正在加剧,这种威胁不仅表现在个人和组织采取勒索病毒等网络安全攻击手段对能源关键基础设施发动网络安全攻击并索要赎金;还表现在国家级攻击力量采取各种高级网络安全攻击手段对能源关键设施发动网络安全攻击,这种攻击不仅会通过网络安全攻击能源关键基础设施的信息系统和控制系统以短期切断小范围能源供应,还会通过网络安全攻击破坏甚至摧毁能源关

键基础设施中的能源装备实现长时间大范围切断能源供应,对国家能源安全和国家安全造成严重危害。

信息系统的信息安全经过多年的研究,体系结构和要素已经基本清晰,相关的技术标准、防护体系、产品相对成熟;控制系统网络安全自“震网”事件后引发较多的关注,随着 IEC 62443<sup>[1]</sup>、信息安全技术网络安全等级保护 2.0<sup>[2]</sup>等技术标准的推出,控制系统网络安全采取“纵深防御”模型初步建立

收稿日期:2021-08-23

基金项目:四川省科技厅重点研发项目: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:袁晓舒(1973-),男,成都市高新西区西芯大道18号东方电气集团科学技术研究院有限公司,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。

了防护体系。针对能源装备的网络安全攻击应该如何应对还缺乏深入的研究。

信息安全的双方是对抗的双方,由于在信息安全的对抗过程中,双方的资源投入始终处于一个动态的不平衡状态,信息安全的防护难以在一个确定的投入下得到保障,需要不断的追加投入以应对新的攻击。工业控制系统信息安全也存在相同的问题,能源装备作为一个物理设备,多数时候运行在高温、高压、强电磁场的环境中,必须处在安全的状态才能保证人员、财产和能源供应的安全。在当前网络安全攻击可以从信息域达到物理域的情况下,必须保证能源装备网络安全,本文试图探讨遭受网络安全攻击时确保能源装备安全这一目标下,信息安全、控制系统网络安全、能源装备网络安全的要素之间的关系。

## 1 网络安全攻击对能源装备的威胁

### 1.1 能源行业网络安全事件

2015年12月23日下午,乌克兰首都基辅部分地区和乌克兰西部的140万名居民突然发现家中停电。黑客攻击了约60座变电站。黑客首先操作恶意软件将电力公司的主控电脑与变电站断连,随后又在系统中植入病毒,让电脑全部瘫痪。与此同时,黑客还对电力公司的电话通讯进行了干扰,导致受到停电影响的居民无法和电力公司进行联系<sup>[3-5]</sup>。

2017年7月,美国塔尔萨大学 Stagg 博士团队公布了3个针对风电场的攻击。Windshark 向联网的涡轮机发送命令,禁用或者反复制动急停,以造成磨损和破坏。Windworm 利用 Telnet 和 FTP 在可编程自动化控制器间扩散,感染整个风电场的计算机。Windpoison 利用 ARP 缓存病毒,发现和定位控制系统的网络组件漏洞,并伪造涡轮机发回的信号,隐瞒机组遭攻击破坏的事实。研究团队在美国中部多个风电场撬开风力发电设备的服务器机柜,将通信设备接入风电控制系统,实现远程关停电力发电机<sup>[6]</sup>。

2019年3月7日-3月9日,连续三天,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,全国大部分州都受到了影响。关于3月7日停

电事故原因存在两种不同观点:一是以委内瑞拉官方为代表的观点,认为本次事故是由于委内瑞拉古里水电站受到反对派和网络攻击导致机组停机所致。二是以临时总统胡安·瓜伊多为代表的观点,认为本次事故是由于古里水电站送出线路廊道发生火灾引起送出三回765千伏线路跳闸,导致国家中心变电站失压。而政府多年来管理不善,在过去十年中,原规划新建的十几个火电厂均未投产,造成委内瑞拉电力供应紧张,没有足够的备用容量应对古里水电站的停运<sup>[7-8]</sup>。

值得关注的是,委内瑞拉765千伏的线路是国家输电主干线,负责该国85%的电力传输。由于三回765千伏跳闸,国家中心失去电源,该站全站失电导致送入国家负荷中心的主干线也全部失电<sup>[9]</sup>。

2021年5月7日,美国最大的成品油管道运营商 Colonial Pipeline 遭受了黑客网络公司的攻击,运作被迫中断,美国东部沿海的燃油网络陷入瘫痪。5月9日,美国东部17个州和首都所在的华盛顿特区进入紧急状态,以应对勒索病毒的攻击。5月13日,美国成品油管道运营公司为此向黑客支付了500万美元的赎金<sup>[10-11]</sup>。

### 1.2 网络空间作战对能源装备的威胁

网络空间已经成为继陆、海、空、天之后的第五大主权领域空间,是国际战略在军事领域的演进,对网络信息时代国家安全提出了严峻的挑战。随着网络空间战略地位不断凸显,美国等国家积极推进网络空间军事化,组建专门的网络作战部队,发展先进网络武器,网络空间对抗呈现主体国家化、手段武器化、重点大数据化趋势。2017年11月,美国陆军网络司令部与美国海军网络司令部先后发表声明,41支陆军网络任务部队与40支海军网络任务部队都已通过美国网络司令部的完全作战能力验证。2017年2月22日,俄罗斯国防部长绍伊古称,俄罗斯已成立专门从事信息战的部队,网络空间力量发挥的作用已经大于或者相当于传统力量。德国国防军(Bundeswehr)于2017年正式组建网络与信息太空司令部,日本于2014年就组建了第一支由90名军事人员组成的网络防御单位,2017年通过了将其网络防御单位规模大幅增加至1000人的计划。

2018年6月8日,美军颁布了新的非保密版《网络空间作战》联合条令<sup>[12]</sup>。该条令分为四个章节:网络空间和网络空间作战概述,网络空间作战的核心活动,授权、作用和职责,计划、协调、实施和评估。条令中阐述了网络空间有三大任务:1)进攻性网络空间作战,2)网络空间防御作战,和3)国防部信息网络运维。其中,进攻性网络空间作战是指:在外国网络空间内通过它采取投送力量的行动,为作战指挥官或国家目标提供支持而遂行的网络空间作战任务。进攻性网络空间作战任务可能包括采取升级到使用武力的程度,以实体毁坏或摧毁地方系统。在该作战条令中,美军还对网络空间攻击进行了阐述:网络空间攻击行动可以在网络空间创造明显的拒止效果(比如削弱、扰乱或破坏),或者在物理域内产生拒止效果的操纵。网络空间攻击包括以下行动:①拒止。包含对目标的削弱、中断和摧毁;②操纵,使用欺骗、诱骗、调节、哄骗、伪造和其他方法,达成控制或改变网络空间中信息、信息系统和/或网络,从而产生物理拒止效果。

由此可见,网络空间作战呈现出从信息域发动向物理域攻击,多域融合、跨域协同的攻击特点,能源装备是关键基础设施中最底层的物理支撑,能源装备正面临前所未有的网络安全威胁。

## 2 能源装备网络安全分析

### 2.1 信息系统信息安全、控制系统信息安全和能源装备安全

信息系统的信息安全是指信息网络的硬件、软件及其系统中的数据受到保护,不受偶然的或者恶意的原因而遭到破坏、更改、泄露,信息系统能够连续正常可靠的运行,信息服务不中断。信息安全的基本要素:机密性、完整性、可用性、可控性和不可否认性。根据ISO/IEC 13335-1 2004标准,信息系统信息安全的保密性(Confidentiality)是指:信息不能被未授权的个人、实体或者过程利用或知悉的特性;完整性(Integrity)是指:保护资产的准确和完整的特性;可用性(Availability)是指根据授权实体的要求可访问和利用的特性<sup>[13]</sup>。

工业控制系统的信息安全是指:保护系统免于非授权访问和非授权或意外的变更、破坏或者损失

的系统资源,防止对工业自动化和控制系统的非法或有害的入侵,或者干扰其正确和计划的操作;同时保证授权人员和系统的正常访问不受影响。根据ISA99/IEC 62443-1-1标准,工业控制系统信息安全中的机密性(Confidentiality)是:保证信息不被泄露给未授权的个人、过程或者设备;完整性(Integrity)是:系统质量反映了操作系统的逻辑正确性和可靠性,实现保护机械装置的软件和硬件的逻辑完备性、数据结构和存储数据表现的一致性;可用性(Availability)是:假定提供了其所需的外部资源,在给定的时刻或者给定的时间内,在给定的条件下执行必要功能时的能力<sup>[14]</sup>。

能源装备网络安全目前还缺乏明确的定义,参照相关标准和定义,相对信息安全三要素,能源装备的机密性(Confidentiality)是:装备的信息不被泄露给未授权的个人、实体;完整性(Integrity)是:在装备的全生命周期内的每个环节始终符合设计要求;可用性(Availability):装备能够使用,不管它是否实际在使用,也不管它是否能够提供功率<sup>[15]</sup>。

### 2.2 信息系统信息安全和工业控制系统信息安全关系

信息系统的信息安全和工业控制系统信息安全对信息安全三要素的重视优先级不同(图1)。



图1 信息系统与工业控制系统的信息安全三要素优先级对比

信息安全在其不同的发展阶段有不同的重点。在早期,信息安全重点在通信过程的保密,主要通过密码技术解决通信保密问题,保证数据的机密性和完整性;在上世纪70年代进入计算机安全阶段,重点在于确保计算机中软硬件以及处理、存储、传输信息的保密性,是以保密性为优先;随着计算机网络的广泛,信息系统开始重视完整性、可用性等安全特性。

控制系统网络安全的重点和优先级有所不同,在IEC 62443中的描述是:在工业自动化和控制系统的的环境下,这些目标的优先级往往是不同的。这些系统的信息安全最关注维持系统所有部件的可



用性。工业自动化和控制系统的信息安全直接影响了工业机器是否可控、是否被监视。完整性经常被置于第二重要的位置,而通常保密性的重要性更差一些,因为数据经常是未经过加工的,需要在上下文中经过分析才具有一定价值<sup>[16-17]</sup>。

根据环境的改变,系统的完整性也可具有最高优先级。某些运行要求各个部件或系统具有不同的优先级目标(即完整性或可用性可优先于保密性,或反之),从而使得组织采取不同的应对措施达到这些安全目标。

### 3 能源装备的网络安全基本要素分析

#### 3.1 能源装备网络安全威胁分析

随着计算技术、通信技术和控制技术在传统能源系统中的应用,能源系统发生了深刻变革,能源系统的信息系统和物理系统深度融合使得能源系统体现出信息物理融合系统(cyber-physical systems, CPS)的特征<sup>[18-20]</sup>。传统的能源物理系统被设计为在高度隔离和受控的区域内运行,创建专门的控制机制和通信协议实现与外部系统隔离。但能源系统正在变得更智能、和更高效,与各种信息技术不断融合<sup>[21]</sup>。这使得能源系统从最初相对封闭的简单控制系统变得越来越开放,被攻击的风险也越来越高。此外大多能源物理系统在设计的早期阶段设计了状态检测和故障诊断等机制,还针对特殊的情况准备了应急预案,但是这些措施都是针对由于外部不可抗力因素导致系统发生的工程故障,如果攻击者了解这些运行机制和应急预案并制定相应的攻击策略,同时对多个目标进行攻击,就能够突破网络边界,攻入系统内部网络,对能源装备安全构成重大威胁<sup>[22]</sup>。能源 CPS 中信息系统和物理系统高度耦合,能源系统不能简单考虑物理系统的工程安全和信息系统的网络安全,而应考虑两者相互影响引发的新型综合安全问题<sup>[23]</sup>。近年来的攻击事件也显示,攻击者正在针对物理系统的业务流程和安全防护机制,设计出隐蔽性更好和破坏力更强的攻击策略,相关的攻击过程及策略值得研究人员更深入的探讨。

通过分析 1.1 节的能源行业安全案例可以看出,能源装备综合网络攻击具有特殊性,因为物理

系统的状态变化有一定限制,且物理系统都有安全应急机制和保护措施。因此攻击者往往通过中间人攻击、恶意固件植入等攻击手段,篡改传感器的量测数据、控制器的控制指令、控制器的控制逻辑和保护逻辑,结合物理系统的业务逻辑和保护机制,设计攻击策略,对特定对象展开的持续有效的攻击活动,从而引发设备故障等严重后果。综上所述,攻击者基于信息物理耦合思想设计攻击策略并通过完整性攻击手段实施攻击。

#### 3.2 能源装备网络安全要素关系

能源装备的网络安全三要素“机密性、完整性、可用性”的顺序一般认为和控制系统信息安全相同,也就是可用性、完整性、机密性,但进一步研究可以发现,能源装备的可用性是以完整性为前提,也就是能源装备不被破坏和损坏为前提。以发电机为例:一般来说如果发电机定子、转子或者线圈被破坏或损坏后不符合设计要求,也就是完整性被破坏;那么发电机就不能投入使用或者需要进行检修,因此,能源装备的完整性是可用性的前提;相比之下,能源装备的机密性如果受损,不会直接对能源装备造成危害。

为了进一步分析能源装备网络安全的三要素,本文构建了如图 2 所示的能源装备网络安全威胁模型。其中,能源装备系统主要由能源装备、控制器、执行器与传感器构成;控制器通过网络与更上层的监视/配置设备、其他控制系统以及控制系统实现通信连接。整个系统的物理防护较为严格,攻击者需要通过网络攻击才能对系统产生影响。

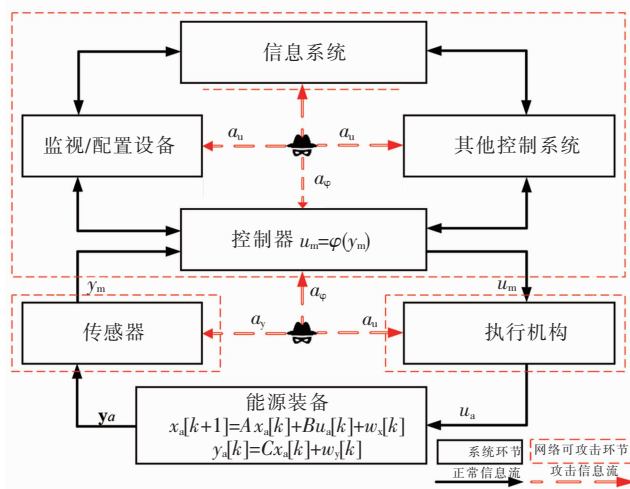


图 2 能源装备系统网络安全模型



能源装备的状态经过传感器采样将模拟信号转为数字量,通过控制器计算出控制量,并将控制信号发送给执行机构进行执行。当短时间内设备状态在一定范围内变化时,能源装备运行的物理过程可近似为离散时间的线性时不变系统,其模型可表述为:

$$\begin{aligned} x_a[k+1] &= Ax_a[k] + Bu_a[k] + w_x[k] \\ y_a[k] &= Cx_a[k] + w_y[k] \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x_a[k] \in \mathbb{R}^n$ 与 $y_a[k] \in \mathbb{R}^m$ 分别表示设备运行状态与传感器量测值; $u_a[k] \in \mathbb{R}^l$ 为控制信号; $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、 $B \in \mathbb{R}^{n \times l}$ 与 $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 分别为系统矩阵、控制矩阵与量测矩阵; $w_x \in \mathbb{R}^n$ 与 $w_y \in \mathbb{R}^m$ 分别表示过程噪声与量测噪声。假设 $w_x \in \mathbb{R}^n$ 与 $w_y \in \mathbb{R}^m$ 均服从零均值多元高斯分布,其协方差矩阵分别为 $Q$ 与 $R$ ,式中: $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 且 $R \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 。控制信号 $u_a[k]$ 与传感器量测值 $y_a[k]$ 由通信网络进行传输。

从能源装备的网络安全三要素的角度出发,攻击者实施的网络安全攻击可分为机密性攻击、可用性攻击和完整性攻击三大类。

(1)机密性攻击:攻击者通过网络侦查等手段,窃取控制器的控制策略和保护策略 $\varphi(\cdot)$ 和 $A, B, C$ 等能源装备的核心运行参数,以及 $y_m, u_m$ 等系统的运行状态。该攻击会导致系统的运行数据泄露,产生安全风险。但是不会直接影响系统的可用性和完整性。

(2)可用性攻击:攻击者通过攻击行为 $a_\varphi$ 干扰控制器的控制逻辑 $\varphi(\cdot)$ 触发系统保护逻辑或保护装置,导致启动系统停机保护( $u_m = 0$ );或者通过破坏指令和数据完整性间接破坏能源装备本体( $A, B$ 变化)导致控制策略失效,最终导致系统不可用,影响正常业务。

(3)完整性攻击:攻击者通过中间人攻击、恶意固件植入等攻击手段,篡改传感器的量测数据( $y_m: y_a \rightarrow a_y$ )、控制器的控制指令( $u_a: u_m \rightarrow a_u$ )、控制器的控制逻辑和保护逻辑( $\varphi(\cdot) \rightarrow a_{\varphi(\cdot)}$ )。借助完整性攻击,攻击者协同篡改多处数据以绕过数据校验机

制,实现攻击行为的隐蔽;利用伪造量测数据诱导控制器发送错误的控制指令,或直接伪造错误控制指令,使得装备运行状态异常,导致物理设备受损,间接影响系统的可用性。

结合以上分析,从能源装备的视角看,控制系统网络安全要素的优先顺序会发生变化。控制系统的可用性遭到破坏虽然会导致能源装备无法受控运行,但由于控制系统一般都有保护逻辑或保护装置的设计,能够保证能源装备在控制系统不可用时停止运行,能源装备的完整性不会被破坏,能源装备的可用性也没有被破坏。

相反,控制系统的完整性一旦被破坏,例如:控制逻辑、控制参数、保护逻辑、保护参数等各种控制系统完整性被破坏,能源装备就可能在运行过程中受损,其完整性受到损坏,从而造成能源装备可用性被破坏。因此,从能源装备网络安全视角出发,就会要求能源装备控制系统的网络安全要素优先级变为:完整性、可用性、机密性,如图3所示。



图3 能源装备与工业控制系统的信息安全三要素优先级对比

#### 4 结语

通过分析已有能源系统的安全案例,以及安全威胁和要素的关系,可以发现网络攻击难以直接破坏能源装备自身,攻击者需要通过控制系统的完整性攻击,实现对能源装备的攻击、造成运行故障或者物理损伤。本文从能源装备安全的角度,对网络安全要素重新进行梳理,提出完整性是能源装备安全的关键属性,建议在现有信息系统安全与控制系统安全的相关理论方法基础上,围绕完整性问题,开展针对性研究提升我国能源装备的安全防护能力。

参考文献:

[1] R. S. H Piggin. Development of industrial cyber security standards: IEC 62443 for SCADA and Industrial Control System security [ C ] IET conference on control and automation 2013: Uniting problems and solutions. IET, 2013: 1 - 6

[2] GA/T 1390.5 - 2017, 信息安全技术网络安全等级保护基本要求第5部分: 工业控制安全扩展要求 [ S ]

[3] Liang G, Weller S R, Zhao J, et al. The 2015 Ukraine Blackout: Implications for False Data Injection Attacks [ J ]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017

[4] Haes Alhelou H, Hamedani-Golshan M E, Njenda T C, et al. A survey on power system blackout and cascading events; Research motivations and challenges [ J ]. Energies, 2019, 12(4) : 682

[5] Sullivan J E, Kamensky D. How cyber-attacks in Ukraine show the vulnerability of the US power grid [ J ]. The Electricity Journal, 2017, 30(3) : 30 - 35

[6] Staggs J, Ferlemann D, Sheno S. Wind farm security: attack surface, targets, scenarios and mitigation [ J ]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2017, 17: 3 - 14

[7] 朱朝阳. 委内瑞拉大停电事故的背后 [ J ]. 国家电网, 2019(5) : 72 - 74

[8] Oxford Analytica. Massive Venezuela blackout will fuel anger and fear [ R ]. Emerald Expert Briefings ( oxan-es)

[9] Vaz R. Venezuela's power grid disabled by cyber attack [ R ]. Green Left Weekly, 2019 ( 1213 ) : 15

[10] FBI Deputy Director Paul M. Abbate's Remarks at Press Conference Regarding the Ransomware Attack on Colonial Pipeline [ EB/OL ]. <https://www.fbi.gov/news/pressrel/press-releases/fbi-deputy-director-paul-m-abbates-remarks-at-press-conference-regarding-the-ransomware-attack-on-colonial-pipeline>

[11] FBI Statement on Compromise of Colonial Pipeline Networks [ EB/OL ]. <https://www.fbi.gov/news/pressrel/press-releases/fbi-statement-on-compromise-of-colonial-pipeline-networks>

(上接第5页)

要求》提供的功率谱密度函数,通过 Workbench 随机振动分析,得到燃料电池系统支架的应力响应均方根值,发现了燃料电池系统支架的薄弱位置。并对系统支架进行了损伤评估,评估表明该型号燃料电池系统支架能够通过随机振动耐久性试验,满足车载随机振动条件下耐久性寿命要求。本文提供了一种快速评估车载燃料电池零部件耐久性寿命的方法,为车载燃料电池零部件的耐久性设计和寿命评估提供了参考,可以有效缩短满足车载耐久性

[12] Cyberspace Operations [ EB/OL ]. [https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctr-ine/pubs/jp3\\_12.pdf](https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctr-ine/pubs/jp3_12.pdf)

[13] ISO/IEC 13335-1:2004, 信息技术—安全技术—信息和通信技术安全的管理-第1部分:信息和通信技术安全管理用概念和模型 [ S ]

[14] ISA99/IEC 62443-1-1, 工业通信网络—网络和系统—第1-1:术语、概念和模型 [ S ]

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 燃气轮机采购第9部分: 可靠性, 可用性, 可维护性和安全性: GB/T 14099.9-2006 [ S ]. 2006

[16] Drias Z, Serhrouchni A, Vogel O. Analysis of cyber security for industrial control systems [ C ] 2015 International Conference on Cyber Security of Smart Cities, Industrial Control System and Communications (SSIC). IEEE, 2015: 1 - 8

[17] Fan X, Fan K, Wang Y, et al. Overview of cyber-security of industrial control system [ C ] 2015 international conference on cyber security of smart cities, industrial control system and communications (SSIC). IEEE, 2015: 1 - 7

[18] National Institute of Standards and Technology (NIST) Cyber Physical Systems PWG. Framework for Cyber-Physical Systems. 2017

[19] Song K, Anderson K, Lee S H. An energy-cyber-physical system for personalized normative messaging interventions: Identification and classification of behavioral reference groups [ J ]. Applied Energy, 2020, 260: 114237

[20] 管晓宏, 赵千川, 贾庆山等. 信息物理融合能源系统. 北京: 科学出版社, 2016

[21] 中国电子技术标准化研究院, 中国信息物理系统发展论坛. 信息物理系统白皮书(2017) [ R ]. (2017-03)

[22] Tang Yi, Chen Qian, Li Mengya, et al. Overview on cyber-attacks against cyber physical power system [ J ]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17) : 59 - 69

[23] 刘焯, 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

要求的零部件设计开发时间。

参考文献:

[1] GB 38031 - 2020, 电动汽车用动力蓄电池安全要求 [ S ]. 2020

[2] 刘磊, 马爱军, 刘洪英等. 载人航天某装置随机振动响应分析与结构修改 [ J ]. 智能制造, 2016(4) : 35 - 38

[3] 王荔. 70 MPa 车载氢系统框架随机振动与疲劳寿命分析 [ J ]. 新能源汽车, 2020(1) : 43 - 46

[4] 樊俊铃, 郭杏林, 吴承伟等. 热像法和能量法快速评估 Q235 钢的疲劳性能 [ J ]. 材料工程, 2012(12) : 71 - 76

# 基于时间自动机的汽轮机控制保护系统建模

马海迎<sup>1</sup> 李奕彤<sup>1</sup> 袁晓舒<sup>2\*</sup> 桑梓<sup>2\*</sup> 何立栋<sup>1</sup>

1. 南京理工大学, 南京 210094; 2. 东方电气能源装备工控网络安全工程实验室, 成都 611731

**摘要:**近年来,汽轮机控制保护系统面临的安全威胁引起了学术界及工业界的广泛重视。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,学者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。本文在总结相应研究的基础上,提出一种基于时间自动机的形式化方法对汽轮机控制保护系统进行建模,同时借助 UPPAAL 软件,对建立的模型进行仿真及验证。研究表明,本文提出的模型可以较好地描述汽轮机控制保护系统的工作过程,为后续安全问题研究奠定基础。

**关键词:**汽轮机控制保护系统; 时间自动机; UPPAAL

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)04-0012-06

## Modeling of Steam Turbine Control and Protection System Based on Time Automata

MA Haiying<sup>1</sup>, LI Yitong<sup>1</sup>, YUAN Xiaoshu<sup>2\*</sup>, SANG Zi<sup>2\*</sup>, HE Lidong<sup>1</sup>

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

2. Academia Sinica of Dongfang Electric, 611731, Chengdu, China)

**Abstract:** In recent years, the safety threat of steam turbine control and protection system attracts extensive attention from academia and industry. Different from the previous attacks on communication protocols, the attacker gradually shifts the target to the controller itself. In order to deal with this new threat, scholars begin to study how to establish an effective model of the controller to describe and analyze the impact of this attack on the system operation, and then design timely and effective defense strategy. On the basis of summarizing the relevant research, this paper proposes a formal method based on time automata to model the turbine protection system. At the same time, UPPAAL software is used to simulate and verify the established model. The results show that the proposed model can describe the working process of steam turbine control and protection system well, and lay a foundation for subsequent safety research.

**Key words:** steam turbine control and protection system; time automata; UPPAAL

《电力发展“十四五”规划》指出我国在“十四五”期间需加快智能电网建设,提高电网与发电侧、

收稿日期: 2021-11-19

**基金项目:**国家自然科学基金项目: 欺骗攻击下网络化控制系统防御对策研究; 项目编号(61973163); 四川省科技厅项目: 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; 项目编号(ZKZF200001)。

**作者简介:** 马海迎(1998-), 男, 2020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理论研究。

李奕彤(1999-), 女, 2021年毕业于中国地质大学(北京), 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理论研究。

袁晓舒(1973-), 男, 2013年毕业于电子科技大学软件工程专业, 工学硕士。现为东方电气能源装备工控网络安全工程实验室高级工程师, 主要从事网络安全研究工作。邮箱: yuanxs@dongfang.com

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, 工学博士。现为东方电气能源装备工控网络安全工程实验室高级工程师, 主要从事网络安全研究工作。邮箱: sangzi@dongfang.com

需求侧交互响应能力,以适应分布式能源发展及多元化用户需求<sup>[1]</sup>。然而随着电力系统智能化的同时,其安全隐患也不断增加。智能电网的出现使得电力系统和互联网息息相关,处于网络之中的电力系统极有可能遭到恶意网络攻击。

汽轮机是火力发电厂中最重要的主设备之一,如果汽轮机遭受到网络攻击并因此受到损坏,则整个机组将会陷入瘫痪,无法正常工作。也就是说汽轮机的安全稳定运行会极大影响整个火力发电机组的安全稳定运行,而汽轮机控制保护系统又是保证汽轮机正常运行的关键,安全可靠的汽轮机控制保护系统一方面能保证汽轮机的正常运行,另一方面能使汽轮机在发生危险工况的情况下完好无损地停下来<sup>[2]</sup>。

汽轮机控制保护系统是汽轮机及其机组安全运行的保障,目前可基于机理知识、运行数据以及专家经验的混合建模方法精确地刻画汽轮机控制模型<sup>[3]</sup>,在此基础上利用模块化思想可以更好地刻画汽轮机局部控制系统<sup>[4-5]</sup>,还可以使用 MATLAB 工具对所建立的控制模型进行仿真<sup>[6]</sup>。从以往文献可知汽轮机控制系统建模已相对完善,但汽轮机控制系统加保护系统建模鲜有研究。汽轮机保护系统核心在于控制保护逻辑<sup>[7]</sup>。不难看出,如何准确便捷地描述控制保护逻辑是汽轮机控制保护建模的核心。机理及经验混合建模方法侧重系统的物理属性,对逻辑属性的建模有所忽视;而形式化方法采用语义符号,逻辑性较强,很好地弥补了这个缺陷。

本文在以往汽轮机控制系统建模的基础上提出了一种汽轮机控制系统与保护系统相结合的新模型,所采用的形式化方法具有严谨、准确等优点,其所涉及的语言、语义符号更适用于描述与验证控制逻辑。

需要指出的是,本文所建立的汽轮机控制保护系统模型更侧重于控制保护逻辑的刻画而非系统的物理性质。形式化模型用符号与符号之间的联系来表达系统状态之间的关系,可以精确地揭示各种控制保护逻辑的规律,并制定相应的控制保护逻辑规则,使汽轮机控制保护系统模型体系更加严密。此外,形式化建模所需的对象、参数、工作状态

等较为容易获得,这也减少了模型建立的难度,使得汽轮机模型进一步简化。同时,形式化模型也更具准确性与安全性。

## 1 时间自动机与 UPPAAL 工具

### 1.1 时间自动机理论

关于形式化方法基本思想的介绍可参照我们前期的工作<sup>[8]</sup>。时间自动机理论最早由 Alur 和 Dill 于 1994 年提出,是在原有自动机理论的基础上加时钟变量构成的。时钟变量的加入使得系统模型具备表达时间的能力,这有效解决了实时系统的时间表述问题。在复杂的实时系统中,一般先用时间自动机对各个子系统进行建模,然后再通过时间自动机积对子时间自动机进行整合。本文所研究的汽轮机控制保护系统是一个典型的实时系统,因此选择时间自动机进行分析、建模与验证是较为合适的选择。此外,时间自动机可以采用图解形式描述控制模型,更易理解与使用。

下面简单介绍时间自动机的定义:

时间自动机 TA 是一组数组,  $TA = (N, L_0, E, I)$ <sup>[9]</sup>, 其中:

(1)  $N$  表示有限位置的集合,汽轮机控制保护系统的每一个工作状态都可对应于一个有限位置;

(2)  $L_0 \in N$  是初始位置的集合,描述了初始工作状态;

(3)  $E \subseteq N \times B(C) \times \Sigma \times 2^C \times N$  是边的集合,边指代汽轮机工作状态的变化过程;

(4)  $I: N \rightarrow B(C)$  是指汽轮机状态不变性到位置的映射,主要为了防止出现死锁现象出现。

### 1.2 UPPAAL 工具

UPPAAL 由丹麦 Uppsala 大学和瑞典 Aalborg 大学基于时间自动机理论研制开发,适用于实时系统的设计与验证,可以避免状态空间的爆炸问题<sup>[10]</sup>。关于汽轮机控制保护系统的研究中,UPPAAL 工具被用于系统模型的设计与验证。

UPPAAL 大体分为三个模块:编辑器、模拟器与验证器。

编辑器主要用于建立、编辑系统时间自动机模型。

模拟器用于模拟、验证所建立的系统模型,主



要对模型动态执行过程进行检查,减少模型设计本身的错误。

验证器具有检测模型功能的作用,可以验证系统模型的安全性与活性<sup>[11]</sup>。在此模块输入需要核实的某一性质,若系统模型具备此性质,则会显示绿色标志,否则显示红色标识。

## 2 汽轮机及其控制保护系统

汽轮机控制保护系统主要由三个部分组成:数字电液控制系统(DEH)、危急遮断跳闸系统(ETS)和安全监视系统(TSI)。其中汽轮机控制功能主要通过 DEH 实现,汽轮机保护功能主要通过 ETS 实现,TSI 监视汽轮机的关键运行参数。简单说来,汽轮机的控制保护装置主要分为三部分:测量元件、处理器与执行机构<sup>[12]</sup>。图 1 是汽轮机控制保护系统基本组成示意图。

汽轮机控制保护系统主要具备以下 7 种基本保护功能:加速度保护功能、功率-负荷不平衡功能、超速保护功能、凝汽器真空低压保护功能、主汽低压保护功能、主汽低温保护以及发电机断水保护等<sup>[11]</sup>。

本文根据以上 7 种基本保护功能对汽轮机控制保护系统进行形式化建模与验证。

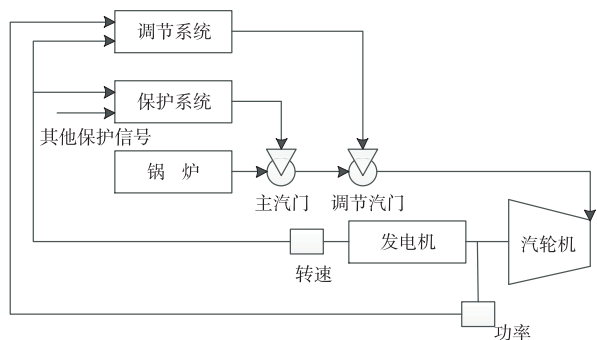


图 1 汽轮机控制保护系统基本组成示意图

## 3 汽轮机控制保护系统模型

根据汽轮机控制保护的基本原理,本节围绕汽轮机以及主汽阀、调节阀、遮断阀和传感器等基本部件的工作过程,从简化的角度,从实际工程的保护监测对象中选取了转速、温度、压力和轴向位移作为建模对象,并且利用 UPPAL 对整个系统的工作过程进行仿真(见表 1)。

表 1 参数变量表

名称	功能
start1	主汽阀启动信号 打开主汽阀门
stop1	主汽阀关闭信号 关闭主汽阀门
start2	调节阀启动信号 打开调节阀
stop2	调节阀关闭信号 关闭调节阀
close1	主汽阀关闭同步信号 将主汽阀关闭信号同步给汽轮机
open1	主汽阀启动同步信号 将主汽阀开启信号同步给汽轮机
close2	调节阀关闭同步信号 将调节阀关闭信号同步给汽轮机
open2	调节阀启动同步信号 将调节阀开启信号同步给汽轮机
urget	遮断信号 使遮断器工作
urget_close	遮断同步信号 将遮断器工作信号同步给汽轮机
k1	主汽阀开启标志 表示主汽阀打开
k2	调节阀开启标志 表示调节阀打开
rpm	转速 表示汽轮机转速
T	温度 表示汽轮机温度
P	压力 表示汽轮机气体压力
V	位移 表示汽轮机轴向位移

### 3.1 汽轮机

将汽轮机的工作过程抽象为三部分:停止—中间态—启动三个状态,如图 2 所示。

停止(Stop):当汽轮机的主汽阀处于关断状态时,由于整个系统没有气体进入,汽轮机处于停止工作的状态。

中间态(Trasition):当主汽阀打开时,汽轮机整体有气体流入。但没有调节阀调节,汽轮机并不能按照正常设定的转速转动,因此将其设为中间状态。

启动(Start):随着调节阀的开启,整个汽轮机的转速可以根据设定值,在调节控制器的作用下慢慢到达预定转速,开始工作。

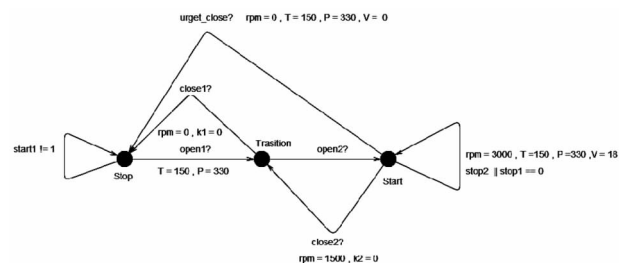


图 2 汽轮机模型

### 3.2 主汽阀、调节阀和遮断阀

主汽阀:主汽阀控制是否有气体进入整个汽轮机,进入的气体是整个汽轮机正常工作的主要动力,因此主汽阀的开、关状态直接关系到汽轮机的启停。由于主汽阀本身的工作特性将主汽阀主要

设置为开 (open1) 和 (close1) 两个不同的状态。当主汽阀的状态转换时,发送不同的信号(开、关)控制汽轮机的状态转换(见图3)。

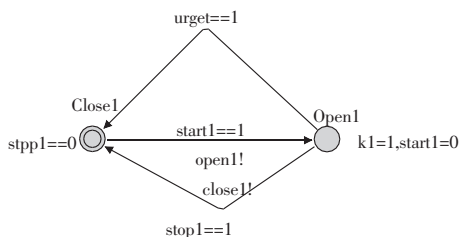


图3 主汽阀模型

调节阀:调节阀主要控制汽轮机的转速变换。考虑到本文的主要研究内容,同时精简系统模型的目的,我们不再将调节阀不同开度抽象成不同的状态,而仅将其简化为启动 (open2) 和关闭 (close2) 两个状态。同样的,当调节阀的状态发生转换时,也将发送不同的信号(开、关)控制汽轮机的状态转换(见图4)。

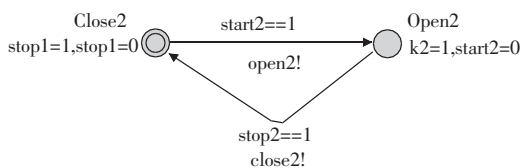


图4 调节阀模型

遮断阀:遮断阀主要在汽轮机异常工作的情况下发挥控制作用。遮断阀工作时,紧急切断主汽阀,使汽轮机紧急停止工作,方便进一步的维修检查。基于遮断阀的工作特性,将其抽象为开 (open3) 和关 (close3) 两种状态,当其状态转换时,发送遮断的信号 (urget\_close) 控制汽轮机的启停转换(见图5)。

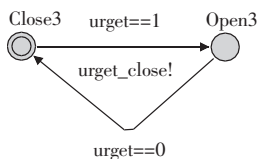


图5 遮断阀模型

### 3.3 传感器

传感器主要担任“监督者”的角色。当汽轮机正常工作时,大部分性能指标,如转速、温度、油压等需要保持在正常的区间内,任何一个指标出现异常时,传感器都将快速检测到异常并将发生异常信号给危急遮断阀,紧急停止汽轮机。

汽轮机的保护系统主要以各类传感器为核心去控制汽轮机的工作状态转换。我们将常见的超速保护、低压保护、低温保护及轴向位移等保护系统分别抽象成四个传感器,如图6~9所示,分别为速度传感器 (Sensor\_rpm)、温度传感器 (Sensor\_tem)、位移传感器 (Sensor\_vib) 和气压传感器 (Sensor\_pre)。传感器的状态主要有两个,即正常和异常状态。当四个指标 (rpm、P、T、V) 发生异常时,传感器状态转换,同时发送遮断信号 (urget\_close),控制遮断器的状态转换,进而控制汽轮机的工作状态进行转换,紧急停止汽轮机。

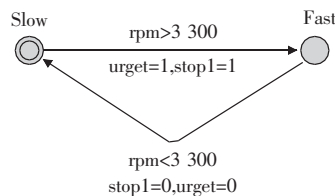


图6 转速传感器模型

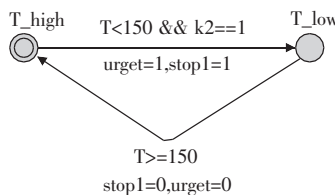


图7 温度传感器模型

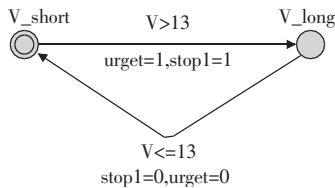


图8 位移传感器模型

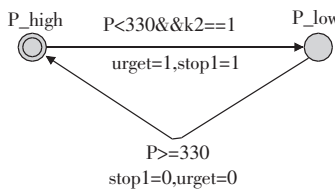


图9 压力传感器模型

## 4 UPPAAL 仿真与验证

本节将对上述建立的自动机模型进行仿真。主要内容包括:对汽轮机的正常启停过程进行仿

真,对指标异常即保护系统的工作过程进行仿真。同时使用 UPPAAL 的验证工具进行双重的验证操作。在仿真过程中,当设备处于某一状态时,该状态会点亮变红。

#### 4.1 汽轮机的正常启停

如图 10~11 所示,给汽轮机主汽阀发送启动信号(start1 置为 1),打开主汽阀。可以看到主汽阀由关断(Close1)状态转换到打开状态(Open1),同时发送同步信号(open1),告知汽轮机主汽阀已经打开。汽轮机接收到主汽阀打开的同步信号后,从停止状态(Stop)转换到中间态(Trasition)。

```
(Stop, Close1, Close2, Slow, T_low, V_short, P_low, Close3)
open1: Valve1 → Auto
(Trasition, Open1, Close2, Slow, T_low, V_short, P_low, Close3)
open2: Valve2 → Auto
(Start, Open1, Open2, Slow, T_low, V_short, P_low, Close3)
close2: Valve2 → Auto
(Trasition, Open1, Close2, Slow, T_low, V_short, P_low, Close3)
close1: Valve1 → Auto
(Stop, Close1, Close2, Slow, T_low, V_short, P_low, Close3)
Auto
```

图 10 汽轮机正常启停状态转换表

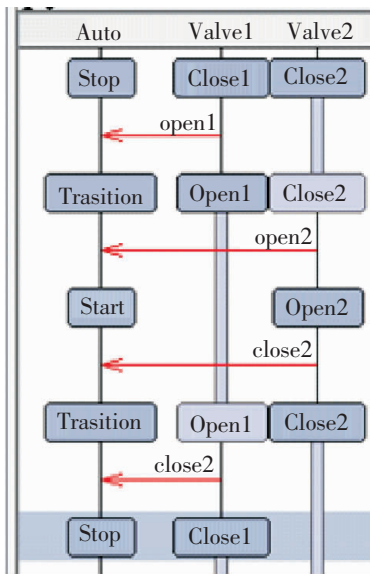


图 11 正常启停动态过程

在主汽阀打开之后,打开调节阀(start2 = 1),调节阀由关断状态(Close2)切换至开启状态(Open2),并发送同步信号(open2)告知汽轮机调节阀正常工作。汽轮机收到同步信号后,汽轮机将在转速调节控制器的作用下慢慢升速至额定转速( $rpm = 3\ 000$ ),由中间态转换至启动状态(Start),并

假设此刻正常工作时,其余参数均正常。

汽轮机的正常停止需要按照固定的顺序,即按照先调节阀再关闭主汽阀的顺序操作。当汽轮机需要紧急停止时,给调节阀发送关断信号(stop2 = 1),调节阀由开启转换为关断,同时发送调节阀关闭同步信号(close2)。汽轮机接收到该同步信号后将从启动状态切换回中间态。

接下来,给主汽阀发送关断信号(stop1 = 1),主汽阀由开启转换为关断,同时发送主汽阀关闭同步信号(close1)。汽轮机接收到该同步信号后将从中间态切换回停止状态。

#### 4.2 保护系统工作

对于汽轮机的保护系统来说,汽轮机在正常工作过程中转速、气体温度、油压以及转动过程中轴向位移这四个量一直处于标准范围内。一旦超出标准的范围,汽轮机的保护系统就会发挥保护作用,危急遮断阀工作,将汽轮机紧急停下。

根据 4.1 节对汽轮机正常工作状态进行仿真,可以得到汽轮机正常工作时四个参数的假设值( $rpm = 3\ 000, T = 150, V = 13, P = 330$ ),当四个参数中的任意一个数值发生变化时,对应的传感器都将发送遮断信号(urget = 1),使遮断器工作,关闭主汽阀及汽轮机。

由于不同参数变化引发的结果基本相同,接下来以最常见超速保护为例进行简单说明,具体见图 12~14。当汽轮机的转速超过 3 300 时,转速传感器从平稳运行状态(Slow)切换至超速状态(Fast),并发送停止主汽阀(stop1 = 1),打开遮断阀(urget = 1)的指令。随后,主汽阀由开启转为关断,遮断阀由关闭(Close3)转为开启(Open3),并发送同步遮断信号(urget\_close)。汽轮机接收到遮断信号,由启动紧急停止。

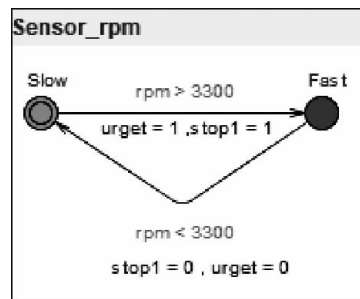


图 12 转速传感器检测到超速

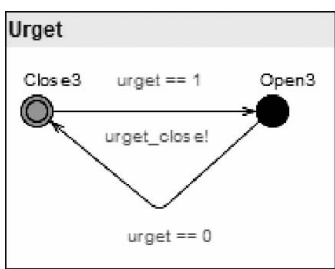


图 13 遮断器工作

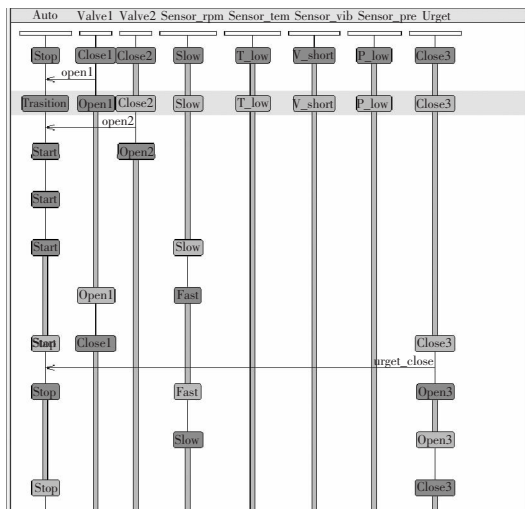


图 14 超速保护动态过程

### 4.3 验证

接下来再通过 UPPAAL 自带的验证工具对上述仿真进行验证。对汽轮机的正常启动过程进行验证,即验证是否存在主汽阀(Valve1)、调节阀(Valve1)以及汽轮机(Auto)同时为开启状态(图 15)。

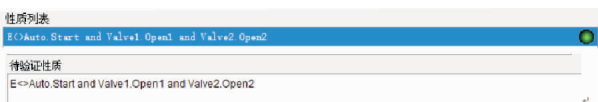


图 15 汽轮机的正常启动

对汽轮机的正常停止过程进行验证,即验证是否存在主汽阀(Valve1)、调节阀(Valve1)以及汽轮机(Auto)同时为关闭状态(图 16)。



图 16 汽轮机的正常停止

对于超速保护逻辑,验证是否存在转速传感器超速(Sensor\_rpm.Fast)、遮断器工作(Urget.Open3)、主汽阀关断以及汽轮机停止状态(图 17)。

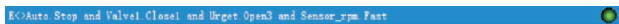


图 17 汽轮机的超速保护

对于低温保护逻辑,验证是否存在温度传感器检测低温(Sensor\_tem.T\_low)、遮断器工作(Urget.

Open3)、主汽阀关断以及汽轮机停止状态(图 18)。



图 18 低温保护

对于低压保护逻辑,验证是否存在气压传感器检测低压(Sensor\_pre.P\_low)、遮断器工作(Urget.Open3)、主汽阀关断以及汽轮机停止状态(图 19)。



图 19 低压保护

对于轴向位移保护逻辑,验证是否存在位移传感器检测位移过长(Sensor\_vib.V\_long)、遮断器工作(Urget.Open3)、主汽阀关断以及汽轮机停止状态(图 20)。



图 20 轴向位移过长保护

## 5 结语

汽轮机是火力发电厂中最重要的主设备之一,如果汽轮机遭受到网络攻击并因此受到损坏,则整个机组将会陷入瘫痪,不能正常工作。也就是说汽轮机的安全稳定运行会极大影响火力发电机组的安全稳定运行,而汽轮机控制保护系统是汽轮机及其机组安全运行的保障。但现有的模型本身结构复杂,对于汽轮机控制保护系统的研究来说,困难重重。针对以上问题,本文提出了一种结构简单、描述准确的形式化模型来刻画汽轮机的控制保护系统,并通过 UPPAAL 进行仿真验证。仿真结果表明,提出的形式化模型可以较好地描述整个汽轮机控制保护系统地工作过程,而且大大减小了模型的复杂性。

## 参考文献:

- [1] 国家能源局综合司. 电力发展“十四五”规划工作方案[R]. 2020.2
- [2] 黄振鸣, 李远锡. 汽轮机安全保护系统的改进[J]. 发电设备, 1995(24):15-18
- [3] 石杰, 白涛. 600 MW 汽轮机系统建模与控制技术研究[J]. 热力透平, 2016, 45(4):304-308
- [4] 周莹. 1 000 MW 机组汽轮机数字电液调节系统建模与仿真[D]. 华北电力大学, 2012
- [5] 龚烽. 超临界机组汽轮机系统的机理建模[D]. 华北电力大学, 2018

(下转第 22 页)



# 大型发电机定子线棒主绝缘 复合材料多工况老化特性研究

裴景克 李愿杰 胡波 张跃 梁智明 刘虹邑

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

**摘要:** 针对发电机定子线棒主绝缘复合材料的热/氧老化行为, 本文分别开展了纯热与热氧环境下的人工加速模拟老化实验及测试分析研究。研究表明, 老化过程中氧气的参与加速了由高温引起的自由基反应机理的老化降解反应, 在老化过程中产生大量自由基, 破坏分子链网络结构, 且氧气的参与加速了热氧老化中自由基含量的快速下降, 加重了材料的老化程度。随老化的进行, 不同相态结构之间的相互作用力下降, 在表层产生大量的碎片化错层结构。本研究对大型发电机绝缘系统的寿命评估提供了材料演变的基础数据, 促进了评估精确性的提高。

**关键词:** 主绝缘; 环氧复合材料; 老化

中图分类号: TQ326.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)04-0018-05

## Study on the Aging Characteristics of the Main Insulation Composite Material of the Large Generator Stator Bar under Multiple Working Conditions

PEI Jingke, LI Yuanjie, HU Bo, ZHANG Yue, LIANG Zhiming, LIU Hongyi

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

**Abstract:** Aiming at the thermal/oxygen aging of the main insulation composite material of generator stator bar, artificial accelerated simulated aging experiments under high temperature and high temperature/oxygen environment were carried out respectively. Studies show that oxygen accelerates the aging degradation reaction of the free radical reaction mechanism caused by high temperature during the aging process, generates a large number of free radicals during the aging process, and accelerates the destruction of the molecular network structure. The participation of oxygen accelerates the rapid decrease of free radical content and aggravates the aging degree of materials. As the aging progresses, the interaction force between different phase structures decreases, resulting in a large number of fragmented structures on the surface. This study provides the basic data of material evolution for the life assessment of large generator insulation system and promotes the improvement of the accuracy of the assessment.

**Key words:** main insulation; epoxy composite; aging

大型发电机组是国民经济发展的基础, 其安全可靠是经济稳定发展的重要保障。发电机一旦发生严重事故, 将导致设备损坏, 电力供应中断, 造成一系列的经济损失。统计发电机机组的故障数据, 其结果表明, 绝缘损坏是引起发电机故障的主要原因。

大型发电机定子线棒主绝缘使用环氧云母复合绝缘体系, 该体系材料为多相结构, 各组分之间的热学、力学、电学性能等差异较为明显, 而环氧组分的耐热性能相对较弱, 极易导致复合材料体系产生热老化为主导的主绝缘老化, 并引起绝缘系统故障<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2021-08-17

**作者简介:** 裴景克(1992-), 男, 2020年毕业于四川大学高分子加工系材料工程专业, 硕士, 助理工程师。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司储能与新材料研究所主要从事绝缘复合材料等研发工作。

本文针对发电机定子线棒主绝缘体系复合材料的热氧老化问题,开展模拟实际运行过程中的纯热、热氧环境的工况老化实验,使用电子顺磁共振波谱测试(EPR)、红外(FTIR)、扫描电子显微镜(SEM)、超景深三维显微镜,获得定子线棒绝缘材料在纯热老化、热氧老化过程中的微观分子结构与凝聚态结构的变化情况,探究其老化机理,起到了优化主绝缘复合材料体系设计,提高发电机组运行的可靠性的作用。

## 1 实验

### 1.1 样品制备与热氧老化实验

样品为定子线棒绝缘片材,主要成分为玻纤、云母、环氧,与发电机定子线棒主绝缘一致,热压成型,将其裁剪为5 cm×5 cm的片材。

热氧老化实验采用DHG公司XGQ-2000型电热鼓风烘箱。纯热老化实验采用上海升利SLQ-1000型全钢高温箱式气氛加热炉。实验条件如表1所示,实验温度为150℃,老化时间共60 h,每隔5 h取出部分样品供测试使用,共得到12组老化至不同程度的样品。

表1 老化实验条件

实验类型	实验温度/℃	气体氛围	取样时间/h
热氧老化	150	空气	5,10,15,20,25,30,
纯热老化		氮气+氩气	35,40,45,50,55,60

### 1.2 实验测试设备与测试条件

电子顺磁共振波谱(EPR)测试使用德国BRUKER EPR EMX PLUS,样品为机械切割环氧基体微粒。

傅里叶红外(FTIR)测试采用Thermo Fisher Scientific Thermo Scientific™ Nicolet™ iS50傅里叶红外光谱仪,测试方式包括全反射模式,光谱范围包括400~4 000 cm<sup>-1</sup>,分辨率为2 cm<sup>-1</sup>。

X射线光电子能谱(XPS)测试采用Thermo Fisher Scientific EscaLabXi + X射线光电子能谱仪,检测环氧基体C、N、O等元素的含量变化。

扫描电子显微镜(SEM)测试采用FEI Nova NanoSEM 450,样品表面喷金处理。

超景深显微镜采用KEYENCE(基恩士)VHX-2000,放大倍率100,300,500,700倍。

## 2 结果与讨论

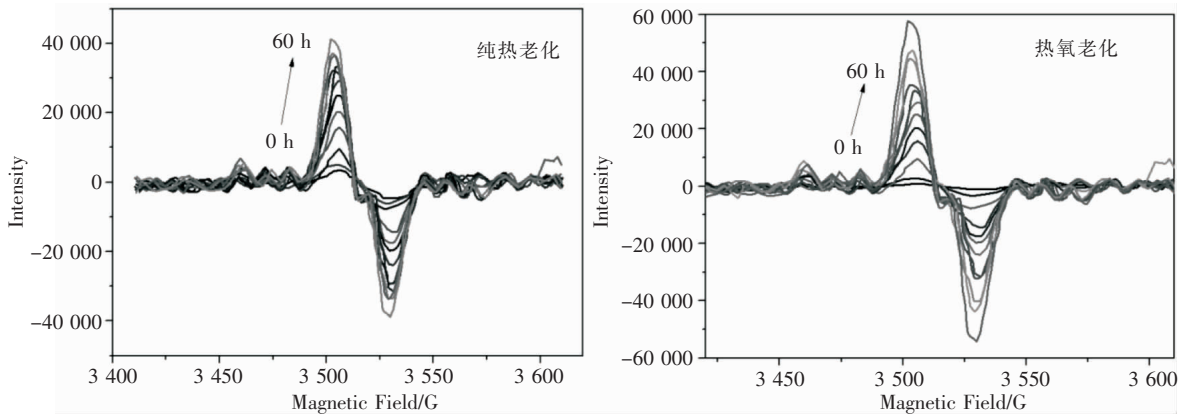
环氧树脂在老化过程中,分子链断裂产生大量俘陷自由基,导致在聚合物中发生连锁反应(分子链断裂、解聚、交联等),因其发生的位置不同,如活性官能团、支链或侧基,则造成老化反应极为复杂<sup>[2]</sup>。利用电子顺磁共振波谱可确定不同老化状态下定子线棒环氧树脂中自由基状态及含量变化,推测其老化程度与老化机理。对不同老化程度的样品进行EPR测试,结果如图1所示。从图1中可得,其未老化样品自由基信号极弱,说明未老化样品的分子链和交联网络未断裂或解聚,基本无自由基产生。而随着老化时间的增加(箭头方向),老化程度加深,自由基含量大幅增加。到50~60 h附近时,自由基含量较低,老化基本完成。这主要是由于随着老化的进行,在温度作用下,分子链中弱键断裂,产生自由基,自由基与外界氧原子、分子链活性基团等发生反应,导致环氧树脂的分子链断裂、官能团破坏以及解聚等。

另一方面,根据EPR谱图的总宽度为12.0 mT,每个峰的平均宽度为11 G,根据文献可以得出,该信号对应于环己二烯基类型的自由基,可能是由于环氧树脂上的苯环在自由基作用下活化后反应形成。说明纯热老化和热氧老化样品的自由基变化行为较为类似<sup>[3]</sup>。

对EPR谱图进行二重积分,可以计算环氧绝缘中自由基含量的变化趋势。使用下式的线性模式计算方程,对环氧绝缘降解过程中自由基变化情况进行动力学分析。

$$N = A_{\text{radical}} \exp(-t/\tau_{\text{radical}}) - k_{\text{radical}} + N_{\text{residual}} \quad (1)$$

式中, $N$ 是实验得到的自由基含量参数,由EPR谱图在3 490 G~3 545 G之间进行二重积分处理得到, $A_{\text{radical}}$ 是与降解过程中自由基重组引发的自由基含量变化常数, $k_{\text{radical}}$ 是与降解时气氛有关的另一常数, $\tau_{\text{radical}}$ 是时间常数,单位为小时(h),与自由基重组过程引发的自由基回复速率有关。



(a) 不同纯热老化程度的样品的 EPR 谱图

(b) 不同热氧老化程度的样品的 EPR 图

图1 不同老化程度的样品测试结果

通过计算,纯热老化和热氧老化的上述参数见表2,所得自由基含量随时间的变化如图2所示。从图2和表2可以看出,两种热氧老化样品的自由基含量变化常数  $A_{\text{radical}}$  明显高于纯热老化,其降解速率常数  $k_{\text{radical}}$  也更大,其降解速率更快。这说明环氧基体在氧气的作用下以自由基反应机理为主发生氧化降解,在自由基链式反应中,氧气的存在会增加自由基的引发几率,使得链增长和传递阶段加速,最终导致老化反应的进行和自由基的消耗加速<sup>[4]</sup>。

表2 样品在老化过程中自由基含量变化描述参数

Samples	$A_{\text{radical}}$	$\tau_{\text{radical}} \text{ (h)}$	$k_{\text{radical}} \text{ (h}^{-1}\text{)}$	$N_{\text{residual}}$
纯热老化	$9.198 \times 10^6$	23.492 8	5 849.9	$2.365 \times 10^6$
热氧老化	$9.783 \times 10^6$	35.837 2	7 639.2	$3.009 \times 10^6$

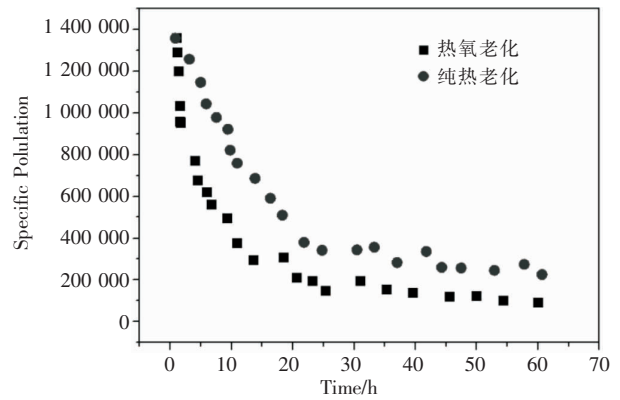
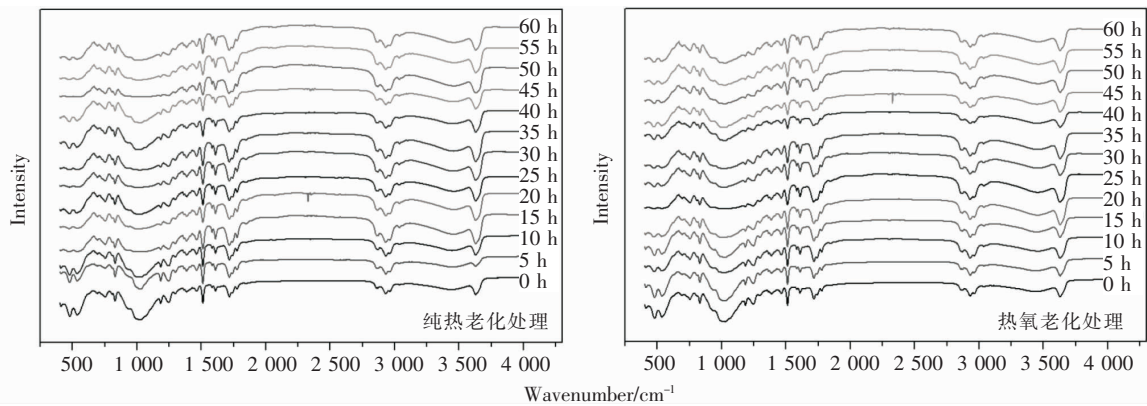


图2 样品在老化过程中自由基含量变化

在老化过程中环氧树脂基体将会发生明显的分子链结构的变化,纯热老化和热氧老化实验中不同程度样品的红外谱图如图3所示。



(a) 纯热老化样品

(b) 热氧老化样品

图3 不同老化时间的红外光谱谱图

可以看出,随着老化的进行,热氧老化、纯热老化样品位于  $1040 \text{ cm}^{-1}$  左右的酯基醚特征峰、 $1188 \text{ cm}^{-1}$  左右的 C-H 特征峰强度都逐渐降低,说明环氧在热氧老化和纯热老化中,分子链逐渐破坏,主要破坏酯基醚键和 C-H 键,这与其化学键键能较低有

密切关系<sup>[5]</sup>。

为进一步研究在老化过程中的化学组成的变化,使用 XPS 检测元素含量的变化,所得元素含量结果如图4所示。热氧老化和纯热老化过程中,样品元素的变化差别明显。对于纯热老化的样品中



C、N、O 元素的含量几乎不变,而热氧老化样品的 O 元素的含量在老化中前期逐渐上升,而 C 元素含量变化相反,二者在老化后期保持稳定,说明空气中的氧气参与到了环氧基体的老化中<sup>[6]</sup>。这与 EPR 中反映的情况相同,在热氧老化中氧气的加入造成

环氧基体链引发阶段从单一的分子链断裂形成自由基转变为分子链断裂形成自由基与分子链氧化形成过氧化氢物和自由基,并且在链增长和传递阶段的反应中也有加速作用。

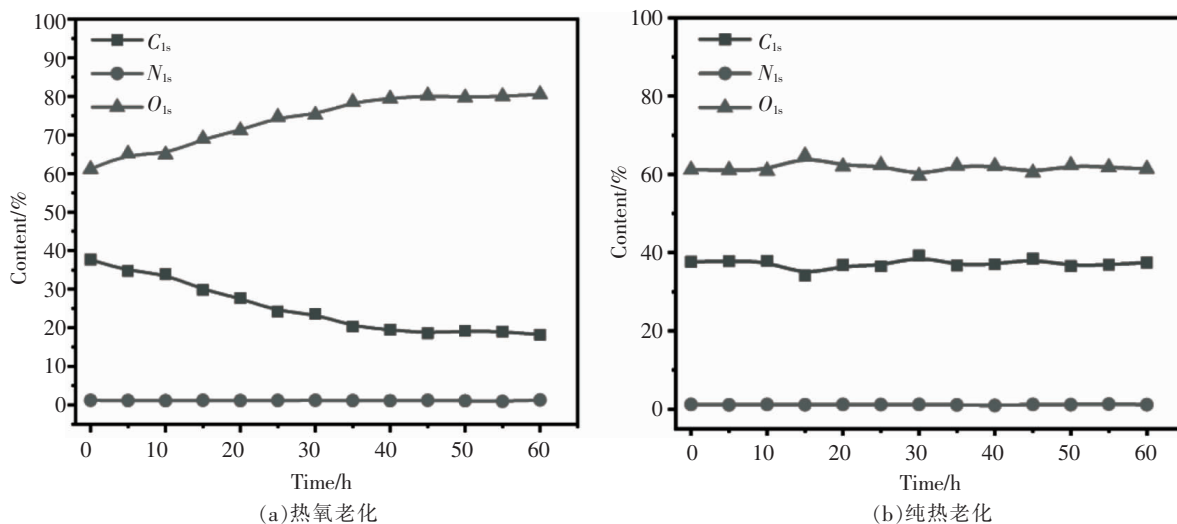


图4 老化样品元素含量变化

环氧树脂微观结构中的元素含量和分子链结构的演变也将影响材料的宏观结构,因此使用 SEM 观察不同老化状态的环氧复合材料的表面形态。纯热老化和热氧老化后样品形貌变化如图 5 和图 6 所示。由图可得,未老化样品的表面平整光洁;随着老化的进行,样品表面粗糙程度逐渐增加,较为平整的表面遭到破碎,形成大量碎片化错层结构,这是由于长时间高温导致环氧基体分子链网络和交联结构遭到破坏,填料与基体之间的紧密粘接结构失效,进而导致材料整体的一致性被破坏分离。

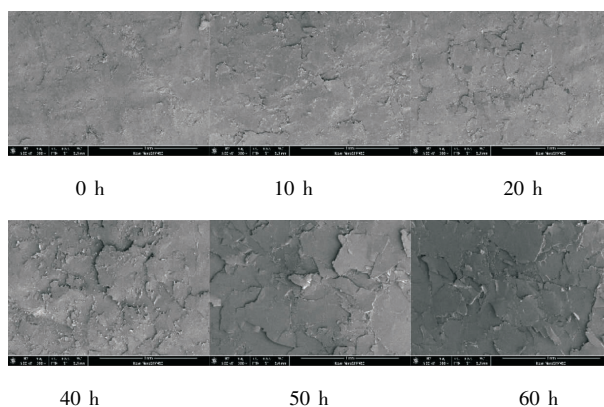


图6 热氧老化样品 SEM 图

使用超景深三维显微镜对老化后样品在微米尺度上的三维形貌进行研究,结果见图 7 和图 8。每个样品取四种分辨率 100X,300X,500X,700X 的测试结果,取 100X 图像。从结果中可以看出,随着老化的进行,样品的形貌粗糙度逐渐增加,说明老化使得样品各个组分之间的结合逐渐被破坏。总体来说,热氧老化和纯热老化的规律较为一致,与 SEM 变化情况基本相同。

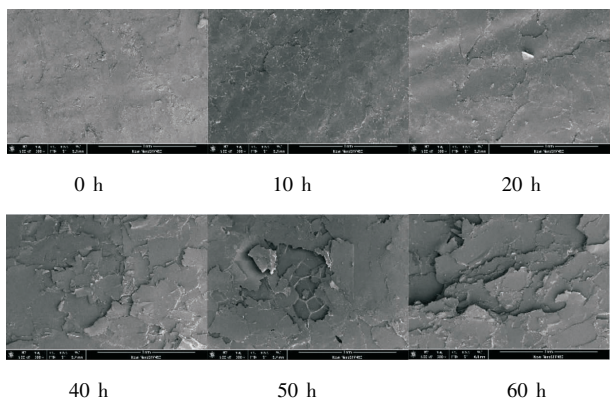


图5 纯热老化样品 SEM 图

### 3 结语

本文通过热氧老化、纯热老化实验研究了定子



线棒绝缘环氧复合材料在老化过程中自由基含量、分子结构、元素组成、微观形貌等微观结构和聚集态的变化。

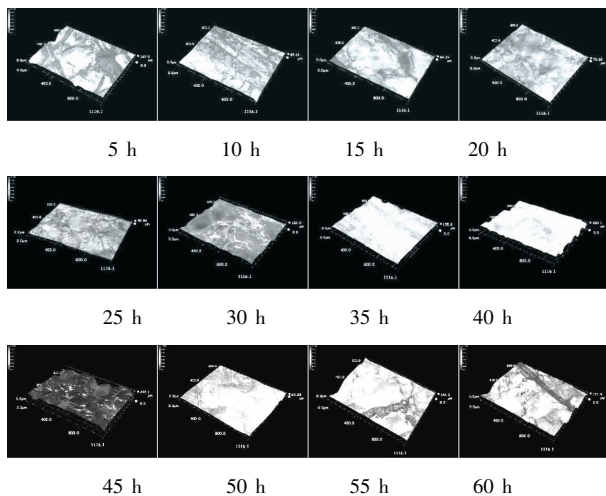


图7 纯热老化样品5~60 h不同放大倍数的超景深三维显微镜

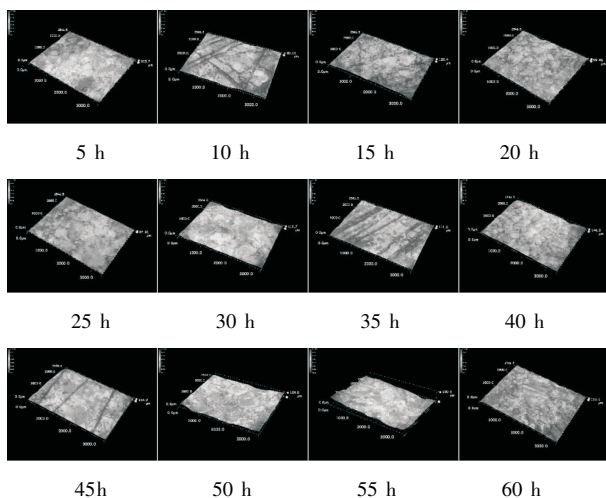


图8 热氧老化样品5~60 h不同放大倍数的超景深三维显微镜

结果表明,由高温引起环氧基体发生以自由基反应机理为主的老化降解反应。并与氧气的协同

作用下,加速分子链断裂、交联网络结构破坏,在老化前中期产生了大量自由基,加速官能团破坏。同时 EPR 和 XPS 结果表明在环氧基体的老化过程中氧气的参与是热氧老化中自由基含量快速下降的关键。

随老化时间的增加,分子链和交联网络遭到破坏,不同相态结构之间的相互作用力下降,云母等填料析出,样品表面平整程度下降,产生大量的碎片化结构。

通过对主绝缘复合材料的老化实验研究,初步确定了环氧绝缘复合材料的老化机理,对大型发电机绝缘系统的寿命评估提供了材料演变的基础数据,提高了评估的精确性,为大型发电机绝缘部件的优化设计提供了支撑数据。

#### 参考文献:

- [1] A. Maxwell, W. R. Broughton, et al. Review of Accelerated Ageing Methods and Lifetime Prediction Techniques for Polymeric Materials [R]. National Physical Laboratory, NPL, Middlesex, 2005
- [2] Singh B, Sharma N. Mechanistic implications of plastic degradation [J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(3): 561 - 584
- [3] Pierangiola Bracco, Luigi Costa, et al. A review of experimental studies of the role of free-radicals in polyethylene oxidation [J]. Polymer Degradation and Stability, 2018, 155: 67 - 83
- [4] 管妮. 聚合物的老化与稳定化[J]. 合成材料老化与应用, 2009, 38(3): 47 - 53
- [5] Damian C, Espuche E, Escoubes M. Influence of three ageing types (thermal oxidation, radiochemical and hydrolytic ageing) on the structure and gas transport properties of epoxy-amine networks [J]. Polymer Degradation & Stability, 2001, 72(3): 447 - 458
- [6] 黄强, 赵鑫刚, 刘波等. 改性环氧树脂胶剂耐热老化性能的研究 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2011, 28(2): 229 - 232

(上接第 17 页)

- [6] 张一豪, 黄葆华, 仇晓智等. 常规火电机组机理建模及仿真 [J]. 华北电力技术, 2016(8): 29 - 33 + 46
- [7] 桑梓, 赵铨冲, 沈宇等. 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 [J]. 东方电气评论, 2021, 35(3): 1 - 8
- [8] 马海迎, 袁晓舒, 桑梓等. 工业控制系统可编程逻辑控制器形式化建模 [J]. 东方电气评论, 2021, 35(3): 9 - 16 + 24
- [9] Timed Automata: Semantics, Algorithms and Tools. In: Desel J.,

Reisig W., Rozenberg G. (eds) Lectures on Concurrency and Petri Nets. ACPN 2003. Lecture Notes in Computer Science, 3098: 87 - 124

- [10] 冯博洋. 基于模型的实时系统形式化验证方法研究与实现 [D]. 杭州电子科技大学, 2016
- [11] 赵东. 1 000 MW 汽轮机控制保护系统分析设计 [D]. 电子科技大学, 2010
- [12] 作华南. HN1251 - 5.38 型半速汽轮机控制保护系统分析和调试 [D]. 山东大学, 2015

# 高换热系数疏水性石墨烯/铜镍合金 材料制备及其性能研究

张中伟 杨大帅 何坪

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

**摘要:**在工业级铜合金材料表面实现蒸汽滴状冷凝的表面处理技术是高效冷凝换热领域的迫切需求技术。本文采用等离子体辅助化学气相沉积(PECVD)技术,以甲烷为碳源,氢气为还原气体,在工业级铜合金材料表面沉积石墨烯薄膜,沉积有石墨烯薄膜的铜合金表面表现为疏水特性,实现了蒸汽在其表面膜状冷凝向滴状冷凝的转变,测试表明沉积有石墨烯薄膜的铜合金管蒸汽冷凝换热性能有较大提升。通过调节沉积温度、等离子体功率、气体流量,本研究实现了对石墨烯薄膜层数和缺陷的可控制备。结果显示在铜合金表面得到了单层石墨烯、少层石墨烯(2~3层)和多层石墨烯,沉积的石墨烯缺陷越少则铜合金表面疏水性越强,对水的最大接触角达到 $128^\circ$ ,石墨烯对铜合金管外表面蒸汽冷凝换热系数能提升110%,总换热系数最高可提升26%,具有较好的应用前景。

**关键词:**增强冷凝换热; 石墨烯薄膜; 疏水性

中图分类号:TB383

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)04-0023-06

## Preparation and Properties of Hydrophobic Graphene/Cu-Ni Alloy with High Heat Transfer Coefficient

ZHANG Zhongwei, YANG Dashuai, HE Ping

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

**Abstract:** Surface treatment technology for steam droplet condensation on the surface of industrial grade copper alloy is an urgent technology in the field of efficient condensation heat transfer. In this paper, Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) technology is used to deposit graphene on the surface of industrial-grade copper alloy materials with methane as carbon source and hydrogen as reducing gas. The surface of copper alloy with graphene shows hydrophobic characteristics, and the transformation of steam condensation from filmwise condensation to dropwise condensation on its surface is realized. The results show that the steam condensation heat transfer performance of copper alloy tube deposited with graphene is greatly improved. By adjusting deposition temperature, plasma power and gas flow rate, the number of graphene layers and defects can be controlled. The results showed that single and multilayer graphene are deposited on the surface of copper alloy. The less graphene defects, the more hydrophobic the copper alloy surface will be, and the contact angle of water up to  $128^\circ$ . The heat transfer coefficient of steam condensation on the outer surface of copper alloy tube can be increased by 110%, and the total heat transfer coefficient can be increased up to 26%, indicating that graphene has a good application prospect in heat transfer fields.

**Key words:** enhanced condensing heat transfer; graphene film; hydrophobic

水蒸气冷凝传热在化工、制冷、电子、发电、动力和航天热控技术等领域具有广泛的应用,如水蒸

收稿日期:2021-10-22

作者简介:张中伟(1984-),男,2011年毕业于中国科学技术大学材料物理与化学专业,博士研究生,高级工程师。研究方向为电化学储能技术,新材料技术等领域。

气汽轮机凝汽器、热法海水淡化、分子精馏、材料加工、吸收式热泵和制冷、真空热管、石油化工等。提升换热设备材料的换热系数,提升其换热性能具有非常重要的现实意义。

目前工业设备中大多为膜状冷凝,其换热效率低。在冷凝换热表面实现滴状冷凝可以大幅提升表面冷凝换热系数,从而提升换热效率。目前实现滴状冷凝的表面材料可分为有机促进剂、金属及其化合物和高分子聚合物三类。许多研究者在如何得到寿命长、表面自由能低的冷凝表面方面已做了大量研究,并取得了许多有益的成果和进展,然而当前还没有一种经济的、能在工业条件下长期维持滴状冷凝的表面材料及有效的表面处理技术。

石墨烯因其具有超高的热导率( $5\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )和良好的疏水特性,具有改变金属表面为滴状冷凝的巨大潜力。化学气相沉积(CVD)法具有工艺简单、能够在金属基底上直接生长出大面积的石墨烯且易于转移等优点<sup>[1]</sup>,使其成为目前应用最广泛的一种石墨烯制备方法。Chen 等人最早采用CVD法成功地在纯Cu和Cu/Ni合金表面上沉积了石墨烯,该石墨烯薄膜能够有效地阻止基体在空气中的氧化以及在过氧化氢溶液中的腐蚀<sup>[2]</sup>。2015年Ahmed, Mohsin 等人在双向碳源气流的条件下合成了大规模连续的双层石墨烯,双向气流很大程度上控制了双层石墨烯的生长,该研究还发现,延长沉积时间和升高沉积温度对减少薄膜缺陷和提高晶粒尺寸也有重要作用<sup>[3]</sup>。2017年Kumar Avshish 等人研究采用等离子体发生器结合CVD在Cu包覆的Si基底上生长高质量的石墨烯,该方法优势是成本较低,且效率高,能在600℃的条件下合成高质量石墨烯<sup>[4]</sup>。Raman 等人采用CVD法在铜基体上制备了石墨烯薄膜,并研究了其在NaCl溶液中的耐腐蚀性能,结果表明,石墨烯薄膜能够明显的增加Cu基体的阻抗,阴极和阳极的腐蚀电流均减小了1~2个数量级,证明了石墨烯薄膜具有超强的耐腐蚀性<sup>[5]</sup>。David, L. 等人研究了在改良的常压化学气相沉积炉中,在快速加热( $8\ \text{℃}\cdot\text{s}^{-1}$ )和冷却( $10\ \text{℃}\cdot\text{s}^{-1}$ )的条件下,实现Cu和Ni基底上石墨烯的沉积<sup>[6]</sup>,用电子显微镜和拉曼光谱法证明在Cu和Ni基底上均合成了大面积多层石墨烯。Kong Jing 课

题组报道了他们在纯度很高的铜管(99.99%)上生长石墨烯薄膜并测试其热传导系数,实验结果表明,石墨烯薄膜涂层金属管比裸金属管的冷凝传热系数高4倍<sup>[7-8]</sup>。A. M. Scaparro 通过调节甲烷流量控制沉积的石墨烯的层数,并阐述了石墨烯沉积的生长机理<sup>[9]</sup>。Rishi Rajde 等人通过理论计算发现纯铜表面沉积石墨烯后接触角逐渐增大<sup>[10]</sup>。Javad Rafiee 等人通过实验发现铜箔上的石墨烯层数越大其与水的接触角越大,最优层数为6-9层,但其得到的最大接触角为 $90.6^\circ$ <sup>[11]</sup>。报道中大都使用的是高纯度铜,而目前实际运用中大都是铜合金,不锈钢等合金材料。在工业级铜合金材料表面沉积石墨烯并验证其疏水特性成为急需解决的问题。

针对目前工业级铜合金材料表面滴状冷凝表面处理技术的研究空白和迫切需求,本文研究并提出一种使用等离子体辅助化学气相沉积(PECVD)设备,以在工业级铜合金材料表面沉积石墨烯的方法,验证了铜合金表面沉积石墨烯后表面与水的滴状接触和对铜合金管冷凝换热性能的提升。主要研究内容有沉积温度、等离子体功率、气体流量对石墨烯薄膜质量影响关系,并采用表面拉曼光谱仪对不同条件下沉积后的铜合金表面进行了表征。

## 1 材料与实验

将铜合金片(BFE10-1-1,工业级)/铜合金管置于丙酮(成都科龙试剂厂,分析纯)中超声振动5 min清洗其表面并用氮气吹干,接着再将其置于去离子水中超声振动5 min清洗其表面并用氮气吹干;置于2 mol/L的稀盐酸(成都科龙试剂厂,分析纯)化学除杂10 min,接着再用去离子水清洗10 min并吹干;将处理完成的铜合金置于化学气相沉积反应室中,密封反应室,使用真空泵使沉积反应室压力至10 Pa以下,通入氢气(液化空气,99.999%),气体流量为56 sccm,开始加热升温,升温速率为 $16.7\ \text{℃}/\text{min}$ ,当铜合金材料达到1 000℃后,保温30 min;打开等离子体设备,离子化气体,通入甲烷(液化空气,99.999%),流量为20 sccm,再保温60 min,然后降至室温。主要研究分析不同沉积温度、等离子体功率、气体流量对铜合金表面沉积石墨烯的影响。



石墨烯的表征:采用光学显微镜(OM, Olympus DP71)、拉曼光谱仪(Raman, Labram HR800-UV-NIR, 激光波长 532 nm, 功率 10% - 10mW)对生长出来的石墨烯进行表征,采用接触角测试仪(Attension Theta)测试材料表面与水的接触角,采用对流传热设备测试尺寸为 D20 mm × 1 mm × 600 mm 的管材的冷凝换热系数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度对石墨烯沉积的影响

甲烷作为小分子气体,分子量小,且为单碳分子,成为化学气相沉积石墨烯的常用碳源<sup>[12-15]</sup>,而温度对石墨烯的沉积至关重要<sup>[15]</sup>。图1为不同温度下沉积的拉曼测试数据,实验数据表明800℃以上沉积都有明显的石墨烯的特征峰,其中D峰为缺陷峰(无序振动),G峰为特征峰(面内振动),2D峰为特征峰(二阶振动)。而在700℃只能沉积一层无定型碳膜,沉积温度越高,石墨烯的缺陷峰D峰越低,说明温度越高越有利于高质量低缺陷的石墨烯的沉积,推断原因为沉积温度越高,降温过程中铜合金中镍金属溶解的C更易于偏析和沉积到表面<sup>[15]</sup>。温度为1000℃时其 $I_G/I_{2D}$ 的值为0.67,小于1,说明石墨烯为单层石墨烯,而温度降低 $I_G/I_{2D}$ 的值增大,说明温度降低趋向于沉积多层石墨烯<sup>[16-17]</sup>。通过比较1000℃和900℃条件下生长的光学显微镜照片可以看出1000℃表面光整,而900℃表面上有少许无定型碳的沉积(见图2)。因为冷凝换热管的行业标准规定铜合金的抗拉强度

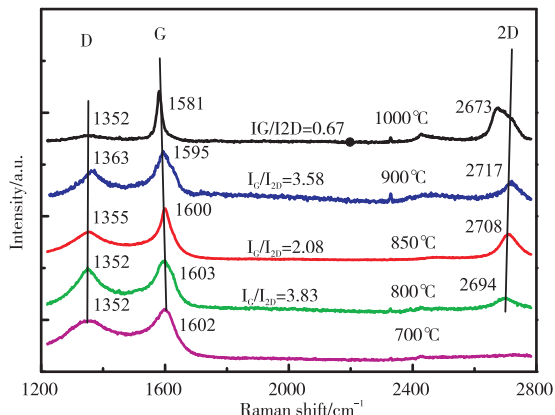


图1 不同温度沉积的拉曼测试数据  
(氢气流量为 56 sccm, 甲烷流量为 20 sccm)

须大于 290 MPa,经过测试铜合金片的抗拉强度发现铜合金只有在 800℃以下热处理的抗拉强度大于 290 MPa,所以后文中研究沉积温度均采用 800℃。本文中的拉曼数据均按 G 峰为基准进行归一化处理,下文中不再赘述。

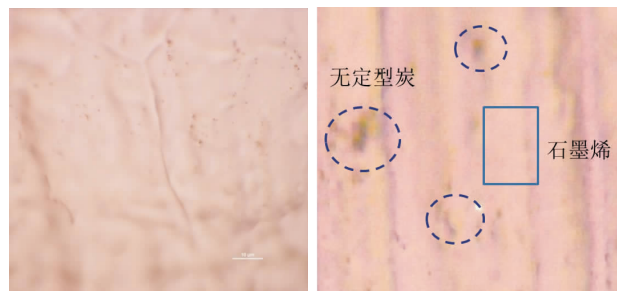


图2 1000℃(左)和900℃(右)下沉积的表面形貌照片

### 2.2 等离子体功率对石墨烯沉积的影响

文献[4,9]报道了将甲烷离子化有利于石墨烯的沉积,可以降低石墨烯薄膜的沉积温度。研究等离体设备的功率对铜合金上沉积石墨烯的影响,图3为在沉积温度为800℃,氢气流量为56 sccm,甲烷流量为20 sccm时,等离体设备不同功率条件下沉积石墨烯的拉曼数据,从图中可以看出等离体设备功率为60W时最有利于石墨烯沉积,其2D峰最明显,推断是等离体功率太低,甲烷的裂解比较困难,而等离体功率太高使得甲烷过于活化,造成在铜合金表面的沉积困难<sup>[9]</sup>。不同功率下缺陷峰D峰都较高,说明沉积的石墨烯都有一定的缺陷。

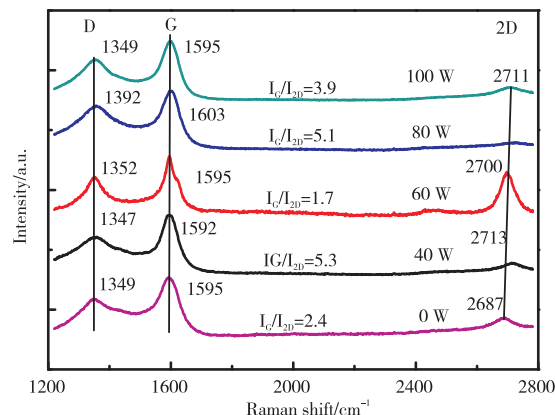


图3 等离体设备不同功率沉积的拉曼测试数据  
(沉积温度为 800℃, 氢气流量为 56 sccm, 甲烷流量为 20 sccm)

### 2.3 甲烷气体流量对沉积石墨烯的影响

甲烷流量直接关系到反应腔室中的甲烷浓度,改变通入反应腔室中的甲烷的流量探索其对铜合



金上沉积石墨烯的影响。实验条件是沉积温度为 800 °C, 氢气流量为 56 sccm, 甲烷流量为 20 sccm 时, 等离子体设备功率为 60 W。图 4 为不同流量下得到的拉曼测试数据, 从图中可以看出随着甲烷流量逐渐增加, 石墨烯的 2D 峰逐渐增强, 其  $I_G/I_{2D}$  的值逐渐减小, 说明在此范围内, 甲烷流量越大, 石墨烯的层数越少, 可能的原因是甲烷流量越大, 石墨烯边缘与 H 原子接触机会越少, 转而与铜合金表面的晶界结合, 趋向于形成少层的石墨烯<sup>[15-17]</sup>。而 D 峰逐渐减弱, 说明甲烷浓度增大, 缺陷逐渐减少。

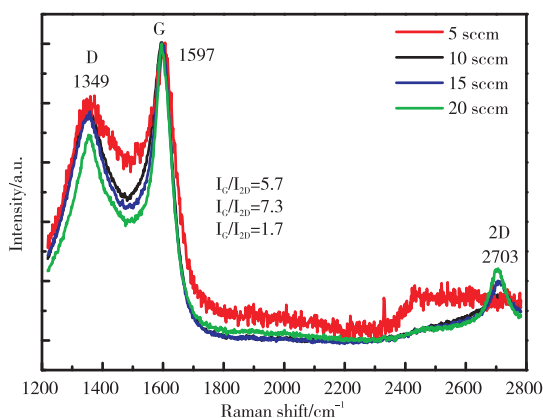


图 4 不同甲烷流量沉积的拉曼测试数据 (沉积温度为 800 °C, 氢气流量为 56 sccm, 等离子体功率为 60 W)

#### 2.4 氢气流量对沉积石墨烯的影响

氢气作为还原性气体, 在石墨烯化学气相沉积过程中为整个反应腔室提供还原性环境, 对石墨烯在铜合金上的沉积起着关键性的作用<sup>[18]</sup>。从图 5 的数据中可以看出氢气流量太低, 反应室内的还原性较差, 石墨烯不能沉积, 当氢气流量增大到 18 sccm

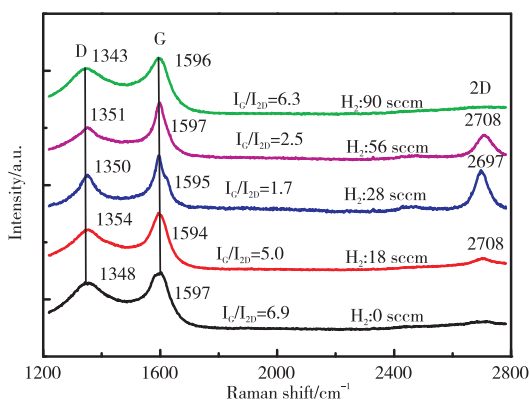


图 5 不同氢气流量沉积的拉曼测试数据 (沉积温度为 800 °C, 甲烷流量为 20 sccm, 等离子体功率为 60 W)

后开始有石墨烯沉积, 流量为 28 sccm 时, 石墨烯的特征峰最明显, 而流量进一步增大后, 石墨烯特征峰又减弱, 原因可能是氢气流量过大造成石墨烯被氢气刻蚀, 这也与图中  $I_G/I_{2D}$  的值先减小后增大的趋势相吻合<sup>[18]</sup>。石墨烯都有一定缺陷, 氢气流量对沉积的石墨烯的缺陷峰影响不明显。

#### 2.5 沉积时间对沉积石墨烯的影响

石墨烯的沉积时间对其沉积的质量也有很重要的影响<sup>[9]</sup>。图 6 为石墨烯不同沉积时间的拉曼数据, 从图中可以看出 60 min ~ 90 min 为石墨烯较优的沉积时间, 低于 30 min 后, 石墨烯几乎不能沉积, 这是因为时间过短时, 石墨烯不能迅速沉积在铜合金表面<sup>[9,19,20]</sup>。随着沉积时间增大, 其  $I_G/I_{2D}$  的值逐渐增大, 石墨烯层数逐渐增多。

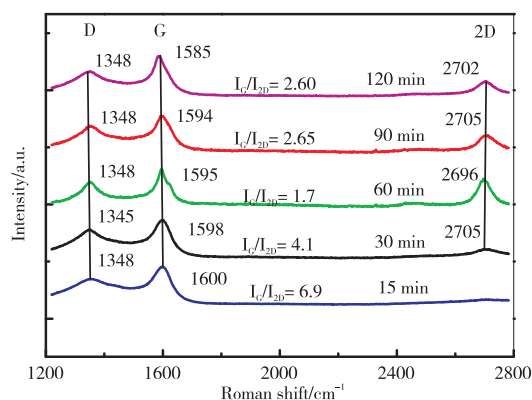


图 6 不同氢气流量沉积的拉曼测试数据 (沉积温度为 800 °C, 甲烷流量为 20 sccm, 氢气流量为 56 sccm, 等离子体功率为 60 W)

#### 2.6 不同石墨烯质量的样品接触角测试

沉积了石墨烯的铜合金表面呈现疏水特性, 其中石墨烯的层数和缺陷对其接触角具有一定的影响<sup>[11,21-22]</sup>。实验研究选择的接触角介质为去离子水, 挑选石墨烯质量 ( $I_D/I_{2D}$ ) 的值呈梯次变化的样本, 对其进行表面接触角测试, 接触角测试数据如图 7 所示。图中接触角最大能达到 128°, 该样品为 1 000 °C 条件下铜合金上沉积的石墨烯, 其缺陷最少, 石墨烯质量最好, 随着石墨烯缺陷峰的增强, 其接触角逐渐减小, 未经处理的铜合金的接触角为 91°, 无定型碳膜的的接触角最小为 82°。由此可见, 接触角随着石墨烯缺陷峰减弱而增大。

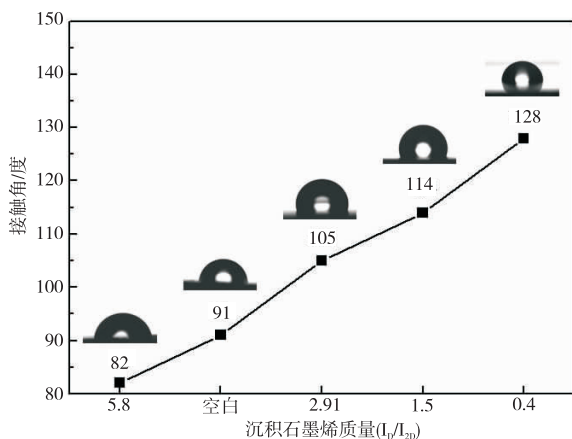


图7 不同石墨烯质量样本的接触角测试数据

### 2.7 石墨烯对铜合金管冷凝换热系数的影响

图8为石墨烯1000℃下沉积石墨烯的铜合金管(D20 mm × 1 mm × 600 mm)的蒸汽冷凝换热测试数据,从图中可以看出,随着蒸汽压力增大,沉积石墨烯和未沉积石墨烯的铜合金管的总传热系数均逐渐增大,沉积石墨烯后铜合金管的换热系数有所提高。管外蒸汽压力为0.2 MPa、管内冷水流速为0.5 m/s时,石墨烯对铜合金管总传热系数提高最大为26%,外表面提高110%。其原因是铜合金管表面沉积石墨烯后,表面疏水性增强,由膜状冷凝变为滴状冷凝,换热系数明显提高。

计算公式为:

$$Q = W_c \cdot C_p \cdot \Delta T = K \cdot S \cdot \Delta t_m$$

$$K = (d_o \cdot \alpha_i^{-1} d_i^{-1} + b \cdot d_o \cdot \lambda_m^{-1} d_m^{-1} + \alpha_o^{-1})^{-1}$$

$$\alpha_i = 0.023 \lambda_i \cdot d_i^{-1} \cdot (d_i \cdot u \cdot \rho \cdot \mu^{-1})^{0.8}$$

$$(C_p \cdot \mu \cdot \lambda_i^{-1})^{0.4} [1 + (d_i \cdot L^{-1})^{0.7}]$$

其中  $Q$  为总传热量,  $W_c$  为冷却水流量,  $C_p$  为冷水比热容,  $\Delta T$  为冷却水进出口温度差,  $K$  为总传热系数,  $S$  换热面积,  $\Delta t_m$  为对数平均温度,  $\alpha_i$  为内表面传热系数,  $\alpha_o$  为外表面传热系数,  $\lambda_m$  为管壁导热系数,  $\lambda_i$  为冷却水导热系数,  $\mu$  为冷却水黏度,  $b$  为壁厚,  $d_o$  为管外径,  $d_i$  为管内径,  $d_m$  为平均管径,  $L$  为管长,  $u$  为冷却水流速。

蒸汽压力大于0.2 MPa后石墨烯对铜合金管的换热增强效应减弱,是因为水的表面张力随着压力增大而减小,且冷凝量增大,管外冷凝水阻碍了蒸汽与铜合金管外表面的快速接触,造成石墨烯对换热系数的增强效应减弱。

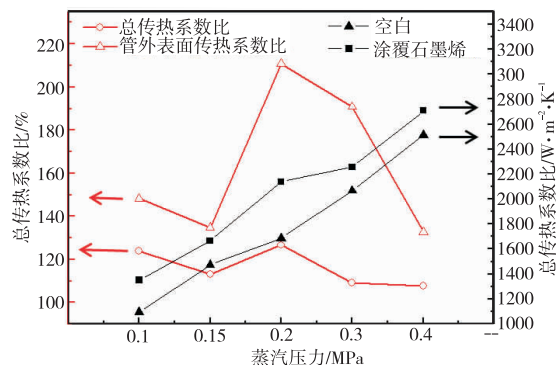


图8 不同蒸汽压力下的传热系数测试数据图

(管内流速为 0.5 m/s)

### 3 结语

本研究工作通过等离子体增强化学气相沉积实现在工业级铜合金材料上使用甲烷和氢气沉积石墨烯,并成功验证了铜合金表面沉积石墨烯后表面与水的滴状接触和对铜合金管冷凝换热性能的提升。研究得到以下结论:

- (1) 随着沉积温度降低,石墨烯缺陷增多,层数增多。
- (2) 等离子体功率不宜太低或过高,功率太低甲烷不能裂解活化,功率太高不利于石墨烯在表面沉积。
- (3) 甲烷流量在合适范围内,随着流量增大石墨烯质量更高,层数减少,而氢气流量增大则易使得石墨烯被刻蚀;
- (4) 石墨烯在铜合金表面为逐层沉积,沉积时间增大,石墨烯层数增多。

研究表明,石墨烯可以明显提高铜合金表面的疏水性,且石墨烯缺陷越少,表面的疏水性越强。在铜合金管外表面沉积石墨烯后,其外表面的冷凝换热性能具有明显的提升效应,有巨大的应用潜力。通过本文的研究成果,对石墨烯在合金材料表面改性及高性能冷凝换热材料的开发提供了一个有效的思路 and 方向。

### 参考文献:

- [1] Nie S, Wu W, Xing S, et al. Growth from below: bilayer graphene on copper by chemical vapor deposition [J]. New J. Phys., 2012, 14 (9): 093028
- [2] Chen S, Brown L, Levendorf M, et al. Oxidation resistance of graphene-coated Cu and Cu/Ni alloy [J]. ACS Nano, 2011, 5

- (2):1321
- [3] Ahmed M, Kishi N, Soga T. Large scale bi-layer graphene by suppression of nucleation from a solid precursor [J]. RSC Adv., 2015,5(53):42645-42652
- [4] Kumar A, Khan S, Zulfequar M, et al. Low temperature synthesis and field emission characteristics of single to few layered graphene grown using PECVD [J]. Applied Surface Science, 2017, 402:161-167
- [5] Raman R S, Banerjee P C, Lobo D E, et al. Protecting copper from electrochemical degradation by graphene coating [J]. Carbon, 2012, 50(11):4040
- [6] David L, Bhandavat R, Kulkarni G, et al. Synthesis of Graphene Films by Rapid Heating and Quenching at Ambient Pressures and Their Electrochemical Characterization [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(3):546-552
- [7] Reina, Alfonso; Jia, Xiaoting; Ho, John; Nezich, Daniel; Son, Hyunbin; Bulovic, Vladimir; Dresselhaus, Mildred S.; Kong, Jing. Large Area. Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition [J]. Nano Lett, 2009, 9(1):30-35
- [8] Sreekar Bhaviripudi, Xiaoting Jia, Mildred S. Dresselhaus, Jing Kong. Role of kinetic factors in chemical vapor deposition synthesis of uniform large area graphene using copper catalyst [J]. Nano Lett., 2010, 10:4128-4133
- [9] Shah J, Lopez-Mercado J, Carreon M G, et al. Plasma Synthesis of Graphene from Mango Peel [J]. ACS Omega, 2018, 3(1):455-463
- [10] Chen S, Cai W, Piner RD, et al. Synthesis and characterization of large-area graphene and graphite films on commercial Cu-Ni alloy foils [J]. Nano Letters, 2011, 11(9):3519-3525
- [11] Rafiee J, Mi X, Gullapalli H, et al. Wetting transparency of graphene [J]. Nature Materials, 2012, 11(3):217-222
- [12] Edwards R S, Coleman K S. Graphene synthesis: Relationship to applications [J]. Nanoscale, 2013, 5(1):38-51
- [13] 刘平, 龙明生, 李铭. 铜镍合金催化制备大面积均匀的少层石墨烯 [J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(5):629-633
- [14] Wu Y, Chou H, Ji H, et al. Growth mechanism and controlled synthesis of AB-stacked bilayer graphene on Cu-Ni alloy foils [J]. ACS Nano, 2012, 6(9):7731-7738
- [15] Choi D S, Kim K S, Kim H, et al. Effect of cooling condition on chemical vapor deposition synthesis of graphene on copper catalyst [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2014, 6(22):19574-19578
- [16] 尤佳毅, 沈鸿烈, 李金泽. 铜衬底上热丝 CVD 法低温生长石墨烯薄膜的研究 [J]. 电子器件, 2014, 37(6):1017-1020
- [17] Dharmaraj P, Venkatesh P. Sundara, Kumar, Pravin, Asokan, K. Jeganathan, K. Direct growth of few layer graphene on SiO<sub>2</sub> substrate by low energy carbon ion implantation [J]. RSC Advances, 2016, 6(103):101347-101352
- [18] Scaparro AM, Miseikis V, Coletti C, et al. Investigating the CVD Synthesis of Graphene on Ge(100): Toward Layer-by-Layer Growth [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2016, 8(48):33083-33090
- [19] 张玮, 满卫东, 涂昕, 等. 衬底对 CVD 生长石墨烯的影响研究 [J]. 真空与低温, 2013, 19(4):195-213
- [20] 余钢, 王志贤. 用接触角法估算复合材料的表(界)面特性 [J]. 粘接, 2000(5):28-32
- [21] Xiuyun Zhang, Lu Wang, John Xin, et al. Role of hydrogen in graphene chemical vapor deposition growth on a copper surface [J]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136(8):3040-3047
- [22] Raj R, Maroo S C, Wang E N. Wettability of graphene [J]. Nano Letters, 2013, 13(4):1509-1515

## 集团要闻

### 东方电气获 2020 年度国家科学技术进步奖

中共中央、国务院 11 月 3 日上午在北京隆重举行国家科学技术奖励大会。习近平、李克强、王沪宁、韩正等党和国家领导人出席大会并为获奖代表颁奖。李克强代表党中央、国务院在大会上讲话。韩正主持大会。东方电气集团东方电机有限公司荣获 2020 年度国家科学技术进步奖二等奖。

近年来,东方电气集团科技创新能力稳步提升,创新平台建设成绩突出。自 2016 年以来,共获各类省部级及以上奖励 86 项。其中,“长江三峡枢纽工程”获 2019 年国家科学技术进步奖特等奖,“600 MW 超临界循环流化床锅炉技术开发、研制与工程示范”获 2017 年国家科学技术进步奖一等奖,“汽轮机系列化减振阻尼叶片设计关键技术及应用”获 2018 年国家科学技术进步奖二等奖。

来源:东方电气网

# 永磁直驱式风力发电机整机装配动力特性研究分析

王世建 何启源 段志强 王明坤 周俊鹏

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**本文阐述了利用 Ansys Workbench 有限元软件建立永磁直驱发电机整机装配模型,采用电磁耦合计算发电机整机装配的固有频率,即考虑转子永磁磁钢和定子铁心的均布磁拉力,以及由于加工、装配、转子支架和定子支架自身的变形导致的偏心磁拉力的影响。并将计算结果与模态试验实测结果对比验证该方法的准确性。

**关键词:**有限元法; 电磁耦合; 动力特性; 模态试验

中图分类号:TB12

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)04-0029-05

## Research and Analysis on Assembly Dynamic Characteristics of Permanent Magnet Direct Drive Wind Turbine

WANG Shijian, HE Qiyuan, DUAN Zhiqiang, WANG Mingkun, ZHOU Junpeng

(Dongfang Electrical Machinery Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** This paper describes the use of Ansys Workbench finite element software to build a permanent magnet direct-drive generator assembly model, using electromagnetic coupling to calculate the natural frequency of the generator assembly, that is, considering the uniform magnetic pull of the rotor permanent magnet and stator core, And the influence of eccentric magnetic pull due to deformation of the machining, assembly, rotor bracket and stator bracket itself. The accuracy of the method is verified by comparing the calculated results with the measured results of the modal test.

**Key words:** finite element method; electromagnetic coupling; dynamic characteristics; modal test

风力发电机功率不断增大,振动问题也在不断地浮现,发电机振动会产生严重的设备故障<sup>[1]</sup>。其中最主要的振动为当其他振源的振动频率与发电机本身的固有频率相接近甚至重合时而发生的振幅增大<sup>[2]</sup>。风力发电机振动的危害随着使用年限的增长也就愈发严重,风力发电机在平常运行时产生的强烈振动会降低发电机组经济性能。在其振动时,部件如齿轮的间隙数值不断地在增大,会使各机组相连的部件有所松动,甚至断裂,使风力发电机组产生损坏<sup>[3]</sup>。风力发电机的振动是运行时最常见的一个问题。只要发电机开始运行,机组的各个部件就会出现振动的现象。长期振动会造成

轮齿磨损,叶片损坏,轴件出现故障,久而久之,风力发电机会产生严重故障或者损坏,直接影响风力机的性能和稳定性<sup>[4]</sup>。

因此,如何建立合适的机组模型,对机组振动性能的研究尤为关键。模拟永磁直驱风力发电机电磁的相互作用,以得到整机装配下准确的固有频率,避开外界激励频率,保证机组不不发生较大振动,保障机组的安全稳定运行<sup>[5]</sup>。

ANSYS 软件是一种力学计算功能非常强大的有限元分析软件,可以用来分析解决流体、电场、磁场、结构、声场等等多个学科领域复杂问题,并且可以将有限元理论和实际工程处理应用,较为更好的

收稿日期:2021-09-24

作者简介:王世建(1988-),男,2019年毕业于西南交通大学机械工程专业,工程师。现在东方电机有限公司从事强度振动研究试验工作。



相结合,尤其是对动力有限元分析效果显著<sup>[6]</sup>。本文主要通过利用有限元理论,研究动力学的模态分析。

## 1 力学有限元分析

在经典力学理论中,物体的固有模态力学方程为:

$$[M](\ddot{x}) + [C](\dot{x}) + [K]\{x\} = 0 \quad (1)$$

其中 $[M]$ 为质量矩阵, $[C]$ 为阻尼矩阵, $[K]$ 为刚度系数矩阵, $\{x\}$ 为位移矢量。

用标准特征值来求解上式,可得到:

$$(-\omega^2[M] + [K])\{\varphi\} = \{0\} \quad (2)$$

考虑预应力问题的特征值方程是:

$$(-\omega^2[M] + ([K] + [K]_D))\{\varphi\} = \{0\} \quad (3)$$

这里 $[K]_D$ 是微分刚度矩阵,在线性分析中,假设 $[K]$ 为一个常量矩阵,且该矩阵必须是连续的,同时材料必须满足线弹性、小变形理论,且边界条件允许包含非线性的边界条件。此时不包括惯性(如质量、阻尼等)其他影响因素。

### 1.1 模态分析概述

对于模态分析,振动频率 $\omega_i$ 和模态 $\varphi_i$ 是由下面的方程计算出:

$$([K]) - \omega_i^2[M]\{\varphi_i\} = 0 \quad (4)$$

模态分析的最终目标是识别出系统的模态参数,为结构系统的动力特性分析、振动故障诊断和预报、结构动力特性的优化设计提供依据。

### 1.2 模态分析概述

Lanczos 方法和里兹向量<sup>[7]</sup>直接叠加法所应用的计算方法,本质上是相同的。里兹向量直接叠加法的基本原理是,根据特定的载荷空间分布模式,按照一定规律产生一组可以相互正交的里兹向量,这种可以相互正交的里兹向量在 Lanczos 方法中称为 Lanczos 向量,在将原有动力学方程,通过里兹向量空间进行转化之后,只需要求解一次缩减之后的标准特征值问题,再通过坐标变换,就可得到原有动力学方程的部分特征解。该方法不需像反迭代法或子空间迭代法的多次迭代,所以称之为里兹向量直接叠加法。

里兹向量直接叠加法好 Lanczos<sup>[8]</sup>方法的具体差

别在于 Lanczos 方法中利用了里兹向量直接叠加法中的系数 $\alpha_{ij}$ 的某些性质。

$$\alpha_{ij} = 0 (j = i - 3, i - 4, \dots, 1) \quad (5)$$

$$\alpha_{i,i-1} = \beta_{i-1} \quad (6)$$

将以上两式引入里兹向量直接叠加法,从而得到 Lanczos 向量的相应计算方法。相比较子空间迭代法而言,里兹向量直接叠加法则具有更高的计算效率。

## 2 有限元计算

### 2.1 有限元计算模型

发电机是一个复杂的装配系统,包含转轴、定轴、转子支架、定子支架、磁钢、定子铁心、轴承、轴承压圈把和螺栓等部件。

在整个计算模型建立过程中,必须对该模型进行了必要的简化:模型中去掉结构中不涉及分析的螺栓孔、连接螺栓、垫片等;对小尺寸且不影响模型有限元计算表现的倒角和圆角进行删除简化;对轴承的滚子采用 link180 单元进行简化,并赋予相关的截面属性;将磁钢和定子铁心用单一圆柱体进行材料的简化,其它部件保持不变。

建立的几何模型如图 1 所示,电机有限元模型剖面如图 2 所示。网格划分过程中,综合采用 Sweep Method、Hex Dominant Method 以及 Tetrahedrons 等局部有划分方法,采用 Face eshing 映射划分和采用 Edge Size、Body Size 等进行细节控制。采用单元类型主要有 Solid186, Solid187, Link180, Beam188。

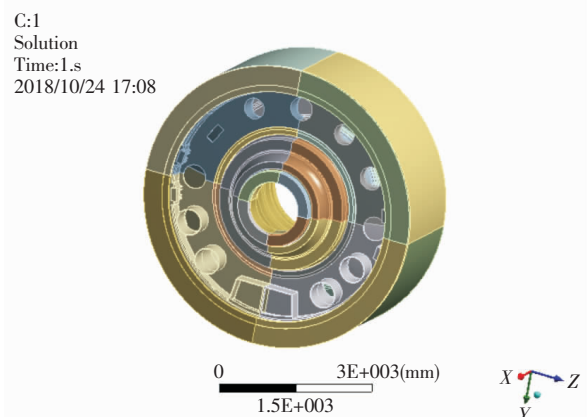


图 1 几何模型

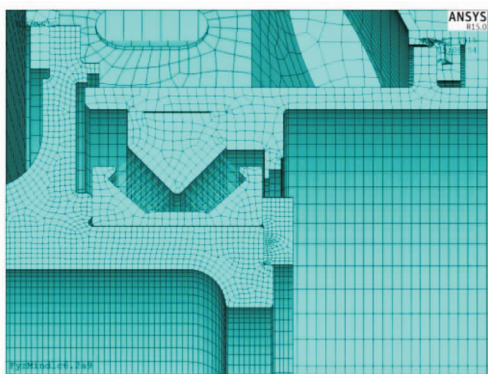


图2 有限元模型剖面图

接触对设置:

(1) Bonded 接触

主要用于转轴与转子支架、转子支架与磁钢、定轴与定子支架,定子支架与定子铁心、轴承压圈与转轴等螺栓把合位置的约束。

(2) Frictional 接触

主要用于定、转轴与轴承内外圈、转轴与轴承压圈之间的配合。强度计算中,定、转轴与轴承内外圈、转轴与轴承压圈之间的过盈配合根据设计要求按最大过盈量设置。具体的过盈量参数设置见表1。

表1 过盈量参数设置

配合位置	最大过盈量	最小过盈量
驱动端轴承内圈与转轴	0.742 5	0.525
驱动端轴承外圈与定轴	0.435	0.23
非驱动端轴承内圈与转轴	0.742 5	0.525
非驱动端轴承外圈与定轴	0.357 5	0.165
非驱动端轴承内圈与轴承压圈	0.5	0.3

2.2 边界条件

模态分析的边界条件为,发电机平放于支撑面,即约束其驱动端的竖直方向。重力垂直向下,见图3。

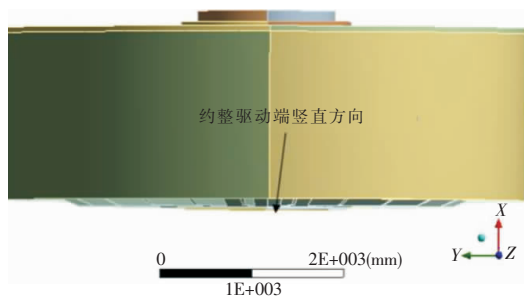


图3 模态计算的约束

在磁钢和定子铁芯上施加转子永磁磁钢和定子铁芯上均布的磁拉力,以及由于加工、装配、转子支架和定子支架自身的变形导致的偏心磁拉力。定子铁芯上的磁拉力施加详见图4,转子磁钢上的磁拉力施加详见图5。

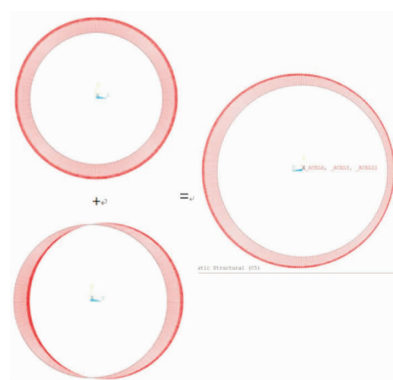


图4 定子铁芯上的磁拉力分布

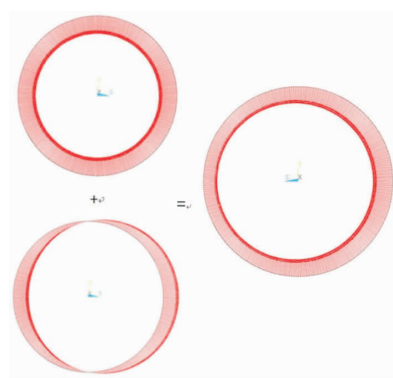


图5 转子磁钢上的磁拉力分布

表2 发电机材料机械特性表

部件名称	材料名称	弹性模量 (N/mm <sup>2</sup> )	质量密度 (kg/mm <sup>3</sup> )	泊松比
定轴	QT400	$1.69 \times 10^5$	$7.1 \times 10^{-9}$	0.27
定子支架	Q345E	$2.10 \times 10^5$	$7.85 \times 10^{-9}$	0.3
转轴	QT400	$1.69 \times 10^5$	$7.1 \times 10^{-9}$	0.27
轴承压圈	Q345E	$2.10 \times 10^5$	$7.85 \times 10^{-9}$	0.3
磁钢	/	$1.5 \times 10^5$	$5.9 \times 10^{-9}$	0.21
定子铁心	/	$1.5 \times 10^5$	$7.0 \times 10^{-9}$	0.21
转子支架	Q345E	$2.10 \times 10^5$	$7.85 \times 10^{-9}$	0.3

2.3 有限元计算结果

风力发电机平放于支撑面,在其驱动端施加竖直方向约束后,通过 ANSYS 软件,模拟仿真计算出风力发电机只考虑重力的固有频率以及电磁耦合固有频率。如图6~图9所示,其各阶固有频率见表3。

表 3 有限元计算结果 Hz

模态	只考虑重力的固有频率	电磁耦合固有频率
1 阶	38.698	39.644
2 阶	113.45	107.66

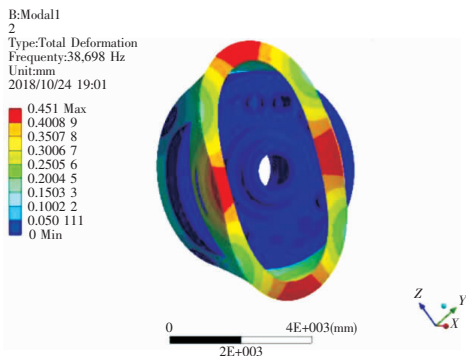


图 6 只考虑重力的固有频率频率 38.698 Hz 对应振型

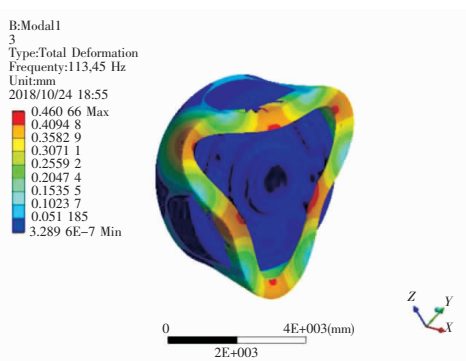


图 7 只考虑重力的固有频率频率 113.45 Hz 对应振型

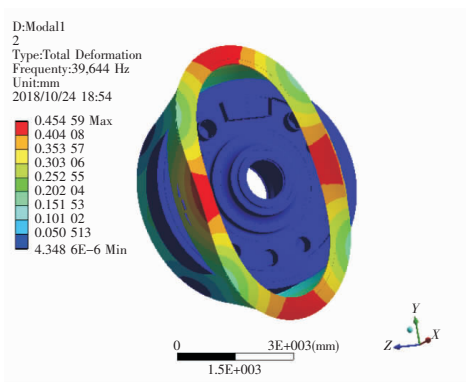


图 8 电磁耦合频率频率 39.644 Hz 对应振型

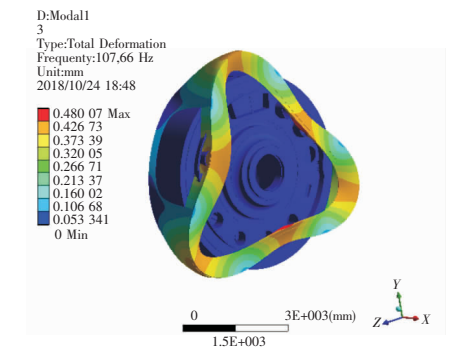
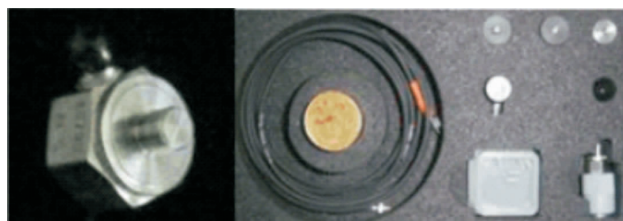


图 9 电磁耦合频率频率 107.66 Hz 对应振型

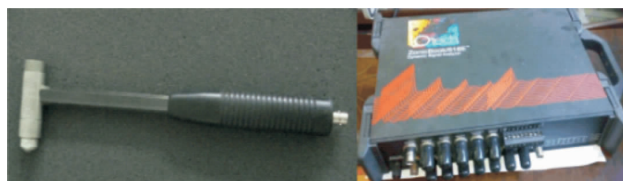
### 3 试验模态分析

#### 3.1 试验设备

该模态试验采用的设备如图 10 所示,有 PCB 加速器 A、力锤 B,数据采集器 C。



(a) PCB 加速器



(b) 力锤

(c) 数据采集器

图 10 模态试验设备

#### 3.2 试验原理

模态试验(modal test)又称试验模态分析。为确定线性振动系统的模态参数所进行的振动试验。模态参数是在频率域中对振动系统固有特性的一种描述,一般指的是系统的固有频率、阻尼比、振型和模态质量等。模态试验中通过对给定激励的系统进行测量,得到响应信号,再应用模态参数辨识方法得到系统的模态参数。

模态分析及参数识别是研究复杂机械和工程结构振动的重要方法,该模态实验采用的是数学上分离模态的方法,即对结构施加激励,测量系统频率响应函数矩阵,然后再进行模态参数的识别。为获得系统动态特性,常需要测量系统频响函数,本文通过单点激励多点测量(SIMO)确定频响函数。

本试验采用“多点激励单点响应”锤击法,通过力锤对端部绕组施加脉冲力激励,加速度传感器拾取振动响应信号,由接口箱将激振力和振动响应信号进行调理后送入计算机,计算机采集该激振力与振动响应信号,通过模态分析软件对测试数据进行分析处理,能获得模态参数:固有频率、阻尼比和模态振型。根据实际情况设置相应的测点,测点示意图见图 11。



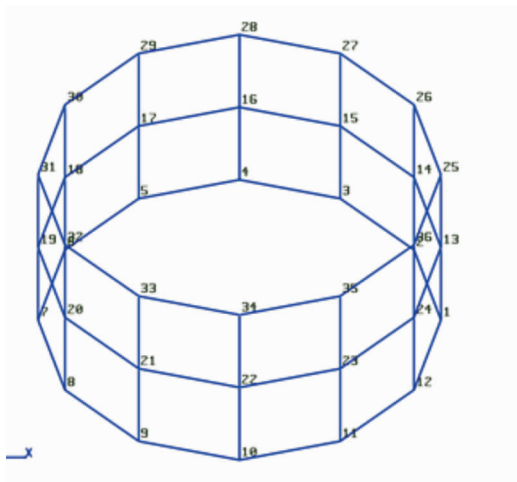


图 11 发电机模式试验测点示意图

### 3.3 试验结果

发电机的模式试验分析得到的模式频率表 4, 相应模式振型见图 12 至图 13。

表 4 模式试验结果

模式	试验实测频率 / Hz
1 阶	40.1
2 阶	103.9

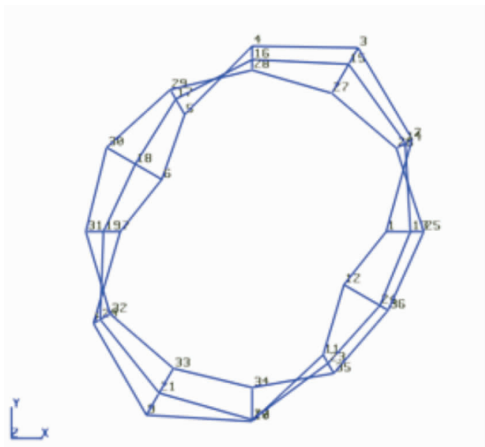


图 12 频率 40.1 Hz 对应振型

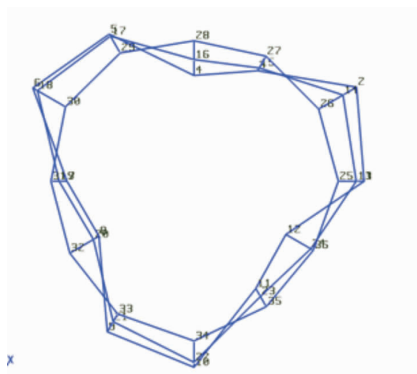


图 13 频率 103.9 Hz 对应振型

## 4 有限元计算结果与试验结果对比

通过有限元分析,计算得到发电机整机装配后只考虑重力的固有频率及电磁耦合固有频率的仿真值,模态试验实测得到发电机整机装配后的真实固有频率,将仿真结果和试验实测结果进行对比,见表 5。有限元计算频率与试验实测频率的偏差比较见表 6。

表 5 仿真计算固有频率与试验实测固有频率对比

试验实测频率 / Hz	有限元计算频率 / Hz	
	只考虑重力的固有频率	电磁耦合固有频率
1 阶	40.1	38.698
2 阶	103.9	113.45

表 6 有限元计算模态与试验模态偏差

	偏差 / %	
	只考虑重力的固有频率	电磁耦合固有频率
1 阶	-3.50	-1.14
2 阶	9.19	3.62

图 6、图 8 与图 12 的模式振型相对应,图 7、图 9 与图 13 的模式振型相对应。从表 5 可知,在一阶模态时,试验实测频率均比有限元计算频率高,在二阶模态时,试验实测频率均比有限元计算频率低。有限元计算频率中,电磁耦合固有频率更为接近试验实测频率。

## 5 结语

本文通过利用有限元方法计算得到的固有频率与试验实测频率的对比可知:

(1) 一阶频率,2 种有限元计算方法计算的值都偏小,且偏差均不大。

(2) 二阶频率,有限元计算方法计算值都偏大,其中电磁耦合计算方法偏差 3.62%,误差在工程上可接受,而只考虑重力的固有频率偏差达到了 9.19%,偏差大,计算结果不可靠。

(3) 电磁耦合计算方法得到的结果均和发电机整机装配实际频率较接近,误差在工程可接受范围内,计算结果可靠。

(4) 电磁耦合计算方法得到的机械刚度,可以用于响应分析。

因此,对永磁直驱式风力发电机的整机装配动

(下转第 46 页)



# VPN 在风电机组异地集中监控中的应用

李盛儒<sup>1</sup> 王明军<sup>2</sup>

1. 东方电气自动控制工程有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 酒泉职业技术学院, 甘肃 酒泉 735000

**摘要:**风电机组异地监控系统对加强风电场远程管理,降低机组运维成本,检查和排除机组安全隐患至关重要。通过虚拟专用网络(VPN)建立异地监控中心,既能达到节约成本的目的,又能满足国家电力监管委员会《电力二次系统安全防护规定》的要求。本文就通过 VPN 登陆方式建立风电机组的异地监控及其安全性进行分析和论述。

**关键词:**虚拟专用网络; 远程异地监控; 风电机组; 网络安全; SCADA 软件

中图分类号:TM614

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)04-0034-04

## Application of VPN in Centralized Monitoring of WTGs

LI Shengru<sup>1</sup>, WANG Mingjun<sup>2</sup>

(1. Dongfang Electric Automatic Control Engineering Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China;

2. Jiuquan Vocational Technical College, 735000, Jiuquan, Gansu, China)

**Abstract:** It is essential for off-site monitoring of WTGs to enhance remote management of wind farms, to reduce WTG operation and maintenance costs, to check and eliminate potential safety hazards. A remote monitoring center can not only achieve cost-saving purposes through a virtual private network (VPN), but also meet the requirements of the State Electricity Regulatory Commission's "Safety Protection Regulations for Secondary Power Systems". This paper analyzes and discusses the remote monitoring and safety of WTGs through VPN.

**Key words:** virtual private network (VPN); remote monitoring; WTG; network security; SCADA

每个风电场都有其各自的本地监控系统,该系统可通过机组控制器监测机组运行状态,并可对机组进行实时控制。风电场集中控制室的集中监控系统主要由 SCADA 监控软件和服务器组成,风电场集中监控系统通过 SCADA 监控软件,从每台机组的控制器中获得机组信息,如机组的发电量,故障信息及可利用率等,同时还可实现对每台机组的独立控制,如控制机组启停、控制机组有功和无功大小等<sup>[1]</sup>。

如异地集中监控中心能通过互联网连接到风电场,那么在全球各地经过授权的操作人员都能利用手机 APP 或远程监控系统,通过互联网登陆风电机组 SCADA 监控软件获得每台机组的各种信息,

从而可实现对风电机组的远程管理等:如通过修改参数等多种手段,判断机组故障和运行状态;实现机组远程检查、诊断和远程故障处理等,并实现机组在异地集中运维管理。异地专家可通过 SCADA 软件对现场机组运维进行指导,并可进行现场风电机组的远程故障诊断和故障处理,这些都有利于风电业主充分利用社会资源,降低其风电机组的运维成本。

陆上机组大都分布在风资源丰富且人迹罕至的偏远地区,随着我国风电行业发展的深入,海上机组和机组出口也不断增多,而风电公司的总部及大部分的技术人员大都工作、生活在远离风电场的某个城市,所以无论是实现风电机组的“集中

收稿日期:2021-06-01

作者简介:李盛儒(1984-),男,2007年毕业于燕山大学热能与动力工程,工学学士,高级工程师。现主要从事于风力发电机组所属变流器、主控、塔基控制柜与变桨等电控产品的技术管理工作。

监控,区域维修”降低机组运维成本;还是及时监控和了解机组运行状况改进产品质量等,均需通过远程监控系统才能得以实现。综上所述无论是对整机生产厂家,还是风电场业主,建立异地集中监控中心均具有极其重要的意义。

## 1 风电机组异地监控的安全要求

按照《电力二次系统安全防护规定》要求:电力二次系统安全防护工作应当坚持安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证的原则,保障电力监控系统和电力调度数据网络的安全<sup>[2]</sup>。

由于通过 Internet 远程访问很有可能造成数据泄密和被黑客攻击,所以按照电力二次安全防护要求,实现数据中间链路层防护可采用两种方式:数据专网和 VPN 虚拟专用网,然而租用数据专线不仅费用太高,而且很难实现世界各地的多用户登陆访问和充分利用社会资源、降低机组运维成本的目标,因此利用 VPN(虚拟专用网络, Virtual Private Network)是一种理想的选择<sup>[1]</sup>。

要让异地集中监控系统充分地发挥其应有的作用,不仅需要其具有远程控制和参数修改等功能<sup>[3]</sup>,还需其对风场就地监控中心的操作进行存储记录及提示指导等。异地集中监控系统的通讯设计、用于登陆风电机组的 SCADA 软件以及机组控制器系统的设计必须考虑人身、机组及电网安全等问题。同时为保证异地集中运维过程中的操作人员人身安全、机组及电网安全,需要设计机组运维的异地、风电场和本地的三级控制架构,即通过设置适当的控制级别和顺序,通常为现场控制级别最高,其次是风电场就地集中监控室控制,最后是异地集中监控中心的主站控制。

## 2 VPN 虚拟专用网络

VPN 是依靠 Internet 服务提供商和其它网络服务提供商,在公用网络中建立专用的数据通信网络的技术。虚拟专用网不是真的专用网络,但能实现专用网络的功能,在虚拟专用网中,任意两个节点之间的连接是利用公众网络资源动态组成,所以 VPN 网络具有投资小、安全性高、稳定性强以及接口与结构形式多样化的特性,从而为在公用 Internet

网络上安全地交换私有信息提供了一个经济有效的手段。

### 2.1 VPN 的安全保障

目前,采用 VPN 虚拟专用网可通过隧道技术、加解密技术、密钥管理技术、使用者与设备身份认证技术这四项技术,来保障风电机组远程登陆、操控及数据的安全。

VPN 可直接利用现有成熟的加解密技术,在公用 Internet 网中,密钥管理技术是以安全地传递密钥不被窃取为主要任务,如使用者的名称、密码或卡片式认证等方式则是最常用的身份认证技术。

网络隧道技术涉及到三种网络协议,即:网络隧道协议、隧道协议下面的承载协议和隧道协议所承载的被承载协议。网络隧道是指在公用 Internet 网上建立一条数据通道,也就是所谓的“隧道”,让数据包通过这条“隧道”进行传输,即:利用一种网络协议传输另一种网络协议。

构建远程访问虚拟专网(Access VPN)通常采用二层隧道协议,以用于传输二层网络协议,实现全国,乃至世界各地风电机组的集中监控,数据传输及在线获取等;实现机组的远程控制、调节以及上级调度的控制与调节;同时机组的所有操作和运行产生的数据等不仅会保存在被登陆机组的机组控制器中,还可由系统自动传给监控服务器;由于不同地点的多个用户可登录机组控制器,对机组进行远程操控以及对机组控制器内的控制参数进行修改,所以为保证机组操控及数据安全,对机组操控和参数修改应有严格限制和制约措施,即只允许少数用户具有修改和操控权限<sup>[4]</sup>。

VPN 连接方式利用风场已有网络的物理连接图如图 1 所示,该物料连接在数据安全性方面,按照 VPN 技术要求在数据网络中传输时,对数据进行加密和压缩每条传输信息提供了安全保证,同时在通讯两端还要加装防火墙,从而保证了风场异地监控系统的安全性。

利用上述的远程 VPN 风电机组登陆方式,一方面可实现机组数据在互联网上的安全传输;另一方面可将特定的计算机和服务器同风电场集控室的计算机和服务器组建成为一个虚拟内部网<sup>[5]</sup>,建立 VPN 网络,从而可大大降低机组营运费用,提高风

电企业的管理效率<sup>[6]</sup>。

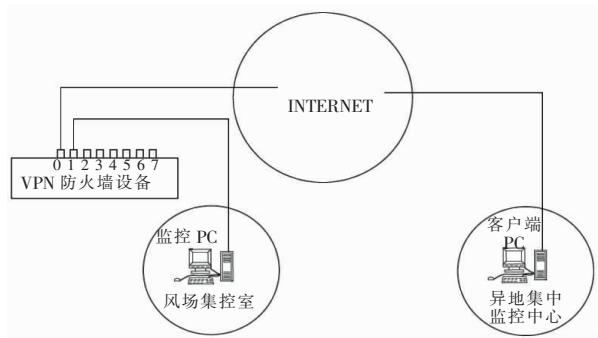


图1 VPN网络物理连接图

## 2.2 通过 SCADA 软件加密狗提高安全性

加密狗的基本功能通常是防止软件盗版,保护软件代码安全,在以安全为基础的前提下,可通过给 SCADA 监控软件设置加密狗的方法,进一步提高风电场集中监控和异地集中监控系统的安全性。

利用 USB 加密狗作为身份认证安全工具,它类似 U 盘,可通过 USB 接口与电脑进行连接。每只加密狗都具有独立的识别码,在用户在登陆平台时,只有检测到特定的加密狗和准确的物理验证后,才允许正常登陆。此外基于加密狗作安全工具,即便是用户帐号被病毒和黑客截取,但因为其没有硬件狗也将无法运行 SCADA 监控软件,对风电机组实施操控,从而可达到提高网络安全的目的。

## 2.3 VPN 已在银行系统中得到普遍应用

VPN 技术在现代银行网络系统中有着十分广泛的应用,对银行工作有着极大的帮助,同时对银行进步及发展有着很大的促进作用。

在当前的银行业务办理中 VPN 技术在保证数据安全传输方面起着极其重要的作用。从安全性来讲,银行系统对网络安全的要求很高,绝不亚于电力部门对网络数据传输安全的要求,对于银行系统,如果内部信息发生泄漏,或者出现混乱,将严重影响银行自身信誉,甚至影响国家和社会稳定<sup>[7]</sup>。

随着该行业的深入和不断发展,行业规定及思维观念也在不断更新,如在现代通信和互联网出现以前,银行存款、取款业务只能通过柜台当面直接办理,但随着 VPN 技术和公共互联网的发展,各种金融业务大都能通过网络办理,这极大地方便了顾客,减少了运营成本。风电机组大都分布于人迹罕

至的偏远地区,状态不定,这与银行顾客有着相似之处。

综上所述在建立风电异地集中监控系统时,可借鉴银行业务中 VPN 应用的成功经验,使 VNP 技术在风电行业中得到应用和发展,通过实现风场机组的远程管理和远程技术服务,以提高机组服务的有效性和及时性<sup>[8]</sup>。

## 2.4 VPN 是风电远程监控的发展趋势

如今,VPN 在我国风电机组的异地集中监控中不能得到广泛应用,究其原因可能为:担心通过公共互联网进行风电机组监控,尤其是实施机组的远程操控及修改相关参数时不够安全,可能危及机组和电网。通过前面介绍可知,VPN 技术能够为风电机组的异地监控系统提供足够的安全保障。

随着 VPN 技术的发展,在加密访问隧道的基础上,把访问控制、传输管理、加密、路由选择、可用性管理等多种功能进行了融合,在全球信息安全体系中发挥着重要作用<sup>[7]</sup>。某些国外知名的风电整机厂家已经通过 VPN 方式实现全球机组的远程集中监控多年,我国可借鉴国外先进整机风电企业的宝贵经验,在互联网已成为当今社会的信息基础设施的背景下,在此基础上构建异地监控系统,必将成为风电未来智能运维的发展趋势。

## 2.5 通过 VPN 建立异地集中监控中心应用举例

某风场异地集中监控中心的监控方案,以其 3 期风电场为例,下图 2 为其异地监控网络物理连接示意图,通过该网络业主运维人员在异地集中监控中心,可通过 VPN 通道对其 3 期风电场的监控电脑与集控室监控服务器进行访问,具体实施步骤如下:

(1) 选用安全可靠的知名品牌 VPN 防火墙设备,如“CISCO”、“华伟”等。

(2) 为 VPN 通道申请一个静态 IP 地址,客户端可通过固定 IP 地址搭建 VPN 通道,这样,一方面,可以避免动态 IP 地址冲突造成的 VPN 通道连接不稳定性;另一方面,保证 VPN 通道建立的便利性与安全性。

(3) 根据选定 VPN 防火墙设备的配置说明对防火墙设备进行配置,划分防火墙的内部端口与外部端口并设定权限、设置外部端口 IP 地址等信息、设置内部与外部端口之间访问规则、设置 VPN 通

道、设置 VPN 客户端访问用户名与密码。

(4) 在客户端电脑安装 VPN 防火墙设备的客户端软件、风电场监控软件客户端软件或 VNC 远程桌面监控客户端软件。

(5) 在客户端电脑通过 VPN 客户端软件建立 VPN 访问隧道,之后通过客户端风电场监控软件或 VNC 远程桌面监控软件实现对风电场 SCADA 服务器的数据访问或 SCADA 监控画面信息监控。

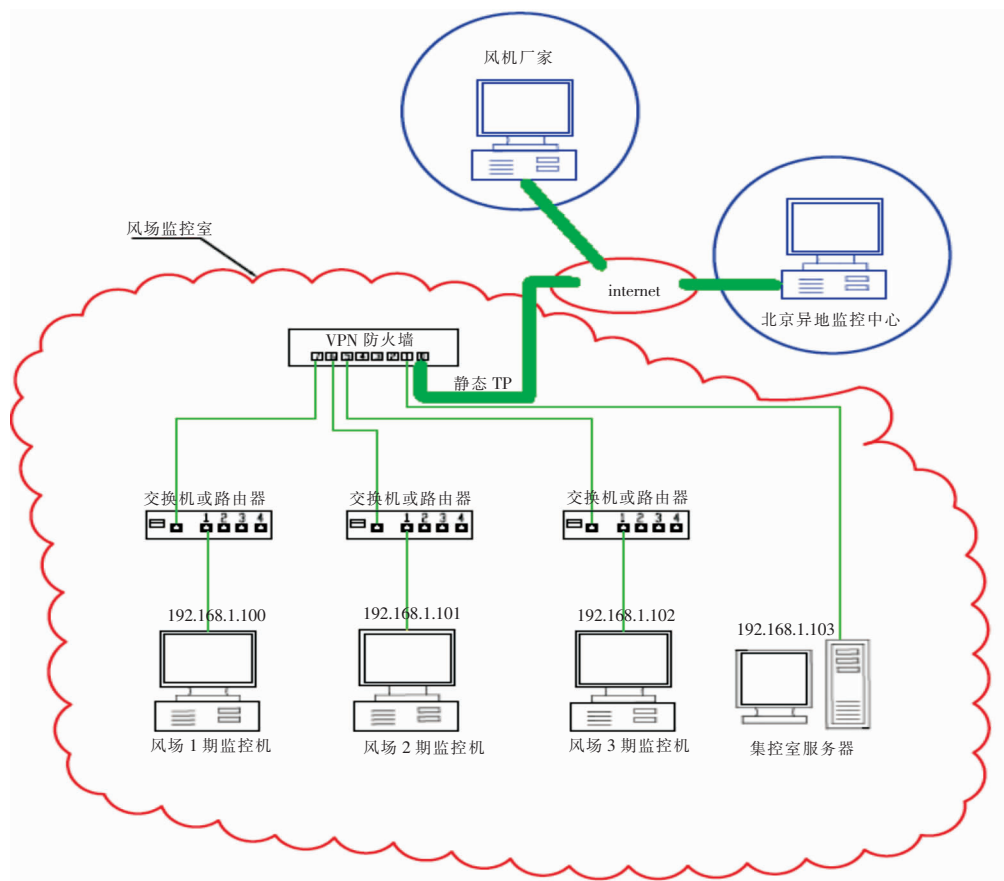


图2 VPN 网络应用实例

### 3 结语

利用 VPN 虚拟专用通道的异地远程 VPN 监控系统,可保证远程监控中心通讯的快速性、稳定性与可靠性。同时 VPN 监控系统还具有投资小、结构简单和配置方便快捷的特点,所以 VPN 虚拟专用通道在异地远程监控系统中的应用,可促进机组厂家对其产品进行迭代升级,与开发出更加符合市场需求风电机组产品,此外通过加强风电机组集中运维管理,可降低机组零散式的运维成本以,对我国风电行业的发展升级具有重要的意义。

### 参考文献:

[1]肖一卓,张天鸿. 风电场远程监控技术应用研究[J]. 河南科技, 2014(6):137

[2]国家电力监管委员会. 电力二次系统安全防护规定[R]. 2005  
 [3]金红,崔志光,单银忠. 风电场远程监控系统的设计与应用[J]. 河北电力技术,2013,32(6):23-25  
 [4]宋晓萍,廖明夫. 基于 Internet 的风电场 SCADA 系统框架设计[J]. 电力系统自动化,2006(17):89-93  
 [5]张可可,程占伟. 基于 IPSec VPN 的风机远程监控系统设计[J]. 电子设计工程,2014,22(20):139-141+145  
 [6]丁巧林,于力强,张哲. 基于 VPN 技术的风电场远程监控系统[J]. 机电信息,2011(3):30-31  
 [7]马辉. 银行网络系统中 VPN 技术的有效运用[J]. 中国新通信, 2015,17(19):81  
 [8]王明军. 风电机组远程故障处理及容错运行[J]. 风能. 2018(9): 68-71



# 智慧风电变流器 CANopen 通信开发

贺生鹏 吴小田 边晓光 蒲晓珉 周宏林

东方电气集团科学技术研究院有限公司,成都 611731

**摘要:**风电机组的智能化是风电行业的重要发展趋势,开发自主可控、灵活开放的变流器通讯系统成为重要任务。CANopen 通讯具有硬件结构简单、抗干扰能力强、实时性高等优势,因此广泛应用于工业控制领域。本文基于 TMS320F28377D 的 CAN (Controller Area Network) 模块开发 CANopen 通讯功能,使其能够应用于以 PLC(Programmable Logic Controller) 为主控制器的智慧风电控制系统中。最后通过实验验证了所开发通讯功能的可靠性和准确性。

**关键词:** CANopen; 变流器; PLC; CAN

中图分类号: TM614; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)04-0038-04

## Development of CANopen Communication Function for Wind Power Converter Control System

HE Shengpeng, WU Xiaotian, BIAN Xiaoguang, PU Xiaomin, ZHOU Honglin

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

**Abstract:** The intelligence of wind power system is an important trend, so the development of an independent, flexible and open converter communication system becomes an important task. CANopen communication has the advantages of simple hardware structure, strong anti-interference ability, and high real-time performance, so it is widely used in the field of industrial control. This paper developed CANopen communication function based on the CAN (Controller Area Network) module of TMS320F28377D, so that it could be used in wind power control systems with PLC (Programmable Logic Controller) as the main controller. Finally, the reliability and accuracy of the developed communication function were verified through experiments.

**Key words:** CANopen; converter; PLC; CAN

风电机组的智能化是风电行业的重要发展趋势,而风机的智能化发展必须在传统制造工艺过关的基础上,充分融合互联网技术创新,运用大数据、云计算等新一代信息技术,最终实现远程风机的后台监控和全生命周期管理,确保风机运行状态最优化。智慧风电场主要基于测控技术、通信技术、信息化技术、大数据处理技术以及各类智能算法,实现对风机控制的自动化、设备状态感知及判断智能化、运维决策智慧化。

变流器作为风电机组的核心部件,故障率相对

较高,信号非常丰富、控制周期短(百微秒级别),并且不同厂商的变频器通讯协议封闭,成为智慧风电系统接入的壁垒。为此需要开发自主可控、灵活开放的智慧风电变流器通讯系统成为重要任务。

控制器局域网(CAN, Controller Area Network)是 BOSCH 公司为现代汽车应用推出的一种多主机局域网,由于其卓越的性能已广泛应用于工业自动化、医疗仪器、环境控制等众多领域<sup>[1]</sup>。由于 CAN 的基本协议没有规定应用层<sup>[2]</sup>,导致各种 CAN 设备之间相互兼容性差,不利于 CAN 协议的推广和发

收稿日期:2021-05-21

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

作者简介:贺生鹏(1992-),男,2020年毕业于中国矿业大学电力电子专业,硕士,工程师。现就职于杭州茂力半导体技术有限公司。

展<sup>[3]</sup>。CAN 总线已经拥有多种应用层协议,例如 Devicenet、CANopen、SDS 协议<sup>[4-5]</sup>,其中 CANopen 通过 CAL 子集实现了通讯和系统服务以及网络管理方面的工作<sup>[6]</sup>,具有抗干扰能力强、短帧高效、高实时性等优点,广泛应用于汽车、传感测量等自动化控制领域<sup>[7]</sup>。

大部分国外风电系统中变流器和主控之间采样 CANopen 通讯协议,为实现国产化替代,本文在基于 TMS320F28377D 自主开发的变流器控制器上利用其 CAN 模块开发 CANopen 通讯协议,使其能够与 PLC (Programmable Logic Controller) 主控制器实现通讯,实现对变流器的实时控制和重要数据的传输。

### 1 硬件拓扑结构设计

随着《中国制造 2025》的出台,对风力发电机数字化、网络化、智能化提出了进一步的要求。智慧风电就是在此前提下发展出来的一种具有高度数字化、网络化和智能化的风力发电控制系统。智慧风电系统构架如图 1 所示,风力发电机组是一个复杂的系统,包括变流器系统、变桨系统、温度控制系统等多个子系统构成,这些子系统通过 CANopen 通讯与 PLC 主控连接,以此实现对各个子系统的控制和状态检测。PLC 主控通过 Modbus 协议与边缘网关连接,然后通过 5G 网络与云端连接,实现对风机运行状态的远程监测和控制,并且可以利用人工智能算法实现故障预警、功率预测等功能。

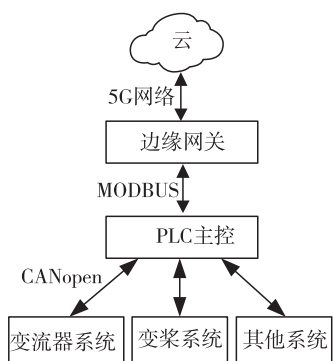


图 1 5G + 智慧风电系统构架

在本系统中,变流器控制器由 DSP 和 FPGA 共同构成,其中 DSP 选用 TMS320F28377D, CANopen 通讯功能基于 DSP 芯片自带的 CAN 模块开发(图 2)。

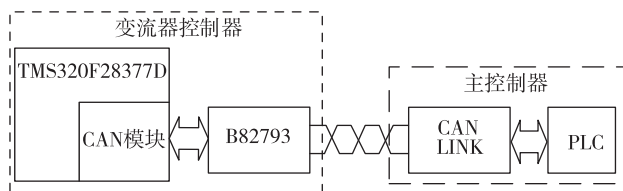


图 2 硬件电路拓扑

### 2 CANopen 通讯协议

CAN 现场总线是一种多主总线,通讯介质可以是双绞线、光纤或同轴电缆,可以实现对通讯数据成帧处理,包括位填充、数据块编码、循环冗余校验、报文优先级判别的功能<sup>[4]</sup>。CAN 总线上任意节点可以在任意时刻主动向网络发送报文,没有主次之分。

国际标准化组织(ISO)将通讯网络体系划分为七层,称为“七层模型”(OSI, Open System Interconnection),由物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层和应用层。CAN 总线只定义了其中的物理层和数据链路层,导致其在不同设备之间的通用性很差。为了解决此问题,开发了多种不同的应用层协议,而 CANopen 协议由于其开放性和非营利性,一经推出就受到了广泛的认可和应用。

对象字典(OD, Object Dictionary)描述了对应节点的所有参数和通讯数据存放位置,是 CANopen 协议中很重要的概念,并且以 EDS 文件(Electronic Data Sheet)的形式进行传递。对象字典的索引范围为 0000h 至 FFFFh,子索引范围为 00h 至 FFh,每个索引内的具体参数用一个最大 32 位的变量来表示。CANopen 协议的核心描述协议位 DS301,包含了对 CANopen 协议应用层及通讯结构的描述。不同行业编写的子协议是对 DS301 的补充和扩展。

CANopen 协议主要包含四种通讯报文,分别为预定义报文、管理报文(NMT, Network Management)、过程数据对象(PDO, Process Data Object)和服务数据对象(SDO, Service Data Object)。在本系统中,每种报文具体功能如下:

(1)NMT 报文可以对整个通讯网络进行管理,由 PLC 主站控制变流器通讯状态的切换,实现在预运行状态、运行状态和停止状态之间的切换。

(2)PCL 主控制器可以通过 SDO 报文对变流器

控制器关键控制参数进行配置以及一些对实时性要求较低的数据经行传输,例如变流器出入水口的温度和压力。当所需传输数据少于 32 位时可以使用快速 SDO 协议,但是若传输数据量较大(大于 32 位)时,就只能使用普通 SDO 协议。

(3)变流器通过 PDO 报文向 PLC 主控制器传输实时数据,包括电网侧无功功率、电网侧电压电流、机侧电压电流、各个错误标志位等对实时性要求较高的数据。PDO 报文分为发送 TPDO 和接收 RPDO 两种,一个 PDO 报文最多传送 8 字节数据。PDO 报文传输形式有两种形式,分别为:同步传输和异步传输。异步传输主要可以提供特定事件触发,而在本系统中对传输数据实时性要求较高,所有选择使用同步传输方式。

(4)PLC 主控制器通过发送预定义报文 SYNC 报文控制变流器同步发送 PDO 报文,以实时传输所需控制数据。

### 3 本系统 CANopen 通讯组网过程

在 CANopen 通讯协议中,利用 11 位标准 CAN-ID 作为标识符,称为 COB-ID(Communication Object Identifier),并将其划分为两个部分,即功能码和节点号。其中功能码为 4 位,用以标示报文功能;节点号为 7 位,与通讯网络中每一个节点唯一对应,如图 3 所示。

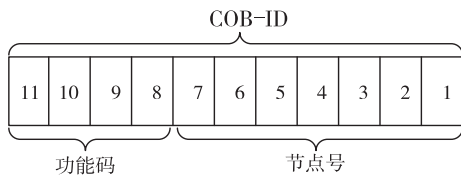


图 3 COB-ID 组成示意图

本系统所设计 CANopen 通讯组网过程如图 4 所示。从站(在本系统中为变流器控制器)上电后完成节点初始化,向主站(在本系统中为 PLC 主控制器)发送节点上线报文,具体报文如表 1 所示,然后从站自动切换至预操作状态。在预操作状态中,主站首先通过 SDO 报文读取从站设备名称,若名称正确则通过 SDO 报文对从节点相关参数进行设置。设置完成后主站发送 NMT 报文使从站切换至运行状态。进入运行状态后,主站发送 SYNC 同步报文,如表 2 所示,所有从站同步通过 PDO 报文向主站发

送数据,例如控制状态字、实际转矩、实际转速、实际直流母线电压、电网频率等。之后主站通过 PDO 报文向各个从站发送数据,例如控制字、给定转矩、给定转速、给定无功功率等。当系统出现故障或者停机时,主站发送 NMT 报文使各个从站进入停止模式。在整个通讯过程中,从站会以一定时间间隔发送心跳报文,报文内容根据从站所处不同状态而不同,如表 3 所示,以此实现主站对节点运行状态监测。

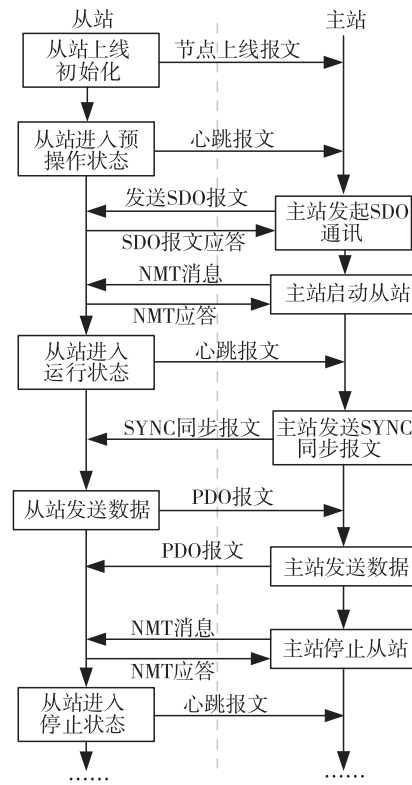


图 4 所设计 CANopen 通讯过程

表 1 上线报文

COB-ID	报文内容
0x700 + 节点号	0x00

表 2 SYNC 同步报文

COB-ID	报文内容
0x80	无

表 3 心跳报文

COB-ID	报文内容
0x700 + 节点号	0x04(停止状态)
	0x05(运行状态)
	0x7F(预操作状态)



#### 4 基于 CANopen 与变流器通讯功能验证

变流器控制器使用 TMS320F28377D 作为主控芯片, CANopen 通讯利用 DSP 自带的 CAN 模块作为硬件基础, 其与 PLC 主控制器所连接的 CAN LINK 模块相连接。CAN 板卡并联在此通讯网络中, 用来监视通讯报文, 方便系统调试(图 5)。

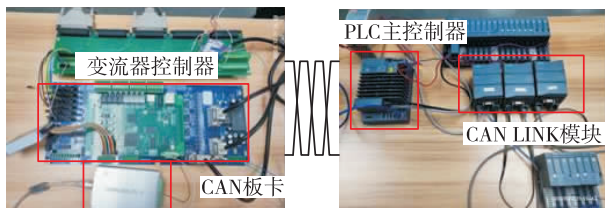


图 5 系统硬件结构图

变流器控制器与 PLC 主控之间的数据通讯主要利用 PDO 报文, 传输报文的内容主要有 BOOL 类型的状态量和整形类型的数据量两种, 如表 4 所示。表 4 中列出了部分部分传输报文的内容和其数据类型, 由于在 DSP 程序中转矩、电机转速、电流电压等数据为浮点型, 所以在传输时需要在精度允许的前提下进行数据转换, 而 BOOL 类型的状态量需要拼接成整形字节才能传输。

表 4 部分通讯数据

报文	Bit	描述	类型
TPDO1. WORD0	0	变流器运行信号	BOOL
	1	网侧运行信号	BOOL
	2	机侧运行信号	BOOL
	3	Chopper 触发信号	BOOL
...	.....	.....	.....
TPDO1. WORD1	0~15	实际转矩	INT
TPDO1. WORD2	0~15	电机转速	INT
.....	...	.....	.....

利用 CAN 板卡抓取两者通讯报文如图 6 所示, DSP 从站和主站的 CAN LINK 模块可以正常通讯。同步 PDO 报文后从站依次发送 4 个 PDO 报文。

序号	传输方向	时间标识	帧ID	帧格式	帧类型	数据长度	数据(HEX)
00009...	接收	17.32.5...	0x00000381	数据帧	标准帧	0x08	34 92 34 13 34 14 34 15
00009...	接收	17.32.5...	0x00000481	数据帧	标准帧	0x08	34 16 34 17 01 00 34 18
00009...	接收	17.32.5...	0x00000201	数据帧	标准帧	0x08	01 10 00 60 00 20 64 00
00009...	接收	17.32.5...	0x00000201	数据帧	标准帧	0x08	01 10 00 60 00 20 64 00
00009...	接收	17.32.5...	0x00000800	数据帧	标准帧	0x00	
00009...	接收	17.32.5...	0x00000080	数据帧	标准帧	0x06	46 00 34 12 34 22 34 32
00009...	接收	17.32.5...	0x00000281	数据帧	标准帧	0x08	34 42 34 52 34 62 34 72
00009...	接收	17.32.5...	0x00000381	数据帧	标准帧	0x08	34 92 34 13 34 14 34 15
00009...	接收	17.32.5...	0x00000481	数据帧	标准帧	0x08	34 16 34 17 01 00 34 18
00009...	接收	17.32.5...	0x00000201	数据帧	标准帧	0x08	01 10 00 60 00 20 64 00
00009...	接收	17.32.5...	0x00000201	数据帧	标准帧	0x08	01 10 00 60 00 20 64 00
00009...	接收	17.32.5...	0x00000701	数据帧	标准帧	0x01	05

图 6 CAN 板卡抓取的部分报文

通过 PDO 报文实现数据通讯结果如图 7 所示, DSP 从站发送到 PLC 主站的数据如图 7(a)所示, 图 7(b)为 PLC 主站接收的 PDO 报文数据, 当主站发送同步 PDO 报文后, 从站发送 4 个 PDO 报文, 对比发送和接收数据, 发现两者一致。

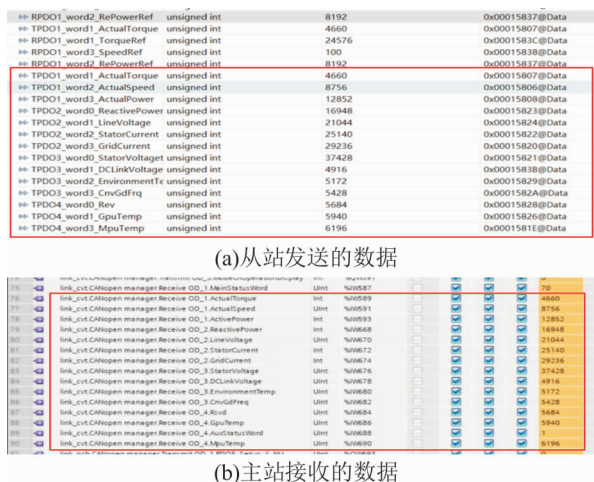


图 7 PDO 报文通信数据

图 8 为通过 SDO 报文实现数据通讯结果, 图 8(a)为 DSP 从站发送到 PLC 主站的数据, 图 8(b)为 PLC 主站接收到的 SDO 报文数据, 通过对比可以发现发送和接收数据一致。

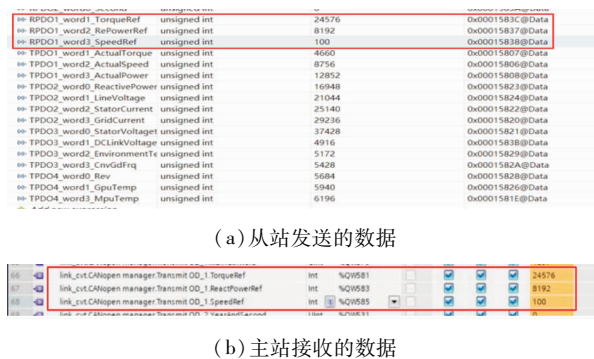


图 8 SDO 报文通信数据

#### 5 结语

本文首先介绍了 CANopen 通讯协议和其硬件基础, 然后介绍了 CANopen 通讯协议在变流器控制中的组网过程和部分重要报文的报文结构。最后通过实际变流器控制器和 PLC 主控制器组网, 实现两者之间的 CANopen 通信, 通过上位机和 CAN 板卡抓取的报文可以验证通讯数据的正确性, 验证了本文所设计的通讯系统的有效性。

(下转第 84 页)



# 发电装备焊接自动化发展研究

董娜<sup>1</sup> 陈弈<sup>1</sup> 张媛<sup>1</sup> 王大勇<sup>2</sup> 王林森<sup>3</sup> 冯涛<sup>4</sup> 钟磊<sup>4</sup> 金宝<sup>4</sup>

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000;

3. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 611731; 4. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**发电装备制造是我国机械工业的支柱产业之一,焊接是发电装备制造的关键工艺。由于发电装备体积庞大、使用环境复杂、焊接要求高等特点,使得发电装备的焊接具有诸多难点。在数字化转型和绿色低碳转型战略指引下,中国东方电气集团在发电装备焊接自动化发展方向持续探索和突破,取得了一系列成果和经验。本文对东方电气集团发电装备制造案例进行分析,提出发电装备行业焊接自动化发展的建议。

**关键词:**发电装备; 焊接; 自动化; 数字化

中图分类号: TG409

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)04-0042-05

## Research on Development of Welding Automation of Power Generation Equipment

*DONG Na<sup>1</sup>, CHEN Yi<sup>1</sup>, ZHANG Yuan<sup>1</sup>, WANG Dayong<sup>2</sup>,  
WANG Linsen<sup>3</sup>, FENG Tao<sup>4</sup>, ZHONG Lei<sup>4</sup>, JIN Bao<sup>4</sup>*

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

2. Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China;

3. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

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

**Abstract:** The manufacturing of power generation equipment is one of the pillar industries of China's machinery industry, and the welding is very important in the manufacturing of power generation equipments. Due to the characteristics of large volume, complex operating environment and high stability requirements of power generation equipment, the welding manufacturing of power generation equipment has many difficulties. Under the strategy of digital transformation and green/low-carbon transformation, Dongfang Electric Group has made continuous exploration and breakthrough in the direction of welding automation, and achieved a series of achievements and experiences. This paper analyzes the cases of power generation equipment manufacturing of Dongfang Electric Group, and recommends suggestions on the development of welding automation of power generation equipment industry.

**Key words:** generation equipment; welding; automation; digitization

发电装备制造业是我国机械工业的支柱产业之一,是电力工业的主要组成部分,对整个国民经济快速、持续、稳定地发展起着重要作用。建国至今,发电装备制造业在国家重视和支持下已取得飞跃发展,具备了水、火、核、风、光、气等制造能力。

大型煤电机组、水电机组、核电装备设计及制造能力目前均处于世界领先地位。

我国大型发电装备领域三大龙头企业为中国东方电气集团、哈尔滨电气集团、上海电气集团,三大集团发电装备制造技术优、产品种类多、装机总

收稿日期: 2021-11-04

作者简介: 董娜(1980-),女,2010年毕业于哈尔滨工业大学材料加工工程专业,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主要从事智能制造、焊接自动化技术及管理工作。

量高,在发电装备市场上竞相角逐。中国东方电气集团(以下简称“东方电气”)拥有水电、火电、核电、气电、风电、太阳能发电装备的研制能力,发电设备产量累计到达6亿千瓦时,已连续17年发电设备产量位居世界前列。

发电装备的发展推动了制造技术向自动化、数字化、智能化方向发展,形成了一系列典型应用案例,自动化水平显著提升,特种高效新工艺应用日趋普遍,但也不可避免的出现了过分依赖自动化设备而轻视工艺研发,过分要求自动化焊接设备具有高柔性多功能而导致“难用”等问题。本文旨在以东方电气集团发电装备制造过程中的焊接产业为例,对发电装备行业焊接自动化发展进行探索分析,总结成功经验,剖析问题、难题,对发电装备焊接自动化提出建议。

## 1 发电装备焊接概述

发电装备产品类型多,锅炉,汽轮机,燃气轮机,水轮机,核岛蒸汽发生器等所有发电设备关键部套制造均离不开焊接工艺,焊接在发电装备产品中的应用实例见图1。但发电装备使用环境复杂,煤电、风电、光伏、核电等机组长期服役于户外环境,承受高温、高压、腐蚀蒸汽、核辐射等恶劣环境,对装备产品焊接接头的材料、缺陷情况、室温强度、蠕变持久性能、耐腐蚀性能、耐冲刷性能等要求均较高。发电装备焊接具有以下特点:

(1)焊接接头涉及的材料种类多,碳钢、低合金钢、高合金耐热钢、不锈钢、高温合金、钛合金、铜合金等均有涉及<sup>[1]</sup>。

(2)制造加工方式主要为单件小批量及离散制造方式。

(3)部分产品制造作业空间有限,作业环境差。

(4)很多装备超宽超重,需要专门研发焊接专机等才能进行焊接。

(5)手工电弧焊占比6%、半自动焊接70%、自动化焊接占比23%。

(6)氩弧焊、焊条电弧焊、埋弧焊等常规工艺为主,激光焊接、激光熔覆、电子束焊接、微弧等离子焊接、电弧增材、窄间隙焊接等特种焊接工艺应用越来越广泛。但激光、电子束、微弧等离子等高能束工艺面临效率、质量及成本等综合权衡的难题;电弧增材工艺面临工艺不成熟,控形控性难度极大的问题;窄间隙焊接工艺面临对焊材品质要求高,且一旦出现缺陷难于返修且返修成本极高的问题。

(7)一线焊接操作人员年龄普遍偏大,愿意从事焊接工种的人越来越少。

(8)部分产品对焊接操作技能要求高,但目前仅少数人能胜任,技术传承断档。

(9)电厂检修对周期控制越来越严格,以往焊机+简易热处理工具+焊工+钳工+热处理工的现场焊接修复组合越来越无法满足要求。

数字化焊接依托计算机与网络技术实现焊接全过程数字化控制,达到自动焊接目的,实现焊接设备制造模块化、工艺参数专家化、过程控制数字化、生产过程智能化以及技术管理网络化等,提高了产品质量和使用寿命、减少了材料损耗、降低了生产成本,提升了装备制造业整体水平<sup>[2]</sup>。通过以上特点分析,发电装备推行焊接自动化、数字化及智能化发展是必经途径。



图1 焊接在发电装备产品中的应用实例

## 2 东方电气集团发电装备焊接自动化实践探索

深化落实碳达峰碳中和战略目标,为能源消费和能源产业带来了重大的变革和挑战。对发电装备行业来说,一方面,装备产品将朝着“大容量、高参数、高效率和超净排放”方向发展,进一步降低发电行业的二氧化碳和污染物的排放水平;另一方面,装备制造环节将朝着低能耗低排放方向发展,采用先进的加工制造技术,进一步降低制造环节的能耗、减少污染排放。另外,作为高端装备制造的重要组成部分,发电装备制造业也逐步进入数字化

转型快速发展期,通过深化数字技术在生产、运营、管理和营销等诸多环节的应用,实现企业降低成本、提高质量、提升效益,从单机台自动化、产线自动化、特种高效新工艺应用、可移动自动化焊接设备四个层面推进焊接自动化转型。

### 2.1 单机台自动化推进实践

东方电气积极推进焊接工作站的改造提升,从原来以工人实施焊接的制造方式转变为现在的自动化焊接的方式,焊接效率明显提升,焊接质量有效提高,工人劳动强度和劳动环境得到极大改善,取得显著成效。部分应用及取得成效如表1。

表1 单机台自动化典型推进案例

项目名称	工作范围	焊接方式	适用产品	实施效果	实施案例图例
十轴倒挂式机器人焊接工作站	14 m × 14 m × 5 m	GMAW、GTAW、座环、转轮、铝青铜窄间隙 GMAW	堆焊	(1)焊接效率提升 30% ; (2)焊接一致性好,探伤合格率明显高于人工; (3)使工人远离狭小恶劣的焊接环境。	
集箱长管接头智能焊接机器人工作站	6 m × 6 m × 5 m	GMAW	锅炉集箱长管接头及大管座自动焊接	(1)焊接效率提升 35% ; (2)焊缝质量大幅提高且稳定; (3)人工劳动强度大幅降低。	
隔板叶栅自动 TIG 焊工工作站	6 m × 6 m × 5 m	热丝 TIG	汽轮机隔板叶栅、燃气轮机压气机静叶栅等	(1)焊接效率提升 45% ; (2)焊后工件尺寸一致性好,变形降低 50% ; (3)单个工件焊工由 2 人(对称施焊)减为 1 人。	

### 2.2 产线自动化推进实践

东方电气开发了集箱短管座机器人焊接产线(图2),由一台装配机器人和两台焊接机器人替代了人工装配和焊接,实现了全自动装配和焊接,焊接过程数据全记录、可实时和追溯查看等功能;并自主开发了智能化离线排道子系统,大幅提高了焊接质量。

### 2.3 高效特种新工艺推广应用实践

东方电气积极推动特种高效焊接工艺的应用,包括机器人窄间隙气保焊、微弧等离子修复、激光焊、双丝焊工艺等。新工艺与焊接机器人的结合,大幅提升了焊接质量与效率。典型案例及应用效



果见表2。



图2 集箱短管座机器人焊接产线全貌



表2 高效特种新工艺应用距离

工艺名称	适用产品	实施效果	实施案例或说明图例
激光 焊接	燃气轮机 燃烧室等 薄壁零件	(1)焊接时间缩短为原来的1/24; (2)焊接变形减少80%,且避免出现不可校正的死弯; (3)无需添加焊材,节省进口焊材费用; (4)工装夹具费用降低90%	
	汽轮 发电机 转子、 阀门等	(1)焊接时间缩短为原来的1/4; (2)焊材用量较低为原来的1/5; (3)焊缝质量大幅提高且稳定,RT检测合格率由原来的60%提高到99%; (4)人工劳动强度大幅降低。	

### 2.4 可移动自动化焊接设备推广应用实践

当前形势下,各发电厂检修时对检修周期等的要求越来越高,传统的人工焊接返修方式已经无法满足电厂的要求,因此移动式焊接修复专机、移动式焊接机器人工作站甚至“移动工厂”等应运而生,东方电气集团与外部单位合作,也进行了移动机器人工作站等的推广应用,典型案例如图3所示。

该工作站配备激光熔覆系统、变位机、激光焊接系统、移动小车、集装箱、三维扫描设备、离线编程软件等,另同时配备了员工休息室、工具室,已具备“移动工厂”雏形,可快速运至电厂现场进行汽轮机转子、叶片等的检修。

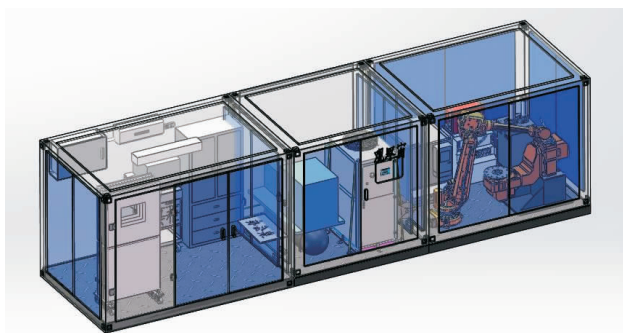


图3 移动式机器人工作站

在焊接自动化提升取得成效的基础上,东方电气积极推行焊接数字化车间建设,旗下各企业焊接分厂均通过数字化提升,实现了车间焊接设备物联监控、焊材及能耗等实时统计、焊接工艺下达、柔性排产及焊接质量追溯等功能,焊接效率及质量大幅提升;探索实施焊接质量大数据评片、焊接工艺专家库、多传感器融合等焊接智能化,引领发电装备自动化和智能化焊接技术的发展,实现高效、高质

的焊接制造目标,推动全集团数字化工厂建设。

### 3 发电装备焊接自动化焊接难点及痛点

经过多年的推广实践,东方电气集团发电装备自动化焊接已经初见成效,但在推进以及后续使用过程中仍发现以下难点及痛点:

(1)过分依赖自动化焊接设备或特种高效焊接

采用了自动化焊接设备后,过分关注设备操作、编程及维护保养,忽视工艺研发,对如何实现更高焊接效率、如何更好控制焊接变形、如何更好保证焊接质量关注较少。

采用特种高效焊接工艺后,沉浸于解决了某一方面的难题,对成本及效率方面考虑过少,同时缺乏系统深入的焊接机理研究及焊接接头性能研究,一旦出现问题,难于快速排查解决。

(2)过于追求自动化焊接设备高柔性

发电装备产品绝大部分为单件小批量,种类繁多,如均采用专机,则成本太高,基于经济性的考虑,使用单位在提需求时偏向要求自动化焊接设备具有高柔性,能焊接的产品种类越多越好,能使用的焊接工艺越多越好,导致最终的设备“四不像”的问题越来越突出。如某设备集成了激光焊接、熔覆、淬火三种工艺,要求能实现薄壁件激光焊接、高附加值产品激光熔覆修复、模具淬火等多种功能,在有限的预算下,最终的设备看似功能强大,实则无法做好产品。

(3)可能增加生产工序及成本

自动化焊接时,对待焊接坡口表面状态、装配精度等要求明显高于手工焊接,某些场合下迫使焊



前下料方式由火焰切割改为机械加工,且增加了工装夹具,对成本及周期均造成了不利影响。

#### (4) 缺乏科学系统的专业性焊前培训

目前针对手工焊接有专业系统且严格的焊前培训取证流程,但针对自动焊,并无相对应的流程,导致自动焊焊工仅是设备的操作工,对整个焊接过程了解极为有限。

#### (5) 缺乏基本的熔池监控手段

目前的自动焊设备中,缺乏视觉手段,即使有也大部分是辅助工人操作,不具备熔池视觉特征提取、焊缝成型控制等功能。

### 4 发电装备焊接自动化发展建议

基于东方电气在发电装备焊接自动化发展中的实践探索,对发电装备焊接自动化发展给予以下建议:

加强顶层设计:自上而下开展焊接自动化转型蓝图规划,做好发电装备焊接自动化升级的顶层设

(上接第33页)

力特性分析研究时,需考虑重力、转子永磁磁钢和定子铁心的均布磁拉力,以及由于加工、装配、转子支架和定子支架自身的变形导致的偏心磁拉力的影响。

#### 参考文献:

- [1] 马宏忠,李思源. 双馈风力发电机轴承故障诊断研究现状与发展[J]. 电机与控制应用,2018,45(9):117-124
- [2] 倪振华. 振动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986

计,围绕焊接生产降本提质增效以及全生产过程的绿色低碳环保进行系统性分析,从整体上统一建设路线。

加强工艺研发及焊工技能培训:转变过去手工焊接思路,进行自动焊工艺研发,结合应用场景,更深入了解自动焊工艺过程,丰富自动焊工取证培训内容,使焊接相关人员做自动焊设备的主导者而不是辅助者。

不为了自动化而自动化:充分论证设备功能,不过分追求高柔性化,充分论证采用自动焊接工艺对整个生产制造流程的影响,做专、精、优且高性价比的自动化焊接设备。

#### 参考文献:

- [1] 葛红花,廖强强,张大全. 火力发电工程材料失效与控制[M]. 化学工业出版社,2015:289
- [2] 赵虎林,苟藏红. 数字化技术在焊接工艺中的应用[J]. 现代制造技术与装备,2019(1):146-147
- [3] 陈德强. 风力发电机的振动危害及监测[J]. 科技展望,2016,26(16):94
- [4] 曹人靖,刘道兴. 水平轴风力机风轮静态结构特性试验研究[J]. 太阳能学报,2001(4):436-439
- [5] 李源,陈昌林,谭恢村. 直驱风力发电机组强度振动特性分析及优化设计[J]. 东方电气评论,2015,29(2):67-71+75
- [6] 邓凡平. ANSYS10.0 有限元分析自学手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2007
- [7] 彭斌,张立翔. 基于 ANSYS 的风力发电机叶片的模态分析[J]. 中国水运(下半月),2018,18(10):120-122
- [8] 王勛成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社,2003

### 集团要闻

## 定制公交“氢”装上线 助力市民低碳出行

11月1日,搭载东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司新一代 VM60 氢燃料电池发动机的 19 台氢能公交车在成都市 D705 定制公交线路正式投入运营,该线路的开通是四川省、成都市落实“碳达峰、碳中和”国家战略的具体体现,将服务于成都市中心城区与郫都区之间的快速通勤,为成都市发展注入新的氢动力。

定制公交搭载的 VM60 氢燃料电池发动机是在四川省科技厅重大专项支持下,由东方氢能自主研发制造,充分运用精细化水热管理、无损启动控制、环境自适应以及基于大数据分析等先进技术,系统集成度高,环境适应性强,具有极高的可靠性和安全性。同时,VM60 系统核心重要零部件均实现了国产化,并经过大量循环工况耐久性测试,技术指标均超过设计要求。

来源:东方电气网

# 锅炉行业进口大口径管采购困境及对策

罗伶俐

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 611731

**摘要:** 本文对进口大口径管(SA-335P92等材质)采购现状和面临的采购困境进行了分析,提出了应对措施,取得了较好的效果,节约采购成本,保证交货周期。

**关键词:** 进口大口径管;采购困境;措施;效果

中图分类号:F426

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)04-0047-02

## Boiler Industry Import Large-calibre Pipe Procurement Dilemma and Countermeasures

LUO Lingli

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

**Abstract:** This paper analyzes the procurement status and difficulties of imported large-diameter pipes (SA-335P92 and other materials), puts forward countermeasures, achieves good results, saves procurement cost and ensures delivery cycle.

**Key words:** imported large-diameter pipes; procurement difficulties; measures; results

锅炉行业需要使用到各种类型的钢材。其中在集箱、连接管等部件需要大量的大口径管,由于国产大口径管(SA-335P92等材质)的生产起步较晚,业绩有限,市场认可度及占有率低,故实际工程应用中,主要使用进口大口径管。

### 1 现状分析

进口大口径管(SA-335P92等材质)主要供方为 Vallourec Deutschland GmbH(以下简称“德国瓦卢瑞克”)、瓦卢瑞克(中国)有限公司(母材从国外进口,以下简称“瓦卢瑞克(中国)”)、NIPPON STEEL CORPORATION(以下简称“日本制铁”)、JFE Steel Corporation(以下简称“日本JFE”)、IBF S. P. A(以下简称“意大利IBF”)、Wyman Gordon Fordings Inc(以下简称“美国威曼高登”)、Forgiatura Morandini S. r. l(以下简称“意大利莫兰迪尼”)。

美国威曼高登市场认可度较高,但101%的反

倾销税<sup>[1]</sup>对价格影响大,随着中美贸易摩擦加剧,还要加征20%关税<sup>[2]</sup>,基于成本考虑,订货的可能性小。意大利IBF和意大利莫兰迪尼市场认可度较低,也有约60%的反倾销税<sup>[1]</sup>,能填补外径 $\varphi 720$ 以上少部分供货量。日本制铁产能有限,主要为本土供货,外销较少。日本JFE的产能和生产范围有限,大规模供货可能性小。

德国瓦卢瑞克是电力行业进口SA-335P92钢管的最早的主力供货商,各电力用户对其产品认可度极高,几乎所有项目的供货商短名单中都有该供货商。其在产品规格的完整性、质量可靠性、价格竞争性及交货周期的整体表现上,相比其他几家进口供货商有明显优势,在电力用户确认厂家时,其往往成为首选。

本文通过对进口大口径管供货商进行调研、分析,总结瓦卢瑞克(中国)相较于其他进口供应商具有如下优势:

收稿日期:2021-10-18

作者简介:罗伶俐(1970-),女,1991年毕业于西南财经大学会计专业,大专,中级经济师。现在东方锅炉股份有限公司主要从事采购工作。

(1) 品牌知名度更高,质量把控能力更强。进口钢锭由其国外工厂提供,从热成型工艺、精整工序到最终出厂检测,均由瓦卢瑞克(中国)完成,其作为电力市场的长期供货商,对电力市场管材质量控制有着丰富的经验,更容易得到电力用户的最终认可。

(2) 由于进口钢锭无反倾销税,外径 D720 以下制管、机加、无损检测等工序在国内完成,相较于进口成品价格大幅降低 60% 以上;外径 D720 以上部分 SA-335P92 毛管进口,由于较成品价值更低,征收的反倾销税也相对较低;机加、无损检测等工序在国内完成,比直接进口成品管有约 3% ~ 5% 的价格优势。

(3) 售价为人民币完税到厂价,汇率及关税波动风险均由瓦卢瑞克(中国)承担。相对从国外直接采购,采购单位的风险可控性更强。

(4) 瓦卢瑞克(中国)通过逐步扩大母材供方认证,母材来源局限性得到改善,基本可以实现 6 个月内交付,能够满足项目进度要求。

(5) 瓦卢瑞克(中国)本地销售及工厂团队,相较于其他国外品牌单纯的代理模式,可以提供更为专业、及时的商务服务和技术支持。

## 2 采购困境

2020 年 3 月德国瓦卢瑞克出于对市场、成本、产业布局的综合考量,加上中国对其出产的产品加征反倾销税,在两者的综合作用下,其德国公司监事会做出于 2020 年 6 月 30 日关闭位于德国的 Reisholz 工厂和相关研发实验室的决定,并将 Reisholz 工厂订单转移到瓦卢瑞克(中国)(母材从国外进口)。

目前,瓦卢瑞克(中国)负责瓦卢瑞克集团全球工厂在中国电力市场的销售工作,德国瓦卢瑞克 SA-335P92 年产量约 2 ~ 3 万 t,由此产生的产品线空白,转而由瓦卢瑞克(中国)承担。

由于德国瓦卢瑞克工厂关闭,电力用户采购的四大管道(主蒸汽管道、再热热段管道、再热冷段管道和主给水管道以及相应旁路管道)会转而向瓦卢瑞克(中国)进行采购,对瓦卢瑞克(中国)的产能造成挤压,对采购方的采购议价能力、资源获取能力

带来较大的负面影响。

## 3 采购对策

鉴于上述情况,为降低进口大管采购成本,提高采购效率,锁定进口大管资源,保证进口大管稳定交货,需要制定相应对策。及时争取与瓦卢瑞克(中国)形成战略采购,与各竞争对手争夺资源并获取价格水平优势,提出如下建议措施:

(1) 尽快将德国瓦卢瑞克工厂关闭的通知告知各电力用户,并会同国内同行,固化瓦卢瑞克(中国)产品属于进口产品的概念;

(2) 需要争取与瓦卢瑞克形成战略采购协议,争夺资源优先权及价格话语权。

(3) 催促瓦卢瑞克(中国)对外径 D720 以上,由瓦卢瑞克集团外合作厂商提供进口毛管,尽快落实在瓦卢瑞克(中国)(常州一期)完成机加工的解决方案,完成产品试制和鉴定。同时要在此基础上快速完成对瓦卢瑞克(中国)(常州一期)毛管来源的许用认可。

(4) 向电力用户推荐意大利 IBF 和意大利莫兰迪尼为供货商,力争在合同谈判阶段将其加入供货商短名单;同时巩固与美国威曼高登的合作关系,在国家取消或降低 SA-335P92 对美反倾销税后,可以加大对威曼高登的采购量。

(5) 会同国产 SA-335P92 钢管供应商北方重工、武汉重工、扬州诚德、衡阳华菱、新冶钢等重点企业,以此为契机,共同推进 P92 钢管的国产化进程。

## 4 实施情况

2020 年 10 月,某公司开始与瓦卢瑞克(中国)商讨、策划战略合作,2020 年 12 月底启动进口大口径管合作谈判采购工作。通过框架协议的方式,锁定价格和资源,价格有效期 6 个月(从 2021 年 1 月 1 日至 2021 年 06 月 30 日),交货期至 2021 年 12 月 30 日,2021 年上半年计划(SA-335P92 等材质)预计合同签订总金额为 1.2 亿元人民币。

通过与瓦卢瑞克(中国)开展进口大口径管合作谈判并签订长期采购框架协议,实现了快速有效

(下转第 54 页)

# 东方超高温亚临界燃煤气锅炉简介

郑刚<sup>1,2</sup> 冉燊铭<sup>1,2</sup> 曾洁<sup>1,2</sup> 杨章宁<sup>1,2</sup> 潘绍成<sup>1,2</sup> 尹朝强<sup>1,2</sup> 刘宇钢<sup>1,2</sup>  
莫春鸿<sup>1,2</sup> 许杨杨<sup>1,2</sup> 易泽中<sup>1,2</sup> 刘一<sup>1,2</sup>

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:**本文介绍了东方锅炉自主开发的超高温亚临界(17.5 MPa/571/569 °C)燃煤气锅炉的设计方案,对其设计特点进行了介绍和总结。该燃煤气锅炉的开发设计,满足了燃煤气锅炉向更大容量、更高参数的发展需要,提升了机组效率和电厂经济性。

**关键词:**超高温亚临界; 燃煤气锅炉; 炉型选择; 低NO<sub>x</sub>燃烧技术

中图分类号:TM621

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)04-0049-06

## Brief Introduction of Dongfang Ultra High Temperature Subcritical Blast Furnace Gas Fired Boiler

ZHENG Gang<sup>1,2</sup>, RAN Shenming<sup>1,2</sup>, ZENG Jie<sup>1,2</sup>, YANG Zhangning<sup>1,2</sup>, PAN Shaocheng<sup>1,2</sup>,  
YIN Chaoqiang<sup>1,2</sup>, LIU Yugang<sup>1,2</sup>, MO Chunhong<sup>1,2</sup>, XU Yangyang<sup>1,2</sup>, YI Zezhong<sup>1,2</sup>, LIU Yi<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract:** This article introduces the design scheme of ultra-high-temperature subcritical (17.5 MPa/571/569 °C) gas fired boiler developed by Dongfang Boiler Group Co., Ltd. and its design features are introduced and summarized. The development and design of the gas fired boiler can meet the needs of the development of the gas fired boiler with larger capacity and higher parameters, and improve the unit efficiency and power plant economy.

**Key words:** ultra-high-temperature subcritical; gas fired boiler; furnace type selection; Low-NO<sub>x</sub> combustion technology

钢铁企业生产过程中会产生的大量可燃废气,主要有高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气,其中高炉煤气体积比达 88.7%<sup>[1]</sup>,这些煤气除用于钢铁主体工艺消耗外,仍有大量富余,将其用于发电有利于企业节能提效<sup>[2-3]</sup>,还可以有效减少碳排放<sup>[4]</sup>。利用燃气锅炉带动蒸汽轮机组发电比燃气-蒸汽联合循环发电具有投资省的优势,系统简单、燃烧适应性广、负荷调节性好<sup>[5]</sup>,在钢铁企业得到广泛应用。

提升蒸汽参数是提高机组效率的有效途径,几年前国内钢铁厂的煤气发电 100 MW 级机组参数最高仅为高温超高压<sup>[3,6]</sup>,热效率约为 37%<sup>[3]</sup>,参数低

制约了机组的效率。随着钢铁行业的发展,大型化使煤气的产量成倍增加,开发更高效的高参数煤气机组能为钢厂节约成本,近两年国内钢厂新建煤气发电机组已逐渐过渡到以超高温亚临界为主<sup>[7-8]</sup>。东方锅炉响应低碳排放国家政策,2018 年自主完成了适用于燃不同煤气的超高温亚临界参数燃煤气锅炉开发,目前已有多台投运。本文对锅炉方案概况做简要介绍。

### 1 煤气特性

因钢铁企业各自生产工艺、除尘工艺等不同,煤气成分、供气压力和温度、含水含尘量均不尽相

收稿日期:2021-02-24

**作者简介:**郑刚(1979-),2013年毕业于浙江大学动力工程领域专业,硕士研究生,工程师。现于东方电气集团东方锅炉股份有限公司技术中心担任锅炉产品设计员。



同。典型煤气主要成分体积分数和特性见表1。

### 1.1 高炉煤气

高炉煤气中主要可燃成分为CO,占比20%左右,其余主要是惰性气体N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>,发热值一般为2 800~3 800 kJ/Nm<sup>3</sup>,属于低热值燃料,其主要燃烧和换热特性为:

(1)可燃成分少,火焰温度低,燃烧时易出现火焰不稳定。

(2)由于火焰温度低,火焰黑度小,辐射能力弱,锅炉炉膛辐射换热量少,对流换热量大,通常需要采用较大的炉膛设计来保证足够的蒸发吸热,蒸

汽压力低的锅炉需布置对流蒸发受热面。

(3)燃烧产生烟气量大,单位发热量的烟气量是烟煤的1.6~1.8倍。燃烧所需空气量少,1 m<sup>3</sup>高炉煤气燃烧需0.595~0.85 m<sup>3</sup>空气,而产生的烟气有1.6~1.8 m<sup>3</sup>,风烟比太小,只靠空气冷却很难将排烟温度降低到较低水平。设置煤气加热器(煤加)可以进一步降低排烟温度,提高锅炉效率<sup>[9]</sup>。通常采用热管式换热器作为煤加,减小低温腐蚀可能性<sup>[10]</sup>。

(4)高炉煤气含尘量很低,受热面烟速通常取值较高,需预防超温、振动。

表1 典型煤气的成分体积分数与特性

	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	低位发热值 kJ/Nm <sup>3</sup>	含尘量 mg/Nm <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> S含量 mg/Nm <sup>3</sup>
高炉煤气	51.3	3.8	0.1	22.1	22.7	0	0	~3 200	<10	-
转炉煤气	27.8	2.3	0.1	53	16.6	0.2	0	~7 000	<10	-
焦炉煤气	4.9	59	0.5	5.8	4	24.1	1.7	~17 500	<10	≤50

### 1.2 转炉煤气特性

转炉煤气中主要可燃成分为CO,占比高于高炉煤气,一般为50%左右,发热值6 500~7 800 kJ/Nm<sup>3</sup>,比高炉煤气高1倍左右,因此转炉煤气的燃烧特性略好于高炉煤气,但仍属于低热值气体,因此通常与高炉煤气混合后一起进入锅炉燃烧。

### 1.3 焦炉煤气特性

焦炉煤气中主要可燃成分为H<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>,占比85%左右,惰性气体含量较少,燃料热值较高,发热值一般为16 000~18 500 kJ/Nm<sup>3</sup>,属于易燃煤气,着火稳燃特性好,焦炉煤气一般也作为煤气炉点火燃料。焦炉煤气理论燃烧温度可到1 800℃左右,与高炉煤气相比,炉内辐射换热强,蒸发吸热较强,燃烧产生的烟气量小,对流换热相对少。

(2)燃用高炉煤气和焦炉煤气时,锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度不超过50/100 mg/Nm<sup>3</sup>(干基,3% O<sub>2</sub>)。

表2 锅炉BMCR主要参数

	100 MW	135 MW
主汽流量/t·h <sup>-1</sup>	330	440
主汽压力/MPa(a)	17.6	17.6
主汽温度/℃	571	571
再热蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	276	408
再热蒸汽进口温度/℃	352	359
再热蒸汽出口温度/℃	569	569
再热器进口压力/MPa(a)	3.92	3.96
再热器出口压力/MPa(a)	3.72	3.76
给水温度/℃	281	291

(3)过热汽温在50%~100% BMCR、再热汽温在60%~100% BMCR负荷范围保持稳定在额定值。过热器出口蒸汽温度偏差不得超过±5℃,再热器出口蒸汽温度偏差不得超过+5/-10℃。

(4)全部高加停运时,锅炉的蒸汽参数能保持在额定值,能达到额定出力。

## 2 锅炉方案

### 2.1 主要参数与性能

#### 2.1.1 主要参数

以100~135 MW为例,典型超高温亚临界煤气炉BMCR工况参数如表2所示。

#### 2.1.2 主要性能

(1)锅炉额定工况下热效率不小于90%(按低位发热值,按煤加出口140℃计算)。

#### 2.1.3 炉型

低热值的高炉煤气(和转炉煤气)与较高热值的焦炉煤气在燃烧特性、辐射和对流换热特性等方面存在较大差异,根据不同的煤气掺混比例需求,开发了两种不同的炉型。

## 2.2 纯烧或大比例燃高炉煤气炉型

对于全烧高炉煤气或者高炉煤气比例较高(50%以上)的锅炉,采用π型布置、尾部双烟道,烟气挡板调节再热汽温。锅炉总体布置根据脱硝装置设置位置有空预器不拉出和空预器拉出两种型式(图1)。前者节省占地,脱硝装置布置在垂直烟道内省煤器与空预器之间,后者脱硝装置拉出布置于锅炉尾部空预器上方,更容易在掺烧焦炉煤气比例高、NO<sub>x</sub>较高的情况下实现超低排放。锅炉主要特点如下:

(1)燃烧方式:锅炉采用前后墙对冲燃烧方式,稳燃性能好。

(2)水循环系统:采用自然循环。不设置对流蒸发受热面。

(3)过热器和再热器受热面布置:过热器四级布置,分别为顶棚与包墙过热器、后竖井后烟道内的低温过热器(低过)、炉膛出口的对流屏式过热器(屏过)、折焰角上方的高温过热器(高过)。由于烟气辐射能力弱,不设置辐射式大屏过热器。再热器

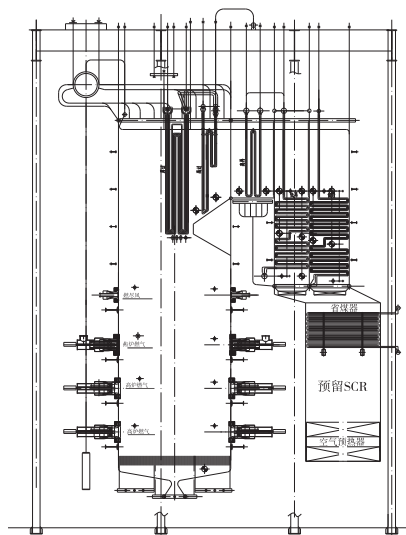
两级布置:分别为后竖井前烟道内的低温再热器(低再)和水平烟道内的高温再热器(高再)。高过和高再部分采用了SA-213TP347H材质并采用横向定位,低过、低再支撑在包墙管屏上。

(4)汽温调温方式:过热汽温采用两级减温水调节,分别布置在低过-屏过之间和屏过与高过之间,再热汽温采用尾部烟道内的烟气调节挡板调节。

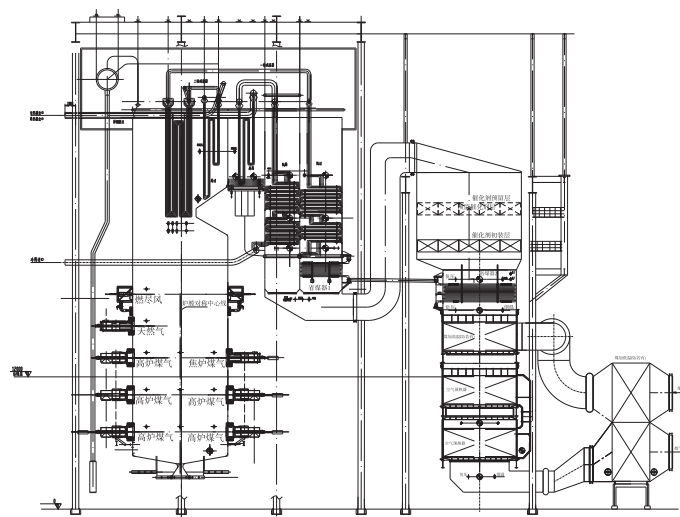
(5)省煤器:省煤器布置在低过和低再下方,烟气调节挡板之后。可以分级布置满足SCR脱硝装置在较低负荷投运需求。

(6)空气预热器和煤气加热器:脱硝装置后依次布置管式空预器和煤加,进一步回收烟气余热,提高锅炉效率。利用煤加换热热量提升煤气温度还有利于提高锅炉稳燃性能。

(7)SCR脱硝装置:SCR布置在省煤器后(分级省煤器之前),当掺烧焦炉煤气比例较高时,燃烧产生的NO<sub>x</sub>浓度会升高,此时通过SCR可以将NO<sub>x</sub>排放浓度进一步降低到50 mg/m<sup>3</sup>以下,满足超低排放标准。



(a)空预器不拉出布置(未示出煤加)



(b)空预器拉出布置

图1 燃高炉煤气为主的锅炉示意图

## 2.3 全烧或大比例燃焦炉煤气炉型

对于全烧焦炉煤气或者焦炉煤气比例较高的锅炉,采用背靠背布置、烟气再循环调节再热汽温的布置型式(图2)。

锅炉采用前墙燃烧或前后墙对冲燃烧方式,脱硝装置拉出布置于锅炉尾部。燃烧产生烟气依次流过屏式过热器、高温过热器、低温过热器、高温再

热器后进入后竖井,再流经低温再热器、省煤器、SCR、分级省煤器、空预器、煤气加热器。过热汽温采用两级减温水调节,再热汽温采用烟气再循环调节,循环烟气由脱硝前送至炉膛下部。

## 2.4 先进的低NO<sub>x</sub>煤气燃烧技术

煤气锅炉面临的设计难点之一是在稳定燃烧的前提下,尽可能降低NO<sub>x</sub>的生成。东方锅炉通过

自主研发,针对不同煤气体燃料的燃烧特性,开发了适用于高热值气体燃料的多枪式气体燃烧器和适用于低热值气体燃料的双旋流式燃烧器,结合炉膛分级配风,实现燃烧整体降氮。

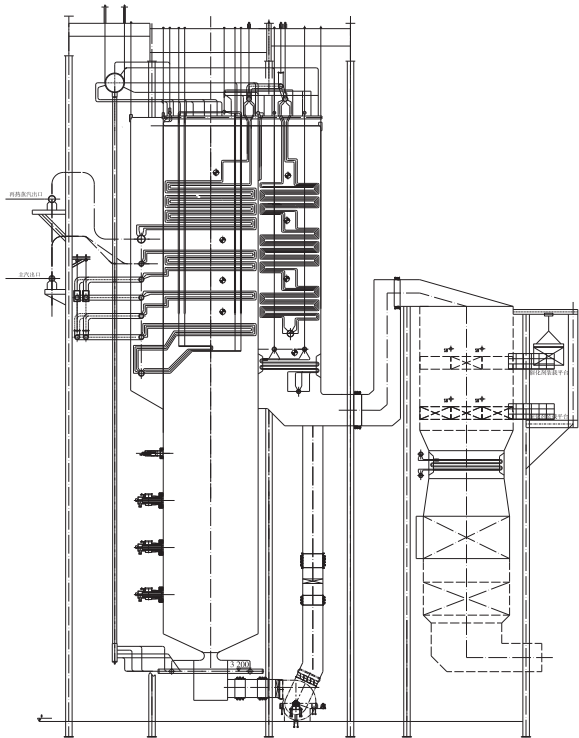


图2 燃焦炉煤气为主的锅炉示意图

#### 2.4.1 燃烧过程的 NO<sub>x</sub> 生成机理

燃烧过程中生成的 NO<sub>x</sub> 一般主要为 NO,其生成形式主要有热力型 NO<sub>x</sub>、瞬时反应型 NO<sub>x</sub>和燃料型 NO<sub>x</sub>。瞬时反应型 NO<sub>x</sub>和热力型 NO<sub>x</sub> 都是来自空气中的氮,二者又可以合称为高温型 NO<sub>x</sub>。

热力型 NO<sub>x</sub> 是燃烧用空气中的 N<sub>2</sub> 在高温下氧化而生成的 NO<sub>x</sub>。温度对热力型 NO<sub>x</sub> 的生成具有决定性的影响。瞬时反应型 NO<sub>x</sub>是由碳氢燃料高温热分解产生的 CH 自由基和空气中的氮反应生成中间产物 HCN 和 N,再以极快的反应速度进一步与氧作用生成的 NO<sub>x</sub>。燃料型 NO<sub>x</sub>是燃料中含有的氮的化合物在燃烧过程中氧化而生成的 NO<sub>x</sub>。燃料氮在 600 ~ 800 °C 分解成 N、CN、HCN 和 NH<sub>3</sub> 等中间产物,此时如果有含氧化合物就会反应生成 NO<sub>x</sub>。

#### 2.4.2 低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术

##### (1) 合理炉膛选型

高炉煤气燃烧的 NO<sub>x</sub> 一般较低,对于焦炉煤气燃料,更为关键是控制高温型 NO<sub>x</sub> 的产生,就控制

高温型 NO<sub>x</sub> 而言降低燃烧温度是最有效措施,防止产生局部高温区。适当增大燃烧器区域的炉膛截面积及炉膛容积等,即降低整个锅炉的热负荷,可使得主火焰区域的烟气平均温度降低,有利于抑制高温型 NO<sub>x</sub>。

##### (2) 采用全炉膛分级燃烧技术

采用全炉膛分级燃烧的方式,在燃烧器上部布置燃尽风喷口,可控制全炉膛的风量和氧量的分配,即在燃烧器区域送入过量燃料,即使得燃烧器区域总体处于缺氧状态,可以降低火焰尖峰温度,减少高温型 NO<sub>x</sub>。设置燃尽风后,主燃区总体缺氧,减少了中间产物在氧化性气氛下被氧化为 NO<sub>x</sub> 的生成量,使更多燃烧初期生成的 NO<sub>x</sub> 向 N<sub>2</sub> 转化。

##### (3) 燃煤气低 NO<sub>x</sub> 燃烧器

##### a) 适用于低热值气体燃料的旋流式煤气燃烧器

高炉煤气热值低,燃烧稳定性差,旋流燃烧器可以强化前期着火,有利于提高火焰稳定性和燃烧强度<sup>[11]</sup>。东方锅炉开发的旋流式煤气燃烧器(图3)由中心风通道、煤气通道、二次风通道组成,中心风通道为点火提供配风,布置有点火枪及高能点火器,煤气通道出口布置有旋流叶片,煤气通过旋流叶片后产生旋流,二次风通道出口布置有旋流叶片,旋流的煤气和二次风在预混室内混合加热,并在稳焰齿的作用下,形成多重回流区,加强煤气与二次风的混合。

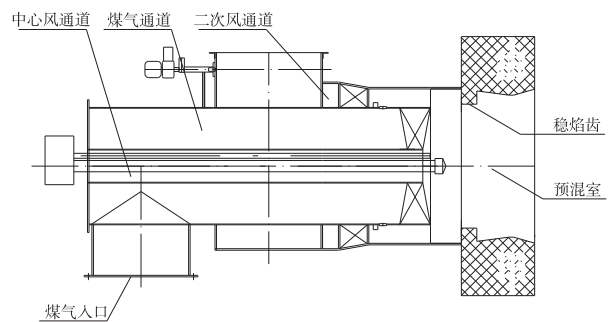


图3 双旋流式煤气燃烧器

##### b) 适用于焦炉煤气的多枪式煤气燃烧器

焦炉煤气燃烧迅速,传统燃烧技术生成的 NO<sub>x</sub> 超过 400 g/m<sup>3</sup>[12]。针对该问题,开发了多枪式焦炉煤气燃烧器(图4)由中心风通道、煤气装置、一次风通道、二次风通道组成,中心风通道为点火提供配风,布置有点火枪及高能点火器。一次风通道出口

布置有一个宽尺度的一级稳燃器和二级稳燃器,其主要作用是在燃烧器中心形成回流区,卷吸高温烟气,保证燃气的稳定高效燃烧;二次风出口布置有烟气卷吸孔板,进一步强化烟气的卷吸和混合。数值模拟表明该燃烧器的 NO<sub>x</sub> 较传统燃烧器可降低 65% 以上。

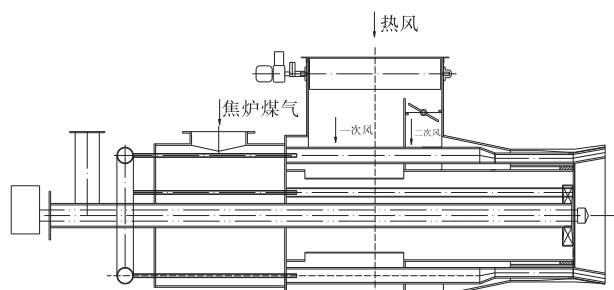


图4 多枪式煤气燃烧器示意图

(4) 燃尽风

在煤气燃烧器上方设置了燃尽风,燃尽风通过调风器送入炉膛,实现全炉膛分级燃烧。选取合适的燃尽风风率和燃烧器与燃尽风喷口的距离,可在不影响锅炉其它性能的条件下进一步降低 NO<sub>x</sub>。

2.5 锅炉主要优点

(1) 采用 17.5 MPa/571 °C/569 °C 超高温亚临界参数设计,可有效提升机组效率。

(2) 锅炉具有良好的燃料适应性,能适应不同煤气全烧或混烧。

(3) 自主研发的低氮气体燃烧器和多枪式高热值气体燃烧器,保证燃用低热值煤气时着火稳定、高效燃烧、低 NO<sub>x</sub> 排放。

(4) 采用墙式对冲燃烧方式,烟温分布均匀,烟温偏差小。

(5) 锅炉合理的水循环回路划分和设计,水循环安全可靠。

(6) 过热器设置两级喷水减温方式,再热蒸汽温度采用尾部烟气挡板或再循环烟气调节控制,汽温保证范围广,可靠性高。

3 锅炉运行情况

某钢厂动力站扩建项目 5<sup>#</sup> 机组采用东方锅炉设计供货的 100 MW 超高温亚临界锅炉,设计燃料为 62% 高炉煤气 + 38% 焦炉煤气(热值比),校核燃料 1 为 100% 纯烧高炉煤气,校核燃料 2 为 30% 高

炉煤气 + 70% 焦炉煤气。锅炉于 2019 年 10 月投运,运行情况如下:

(1) 带负荷能力强

锅炉满负荷可长期连续运行,主要参数见表 3。主蒸汽温度和再热汽温度略低于设计值是因为运行中考虑到煤气压力波动较为剧烈,汽温控制较为保守。

表3 锅炉运行参数表

	100 MW 100% 高炉	108 MW 90% 高炉 10% 焦炉	100 MW 50% 高炉 50% 焦炉
主蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	330	358	328
主蒸汽压力/MPa(a)	16.8	17.1	17.0
主蒸汽温度/°C	570	566	567
再热汽流量/t·h <sup>-1</sup>	300	323	300
再热汽压力/MPa(a)	3.2	3.3	3.2
再热汽温度/°C	562	560	563

(2) NO<sub>x</sub> 排放低

全烧高炉煤气时,满负荷工况炉膛出口 NO<sub>x</sub> 排放量不超过 10 mg/Nm<sup>3</sup> (干基, 3% O<sub>2</sub>), 当掺烧 50% 以内的焦炉煤气时,满负荷工况炉膛出口 NO<sub>x</sub> 浓度在 10 ~ 70 mg/Nm<sup>3</sup> (干基, 3% O<sub>2</sub>) 范围(图 5)。

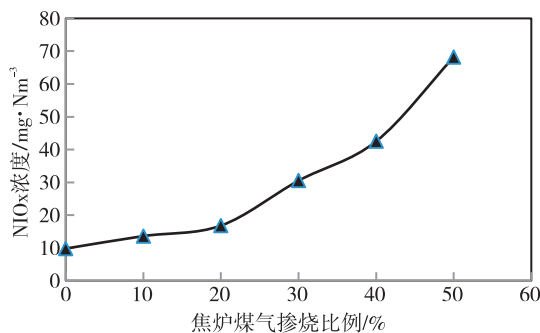


图5 不同煤气掺烧比例下 NO<sub>x</sub> 排放浓度分布图

(3) 稳燃能力强

高炉煤气燃烧器稳燃能力优秀,单只燃烧器点火 10 秒后可撤出点火枪,火焰稳定。

(4) 受热面壁温偏差小

各种燃料掺烧比例、不同负荷下的高温过热器壁温、高温再热器壁温偏差均未超过 15 °C。

4 结语

东方锅炉自主开发 100 MW、135 MW 超高温亚临界机组煤气锅炉自 2019 年已相继批量投运,表明



设计是成功的,其设计理念已拓展应用到 55 ~ 80 MW、150 MW 级燃气炉。该类型锅炉目前已签订订货合同四十余台,在总结已投运锅炉设计运行经验基础上,东方锅炉将继续完善煤气锅炉技术,为钢铁厂创造更大价值,为我国节能减排事业做出更大贡献。

#### 参考文献:

- [1] 中国钢铁企业工业协会. 2012 年 12 月中国钢铁工业环境保护统计月度简析[R]. 2012
- [2] 陶寿松,李小刚. 韶钢 2 号锅炉煤气综合利用升级改造[J]. 冶金动力,2019(9):64-68
- [3] 韩汉平,刘建华,董含林. 小容量高参数煤气发电技术应用特点及分析[J]. 能源与节能,2018(8):63-64+137
- [4] 高炉煤气回收发电项目碳减排问题探究[D]. 邯郸:河北工程大学,2017

- [5] 陶红卫,熊建文. 135 MW 超高压煤气锅炉与燃气-蒸汽联合循环发电技术经济比较[J]. 锅炉技术,2014,45(4):23-26+44
- [6] 李学军,谢毅,袁建德. 一种高温超高压高炉煤气机组的应用与研究[J]. 冶金动力,2015(12):35-38
- [7] 刘子成,吕勇,李建贞等. 100 MW 超高温亚临界煤气发电技术在攀钢钒公司的应用[J]. 冶金动力,2019(10):70-73
- [8] 魏国华,张鑫蕾. 某钢厂 110 MW 等级亚临界高参数高炉煤气锅炉研制及运行[J]. 锅炉制造,2019(6):5-8+28
- [9] 叶亚兰,司凤琪,徐治泉. 高炉煤气锅炉热效率计算方法[J]. 热力发电,2015,44(3):21-27
- [10] 陶红卫,岳洪,张新育等. 降低超高压高炉煤气锅炉排烟温度的研究和实践[J]. 发电设备,2014,28(3):169-172
- [11] 程秀东,张忠孝,张晓旭等. 高炉煤气燃烧器稳燃旋流流场的冷态优化实验研究[J]. 能源工程,2019(2):60-64
- [12] 陶倩. 内置稳燃装置燃气锅炉燃烧及氮氧化物排放特性研究[D]. 武汉科技大学. 武汉,2018

(上接第 48 页)

的锁定资源并满足项目进度需求。在框架协议下,瓦卢瑞克(中国)可以提前预留出产能,与母材供货商协商产能及批量采购价格,在 2021 年上半年原材料价格飞涨的大背景下,提前锁定的材料没有受到涨价的影响,从而降低采购成本。

目前,2021 年上半年进口大口径管框架协议下各项合同已签订完成,实际累计合同签订总金额约 1 亿元人民币,瓦卢瑞克(中国)目前执行的大口径管供应,基本可以满足项目进度需求,并被广大电力用户认可,反馈较好。

与此同时,经过与电力用户沟通,部分原要求进口 SA-335P92 大口径管修改为国产,节约了外汇支出,大力推进了国产化进程。

#### 5 结语

目前,进口大口径管(SA-335P92 等材质)综合

优势较高的供应商是瓦卢瑞克(中国),通过与其签订战略采购协议,形成良好的合作关系,既能够降低采购成本,又能够保证大口径管的交货周期,对锅炉产品的如期交付具有重要的意义。构建战略合作关系、签订框架协议的方式有利于企业强化供应链管控,值得继续保持并推广。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国商务部. 商务部公告 2019 年第 24 号关于调整原产于美国和欧盟的进口相关高温承压用合金钢无缝钢管所适用的反倾销税率的公告[EB/OL]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/b/e/201906/20190602872648.shtml>, 2019
- [2] 国务院关税税则委员会. 国务院关税税则委员会关于对原产于美国的部分进口商品提高加征关税税率的公告税委会公告[2019]3号[EB/OL]. [http://gss.mof.gov.cn/gzdt/zhengcefabu/201905/t20190513\\_3256788.htm](http://gss.mof.gov.cn/gzdt/zhengcefabu/201905/t20190513_3256788.htm), 2019.

# 欢迎投稿,欢迎订阅!

# 搭接成型盘铣刀铣削减小薄壁类零件变形和振动的方法

王应明<sup>1,2</sup>

1. 西南交通大学, 成都 613001; 2. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**薄壁件由于强度低,在铣削中由于受到切削力而易发生变形。同时,由于薄壁件刚性差,加工时容易振动而影响加工表面的粗糙度。本文论述了采用可转位盘铣刀通过搭接成型、进一步细分精铣,一次走刀完成普通精铣和修光精铣、探索最优切削参数等方法减小薄壁件加工中的切削力和振动,提高加工质量和效率,并用加工实例证明了该方法的有效性。

**关键词:**薄壁类零件; 铣削; 加工变形; 加工振动

中图分类号: TH16; V263

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)04-0055-04

## Method of Using Lapped Joint Profile Disk Milling Cutter to Decrease Deformation and Vibration of Thin Wall Part

WANG Yingming<sup>1,2</sup>

(1. Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China;

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

**Abstract:** Thin wall part is easy to deforming when it is milled, because of its low strength. What is more, As its low stiffness, thin wall part is more likely to vibrate. This will decrease machined surface roughness. This paper presents that using indexable disk milling cutter, further subdivision of finish milling, one time to complete the ordinary finish milling and wiper finish milling, exploring the optimal cutting parameters can decrease cutting force and vibration of thin wall part, improve processing quality and efficiency. Furthermore, a processing example is utilized to demonstrated the validity of those method.

**Key words:** thin wall part; milling; processing deformation; processing vibration

薄壁件是指壁厚和高度之比较小的一类零件,定量来说,是指壁厚高度之比在 1/5 - 1/8 范围内的零件<sup>[1]</sup>。这类零件通常都具有刚性差、易变性、尺寸难以把握等缺点<sup>[2]</sup>。薄壁零件自身刚度不足是造成加工难度大、精度差的主要原因<sup>[3]</sup>。根据薄壁件的具体结构特点,设计合理的加工路线、选择合理的加工刀具、确定合理的切削速度才能有效解决薄壁件的加工振动和变形<sup>[4]</sup>。

研究薄壁件的加工,主要是研究如何减小加工

中的振动。可以采用理论分析加实验验证和修正的方法,分析薄壁件在加工中的模态<sup>[5-6]</sup>。一般通过切削力频率避开薄壁件低阶固有频率、减小切削力、减小切削力的振动幅度、增加薄壁件阻力的方法减小薄壁件振动。

本文对薄壁件进行了可加工性工艺分析,对现有的棒铣刀加工工艺进行了分析,研究了优化刀具和切削参数提高薄壁件加工的具体措施,展示了优化后的取得的薄壁件加工效果。

收稿日期: 2021 - 07 - 01

**作者简介:**王应明(1987 - ),男,2010年毕业于西南科技大学制造学院机械设计制造及其自动化专业,本科,工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司环境能源工程分公司从事综合能源新技术开发。

## 1 薄壁件加工难点和现状分析

### 1.1 加工难点

图1所示的薄壁深槽是发电机上常见的某零件的局部,主要加工难点为:该零部件底部厚度和悬伸长度之比约为1/8,加工中工件容易让刀和振动;零件为含Cr、Ni、Mo、V的合金钢锻件,材料可加工性差,切削力较大,切削热不易快速传递;尺寸和形位公差要求较高,壁厚公差要求在 $\pm 0.02\text{ mm}$ ;薄壁悬伸150 mm以上,每个薄壁需加工总面积达 $0.9\text{ m}^2$ ,每个薄壁加工中不允许有中途换刀,故对刀具的耐磨性和可靠性要求较高;每个零件上存在30多个薄壁,故对加工效率要求较高。

按照振动力学理论,切削图1中薄壁件模型可以近似简化为在外激励力的周期作用下变截面悬臂梁的振动模型,可通过简化建模进行模态分析,各阶模态权重因子大小与该阶模态频率的倒数成正比,即频率越低,权重越大,即低阶模态特征基本决定了结构的动态特性<sup>[7]</sup>。为避免铣削时零件明显振动,需要重点关注薄壁件的低阶模态特征,通过刀具结构优化和切削参数优化使切削产生的外激励力频率在某个区间,从而避开薄壁的低阶固有频率。



图1 薄壁件

### 1.2 加工现状

图2为该薄壁件的简图,以前的加工方法是采用如图3所示成型棒铣刀加工。由于棒铣刀刃口与工件接触面积大,故切削力较大,为了减小切削变形和加工振动,只有减小切削力和切削力的周期性

变化范围,切削力频率避开薄壁固有频率。在该棒铣刀设计时通过了以下措施减小切削力:第一是减少铣刀的每齿进给量;第二是在保证铣刀切削刃强度的前提下尽可能增大切削刃前角和后角。第三是通过将切削刃口设计成螺旋分布,以保证切削整个过程中切削力的变化范围尽可能小。第四是为保证切削刃有足够韧性,同时考虑刀具制造成本,刀具材料采用高速钢。

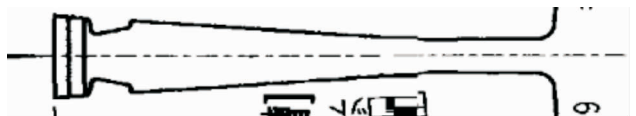


图2 某热电转子下线槽



图3 成型棒铣刀

这样设计的棒铣刀在加工过程中也存在一些不足。第一,棒铣刀的每齿进给量太小,加之高速钢的高温硬度差,切削时转速较慢,从而导致棒铣刀的加工效率比较慢,严重影响瓶颈设备的产出效率。第二,虽然已经最大限度地减小了切削力,但是由于切削刃与工件的接触长度大,加工变形仍然较大,加工出的槽型宽度比刀具的直径要大 $0.12\sim 0.31\text{ mm}$ 。实际加工需要根据每个机床和工件特点计算刀具尺寸,两次精铣的方式完成加工。第三,由于棒铣刀直径 $d$ 约为 $\varphi 50\text{ mm}$ ,要保证线速度 $v_c = 60\text{ m/min}$ ,棒铣刀的转速 $n = v_c / (\pi d) \approx 382\text{ r/min}$ ,棒铣刀上的齿数 $Z = 5$ ,则每分钟有切入的次数 $N = n \times Z \approx 1910$ ,切削力作为外激励力的频率 $f_F = N/60 \approx 31.8\text{ Hz}$ ,根据实际情况,在保证切削效率的情况下进行了转速的适当微调,但最终所有转速对应的切削力频率与薄壁件的一个低阶固有频率较接近,加工中薄壁的振幅较大,加工表面存在轻微

振纹。在转速降低到  $n_2 = 190 \sim 220 \text{ r/min}$  时,切削力作为外激励力的频率  $f_{r2} = n_2 \times Z/60 \approx 15.8 \sim 18.3 \text{ Hz}$ ,该薄壁件振幅明显降低,说明该范围频率远离了该薄壁件的低阶固有频率,但因此转速下实验了不同的进给均不能达到加工效果而放弃。第四,高速钢刀具加工时必须用冷却液,加工时由于冷却液影响,不易实时观察被加工表面和刀具情况。

## 2 优化薄壁件加工措施

为了解决上文所述加工问题,主要对加工方案进行了以下四个方面的优化。

### 2.1 采用可转位盘铣刀代替棒铣刀,采用涂层硬质合金刀片代替高速钢

20世纪50年代开发出机夹可转位刀刀片后,机夹可转位刀具也应运而生,机夹可转位刀具降低了刀具成本,避免了重磨刀具。同时,由于在棒铣刀和盘铣刀的切削微观过程的差异,盘铣刀的切削效率明显高于棒铣刀。经理论计算和以往经验,盘铣刀径向跳动和端面跳动设计在  $0.01 \text{ mm}$  以内,才能保证的切削时每个刀片的切削力变化幅度近似,从而保证盘铣刀切削时外力的变化幅度较小,进而减小薄壁外激励力的振幅,最终有利于实现薄壁件在切削时的振幅受控。

刀具材料对于其寿命、成本、加工质量,加工效率影响较大。为提高转速,提高进给量,采用了涂层硬质合金刀片,合理选择刀片基体和涂层材料,刀具切削线速度可达  $160 \text{ m/min}$ 。同时,由于涂层硬质合金刀片的高温硬度好,刀盘大,散热好,切削时不再需要冷却液,保证了实时加工情况可跟踪,如遇出现加工问题及时停止。

### 2.2 采用分段搭接

采用分段切削、各段搭接成型的办法,使同时参与切削的刃口长度比棒铣刀同时参与切削的刃口长度减少数倍,从而保证对薄壁件的挤压力减小,进而使薄壁件在加工中变形量减小,即减小了加工时的“让刀量”。

为实现分段切削,设计了可转位刀片搭接成型盘铣刀,刀片分布如图4,最终搭接效果如图5。为保证加工出的表面没有可见的搭接痕迹,刀体和刀片的设计精度要求很高,公差只有  $0.005 \text{ mm}$ 。



图4 可转位盘铣刀及刀片分布

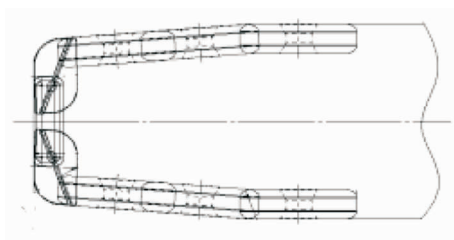


图5 各刀片搭接效果

### 2.3 细分精铣工序

采用修光刃刀片可改善切削性能和提高生产效率<sup>[8]</sup>。将精铣下线槽细分为普通精铣和修光两个工序。普通精铣步骤的单边吃刀量与棒铣刀吃刀量类似。修光步骤的单边吃刀量在  $0.02 \text{ mm}$  以内。刀具设计时让修光刀片刃口的高度和刃口接触长度可以调整,从而可以根据实际加工情况调整修光时单边吃刀量。而通过盘铣刀上安装修光刃的方法,实现了一次走刀完成两次精铣。

### 2.4 优化刀具设计

#### 2.4.1 盘铣刀直径设计

使用该盘铣刀的机床主轴与刀盘的接口为  $\varphi_1 = 500 \text{ mm}$ ,为避免机床的工件发生干涉且便于观察,刀盘接口边缘与切削刃的最小距离  $L_1 = 110 \text{ mm}$ ,薄壁件悬长  $L_2 = 90 \text{ mm}$ ,最终刀盘的直径  $\varphi_2 = \varphi_1 + 2L_1 + 2L_2 = 900 \text{ mm}$ 。

#### 2.4.2 盘铣刀齿数优化设计

可以通过有限元软件对薄壁件建模和分析,计算出薄壁件的低阶固有频率,但理论与实际存在一定误差。也可以通过敲击法等试验方法得到该薄壁件的真实固有频率,但试验投入较大。由本文1.2章节棒铣刀加工薄壁件的实际情况可知:该薄壁件有一个低级固有频率在  $31.8 \text{ Hz}$  附近应该避开; $f_{r2} \approx 15.8 \sim 18.3 \text{ Hz}$  是远离该薄壁件低阶固有频率,切削时振动不明显,故本盘铣刀切削时使用此频率。



切削刃旋转直径约为  $\varphi 810 \text{ mm} - \varphi 900 \text{ mm}$ , 取切削刃最大直径  $d_3 = 900 \text{ mm}$  计算, 由于线速度  $v_{c3} = 160 \text{ m/min}$ , 盘铣刀铣刀的转速  $n_3 = v_{c3} / (\pi d_3) \approx 57 \text{ r/min}$ 。

由铣削原理可知, 盘铣刀的齿数  $Z_3 = (60 f_{F2}) / n_3 \approx 16 - 20$ 。为了提高加工效率, 最终齿数为 20 个齿。

### 2.5 合理选择切削参数

根据实际情况, 通过调节盘铣刀转速对加工切削力频率进行了微调, 最终其频率与薄壁件的低阶固有频率远离, 未发生共振, 故加工表面无肉眼可见的振纹。

在同时兼顾加工效率和加工质量的情况下, 合理的选择了刀具进给量和吃刀量。

## 3 实际加工效果

如图 4 所示的定制可转位盘铣刀经过几次切削

实验, 反复调节加工参数和修光刀片高度, 实验出了最优的加工参数。在最优的加工参数下, 加工振动小、切削噪音小, 加工表面粗糙度合格、加工变形小的表面。

加工后的下线槽表面粗糙度为  $Ra 3.2 \mu\text{m}$ , 各处刀片搭接处没有明显的搭接痕迹, 如图 6。加工变形小, 总长等距间隔测量了 10 个点的数据(如表 1), 加工后的实际壁厚与理论壁厚之差在  $20 \pm 0.02 \text{ mm}$  以内, 且最终壁厚的尺寸和形位公差满足图纸公差要求。

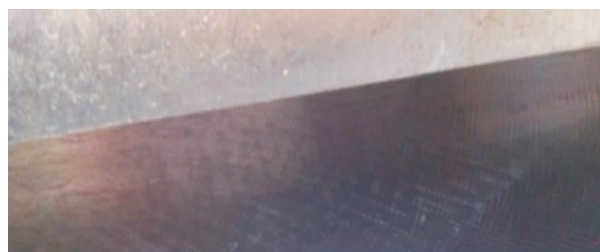


图 6 加工出的下线槽

表 1 加工出的下线槽测量数据

测量点	测量点 1	测量点 2	测量点 3	测量点 4	测量点 5	测量点 6	测量点 7	测量点 8	测量点 9	测量点 10
距离薄壁件最右面距离(m)	0	0.6	1.2	1.8	2.4	3	3.6	4.2	4.8	5.4
壁厚(mm)	19.993	19.998	20.011	20.009	20.010	20.013	20.004	20.014	20.016	20.011
是否在 $20 \pm 0.02 \text{ mm}$	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是

## 4 结语

通过可转位搭接盘铣刀代替棒铣刀铣削薄壁下线槽的加工案例可以提供一些薄壁件的加工经验。

(1) 实例证明, 搭接成型能够减小切削刃在某一时刻与薄壁件的接触长度, 能够明显减小切削力, 从而减小薄壁件在加工时的振动和变形, 提高薄壁件的加工精度和表面粗糙度质量。

(2) 通过实例可知, 细分精铣序, 采用修光铣削的方法能够减小切削力, 提高表面粗糙度质量。

(3) 由于切削路径和过程的不同, 涂层硬质合金刀片比高速钢所能承受的线速度可以高一倍, 以及盘铣刀上普通精铣和修光精铣在一次走到完成, 实际盘铣刀加工的效率比棒铣刀提高一倍以上。

### 参考文献:

- [1] DAVIM J P. Machining of complex sculptured surfaces[M]. London: Springer, 2012
- [2] 刘科明. 改善薄壁类零件加工方法在实际加工中的应用[J]. 科技与创新, 2018(17): 156 - 157 + 159
- [3] 陈熹. 浅析薄壁类零件加工[J]. 机电元件, 2018, 38(1): 23 - 25
- [4] 王森林. 薄壁类零件加工变形的解决工艺方法[J]. 制造工艺, 2014, 49(3): 82 - 83
- [5] 马鹏举, 徐汶, 高延等. 薄壁机匣铣削加工颤振抑制研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(11): 16 - 23
- [6] 周勇. 航空薄壁件加工动态特性及控制[J]. 工具技术, 2016, 50(1): 82 - 86
- [7] 张晓峰, 周凯, 赵加清. 薄壁件多点柔性加工的模态分析与振动控制[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(5): 686 - 690
- [8] 崔业军. 修光刃技术的应用技巧[J]. 新技术新工艺, 2011(8): 31 - 33

# 关于 ASME 规范热应力棘轮分析要求的探讨

李亭

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455

**摘要:** 本文对 ASME 规范热应力棘轮分析的要求进行探讨, 比较了安定性及热应力棘轮的发生机理的差异, 指出了必须开展热应力棘轮分析的条件, 为设计人员进行压力容器分析设计提供参考。

**关键词:** 安定性; 热应力棘轮; 分析设计; 压力容器

中图分类号: TH121

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)04-0059-03

## Analysis on the Requirements of Thermal Stress Ratcheting of ASME Code

LI Ting

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

**Abstract:** This paper discusses the requirements of thermal stresses ratcheting of ASME Code, compares the differences between the mechanism of shakedown and of thermal stresses ratcheting, and clarifies the condition under which thermal stresses ratcheting should be analyzed, which provides references for engineering design.

**Key words:** shakedown; thermal stress ratchet; design by analysis; pressure vessel

安定性分析考虑了材料塑性对结构承载能力的贡献, 以安定性理论为基础进行结构强度分析校核, 将结构的安定极限载荷作为结构承载能力界限, 就能够保证结构在安全承载的前提下, 局部区域可以存在一定量的塑性变形; 在相同的承载力要求下, 可以降低材料消耗, 实现结构的轻量化。世界各国出版的近代压力容器强度设计和安全评定规范如美国的 ASME 规范<sup>[1]</sup>、欧盟的 EN13445<sup>[2]</sup> 和法国的 CODAP<sup>[3]</sup> 等均采用了安定载荷为控制界限的失效准则。

ASME 规范 XIII-1300 对于安定性 (Shakedown) 的定义为: 如果几次载荷循环后棘轮效应终止, 结构趋于安定; 继后的结构反应是弹性或弹塑性的, 且没有渐增性非弹性变形<sup>[1]</sup>。根据此定义, 如果结构评定满足安定性要求, 则不会出现热棘轮效应。安定性分析指出, 对于单向应力状态, 保证安定性的

条件为  $\sigma_1 \leq 2\sigma_s$ ; 对于二向或三向应力状态为一次加二次应力应力强度不大于  $3S_m$ <sup>[4]</sup>。ASME 规范以图表的形式在图 XIII-2100-1<sup>[1]</sup> 中给出了各类应力的限值, 其一次加二次应力限值为  $3S_m$ ; 表中并未提及热应力棘轮分析的要求。其他压力容器标准如 EN13445-3 (2014 版)<sup>[2]</sup> 条款 C7.7 和 CODAP-2000<sup>[3]</sup> 附录 C10.1. A2 中均规定, 若满足一次加二次应力评定要求, 则热应力棘轮的要求可以免除。但 ASME 规范 XIII-3400 (a) 明确要求, 一次加二次应力强度应同时满足  $3S_m$  限值和热应力棘轮评定要求<sup>[1]</sup>。对于分析结果满足一次加二次应力评定要求情况下是否需进行热应力棘轮分析, 不同的标准的要求存在差异; ASME 规范本身在不同章节的表述也容易给设计人员造成混淆。

本文对压力容器结构安定性及热应力棘轮效应进行分析, 比较了安定性及热应力棘轮发生机理

收稿日期: 2021-01-08

**作者简介:** 李亭 (1983-), 男, 2007 年毕业于清华大学机械工程学院材料科学与工程专业, 硕士, 高级工程师。现在东方电气 (广州) 重型机器有限公司技术部主要从事核安全设备设计研发工作。

的差异,为设计人员进行分析设计提供参考。

### 1 压力容器结构安定性分析

在压力容器壳体内壁某一点处应力强度超过了材料的屈服强度,则在该点出现了微小的塑性区,塑性区之外材料仍处于弹性状态。弹性区力图使塑性区恢复原状,从而在塑性区形成残余压缩应力,残余压缩应力的大小与虚拟应力  $\sigma_1$  有关。假定材料由理想弹塑性材料制造,则根据虚拟应力  $\sigma_1$  的大小简单分析结构安定性条件如下<sup>[4]</sup>。

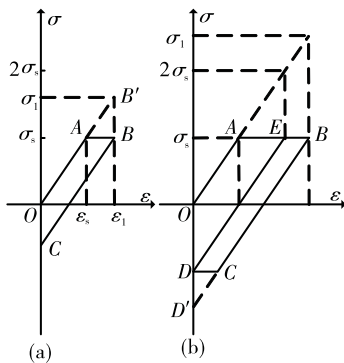


图1 加载-卸载过程中的应力-应变关系

(1)  $\sigma_s < \sigma_1 < 2\sigma_s$

当结构第一次加载时,如图1(a)所示,塑性区中应力-应变关系按OAB线变化,虚拟应力-应变线为OAB'。卸载时,在周围弹性区的作用下,塑性区的应力沿BC线下降,且平行于OA。如图所示,塑性区便形成了残余压缩应力  $E(\epsilon_1 - \epsilon_s)$ ,即纵坐标上的OC值。若在后续的反复加载中载荷大小不变,则应力将沿CB、BC线变化,不会出现新的塑性变形,在新的状态下保持弹性行为,结构呈现弹性安定状态。

(2)  $2\sigma_s < \sigma_1$

结构第一次加载时,如图1(b)所示,塑性区的应力-应变关系按OAB线变化,卸载时沿BC线下降,在C点发生反向压缩屈服而到达D点。在之后的循环受载过程中,应力将沿DEBCD回线变化,反复出现拉伸屈服和压缩屈服,将引起材料塑性疲劳或塑性变形渐增而导致破坏,结构失去安定性。

可见保证结构安定性的条件是  $\sigma_1 < 2\sigma_s$ 。对于二向或三向应力状态为一次加二次应力应力强度不大于  $3S_m$ 。

### 2 热应力棘轮发生机理分析

上述安定性分析过程假设了容器壁在整个加载、卸载过程中仅局部处于屈服状态,故而在卸载过程中由于弹性区的约束作用塑性区的应力可线性下降并发生反向压缩。但即使在  $\sigma_1 < 2\sigma_s$  条件下,比如承受某一固定内压的容器,其内部的流体介质温度可能出现反复的大范围的波动,如果在加载过程中容器壁整个截面发生屈服,那么在卸载过程中塑性区的应力下降到0之后不会发生反向压缩,而是出现了压应变。这样在反复受载时就可能出现渐增性变形而丧失安定性,此即热应力棘轮效应。

现用最简单的三杆模型进行讨论<sup>[5]</sup>。如图2(a)所示,假定三根直杆刚性固定在一起,外面两杆的截面各为中间直杆的1/2,各杆性能相同且为理想弹塑性材料。在连接处下端作用有外载荷P。

当所加外载刚使三杆达屈服时,二根杆1和杆2各承担外载的一半即P/2。设对杆1均匀加热而杆2保持常温,取杆1、杆2之间的温差为T1,则由于热膨胀而使处于静不定系统的杆1有趋势要减小它的应力,即有趋势要减少它原来所承担的那部分外载。由于三杆连接在一起,杆1载荷的减小将引起杆2载荷的增加;但杆2已经屈服,不能再承受更多的载荷,因而杆1的热膨胀将不受约束,相应地带动杆2产生相同数量的膨胀变形,见图2(b)。

当杆1冷却恢复到原来的温度T0时,它将发生收缩,但因杆1已经屈服,不能承担更多的外载,因而仅能产生一定的塑性变形,此时杆1和杆2都保持位置不变,见图2(c)。

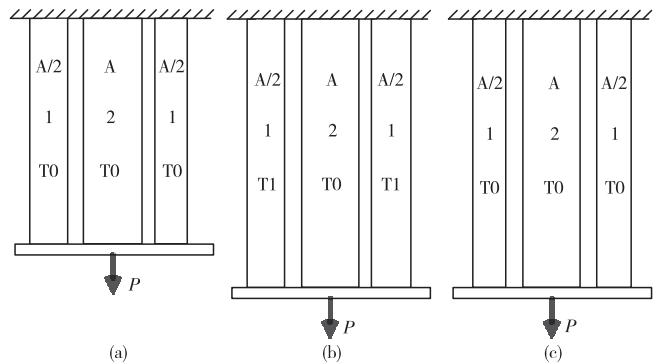


图2 三杆模型

如此在反复的温度变化过程中,杆1和杆2将

不断产生渐增的塑性变形,即产生了热棘轮效应。

由于压力容器壳体在内压及介质温度作用下的应力远比三杆模型在外载作用下的应力复杂,因而对热应力棘轮效应的分析也相当复杂。但其基本原理和三杆模型是相同的。Miller 曾根据和三杆模型相同的原理推导出了在恒定内压和循环温差应力作用下,每一循环所引起的环向塑性应变和材料屈服应变的比值,为 ASME 规范要求的制订提供了理论基础<sup>[6-7]</sup>。Bree 将薄壁圆筒简化为仅承受周向应力的单轴模型,进一步阐述了热应力棘轮变形机理,并建立了著名的 Bree 图,在工程上得到广泛应用<sup>[8]</sup>。

### 3 安定性和热应力棘轮发生机理的比较

安定性分析和热应力棘轮分析都是假设压力容器材料为理想弹塑性材料;实际工程上采用的材料通常还有一定的应变强化能力和应力再分配的情况,因而上述分析具有一定的保守性。

安定性分析和热应力棘轮分析都考虑了反复加载的情况,前者在加载过程中仅允许压力容器壁局部进入屈服状态,承压边界不允许有整体塑性变形;后者在加载过程中运行容器或接管整个截面进入屈服状态并发生一定量的塑性变形。因而运行过程中压力容器如果存在交变的温度载荷,在工程上必须对每次加载允许的变形量进行评估和限制以避免热棘轮现象的发生。

热应力棘轮机理分析并不需要假设  $\sigma_1 > 2\sigma_s$  的条件,也就是说,结构满足弹性安定的条件并不是结构不发生热棘轮效应的充分条件,即使压力容器分析结果显示结构满足一次加二次应力评定要求,仍需要开展热应力棘轮分析。

结构首次加载产生了一定的内应力场,安定性分析和热应力棘轮分析都考虑了反复加载的情况,本质上就是分析和评估结构在有内应力场条件下再次加载时的响应;安定性分析考虑的是在结构内应力场基础上形成的最终应力场沿压力容器壁是非均匀分布的,热应力棘轮分析考虑的是在结构内应力场基础上形成的最终应力场导致压力容器壁

是整体屈服的。但两者都不考虑压力容器实际结构在加载前制造、安装过程中可能存在的内应力场的影响,在工程应用时应结合实际情况进行分析,必要时应对初始内应力场的影响进行评估。

### 4 结语

本文讨论了结构安定性及热应力棘轮发生的机理,比较了结构安定性分析及热应力棘轮分析适用的假设条件及区别,主要结论如下:

(1) 安定性分析提出的  $\sigma_1 < 2\sigma_s$  条件适用于压力容器壁局部屈服的情况,不适用于热应力棘轮过程中压力容器壁整个截面屈服的情况。

(2) 结构满足弹性安定的条件并不是结构不发生热棘轮效应的充分条件,即使压力容器结构满足一次加二次应力评定要求,如运行过程中承受了交变的温度载荷,则仍需要开展热应力棘轮分析。

(3) 规范中对结构安定性及热应力棘轮的要求都未考虑压力容器实际结构在加载前制造、安装过程中可能存在的内应力场的影响,在工程应用时应结合实际情况进行分析,必要时应对初始内应力场的影响进行评估。

### 参考文献:

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Appendices, The American Society of Mechanical Engineers[S]. New York, 2019
- [2] EN13445 Unfired Pressure Vessel [S]. 2014
- [3] CODAP Code for construction of unfired Pressure Vessel [S]. 2000
- [4] 范钦珊. 压力容器的应力分析与强度设计[M]. 北京: 原子能出版社, 1979
- [5] 丁伯民. 热应力棘齿作用的产生机理和限制条件[J]. 化工设备设计, 1984(2): 1-7
- [6] Miller D R. Thermal Stress Ratchet Mechanism in Pressure Vessels [J]. Transactions of the ASME, Series D, 1959, 81(2): 190-196
- [7] 丁伯民. 对 ASME VIII-2 关于“热应力棘轮现象评定”规定的再商榷——联系文《对 ASME VIII-2 (2013 版) 热应力棘轮评定方法修订的解读》[J]. 化工设备与管道, 2018, 55(1): 1-9
- [8] Bree J. Elastic-plastic Behavior of Thin Tubes Subjected to Internal Pressure and Intermittent High Heat Fluxes with Application to Fast-nuclear-reactor Fuel elements[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1967, 2(3): 226-238



# 定子线棒受力三维有限元分析

任盼秋

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**文章构建了用三维瞬态有限元方法计算大型发电机定子线棒电磁力的数学模型,并以某大型发电机的端部实际结构搭建数学分析模型,搭建了满足实际工程结构的发电机定子线棒端部三维瞬态有限元模型。随后进行三维有限元单元剖分和边界条件处理,并完成了对空载运行、额定负载运行、进相(深度0.9)运行等不同工况下发电机定子线棒端部受到电磁力的计算和分析。计算结果不仅验证三维瞬态有限元法分析发电机电磁场的正确性,同时也为发电机定子线棒的设计和振动研究提供了理论依据,并根据分析结果提出了一些防止定子线棒振动的优化措施。

**关键词:**定子线棒端部磁场; 定子线棒端部电磁力; 三维瞬态有限元计算

中图分类号: TM153

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)04-0062-04

## 3D FEM Analysis about Stator Winding Force

REN Panqiu

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

**Abstract:** The mathematical model to calculate the electromagnetic forces acting on winding end of generator by 3D transient magnetic field FEM is established. Taking a generator as an example, 3D full model of the end region of generator is built. After finite element subdivision and boundary condition processing, the paper completes the calculation of the electromagnetic force on winding end at no load operation, rated load operation, leading phase operation (depth 0.9). The calculated results of electromagnetic force acting on stator winding end are obtained. The results can not only verify the correctness of the 3D transient magnetic field FEM method for generator magnetic calculation, but also provide the theoretical basis for the generator design and vibration research of stator winding and propose some measures for preventing winding vibration.

**Key words:** electromagnetic field of stator winding end; electromagnetic force of stator winding end; 3D transient FEM calculation

定子线棒是发电机的导电元件,也是发电机产生电磁作用的结构件,但是定子线棒作为一个复杂的三维结构件在发电机运行时所产生的复杂电磁场中必然会受到各种作用力,因此对定子线棒的受力分析也是极为复杂的。同时由于定子线棒空间结构的复杂性,二维平面模型的计算和分析难以达到实际工程分析要求<sup>[1-8]</sup>。

发电机在特定工况运行下,定子线棒在不同时刻都会同时受到各种变化的电磁力、机械力、热应

力等多种作用力的作用。特别是在发生故障时,如电机突然短路工况下,将使发电机线棒受到数十倍、数百倍的力从而产生位移和变形,造成线棒的绝缘损伤和匝间短路。所以能否确保发电机的长期安全运行,线棒的结构设计和受力分析至关重要。因此,对发电机定子线棒受到的电磁力进行计算和分析,优化线棒结构,并在关键位置采取有效措施防止线棒振动十分有意义。本文依据某发电机实际结构建立了计算模型,在计算发电机端部漏

收稿日期: 2021-02-13

作者简介: 任盼秋(1986-), 2012年毕业于重庆大学电气工程及其自动化专业, 硕士研究生, 工程师。现在东方电机有限公司从事系统设计及应用开发工作。

磁场的基础上对3种不同运行工况下定子线棒端部所受到的电磁力进行了计算与分析,并提出了一些对比结论和优化措施。本文在计算定子线棒端部的电磁力时,不考虑线棒的形变问题。

## 1 定子线棒端部的数学模型

本文建立的定子线棒模型形式为双层圈式叠绕组,结构由3部分组成:出槽口处的直线边,中段渐开线的斜边、端部连接鼻段的圆弧边。发电机定子线棒端部所受电磁力的求解模型如图1所示,模型的外部

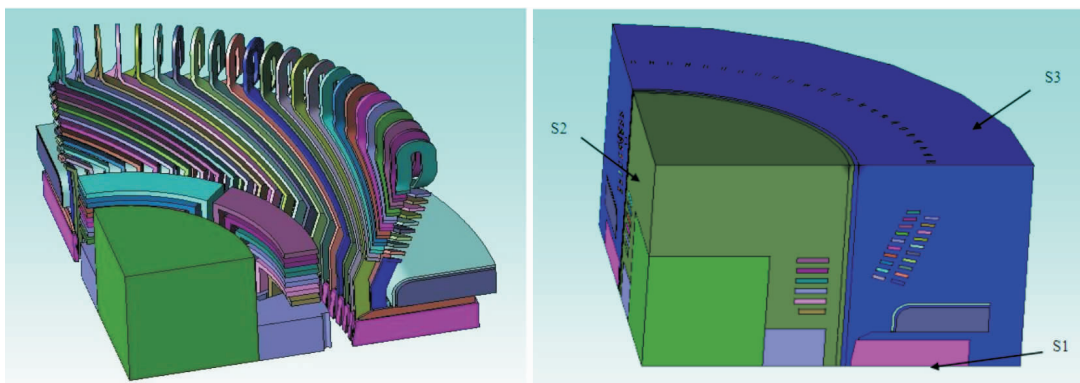


图1 定子线棒端部所受电磁力的求解域

为空气,外表面S2及S3与底面S1一起构建了模型的整个外边界。整个物理模型包含定子铁芯第一段通风沟到端部整个阶梯段铁心,铁芯端部设计为阶梯段主要是为减少端部漏磁引起的铁芯附加损耗,因此这部分必须精确建模。在铁心底面S1上,文章认为位函数虽然是三维的,但是位函数只有x和y方向上的分量,z方向分量为0,可以采用二维磁场结合三维磁场的方法来确定求解区域边界条件,即截面S1上标量电位及矢量磁位由二维磁场求解出,并作为三维磁场的求解域的初始边界条件。

## 2 定子线棒端部的受力分析

### 2.1 空载运行时定子线棒端部的受力

空载运行时由于定子线棒没有施加电流,理论上电磁力应该为0。由图2可以看出空载运行时线棒所受到的电磁力非常小,最大值为 $490 \text{ N/m}^3$ 。这是因为此定子线棒模型未考虑多匝电磁线形式和匝间绝缘,整个一根线棒为一个导体,因此在发电机端部时变的磁场中自身产生了幅值较小的涡流,使得定子线棒上产生了较小的电磁力。

### 2.2 额定负载运行时定子线棒端部的受力

额定负载运行时的电磁力如图3所示。图3左可以看出此时定子线棒端部所受到的电磁力比较大,主要集中在线棒与定子铁心齿部接触处,即出槽口处的直线边上受到的电磁力远大于中段渐开线的斜边和端部连接鼻段的圆弧边,最大电磁力为

为空气,外表面S2及S3与底面S1一起构建了模型的整个外边界。整个物理模型包含定子铁芯第一段通风沟到端部整个阶梯段铁心,铁芯端部设计为阶梯段主要是为减少端部漏磁引起的铁芯附加损耗,因此这部分必须精确建模。在铁心底面S1上,文章认为位函数虽然是三维的,但是位函数只有x和y方向上的分量,z方向分量为0,可以采用二维磁场结合三维磁场的方法来确定求解区域边界条件,即截面S1上标量电位及矢量磁位由二维磁场求解出,并作为三维磁场的求解域的初始边界条件。

$9.60 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ 。图3右可以看出电磁力轴向分量计算值很小,最大值为 $2.34 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ ,主要集中在鼻段的圆弧内圆和渐开线的斜边下部,在出槽口处的直线边轴向分量较小,主要为径向分量。

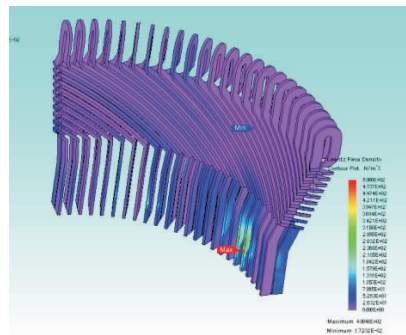


图2 空载运行时定子线棒端部的电磁力分布

额定负载运行时定子线棒端部关键点的电磁力见表1。

从电磁力角度上看有三部分因素:定子产生的漏磁场引起定子线棒受力、转子产生的漏磁场引起定子线棒受力、上下层线棒的相互作用力。下面对不同时时刻定子线棒端部在轴向、径向和切向上所受到的电磁力的渐变规律进行了分析。

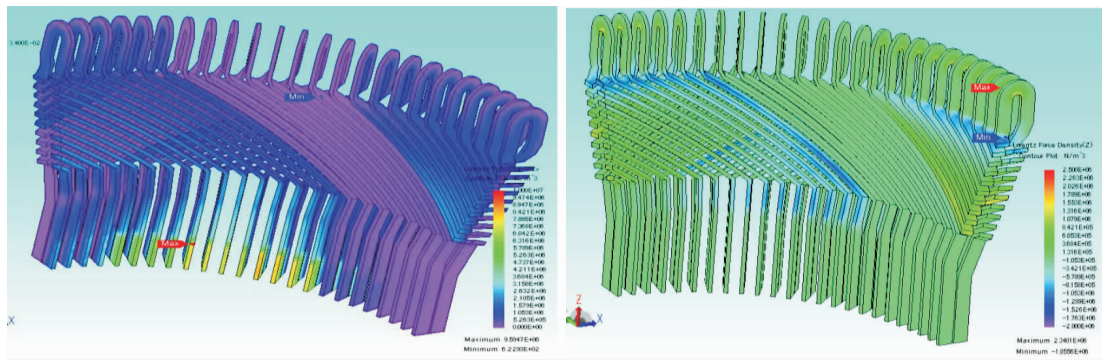


图3 额定负载运行时定子线棒端部的电磁力分布

表1 额定负载运行时定子线棒端部关键点的电磁力

关键点	1 (槽内)	2 (出槽口)	3 (渐开线起点)	4 (渐开线中点)	5 (渐开线终点)	6 (鼻端顶点)	$N/m^3$
电磁力	3.90E6	4.57E6	6.17E5	7.16E5	5.79E5	6.75E4	
X 向分量	2.22E6	1.75E6	-1.88E5	6.40E5	3.39E5	-1.34E4	
Y 向分量	1.95E6	2.54E6	3.80E5	1.89E5	-3.15E4	-5.08E3	
Z 向分量	-0.014 4	-0.722 63	4.47E5	6.90E4	-5.57E4	5.31E4	

定子线棒出槽口处直线边只有轴向电流,此段电磁力只有径向和切向分量。图4为同一槽的上下层线棒在不同时刻电磁力的矢量分布,22 ms 时上层线棒不受力,下层线棒电磁力推向槽底。这是因为转子产生的磁场使定子线棒推向槽底的作用力与定子产生的磁场和线棒之间的作用力一起产生的推向槽口的作用力相互抵消。23 ms 时下层线棒受到推向槽底的电磁力大于上层线棒受到推向槽

口的电磁力,总体受力方向指向槽底。24 ms 时上层线棒电磁力从径向转向为切向,且在切向上不断增大,随后电磁力转为推向槽底方向,而下层线棒电磁力一直为推向槽底,且此时下层线棒所受到的电磁力较上层线棒小很多。29 ms 时上层线棒和下层线棒受到的电磁力都为推向槽底方向,由一个全过程看出,上下层线棒的受力随时间不断的变化。

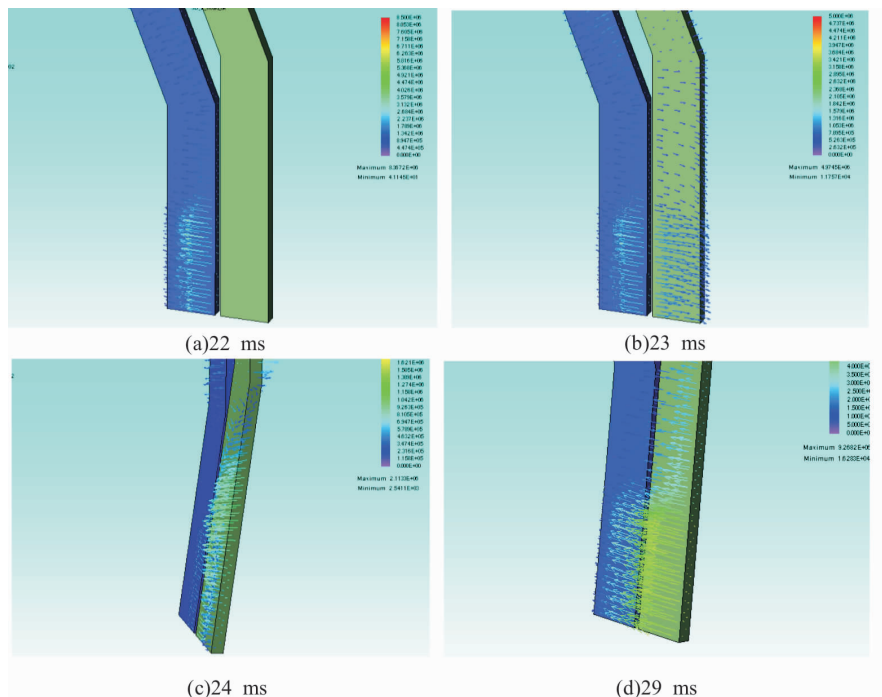


图4 额定负载运行时出槽口直线边的电磁力矢量分布



中段渐开线的斜边为圆锥面曲线结构,把它受力分为两个分量:一个相切于圆锥面,一个垂直于圆锥面。由图5所示,不同时刻的电磁力主要集中于渐开线与出槽口直线边的接合处,但较出槽口处

的直线边小很多,受力方向主要集中于圆锥面的切向。鼻段的圆弧边的电磁力较渐开线斜边部分更小,主要为径向和切向,且圆弧两端受力方向相反。

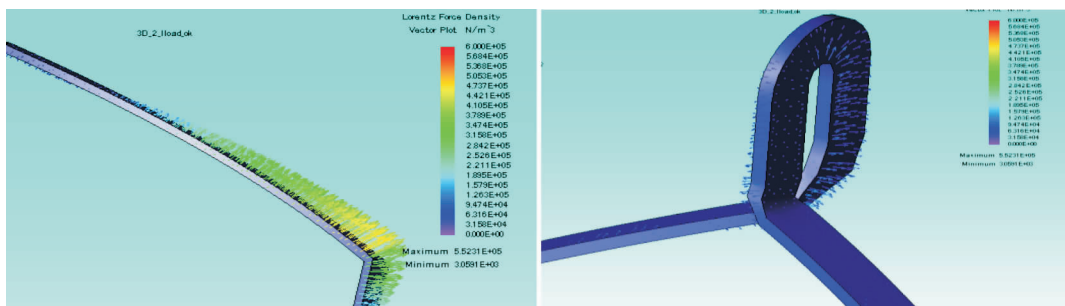


图5 额定负载运行时渐开线段和鼻端的电磁力矢量分布

### 2.3 进相(深度0.9)运行时定子线棒端部的受力

如图6所示,进相运行时定子线棒端部的电磁力最大值为  $1.04 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ ,比额定负载运行时有所增大,这是因为进相运行时定子电枢电流和励磁电流较额定运行时减少,但定子线棒上的磁密较额

定负载时增大,使得定子线棒端部的受力力较额定运行时有所增强,但增幅不大,分布规律也与额定负载时较为一致。

进相(深度0.9)运行时定子线棒端部关键点电磁力见表2。

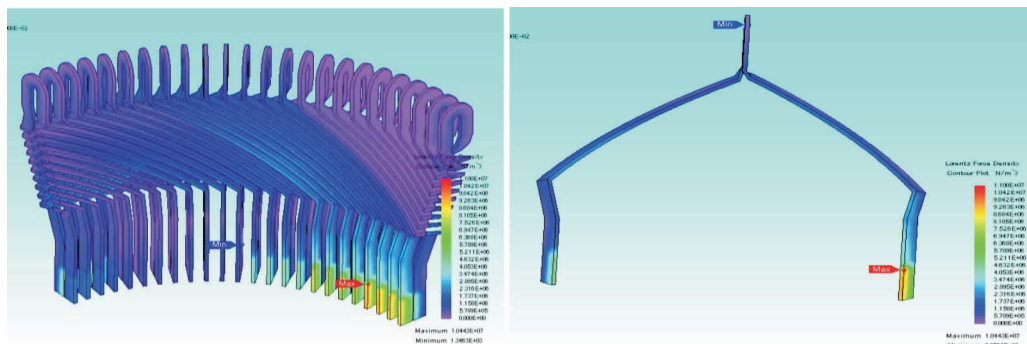


图6 进相(深度0.9)运行时定子线棒端部所受电磁力

表2 进相(深度0.9)运行时定子线棒端部关键点的电磁力

	N/m <sup>3</sup>					
关键点	1 (槽内)	2 (出槽口)	3 (渐开线起点)	4 (渐开线中点)	5 (渐开线终点)	6 (鼻端顶点)
电磁力	4.89E6	5.07E6	7.98E5	1.17E6	7.93E5	5.34E4
X向分量	3.18E6	4.16E6	6.94E5	1.04E6	2.22E4	5.21E3
Y向分量	2.43E6	2.60E6	3.80E4	4.08E5	5.97E5	5.78E3
Z向分量/N/m <sup>3</sup>	-0.813 3	-2.049 4	-1.79E5	-5.69E4	-5.16E5	-3.32E4

将表1和表2计算值对比可发现,额定负载运行时与进相(深度0.9)运行时定子线棒的电磁力分布规律较为一致,且进相运行时计算值较额定负载时增大约10%。

额定负载运行和进相(深度0.9)运行三种工况下发电机定子线棒端部所受到的电磁力的时空分布规律,并对计算结果进行了对比,分析发现:

(1)空载运行时定子线棒几乎不受力,进相(深度0.9)运行时定子线棒端部的电磁力比额定负载时增大10%左右。

### 3 结语

本文运用三维瞬态有限元法分析了空载运行、

(下转第71页)



# 东方电机“十三五”创新驱动发展综述

余小波 尹国军

东方电气集团东方电机有限公司,四川 德阳 618000

**摘要:**本文简要回顾了东方电机“十三五”创新驱动发展取得的主要成就,经过“十三五”时期的创新驱动,东方电机的综合技术实力达到了国内领先、国际先进水平,荣获东方电气集团公司“十三五”发展突出贡献科技创新奖,并对东方电机“十四五”创新驱动前景进行了展望。

**关键词:**创新; 驱动; 综述

中图分类号:F426.4

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)04-0066-06

## Overview of the Innovation-driven Development of Dongfang Electric in the 13th Five-Year Plan

YU Xiaobo, YIN Guojun

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

**Abstract:** This paper briefly reviews the main achievements of the innovation-driven development of Dongfang Electric Machinery Co., Ltd (DFEM) “13th Five-Year Plan”, after the “13th Five-Year Plan” period of innovation drive, the comprehensive technical strength of DFEM reached the leading domestic and international advanced level. DFEM won the “13th Five-Year Plan” development of Dongfang Electric Corporation(DEC) outstanding contribution to scientific and technological innovation award. The prospect of the innovation driving of the “14th Five-Year Plan” of DFEM is forecasted.

**Key words:** innovation; drive; review

“十三五”期间,东方电机有限公司(以下称“东方电机”)深入贯彻落实习近平总书记关于科技创新系列重要指示批示精神和国家创新驱动发展战略,坚持把创新作为引领企业发展的第一动力,全面实施了关键核心技术攻关、产品创新优化、智能制造转型三大创新工程,年均研发投入强度达到了7%,持续提升了企业自主创新能力,重大技术攻关取得了新突破,高端产品研制攀上了新高峰,数字化制造转型取得了新成就。

### 1 关键技术攻关突破

“十三五”期间,东方电机全面实施了关键核心技术攻关工程,DF-300 冲击式水力试验台、变速抽蓄发电电动机试验研究平台、热能发电机通风气动性能试验平台、高性能仿真计算平台、三维设计工艺协同平台等重要科研平台投入使用,进一步提升了关键核心技术攻关能力,并取得显著成效,共获得各级各类科技进步奖 56 项、授权专利 280 件。彰显了把核心技术牢牢掌握在自己手上,科技自立自强打造大国重器的初心(图 1~8)。

收稿日期:2021-08-30

**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。

尹国军(1965-),男,2012年毕业于西南交通大学管理专业,硕士。高级工程师,现任东方电气集团东方电机有限公司副总经理。研究方向:技术管理,项目管理。

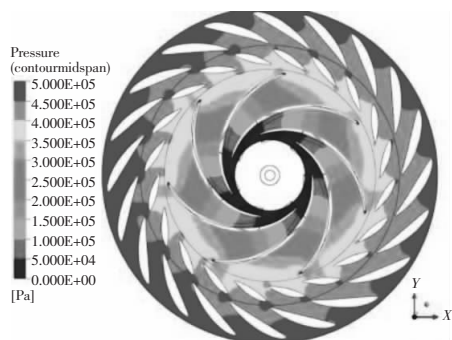


图1 水力稳定性研究

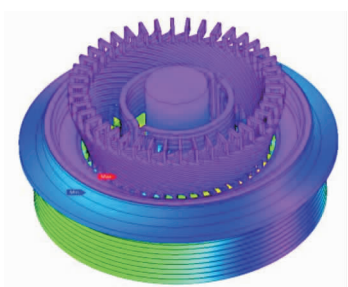


图2 全三维电磁场分析

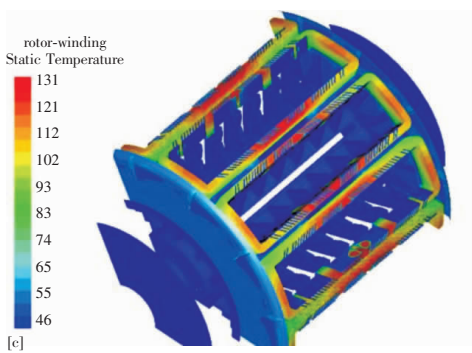


图3 空内冷转子线圈温度分布模拟



图4 低损耗轴承仿真

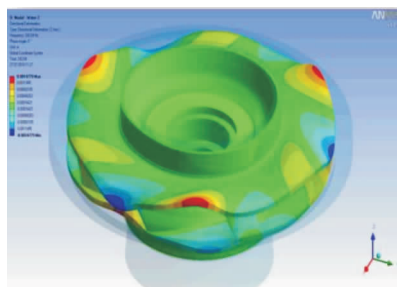


图5 动态流固耦合分析

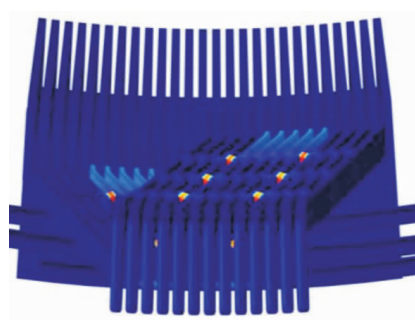


图6 高海拔防电晕研究



图7 定子铁心机器人自动叠片



图8 发电机机座空间尺寸三维检测

## 2 高端产品研制

“十三五”期间,东方电机全面实施了产品创新优化工程,创造了两个世界第一:全球首台1 000 MW 白鹤滩水电机组(图9~10)、世界最大1 750 MW 三代核电机组主设备(图11),分别占领水电和核电技术的制高点。创造了三个中国第一:中国第一高水头长龙山抽水蓄能机组(图12)、单机容量中国第一10 MW 海上风力发电机(图13)、中国第一个自主三代“华龙一号”核能发电机(图14)。首个国产化抽水蓄能项目深圳抽水蓄能项目由东方电机完成机组调试并成功投运,绩溪抽水蓄能电站“一年五投六并网”,创造了行业安装调试新纪录。东方电机践行了求实图强研制精品机组、服务国家战略的使命。



图9 1 000 MW 白鹤滩水轮机转轮吊装

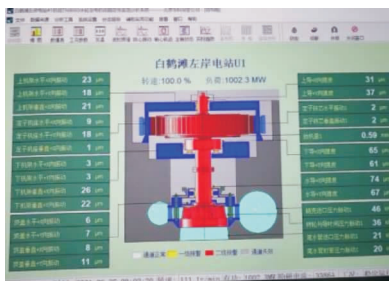


图10 白鹤滩左岸1号机运行数据



图11 全球首台 ERP1 750 MW 发电机定子发运



图12 长龙山抽水蓄能机组发电机转子吊装



图13 10 MW 海上风电在福建兴化湾风场并网发电

东方电机自主研发的世界上单机容量最大 300 MVar 换流站专用新型空冷调相机成功并网投运,机组振动等关键参数优于国家标准,主要性能指标表现优异,综合性能达到国际先进水平(图15)。东方电机成功研制的国内首台新型 50 MVar 凸极空冷和

50 MVar 隐极空冷分布式调相机(图16)。目前,东方电机已成为行业调相机种类最全、研制水平最高的企业。



图14 华龙一号首台核能发电机在电站投入运行



图15 300 MVar 空冷同步调相机厂内型式试验



图16 50 MVar 凸极空冷调相机厂内型式试验

东方电机自主研发成功国内单机容量最大、达到国际先进水平的 24 MW 级 6 000 r/min 管线压缩机防爆无刷励磁同步电动机;成功获得防爆电机市场准入资质,完成了三大系列 33 台低压防爆电机样机研制(图17)。



图17 24 MW 管线压缩机驱动同步电动机厂内试验

此外,东方电机持续推进热电产品系列化、模块化和智能化设计,大型热电已形成具有东方技术



特色的 50 Hz 和 60 Hz 水氢冷 2 极、水氢冷 4 极、全氢冷、空冷 4 个完整的产品系列,完成简洁紧凑的第五代 300 MW、灵活运行性能优良的第四代 600 MW 燃煤火电产品的升级换代。并且完成了 6 MW ~ 165 MW 系列节能环保中小热电发电机产品全覆盖,已形成 3 个系列 21 个规格的标准产品。东方电机持续拓展综合能源利用、风光水火储等重点新领域技术研究,有序开展产业化示范,为新产业发展储备技术。

### 3 数字化制造转型成就

“十三五”期间,东方电机全面实施了智能制造转型工程,智慧机组开发、数字化制造、初见成效,创新研究平台进一步完善升级。

#### 3.1 智慧机组开发

东方电机成功开发水电、热电机组远程监测和智能诊断信息系统,全生命周期服务技术取得初步成果(图 18 ~ 19),先后获得大朝山、安康电站改造,深圳抽蓄机组调试、葛洲坝全息在线监测等服务项目,为智能产品打造和智慧电厂建设进行了有益探索。

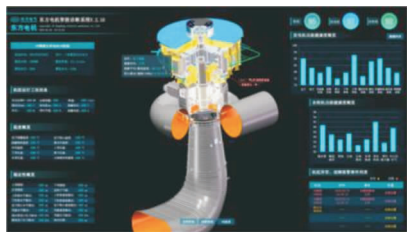


图 18 水能发电机组智能诊断系统一期投入使用



图 19 热能发电机远程专家诊断系统上线运行

#### 3.2 数字化制造

东方电机以“核心、自主、安全、可控”为指导,完成了本行业首个定子线圈、转子线圈及冲片制造数字化车间建设(图 20 ~ 21),车间稳定运行后,冲片年产量从 9 000 吨提高到 12 000 吨,人均产出可提升 620%,能源利用率提高 56.6%,劳动强度降低

90% 以上。该项目通过工信部验收,实现了核心部件高精度、高效率 and 高质量制造,树立了大型发电装备数字化制造标杆,为“十四五”建设数字化智能化工厂奠定了坚实基础。



图 20 定子冲片无人数字化车间制造



图 21 转子线圈自动线铣孔

#### 3.3 创新研究平台升级

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(图 22)通过行业验收,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,开启了高水头大容量冲击式水电机组国产化的新征程。

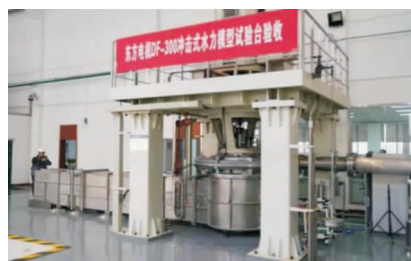


图 22 DF300 冲击式水力试验台通过行业验收

### 4 科技创新体系

“十三五”期间,东方电机深入贯彻落实习近平总书记关于科技创新系列重要指示批示精神和国家创新驱动发展战略,不断完善科技管理体系,促进了企业自主创新能力持续提升。

#### 4.1 科技管理升级

“十三五”研发费用占营业收入平均比重较“十



“二五”增长了近10个百分点,确保了东方电机关键技术攻关和重大新产品开发的顺利实施。通过实施科技战略管理,科技管理水平不断提升,科研项目数量显著增长,新产业研发比例不断提升,技术创新发展路径规划更加精准,目标和任务更加明晰。东方电机每两年召开一次科技创新大会,对有突出贡献的科技人员及团队进行表彰、奖励(图23)。



图23 “十三五”期间有突出贡献的科技人员受到表彰

#### 4.2 科技成果

“十三五”期间,东方电机科技创新成效显著,共获得各级各类科技进步奖56项(图24~26)。其中,获国家科技进步奖2项(特等奖1项、二等奖1项),省部委及行业科技进步奖22项,(其中特等奖2项、一等奖4项),中国好设计2项(其中金奖1项)。申请专利369件,获得授权专利280件,其中发明专利69件。



图24 国家科技进步奖证书

### 5 创新驱动开新局

成绩代表过去,未来还需开拓。在总结“十三五”成绩的同时,东方电机也清醒地看到了存在的差距,主要表现在开放创新不足,创新模式单一,“十三五”期间人才的创新活力不足等方面。为此,

东方电机必须要主动研判科技和产业变革大势,坚定做好创新驱动的四篇文章,在创新引领,数字赋能,合作共赢中,开创东方电机“十四五”创新驱动高质量发展新局面。

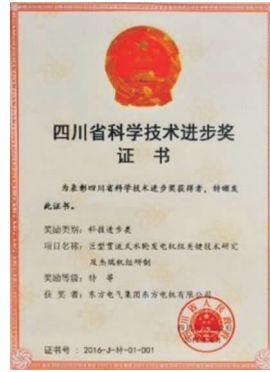


图25 四川省科技进步奖证书



图26 机械工业科学技术奖证书

#### 5.1 加大科技投入,夯实创新驱动的根基

坚持面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康,加大科技投入,加快数字化和智能化转型,以敏锐的眼光和迅捷的速度,抓住用户需求和行业发展方向,着力扩大产学研用科技开放合作空间,在更高起点上推进自主创新,选准必争领域和优先方向,努力实现关键技术重大突破,集中力量抢占行业技术制高点。采取以市场需求为导向和技术引领市场双轮驱动的创新策略和差异化竞争策略,集中人力物力对制约东方电机发展的关键技术进行攻关,掌握更多的具有自主知识产权的技术成果,夯实占领市场制高点的技术基础,用最新的科技进步和创新成果去满足用户的需要,引领用户的需要,培育新的经济增长点。

#### 5.2 加快人才培养,抓住创新驱动的关键

目前,东方电机面临创新人才队伍结构欠合

理,高层次技术带头人才、复合型、国际化人才缺失等问题。当务之急就是要采取切实可行的措施,全方位培养、引进、用好人才,形成人才选聘有引力、人才成长有动力、创新工作有活力的平台和环境。加快建设一支结构合理、素质精良的科技人才队伍,为企业实施创新驱动发展战略奠定坚实的人才基础。

### 5.3 培育创新文化,铸就创新驱动的靈魂

如果说科技创新是企业生生不息的源泉,那么创新文化就是科技创新的不竭动力。东方电机要深入践行创新、创造、创享的同创文化,进一步提升创新动力、激发创新活力,致力打造勇于探索、锐意创新、甘于寂寞、宽容失败的创新氛围,勇敢担负起“铸造大国重器,挺起民族脊梁”、“产业报国、制造强国”的历史使命,充分发挥创新的第一动力作用,把创新引领公司高质量发展的各项举措落到实处。

### 5.4 完善创新机制,提供创新驱动保障

良好的科技评价和奖励制度是形成正确评价导向、激发科技人员创造活力和动力的关键。东方电机要积极贯彻尊重劳动、尊重知识、尊重人才、尊重创造的方针,进一步解放思想,创新科技人才体制机制,完善以创新能力和实际贡献为导向的科技

人才评价制度,进一步激发的科技人员创新的积极性和主动性,增强科技人员的获得感和荣誉感,让真正为企业科技创新做出突出贡献的科技人员得到认可和尊重,得到更多的实惠,使科技人员的价值在企业里得到相应的体现。

## 6 结语

当前,新一轮科技革命和产业变革深入发展,科技革命对人类生产生活方式带来颠覆性改变,“碳达峰”、“碳中和”战略将对我国能源发展战略产生深远影响,必将深刻影响能源装备行业的发展方向。“十四五”期间,东方电机将坚定不移贯彻新发展理念,进一步增强科技创新的责任感和使命感,精准把握科技创新方向,紧跟绿色发展、清洁低碳和数字化、智能化转型的趋势,积极推动质量变革、效率变革和动力变革,围绕“补短板、锻长板”,系统抓好核心技术攻关,持续提升产品性能、质量及竞争力,大力开展新技术研究及新产业培育,积极推进智能制造转型,着力打造数字化智慧化工厂,全面增强自主创新能力,大幅提升企业价值创造能力,从根本上重塑企业的核心竞争力,向着建设“中国最好、世界一流”的发电设备企业的目标迈进。

(上接第 65 页)

(2) 定子线棒端部所受电磁力主要还是在径向上,该力使得定子线棒在径向上有不断地收缩扩张的趋势,在三维空间上随着时间连续变化,呈现旋转的类椭圆形状。因此有必要施加多层圆形端箍对线棒径向上作固定。

(3) 定子线棒出槽口直线边的径向电磁力最大,且上下层线棒受力大小方向都随时间连续变化,因此需要在槽口、层间、槽底都增加垫条固定。渐开线斜边部分主要受到相切于圆锥面方向的受力,这将会引起整个线棒的扭转。连接鼻端圆弧处的受力主要为径向和切向上,上下层受力方向相反。

### 参考文献:

[1] 陈丕章,严烈通,姚若萍. 电机电磁场理论和计算[M]. 北京:科

学出版社,1986:269-299

- [2] 李京平,唐任远. 汽轮发电机定子定子线棒端部电动力研究[J]. 沈阳工业大学学报,1991(2):13-25
- [3] 张炳军,陈贤珍,周克定. 汽轮发电机端部电动力的有限元计算[J]. 大电机技术,1992(2):23-28
- [4] 阮江军,陈贤珍,周克定. 汽轮发电机3D涡流场计算中定子线棒端部渐开线的三维解析表示[J]. 哈尔滨电工学院学报,1995(6):21-24
- [5] 金丽萍,何圣熙. Pro/ENGINEER 中的汽轮发电机定子线棒三维建模及参数系列化设计[J]. 工程图学学报,2007(2):31-38
- [6] 欧阳鹏,王建辉,范成西等. 基于 ElecNet 的汽轮发电机定子线棒端部结构建模及电场计算[J]. 大电机技术,2009(1):14-18
- [7] 张炳军,陈贤珍,周克定. 汽轮发电机线棒端部电动力的三维计算(I)-积分方程法[J]. 大电机技术,1993(5):25-29
- [8] 张炳军,陈贤珍,周克定. 汽轮发电机绕组端部电动力的三维计算(续)——(II)实例计算[J]. 大电机技术,1993(6):14-19

# 基于高频电磁换向阀控制的汽轮机 危急遮断装置研究分析

李庆 刘炯 邵毅 李亮

东方电气自动控制工程有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**本文介绍了一种新型高频电磁换向阀的结构及工作原理,建立该电磁换向阀的仿真模型,通过对电磁回路、机械部分及液压系统之间的耦合仿真,获得了较准确的电磁换向阀静态仿真结果,并将该高频电磁换向阀应用到一种汽轮机危急遮断装置上,通过仿真软件完成了对基于高频电磁换向阀控制的汽轮机危急遮断装置仿真模型的建立,通过模拟汽轮机各中工况下危急遮断器相关工作状态,进一步验证了基于高频电磁换向阀控制的汽轮机危急遮断装置的具有很高动态特性。

**关键词:**高频电磁换向阀; 耦合仿真; 危急遮断装置

中图分类号: TM62

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)04-0072-04

## Research and Analysis of Steam Turbine Crisis Trip Device Based on High Frequency Solenoid Valve Control

LI Qing, LIU Jiong, SHAO Yi, LI Liang

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

**Abstract:** In this paper, a new type of high frequency solenoid valve structure and the working principle, to establish the simulation model of solenoid valve, by means of the mechanical parts of the electromagnetic loop, and the coupling between the hydraulic system simulation, the solenoid valve static and dynamic simulation results more accurate, and the applications of the high frequency solenoid valve to a steam turbine crisis trip device, completed by simulation software based on steam turbine critical of the high-frequency solenoid valve control block device simulation model is established, through the simulation of various working conditions is critical in the interrupt turbine working state, It is further verified that the critical block device of steam turbine based on high frequency solenoid directional valve has high dynamic characteristics.

**Key words:** high frequency solenoid valve; coupling simulation; crisis trip device

随着科学技术的快速发展,智能数字电液控制技术成为液压技术重要的发展趋势之一,也是推动汽轮机调节保安系统技术发展的重要原因。目前在汽轮机调速系统中大量使用了电磁换向阀,其中最为重要的电磁换向阀就是汽轮机危急遮断装置上的四只 AST 电磁换向阀。目前该电磁换向阀几乎普遍存在动态响应频率不高,线圈发热量高等缺点,无法满足长期带电使用要求。近年来,随着各

行各业科技飞速发展,也使得电磁换向阀的理论和应用研究得到了较快的发展,现提出一种具有结构简单,零泄漏,价格低廉,发热功率低的高频电磁换向阀。

本文在汽轮机危急遮断装置的实际应用中,对电磁换向阀性能要求的,设计了一种新型两位三通高频电磁换向阀,并构建了高频电磁换向阀的数学模型,并利用仿真软件对高频换向阀进行了电磁回

收稿日期:2021-09-24

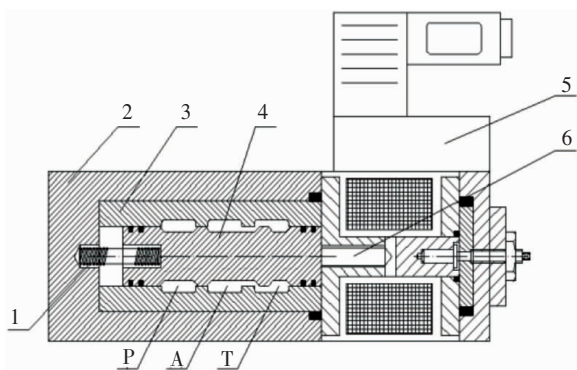
**作者简介:**李庆(1983-),2010年毕业于昆明理工大学机械制造及其自动化专业,工学硕士,高级工程师。现在东方电气自动控制有限公司任设计工程师,长期从事汽轮机调节系统研发设计工作。



路、机械部分及液压系统之间的耦合仿真分析,得到了高频电磁换向阀的静动态特性。最后将该高频电磁换向阀应用到汽轮机危急遮断装置上,再通过对整个装置进行仿真模型,并对相关仿真数据进行分析,可得到应用了高频电磁换向阀的汽轮机危急遮断装置在汽轮机的各个工况下动作时均具有很高的响应速度,并在原理设计上具有很高的可靠性。进而从整个系统上验证了高频电磁换向阀动态性能。

### 1 高频电磁换向阀系统模型的建立

高频电磁换向阀的结构设计应充分考虑磷酸酯抗燃油对金属材料的腐蚀性较强等特点,在阀芯,阀体及密封件材料选择上都选用了抗腐蚀的材质。图1为两位三通高频电磁换向阀的结构简图。



1-复位弹簧;2-阀体;3-阀套;4-主阀阀芯;  
5-高频电磁铁;6-衔铁

图1 两位三通高频电磁换向阀结构简图

当无电压信号输入时,电磁铁5失电,主阀阀芯4在阀芯复位弹簧1及液压油的作用下位于右边极限位置,此时T口与A口接通,当有电压信号输入时,电磁铁得电,衔铁6克服弹簧力,推动主阀阀芯4向左运动,P口与A口接通,实现对执行机构流量、压力的控制。

### 2 高频电磁换向阀数学模型

高频电磁换向阀是电磁回路、机械部分及液压系统相互作用的耦合体,其工作过程也就是电、磁、机、液相互作用的过程。根据高频电磁换向阀的功能和机理,我们将其分为4个子系统,分别为

“电”子系统,“磁”子系统,“机械”子系统和“液”子系统。通过对电、磁、机、液4个子模块的分析,建立电磁换向阀的耦合数学模型如下。

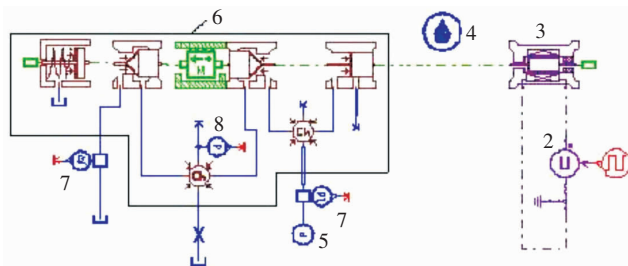
$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L(x) + i \frac{\partial L(x)}{\partial i}} (u(t) - Ri(t) - i(t)v \frac{\partial L(x)}{\partial x}) & \text{电流方程} \\ F_m = -\frac{\phi}{\mu_0 S} & \text{电磁力方程} \\ m\ddot{x} = F_m - F_{\text{spring}} \pm F_w - F_z & \text{运动方程} \\ F_w = C_d C_v \pi d \Delta P \sin 2\theta x & \text{液动力方程} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中各参数含义如下:

$u(t)$ 为施加在线圈上的电压; $R$ 为线圈的电阻; $\Psi$ 为线圈总磁链; $\Psi = Li(t)$ ; $L$ 为线圈的电感,它与衔铁的位置是相关的,即 $L = L(x)$ ; $v = \frac{dx}{dt}$ ; $F_m$ 为电磁力; $F_{\text{spring}} = k(x + x_0)$ 为弹簧力; $F_w$ 为液动力; $F_z$ 为阻力; $\ddot{x}$ 为轴向加速度; $m$ 为阀芯等效质量; $\theta$ 为锥阀锥角; $x$ 为阀芯位移。

### 3 高频电磁换向阀仿真分析

利用仿真软件对创建完整的高频电磁换向阀的仿真模型,实现电磁回路、机械部件和液压系统之间的耦合,模型如图2所示。



1-PWM调制信号;2-电压源;3-电磁铁;4-介质参数定义单元;  
5-压力源;6-阀体;7-流量传感器;8-压力传感器

图2 耦合仿真模型

通过仿真得到不同占空比下阀的平均空载流量曲线如图3所示。从图中可以看出在曲线的低段和高段出现了死区和非线性区,而对于占空比在0.2~0.8之间有着良好的线性关系,即意味着控制占空比在此范围内对保证换向阀的控制特性有着重要的作用。



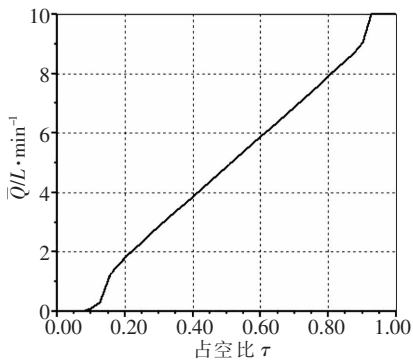


图3 高频电磁换向阀空载流量特性曲线

流量压力特性如图4所示,平均流量随着出口压力的增大而减小,即随着压差的减小,电磁换向阀流量逐渐减小,而流量压力曲线随着占空比的增大有逐渐上移的趋势,表明增大占空比,保持换向阀开启时间,能获得较大的流量输出。

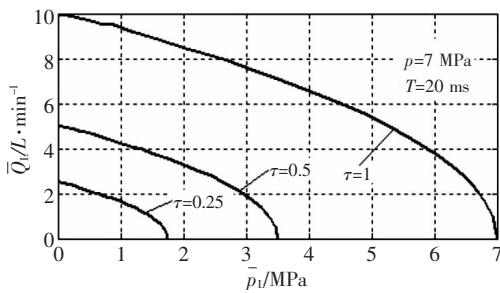


图4 高频电磁换向阀的流量压力特性

阀芯在方波信号的位移响应曲线如图5所示。由于粘性阻尼与摩擦力的影响,阀芯的位移响应曲线在正阶跃响应和负阶跃响应中不会出现超调。从图中可以看出,阀的总开启时间  $t_{on}$  和总关闭时间  $t_{off}$  代表了阀的正负阶跃响应的过渡时间,时间越短,则阀的响应性越好。

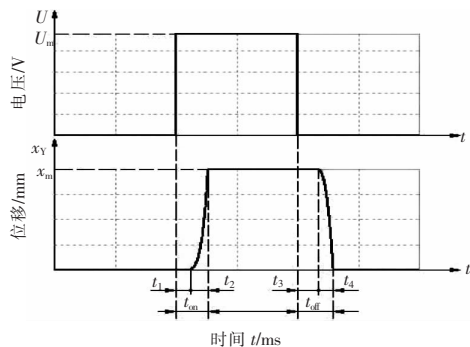


图5 高频电磁换向阀的阶跃响应曲线

图6可看出减小电磁换向阀的开启、关闭时间可以有效增大线性控制区,同时能提高最大响应频率,从而验证了该电磁换向阀具有很高的频响特性。

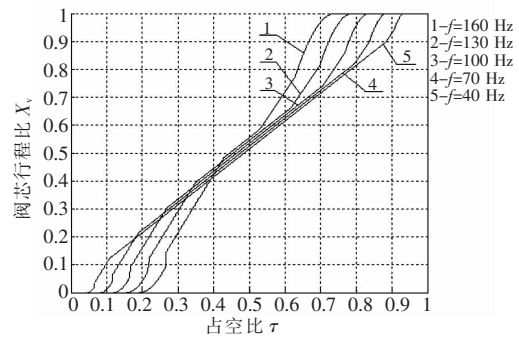


图6 不同频率下的阀芯位移和占空比的关系

#### 4 汽轮机危急遮断装置仿真分析

将该高频电磁换向阀应用到公司最典型的一种汽轮机危急遮断装置上。这种汽轮机危急遮断装置的工作原理是高频电磁换向阀控制压力油串联通过三只节流器形成一个成闭环的液压回路。其中第一只节流器液阻相对于后面两只阻值小很多,第二只节流器和第三只节流器阻值相等。汽轮机危急遮断装置在四只高频电磁换向阀组成串并联液压回路的控制下可控制高压安全油油压的建立和泄压。其液压原理如图7所示。

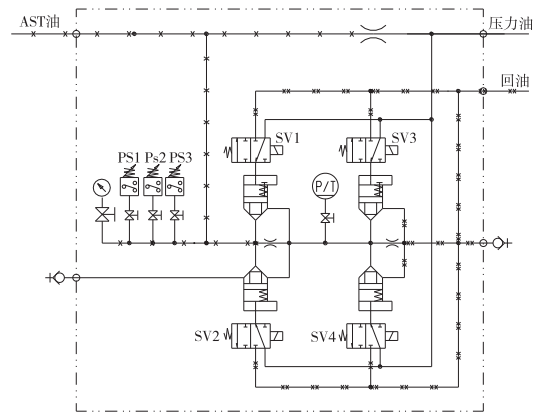


图7 汽轮机危急遮断装置液压原理图

将应用了高频电磁换向阀的汽轮机危急遮断装置通过仿真软件建立了整个装置的简化仿真模型如图8所示。

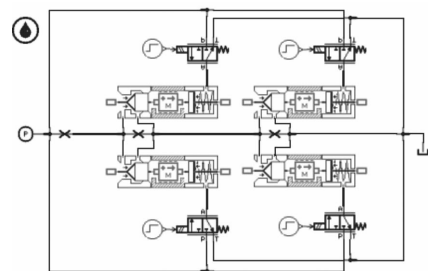


图8 汽轮机危急遮断装置仿真模型

汽轮机控制油的额定油压为 140 bar,在仿真系统值模拟汽轮机挂闸指令 4 只高频电磁换向阀同时带电动作,并在 5 s 后同时失电,通过仿真结果可知安全油压可在 4 只高频电磁换向阀同时带电动作后 0.2 s 内达到 139.6 bar,并能在 4 只高频电磁换向阀同时失电动作后 0.2 s 内快速下降到 0.1 bar;两只阻值相等的节流器中间点油压在 4 只高频电磁换向阀同时带电 0.3 s 内稳定在 69.8 bar,并能在 4 只高频电磁换向阀同时失电动作后 0.2 s 内快速下降到 0.5 bar;其响应曲线如图 9 所示。

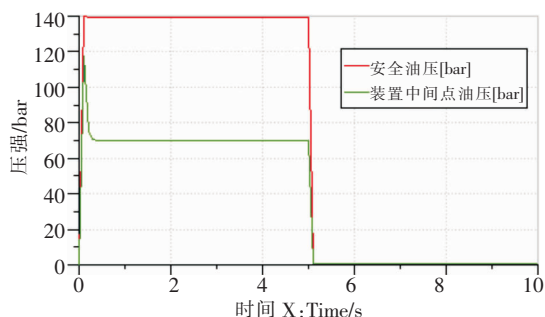


图 9 危急遮断装置挂闸工况油压曲线

在仿真系统值模拟在汽轮机正常运行工况下,定期做危急遮断装置电磁换向阀活动试验指令高频电磁换向阀 SV1 或 SV2 在 5 秒后失电动作,通过仿真结果可知安全油压值几乎没有变化,两只阻值相等的节流器中间点油压在高频电磁换向阀 SV1 或 SV2 失电动作后 0.2s 内快速上升到 139.1bar;其响应曲线如图 10 所示。

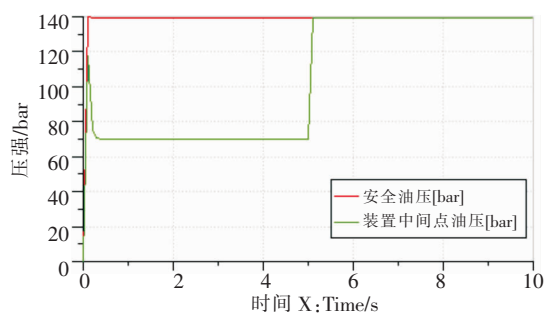


图 10 危急遮断装置试验工况油压曲线 1

在仿真系统值模拟在汽轮机正常运行工况下,定期做危急遮断装置电磁换向阀活动试验指令高频电磁换向阀 SV3 或 SV4 在 5 s 后失电动作,通过仿真结果可知安全油压值几乎没有变化,两只阻值相等的节流器中间点油压在高频电磁换向阀 SV1 或 SV2 失电动作后 0.2 s 内快速下降到 0.7 bar;其响应曲线如图 11 所示。

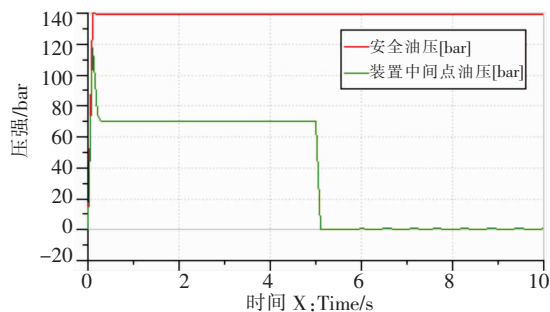


图 11 危急遮断装置试验工况油压曲线 2

## 5 结语

由上述分析可得以下结论:

(1)通过对一种新型高频电磁换向阀的仿真分析,获得了该高频电磁换阀各种参数特性,并通过对该高频电磁换阀各种参数特性的分析;可得到此电磁换向阀具有很高的频率响应特性和流量特性。

(2)将该高频电磁换向阀应用到公司最典型的一种汽轮机危急遮断装置上,并通过仿真软件建立了整个装置的简化仿真模型,模拟在汽轮机运行中出现各种工况下,汽轮机危急遮断装置要执行的响应动作,并对相关仿真结果进行分析;可得到基于高频电磁换向阀控制的汽轮机危急遮断装置可满足汽轮机在各个工况下执行响应动作要求,在汽轮机正常运行并能一直保持安全油压长期稳定的要求,在汽轮机需要做出紧急停机工况时,汽轮机危急遮断装置上的高频电磁换向阀能根据控制指令做出快速的动态响应,使安全油压快速下降,以达到快速关闭汽轮机上所有阀门的目的,最终快速实现机组打闸停机。

## 参考文献:

- [1]唐向阳,郑华文,吴张永等. 纯水液压系统的现状与未来[J]. 液压与气动,2000(4):5-6
- [2]王扬彬,徐兵,刘英杰. 基于 Ansoft 及 AMESim 的电磁铁动态特性仿真分析[J]. 机床与液压,2008(9):104-105+108
- [3]杨华勇,弓永军,周华. 纯水液压控制阀研究进展[J]. 中国机械工程,2004(15):84-88
- [4]张利平. 液压阀原理、使用与维护[M]. 北京:化学工业出版社,2005.6
- [5]路甬祥. 液压气动技术手册[M]. 机械工业出版社,2002
- [6]吴振顺. 液压控制系统[M]. 高等教育出版社,2008
- [7]火力发电厂汽轮机液压控制系统技术条件[S]. 2006;DL/T996-2006

# 大型水氢氢汽轮发电机定子 空心股线的优化设计

刘传坤 周光厚 张海波 江波

东方电气集团东方电机有限公司,四川 德阳 618000

**摘要:**大型汽轮发电机定子线圈采用水冷的的方式,由于传统空心股线采用铜质材料,损耗低,但空心导线内壁结垢、腐蚀的问题。易引起股线堵塞甚至断水并导致定子温度过高引起重大事故发生。针对此问题可采用不锈钢空心股线避免股线堵塞;不锈钢空心股线具有主绝缘耐压等级高,机械强度大、抗老化性能好等优点。本文对定子线圈采用不同股线规格、排列方式及上下层截面积等方式,以及不锈钢和铜两种材料的空心股线采用有限元方法进行发电机定子绕组损耗和温升分析研究,通过优化设计达到采用不锈钢代替铜空心股线的目的。

**关键词:**空心股线;大型汽轮发电机;优化设计

中图分类号:TM311

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)04-0076-05

## Advantages of Evaporative Cooling Technology in Large Generator-motor and Its Simulated Test

LIU Chuankun, ZHOU Guanghou, ZHANG Haibo, JIANG Bo

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

**Abstract:** Stator coils of large turbo-generators are water-cooled. Traditional hollow strand is made of copper with low loss, but the inner wall of hollow strand is scaled and corroded. It is easy to cause strand blockage or even water cut-off and stator temperature is too high to cause major accidents. To solve this problem, hollow strand of stainless steel can be used to avoid strand blockage. Hollow strand of stainless steel has the advantages of high voltage withstand grade of main insulation, high mechanical strength and good aging resistance. The stator winding is analyzed by using different strand sizes, arrangement and cross-sectional area of upper and lower layers as well as hollow strand made of stainless steel and copper by finite element method. The purpose of replacing copper hollow strand with stainless steel is achieved by optimizing design.

**Key words:** hollow strand; large turbine generator; optimal design

大型汽轮发电机采用水氢-氢冷却,其定子线圈采用水冷方式。传统的大型汽轮定子线圈空心股线为铜空心股线。发电机长期运行后铜空心股线内容易引起导线内壁结垢、腐蚀问题,从而引起冷却水系统出现故障而造成断水,定子线圈温度就

会快速升高,应对措施不及时就可能危及发电机安全。而不锈钢空心导线具有防止空心导线内壁结垢、腐蚀的问题的特点,且有线棒的主绝缘耐压等级高,机械强度大、抗老化性能好的优点。

两者相较而言,不锈钢定子空心股线具有较大

收稿日期:2021-04-06

**作者简介:**刘传坤(1980-),男,2002年毕业于湖南大学电机电器及其控制专业,大学本科,学士,高级工程师。长期从事大型发电机分析计算及试验研究工作。

周光厚(1970-),男,1995年毕业于重庆大学电机专业,硕士,教授级高级工程师。长期从事大型发电机分析计算及试验研究工作。

的优点,因此制造厂家需要分析和掌握新设计的发电机的定子线圈股线排列方式和股线规格,才能更好地利用不锈钢材料优势,使得发电机的损耗更低和空心股线冷却水过流面积更大。就此开展该方面的研究具有重要的现实意义,以实现用不锈钢空心股线替代铜空心股线,达到定子线圈的设计达到更优的目的。

以前国内在水冷定子线圈内股线的计算,即可以用全实心导体组成的线圈即外冷线圈的涡流计算公式为基础,按照空心与实心股线的有效截面积,用简单的代数运算推得计算公式<sup>[1]</sup>;近似地用股线在定子槽的深度方向的深度所占份额去代替其面积所占的份额,得出涡流损耗。对于涡流损耗值以及对损耗在空心线和实心线中的分配都会引起一定的误差,对大型汽轮发电机,近似计算引起的绝对误差是比较可观的。且在采用不锈钢空心股线方案时,以不锈钢不导电来考虑,其附加损耗计算值不精确,也会给定子水冷线圈设计带来较大误差。

为此,针对不同的材质水冷线圈的汽轮发电机定子损耗和温升计算,进行对比选择较为合理的设计方案。本文用有限元方法,并以东方电机研制的某大型汽轮发电机为例,对发电机定子线圈损耗和温升进行分析,相比传统计算方法具有其工程应用的特有优势<sup>[2]</sup>。依据优先考虑不锈钢材料的原则,进行水冷线圈的优化设计。

### 1 水冷线圈的特点

发电机产生损耗的部位包括定子线圈和定子铁心、转子线圈和转子磁极扩展部分、阻尼绕组以及定子铁心压板和压指之类的结构部件。大型汽轮发电机定子槽内有上下两根线棒,每根线棒由两排导线组成。大型汽轮发电机定子线圈的损耗包括基本损耗和附加损耗。对于水冷定子线圈来说,其线圈结构采用了两种单元股线:空心股线和实心股线。线圈分成多个单元股线组,每组有一根空心单元股线和多根实心单元股线(见图1)。空心股线作为冷却水循环通道,以实现冷却对绕组的冷却。在选择空心股线和实心股线比例时应使温升留有一定裕度<sup>[3]</sup>。

水冷线圈空心股线采用不同材料的设计方案,其材料分别为铜和不锈钢。槽内为两排股线布置,空心股线和实心股线按照1:2或者1:4的比例进行配置排列,上下层按照等截面(图2a)或者上大下小的非等截面(图2b)进行截面设计。

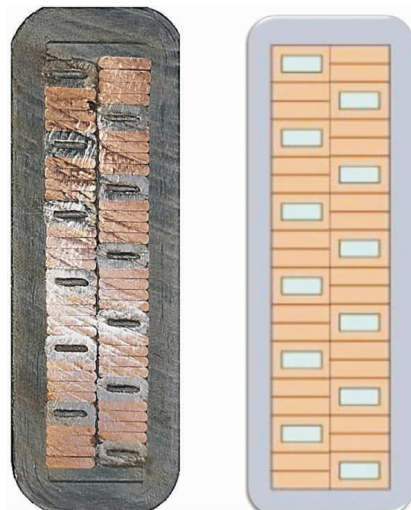
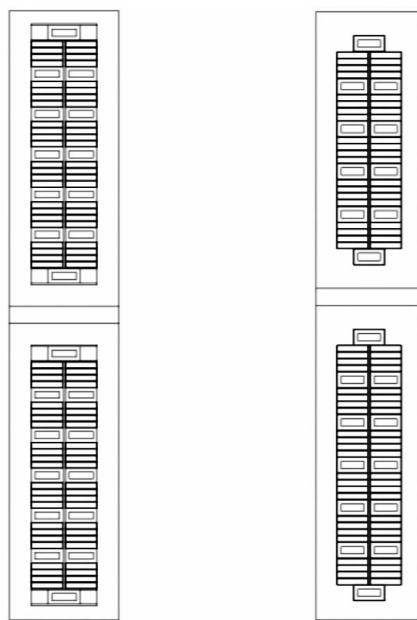


图1 定子线圈横截面图



(a) 上下层等截面

(b) 上下层非等截面

图2 空心股线与实心股线配置为1:4股线排列

按照初步电磁设计,在相同的定子槽尺寸内,按股线比例配置不同和材料不同设计出很多方案。经解析法计算筛选后布置了铜和不锈钢股线3种较优的方案,其中股线规格、目数、空心线壁厚等数据见表1,进行有限元精确计算。



表1 铜及不锈钢方案股线部分数据

方案/材料	铜 <sup>1</sup>	铜 <sup>2</sup>	不锈钢
线棒股线排数	2	2	2
上层单排空心股线数	9	6	6
上层单排实心股线数	18	24	24
下层单排空心股线数	7	5	6
上层单排实心股线数	14	20	24
空心线壁厚(上、下层)	1.2	1.2	1.1

注:1. 铜<sup>1</sup>代表第一种方案-不等截面,导体空心与实心配比为1:2;2. 铜<sup>2</sup>代表第二种方案-不等截面,导体空心与实心配比为1:4;不锈钢为等截面方案。

## 2 建立计算模型

### 2.1 基本原理

大型发电机定子绕组中通过电流时,将产生槽磁动势及槽宽方向的漏磁通,漏磁通使定子绕组股线电流分布不均匀,导致绕组交流电阻增加,产生涡流损耗,在定子绕组涡流损耗计算方面,由于传统计算公式难以得到定子绕组不同股线中的损耗分布情况,根据经典电磁设计理论,Field系数定义为导体的交流电阻和直流电阻之比 $K_s$ ,可以近似表示为:

$$\begin{cases} K_s = 1 + 0.107 \varepsilon \left(\frac{b}{b_n}\right)^2 n^2 h^4 \left(\frac{f}{50}\right)^2 \\ \varepsilon = \frac{2l_l - n_v b_v}{l_w} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $K_s$ 为Field系数; $b$ 为定子槽内铜宽; $b_n$ 为定子槽宽; $n$ 为定子槽内股线数; $h$ 为单根股线铜高; $f$ 为频率; $l_l$ 为定子铁心有效长度; $n_v$ 为定子风沟个数; $b_v$ 为每个定子风沟高度; $l_w$ 为单个线圈长度。

从式(1)中可以看出,Field系数没有考虑股线在槽内实际布置位置和上下层线棒之间的距离带来的影响,也未考虑线圈空心股线和实心股线的区别。因此选择合理的模型边界,依据股线在槽内实际位置、股线的规格、壁厚及导体材料等特征,建立单槽的发电机定子数学模型,包括电磁模型和温度场模型,以热模型加载电磁模型得出损耗值,可获得准确的数值分析结果。

在计算中对空心股线分别加载不同的材料,即铜空心股线和不锈钢空心导线进行计算。电磁模型中依据材料加载电阻率。铜的电阻率按75℃进行加载 $0.213 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ ,不锈钢的电阻率设置为

$5 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 。因为电阻是随着温度变化的,所以需要确定温度的分布通常采用特定的温度进行损耗计算<sup>[4]</sup>,图3通过迭代计算得出最终结果。

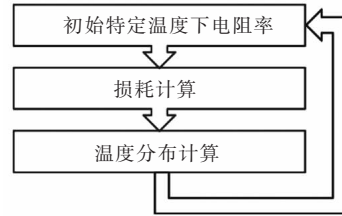


图3 磁场与温度计算迭代框图

### 2.2 电磁模型

采用有限元的方法对发电机定子绕组进行仿真计算。选取一个定子齿距作为研究对象,为考虑空间位置对涡流的影响,以股线实际尺寸建立模型(图4),包含上下层线棒、层间绝缘、槽楔垫条、定子铁心等结构为主体的模型。

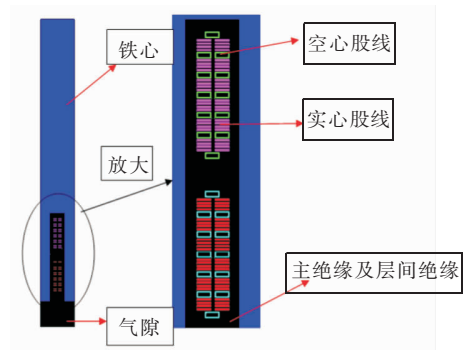


图4 槽部尺寸模型

模型分网格进行局部加密,以保证计算精度。图5为电磁场有限元仿真计算模型的剖分图。

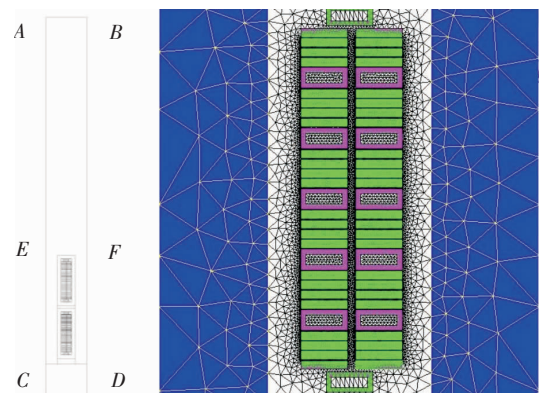


图5 电磁场求解区域及局部网格剖分

考虑到铁心的饱和效应,描述非线性时变运动电磁场问题的偏微分方程为

$$\nabla \times (v_0 [v_r] \nabla \times A) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中: $[v_r]$ 为材料磁阻率张量; $v_0$ 为真空磁阻率; $A$ 为矢量磁位; $\sigma$ 为电导率。

图5中AB和CD边设置为狄利克莱(Dirichlet)边界,AE和BF边设置为纽曼(Neumann)边界。并且在进行涡流损耗计算时,定子线棒采用 $540^\circ$ 股线完全换位方式使同层股线的槽内涡流损耗基本均匀,定子绕组已经通过换位消除环流损耗的影响,即单根绕组过流面积相同的股线时电流相等。电流计算的过程中,由于有空心股线和实心股线的存在及不同材质的原因,其电流值 $I_n$ 可以统一表示为定子电压 $U$ 和电阻 $R$ 的函数,每根线棒中的总电流是按一个线棒中各种线的实际电阻所占的比例分配的,定子线棒两端的电压相等,线棒电流及股线电流均与 $R$ 成反比。

先通过加载直流电压,用直流模块计算出直流损耗。把该计算结果加载至交流电磁计算模型,计算各种类型股线损耗(图6)。

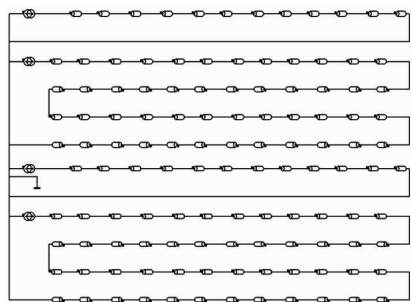


图6 模型加载电路图

### 2.3 温度场模型

建立了定子部分三维模型并定义相应的圆周周期性边界,包括定子单槽上下层线棒、绝缘、定子铁心、槽楔等结构,见图7。

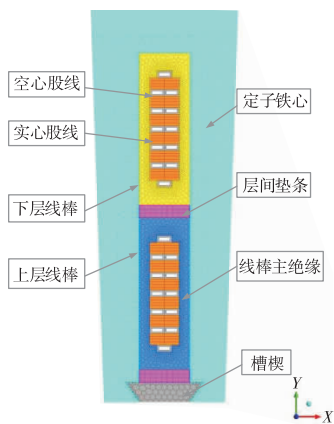
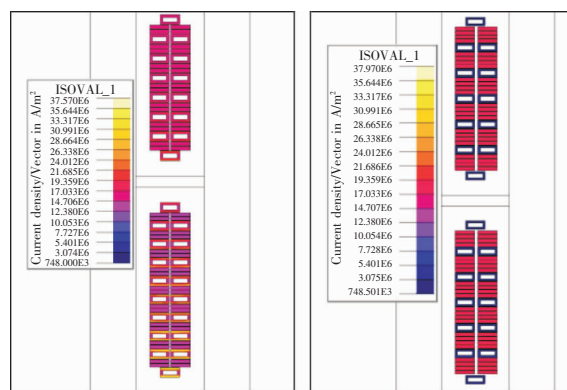


图7 槽部截面的结构和网格划分

## 3 计算结果与分析

### 3.1 定子绕组损耗分析

通过电磁场有限元计算得到发电机定子槽中的漏磁场分布和定子线棒上下层各个股线的电流密度分布云图。



(a) 铜空心股线 (b) 不锈钢空心股线

图8 股线线涡流密度云图

由图8可以看出用不锈钢材料时,不锈钢的涡流比铜的要低很多,相应的铜的涡流损耗密度也要大一些。采用铜作为空心股线时,附加损耗大,基本铜耗小;采用不锈钢作为空心股线材料时,附加损耗(铜耗和不锈钢损耗)小,基本损耗(铜耗和不锈钢损耗)大,具体数据见表4。

表4 发电机定子损耗

方案/材料	铜 <sup>1</sup>	铜 <sup>2</sup>	不锈钢
定子电流(kA)	36.8	36.8	36.8
上层实心线损耗(kW)	1 305	1 700	3 256
上层空心线损耗(kW)	2 476	1 644	28
下层实心线损耗(kW)	1 490	1 775	2 999
下层空心线损耗(kW)	1 329	870	26

注:电磁和温度场计算以额定运行工况为基准

### 3.2 长期运行稳态温升

由表5中数据得到:发电机以1.0PN负荷、100%定子冷却水流量长期运行时,上层出水温升26.8K,股线温升47.4K;下层出水温升24.6K,股线温升43.4K。

计算表明,3种设计方案,稳定运行工况时定子股线温度均满足技术考核要求并有相当安全余量,空心线内的冷却水温度也远低于沸点温度(图9)。

表5 冷却水出水水温

方案/材料	铜 <sup>1</sup>	铜 <sup>2</sup>	不锈钢
进水温度(°C)	45.0	45.0	45.0
上层出水温度(°C)	70.7	68.5	71.8
上层空心线温度(°C)	73.5	72.3	74.5
上层实心线温度(°C)	83.5	84.6	92.4
下层出水温度(°C)	68.2	66.9	69.6
下层空心线温度(°C)	69.8	70.6	72.1
下层实心线温度(°C)	79.2	82.1	88.4

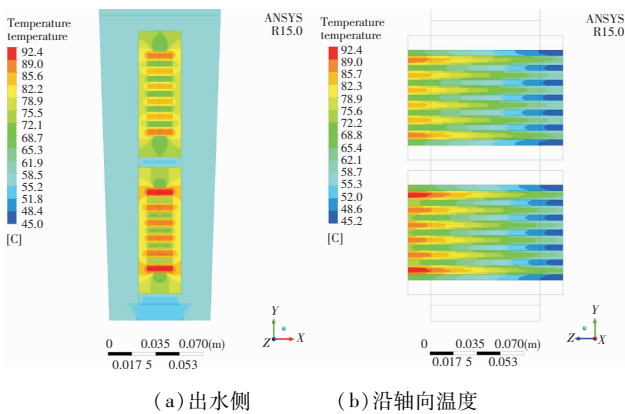


图9 定子线圈温度分布(冷态水温40°C)

#### 4 结语

由上述分析可得以下结论:

(1)相对于解析法分析,本文建立的有限元与电磁和温度场耦合计算模型,可以更好地考虑股线在槽内实际位置、股线的规格、壁厚及空心导体材料等多种因素的综合影响,从而能够更精确地计算定子部分损耗,并通过温度场计算得出水冷线圈定子股线的温度分布和空心股线内水的温升值。

(2)空心股线用不锈钢材料时,不锈钢的损耗比铜空心股线的损耗要低很多,相应的铜的损耗也要大一些。采用铜时,附加损耗大,基本铜耗小,宜采用上下层线棒导体截面不等的结构,以平衡两线棒之间的损耗;或者采用增加导体空心与实心配比为1:2,缩小上下层线棒之间的温差,以减小线棒

间的应力。采用不锈钢作为空心股线材料时,附加损耗(铜耗和不锈钢损耗)小,基本损耗(铜耗和不锈钢损耗)大,上下层线棒间的损耗差值不大,可采用上下线棒等截面结构。

(3)对于采用铜和不锈钢空心股线导体,其温升均能满足技术考核要求并由相当安全余量。鉴于不锈钢的诸多优点,当选用不锈钢作为空心导体时其温升虽然偏高(水流量相同),但不锈钢其机械性能的特点,作为空心股线的壁厚更薄,更加不易堵塞;其运营维护成本更低,更能获得用户的青睐。不锈钢应力比铜强,通过提高股线内水流量和槽内股线合理布局,降低温升满足大型汽轮发电机的要求。

(4)通过有限元法的磁场和热场建模数值迭代计算,提升计算的准确度。目前,本文的电磁损耗、温度场计算方法已在华龙一号和田湾电站等工程设计中予以采用。选用空心不锈钢导体作为空心股线与铜实心股线通过交叉换位的方式编织水冷线圈已初步应用在大型汽轮发电机。以水冷作为冷却方式的其他类型电机应用不锈钢作为空心导体应用将变成一种趋势。

#### 参考文献:

- [1] 缪昌明. 汽轮发电机设计和运行若干问题的分析或计算(一)[J]. 大电机技术,1981(3):1-7+2
- [2] 徐兰坤,张海波,刘传坤. 基于量纲分析法的水氢-氢冷却汽轮发电机定子突然断水运行能力仿真[J]. 东方电气评论,2018,32(1):64-69
- [3] 丁舜年. 大型发电机发热与冷却[M]. 第1版. 北京:科学出版社,1992
- [4] Kenichi Hattori 等. 大型汽轮发电机多层罗贝尔换位线圈的温度计算[J]. 国外大电机,2006(2)
- [5] 汪耕,李希明. 大型汽轮发电机设计、制造与运行[M]. 上海科学技术出版社,2000

欢迎投稿,欢迎订阅!

# 项目管理在核电涉外分包项目中的应用

王志坚

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**本文以东方电机和国外 A 公司签订的励磁系统分包项目执行为背景,结合 PMBOK 项目管理知识体系以及供应链管理理论知识,详细阐述了项目管理思路以及工具方法在涉外分包项目管理中的应用,以达到分包项目产品、服务的范围、进度、质量能够满足合同及发电机制造项目要求。

**关键词:**项目管理; 分包; PMBOK; 供应商管理

中图分类号:F426

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)04-0081-04

## Project Management in Foreign Subcontracting Project

WANG Zhijian

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

**Abstract:** This article is based on the excitation system subcontracting project between DFEM and company A, in which, theory and management tools of project management in PMBOK and supply chain management are introduced in the execution of foreign subcontracting project to make sure the scope, schedule, quality of the product and service of the subcontract project could fully satisfy the need of the main contract project.

**Key words:** project management; subcontracting; PMBOK; vendor management

2004年,东方电气集团在岭澳一期合作基础上与A公司达成了1100~1300MW级、半转速核能汽轮发电机组技术转让协议。该协议以岭澳二期汽轮发电机组制造项目为依托向东方电机进行发电机及励磁机的技术转让,但作为发电机运行大脑的励磁系统并未列入技术转让范围。东方电气股份公司在2008年和2010年牵头东汽、东电、东重三厂向A公司签订了NFF及NFT采购合同。共采购完成6台套定子线棒和12台套AVR系统应用于6个核电项目上。

### 1 供应商管理策略制定

#### 1.1 供应商关系分析

定子线棒是发电机定子最核心的部件,包括100多个制造工序。制造过程中需要对电气性能及尺寸进行严格考核控制,以满足定子下线过程装配

及钎焊要求。除此之外,由于核电定子线棒采用的是水内冷的冷却方式,制造过程中需要对线棒的气密性和流量的均匀性进行验证。其中任何一项检验不合格都会造成产品制造返工甚至报废。因线棒采购制造周期较长,并且核电项目重要部件原则上不允许替换,一旦交付延误将直接影响到定子下线装配的顺利进行,造成整个发电机的交付延误,从而导致业主巨额的罚款。

励磁系统作为发电机的控制系统,一方面通过励磁电压电流的调节实现对发电机运行控制。另一方面采集电网的相关信号对发电机运行进行反馈调节以确保电网稳定性,其性能表现直接关系到业主能否顺利并网发电。因此励磁系统的产品质量及现场调试服务对客户核心利益有着极其重要的影响。但因励磁系统的制造技术A公司未向东方进行技术转让,现场调试、技术改造等一系列工

收稿日期:2021-09-24

作者简介:王志坚(1986-),男,2009年毕业于华中科技大学工业工程专业,2018年毕业于西南交通大学工商管理专业,硕士学位,经济师。

现在东方电气集团东方电机有限公司项目管理部工作,主要从事核能发电机项目管理。



作均需以 A 公司为主进行。

此外,由于东方和 A 公司的合作并不仅限于 1 150 MW 汽轮发电机组技术转让,在 AP1000 核电项目上 A 公司同样作为技术转让方与东方开展合作。因此分包合同谈判和执行过程中东方处于相对被动的地位。

综上所述,在 NFF 和 NFT 分包合同中提供的定子线棒和励磁系统对厂内生产及客户核心利益有着极其重要的作用,而此两种物项的采购成本占项目总成本 10%。采购物项属于重要的战略型物项(图 1)。

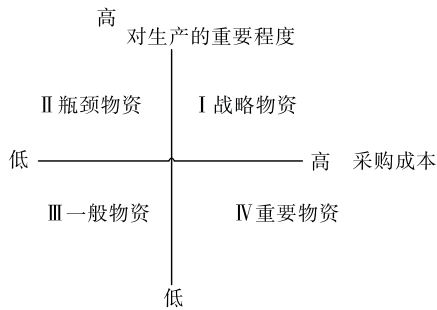


图 1 物资分类图

### 1.2 供应商管理策略制定

因企业对该类战略型物流要求很高,要求物料供应不能出现任何差错,对供应商的考核涉及到质

量、价格、交货期、响应速度、财务状况、技术水平、产能和合作时间等各个方面。针对此类物料的供应商,企业应与其建立起牢固的合作伙伴关系。原则是让东电和 A 公司都能彼此意识到对方的价值。在此基础上从东电总包项目执行整体考虑进行互动的、密切合作以解决并改善项目执行过程中业主提出的关于技术、质量、服务相关问题,最终达到让客户满意的目的。

## 2 独特的采购项目管理团队

### 2.1 东方内部项目团队介绍

因 NFF 和 NFT 合同分包商 A 公司提供的励磁系统设备及服务执行过程复杂并且是直接面对业主的,为确保整个 TG 包供货合同的顺利执行,东电内部建立了独具特色的跨部门矩阵型采购项目管理机构(图 2)。首先,该项目的项目经理是设立在项目管理部,由项目经理对整个采购项目的执行进行统一协调。另外,在采购部设置专门的项目接口人负责项目的商务付款及物流运输,在控制公司设置专门接口人负责项目执行的技术问题处理,质检部和质保部等其他单位也针对具体的项目建立相应的接口人。

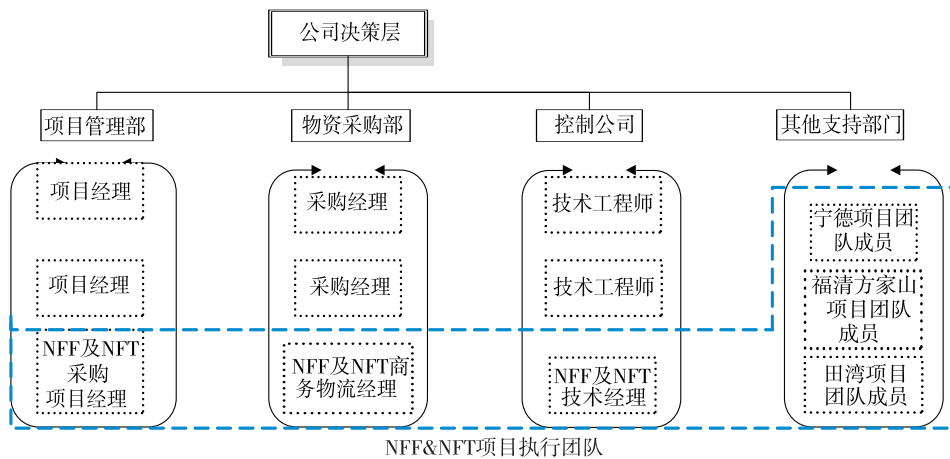


图 2 NFF&NFT 组织机构图

该种组织机构的设定最大特点是将采购项目的执行放在项目管理部。这种机构设置最大的优势是能够将业主的需求更加直接和快捷的反馈至 A 公司,同时也便于从整个发电机项目执行的角度去协调 A 公司解决相关问题,以最大限度的满足业主提出的要求。另外,在项目执行过程中涉及的商务

付款、物流运输及技术协调等主要业务设立的专门负责人,而对质保质检等其他支持部门相关业务由各个发电机制造项目组织机构中的相关成员负责。如此不仅保证了采购项目的高效执行,而且确保了采购项目为主包项目服务的原则,同时也让工程公司、东方及 A 公司认识到彼此的价值,促进三方的

紧密合作。

### 3 采购项目时间管理

#### 3.1 文件提交及设计制造进度计划

因采购合同不仅包括设备硬件的交付,同时励磁系统涉及到跟电力设计院和工程公司 40 余份技术资料交换。设备和文件的按期交付不仅关系到厂内生产的顺利进行,而且是整个核电建设工程项目设计、建造、安装调试顺利进行的重要保证。

为确保整个项目的顺利进行,不仅需要根据主合同的交付要求及厂内排产计划,以合同交货期为目标和供应商沟通编制进度计划并对采购物项进行节点控制,而且需要跟工程公司和电力设计院设计进度要求,对项目执行过程中需要提交的技术资料进行提前梳理,确认各个版次出版的时间要求,据此编制项目文件提交计划。

#### 3.2 文件提交进展及设计制造进度控制

为控制好设备及文件资料的交付进度,最主要的措施就是在分包合同谈判前以工程公司和设计院核实的交付计划以及采购物项节点空为基础,按照“越早越好”的原则将文件交付进度落实到采购合同中。同时,为促使 A 公司在执行过程中对制造进度及提资进度进行控制,可以将重要的或者急需的文件、设计固化、重要原材料采购及重大制造节点列入支付里程碑中。在执行过程中,根据编制的项目进度计划,A 公司在月报中提交相关节点的完成记录,以达到对项目进度和提资的跟踪。在出现偏差时,通过函件或者项目协调会的形式进行纠偏。

### 4 采购项目风险管理

#### 4.1 项目风险计划

采购项目管理中的风险管理首先是制定项目风险管理计划。通过项目风险管理计划来确定整个采购项目风险管理的思路。在项目风险计划中除了需要对执行风险进行记录和风险应对措施制定外,同时还需要对风险进行分析确定风险大小以达到对风险进行有效监控的目的。为确定项目风险的大小,首先对风险事件发生的概率进行评估,然后对风险事件如果发生产生的后果进行评估,最终通过风险 - 影响矩阵确定该风险的大小。在确

定风险大小后就需要制定相关控制措施并督促各相关单位执行(见表 1)。

表 1 概率威胁矩阵

概率		威胁			
0.9	0.05	0.09	0.18	0.36	0.72
0.7	0.04	0.07	0.14	0.28	0.56
0.5	0.03	0.05	0.1	0.2	0.4
0.3	0.02	0.03	0.06	0.12	0.24
0.1	0.01	0.01	0.02	0.04	0.08

注:0.05/非常低;0.1/低;0.2/中等;0.4/高;0.8/非常高。

#### 4.2 项目风险控制实施

风险的监控除了需要督促相关单位落实风险应对措施外,还应当对风险进行持续动态的监控,对次生风险进行进一步的关注处理,定期对风险进行梳理以确保对风险的有效管控。针对执行重大风险通过专题会议以及领导协调的方式进行处理。因 NFF 和 NFT 分包合同的执行放在项目管理部,因此在应对风险时的处理思路就不仅仅局限于分包合同,也可以从整个 TG 包项目的角度同业主方一起制定风险应对措施,确保整个项目的顺利进行。

### 5 采购项目沟通管理

#### 5.1 项目干系人沟通规划

分包合同项目执行干系人不仅包括厂内项目团队和 A 公司项目执行团队,因涉及到技术资料提交和现场调试,工程公司、设计院及业主均是项目执行的主要干系人。从项目总体执行来说只有获得这些干系人的支持才能确保项目的顺利进行,然而在项目开始时,不同干系人所表现出的态度有所差别。为确保沟通的高效,在项目执行各个阶段需要进行干系人进行动态评估。在识别沟通需求后,在项目执行前期就需要针对不同的干系人进行不同方式的沟通。在针对项目具体事项时,同样需要对干系人进行更细致分析,明确各个干系人在事项推进方面的利害相关点,针对各方的利害点进行针对性的沟通,以获得各个干系人的支持,尽力协调以避免具体事项推行过程中干系人出现的抵制行为,以确保项目具体事项的推行(见表 2)。

A 公司项目执行团队不仅管理着整个 NFF 和 NFT 采购合同而且管理着红沿河等项目的分包合

同。NFF 和 NFT 合同中的发电机部分仅占其中很少一部分采购金额,因此 A 公司执行团队对发电机分包部分并未全力支持。为促进 A 公司对项目的支持,一方面依据合同对每次项目协调会及专题会的会议行动项以及函件答复情况进行专项跟踪,对完成情况进行定期的通报。另一方面,通过里程碑的审核 A 公司意识到分包合同电机部分能否完成会影响着整个分包合同的支付。

表 2 干系人管理矩阵

干系人	不知晓	抵制	中立	支持	领导
项目业主	C			D	
工程公司	C			D	
电力设计院	C			D	
东电项目执行团队				D C	
A 公司项目执行团队			C	D	

注:其中 C 表示当前参与程度,D 表示所需参与程度。

## 5.2 项目沟通管理

对于涉外合同执行,过程控制显得尤为重要。项目执行过程中具体事项的处理均需通过函件这个载体进行沟通确认,而项目执行中的函件效力如同要约,同样具有法律效力。在分包同执行中项目函件收发均通过东方电气核电 MIS 系统进行统一编号存档管理,以确保核电的“凡事有据可查”。同时,因分包采购项目执行贯穿着所有核电发电机项目,项目执行过程中的事项均是通过函件进行交流传递,而根据合同针对技术文件、商务文件的处理时有严格的时间要求的,超出了处理时间都有可能

(上接第 41 页)

### 参考文献:

[1] 孟诏. 基于 CANopen 协议的 CAN 总线控制系统[D]. 北京:北京工业大学,2008  
 [2] 云利军,孙鹤旭等. 运动控制网络的研究现状及发展趋势[J]. 控制工程,2006(4):89-92  
 [3] 毕杨. 基于 CANopen 协议的 DSP 从节点网络设计[J]. 自动化与仪器仪表,2016(7):120-121

引起 A 公司货物延迟交付、商务罚款,因此,除了通过 MIS 系统进行统一编号存档外,还需要根据合同约定,对每一个函件涉及的事项进行跟踪处理,确保项目执行过程控制的有效性。

在项目执行过程中除了定期的项目协调会外,也会根据项目执行情况通过面对面形式或者电话会的形式召开专题会。以解决执行过程中质量问题、商务清理、技术改进等各个方面的问题。而专题会也会根据包括业主在内的各个项目干系人的沟通需求进行提前策划,同时,在对业主参会上应把握“技术、进度背靠背,商务面对面”的沟通原则,如此既保证了业主和分供方的充分沟通和理解,又可确保公司商务利益不受损害。

同时,针对涉外项目,定期的和分供方进行发出的函件是否收到也是很重要的一个细节。因为根据合同法规定,函件的处理不是以函件发出作为起点,而是以接收方收到函件为处理的起始点。若缺少这一环节,在事情清理时一旦对方表明其未收到相关函件,则无法对供应商进行追责而对项目执行造成不必要的损失。

### 参考文献:

[1] 袁经勇. 国内外项目管理现状及发展趋势[J]. 化工建设工程, 2001(3):8-9+12  
 [2] 杨玉峰. 项目管理在 K 公司营销中的应用[D]. 北京邮电大学, 2012  
 [3] 毕星. 项目管理[M]. 复旦大学出版社,2000  
 [4] 卢有杰. 现代项目管理学[M]. 首都经济贸易大学出版社,2004  
 [4] CANopen Device Profile and Motion Control. CiA Draft Standard Proposal402[S]. Version 4.02,2002  
 [5] Copley Controls Corp. CANopen Programmer's Manual[S]. Version 3,2006  
 [6] 武利斌,吴小田,周宏林等. CANopen 通信协议在风电电控系统的应用研究[J]. 东方电气评论,2018,32(2):11-14  
 [7] 唐会成. 变频器通讯控制 CANopen 总线的研究[J]. 机电产品开发与创新,2020,33(1):72-74

# 核电小堆发展现状及前景展望

罗晓秋 刘伟东 王放

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 611731

**摘要:** 本文以核电小堆技术发展现状和未来发展前景为研究对象, 通过对核电小堆特点的剖析及对当前全球核电小堆的技术发展情况和未来市场前景的阐述和分析, 指出了核能发展的必然趋势——核电小堆及其对我国乃至全球核能发展的意义。

**关键词:** 核电小堆; 技术发展; 市场前景

中图分类号: F416; TM623

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)04-0085-04

## Development Status and Prospect of Small Modular Reactors

LUO Xiaoqiu, LIU Weidong, WANG Fang

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

**Abstract:** Taking the current situation and future development prospect of small modular reactor technology as the research object, through the analysis of the characteristics of small modular reactor and the description and analysis of the current situation and future market prospect of global small modular reactor technology, this paper points out the inevitable trend of nuclear power development—small modular reactor and its significance for the development of nuclear power in China and even in the world.

**Key words:** small modular reactor; technological development; market prospect

随着当前全球工业经济的快速发展, 环境安全和能源供应安全等问题已经成为许多国家迫切关心且又急于解决的实际问题, 而核能作为既能零排放应对环境问题, 又能高经济性、高效、稳定供电的一种可靠新兴清洁能源也自然引来了各方的密切关注<sup>[1]</sup>。由于核能大堆存在选址要求严、前期投入高、建设周期长、回报速度慢等现实问题, 核能小堆成为了当前核能发展的一种新趋势。结合目前我国环境安全问题所带来的对发展清洁能源的迫切需求, 以及我国当前的能源结构和核能多种技术并举的状况, 分析小堆的特点、发展现状和未来趋势, 将对国家“一带一路”机遇下, 践行核电走出去的战略有着一定参考的价值, 同时更是对我国能源及相关行业的发展<sup>[2]</sup>有着极其重要的意义。

### 1 小堆定义

“小型先进模块化多用途反应堆”简称为“小堆”, 由国际原子能机构(IAEA)定义为电功率小于30万千瓦的反应堆<sup>[3]</sup>, 由于其具有环境适应性高、前期成本低、建造周期短、回报效率高的优点, 并结合其一体化、模块化设计和建造, 以及固有的高安全性和多用途特点, 因此小堆备受众多核能投资方的青睐。

### 2 小堆的发展现状

当前, 世界上已经有许多国家开展了小堆研发项目, 但真正投入建设项目的还不算很多。根据国际原子能机构最新发布的数据<sup>[4-5]</sup>显示, 目前已经有50多种小堆在册。

陆上水冷式小堆如表1所示, 其中 ACP100 和

收稿日期: 2021-09-24

作者简介: 罗晓秋(1990-), 男, 2012年毕业于重庆大学核工程与核技术专业, 本科, 工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司化工核电装备工程公司工作。



CAREM 目前进展最快。ACP100(玲珑一号)是由中国核工业集团公司设计研发的具有自主知识产权的三代陆上小堆技术,于2010年正式立项,2012年编制完成《ACP100标准设计初步安全分析报告》,2016年成为全球首个通过国际原子能机构安全审查的小堆,2017年海南昌江“玲珑一号”示范工程获国家发改委同意开展前期工作,2019年正式开建,建设周期为36个月,预计于2022年建成投运。CAREM是由阿根廷原子能委员会(CNEA)自主设计研发的小堆,于2014年浇筑第一罐混凝土(FCD),2019年11月因政府延迟付款、设计变更和技术文件延迟等原因,承包商 Techint 工程建设公司停止了项目建设工作,阿根廷核电公司于2020年4月决定重启该项目,预计于2022年建成投运。

表1 国内外陆上水冷式小堆

小堆名称	电功率 MW(e)	国家	当前进展
ACP100	100	中国	在建
CAP200	200	中国	初步设计
DHR	400(MWt)	中国	初步设计
CAREM	30	阿根廷	在建
RITM-200	50×2	俄罗斯	开发中
ELENA	68 kWe	俄罗斯	概念设计
KARAT-45/100	45/100	俄罗斯	概念设计
RUTA-70	70(MWt)	俄罗斯	概念设计
UNITHERM	6.6	俄罗斯	概念设计
VK-300	250	俄罗斯	详细设计
mPower	195×2	美国	开发中
NuScale	50×12	美国	开发中
SMR-160	160	美国	初步设计
W-SMR	225	美国	概念设计
DMS	300	日本	基本设计
IMR	350	日本	基本设计
SMART	100	韩国	认证设计
UK-SMR	443	英国	概念设计

海上水冷式小堆如表2所示,其中KLT-40S、RITM-200M和ACPR50S目前进展最快。KLT-40S是由俄罗斯阿夫里坎托夫机械工程实验设计局(Afrikantov OKBM)自主设计研发的三代船用小堆,基于该种堆型设计建造的罗蒙诺索夫号浮动核电

站于2007年在圣彼得堡开工建设,2017年建成下水并开展各项调试工作,2020年5月22日正式投入商业运营。RITM-200M是由俄罗斯阿夫里坎托夫机械工程实验设计局(Afrikantov OKBM)在KLT-40S基础上予以优化的船用小堆,目前已经分别在“北极”号、“西伯利亚”号和“乌拉尔”号破冰船上共建造了6个RITM-200M反应堆,其中“北极”号破冰船上的2个反应堆均已经达到临界状态。ACPR50S是由中国广核集团有限公司自主设计研发的海上小堆,于2015年12月经国家发改委批复同意ACPR50S海洋核动力平台纳入能源科技创新“十三五”规划,标志着ACPR50S实验堆正式取得国家立项,2016年9月正式纳入国际原子能机构的全球小堆发展路线图,同年11月由中广核与东方电气签署了《“中广核ACPR50S实验堆平台项目”压力容器采购协议》,标志着ACPR50S实验堆正式开工建设,2019年4月由中广核与中国船舶重工集团公司第七〇一所签订了一艘3万吨核动力试验船供货合同,试验船平台建造期24个月,调试周期15个月,预计将在2022年左右下水,极大概率成为我国的第一艘核动力舰船。

表2 国内外海上水冷式小堆

小堆名称	电功率 MW(e)	国家	当前进展
ACPR50S	60	中国	在建
ACP100S	100	中国	开发中
KLT-40S	70	俄罗斯	投运
RITM-200M	50×2	俄罗斯	投运
ABV-6E	6~9	俄罗斯	最终设计
SHELF	6.4	俄罗斯	详细设计
VBER-300	325	俄罗斯	认证设计

高温气冷式小堆如表3所示,其中HTR-PM目前进展最快。HTR-PM是由清华大学核能与新能源技术研究院自主设计研发的四代小堆,于2006年2月,列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)》国家科技重大专项,2012年12月浇筑核岛第一罐混凝土(FCD),标志着HTR-PM示范工程正式开工建设,其也是具有四代核电技术的全球首座球床模块式高温气冷堆核电站,预计将在2021年投入商运。

表3 国内外高温气冷式小堆

小堆名称	电功率 MW(e)	国家	当前进展
HTR-PM	210	中国	在建
GTHTR300	300	日本	基本设计
GT-MHR	285	俄罗斯	初步设计
MHR-T	205.5 × 4	俄罗斯	概念设计
MHR-100	25 ~ 87	俄罗斯	概念设计
A-HTR-100	50	南非	概念设计
HTMR-100	35	南非	概念设计
PBMR-400	165	南非	初步设计
SC-HTGR	272	美国	概念设计
Xe-100	35	美国	概念设计

快中子谱小堆如表4所示,其中 BREST-OD-300 和 SVBR-100 目前进展相对较快。BREST-OD-300 是由俄罗斯国家原子能集团公司(Rosatom)自主设计研发的四代铅铋快中子小堆,于2018年通过俄罗斯国家专家审查委员会(Glavgosexpertiza)批准,预计2027年前开工建设。SVBR-100 是由俄罗斯 AKME 工程公司自主设计研发的四代铅铋快中子小堆,联邦生态、技术与核能监督局(Rostechnadzor)于2015年向 AKME 工程公司颁发了建设 SVBR-100 铅铋冷却一体化快堆的许可证,预计2022年后开工建设。

表4 快中子谱小堆

小堆名称	电功率 MW(e)	国家	当前进展
BREST-OD-300	300	俄罗斯	详细设计
SVBR-100	100	俄罗斯	详细设计
4S	10	日本	详细设计
LFR-AS-200	200	卢森堡	初步设计
LFR-TL-X	5 ~ 20	卢森堡	概念设计
SEALER	3	瑞典	概念设计
EM2	265	美国	概念设计
SUPERSTAR	120	美国	概念设计
WLFTR	450	美国	概念设计

熔盐式小堆如表5所示,其中 IMSR 目前进展相对较快。IMSR 是由加拿大特里斯特尔能源公司(Terrestrial Energy)自主设计研发的四代熔盐式小堆,特里斯特尔能源公司(Terrestrial Energy)于2017年6月与加拿大核实验室(CNL)合作在乔克河启动首座商业 IMSR 的选址研究,同年11月,加拿大核安全委员会(CNSC)完成了对 IMSR 的供应商设计评审第一阶段工作,2018年12月启动了供应商设

计评审第二阶段工作,预计本世纪20年代建成投运。

表5 熔盐式小堆

小堆名称	电功率 MW(e)	国家	当前进展
IMSR	190	加拿大	设计审查
CMSR	100 ~ 115	丹麦	概念设计
CA Waste Burner	20	丹麦	概念设计
ThorCon	250	国际财团	基本设计
FUJI	200	日本	实验阶段
Stable Salt Reactor	37.5 × 8	英国	概念设计
LFTR	250	美国	概念设计
Mk1 PB-FHR	100	美国	概念设计
MCSFR	50	美国 & 加拿大	概念设计

eVinci 微堆如表6所示,是由美国西屋电气公司(Westinghouse Electric Corporation)开发的微堆,其技术发展目标是六年内完成设计开发、示范工作,2024年之前获得商业化部署许可证。于2019年3月,美国能源部表示将会提供1290万美元,为2022年前进行的 eVinci 微堆示范项目做准备,包括设计、分析、申请生产许可证、选址和测试。

表6 其他小堆

小堆名称	电功率 MW(e)	国家	当前进展
eVinci	0.2 ~ 15	美国	开发中

## 4 小堆的前景展望

### 4.1 核电发展的必然选择——小堆

与大堆相比,小堆减小了输出功率和堆芯源项,显著提高了其固有安全性。其设计也通常采取将一回路设备一体化布置在反应堆压力容器内,并大量采用非能动安全系统,最大限度地消除了一些特定的事故。同时设计有延长事故反应时间的热阱,进一步提高了其安全性。因此也极大的减少了小堆对公众和环境的可能影响,提升了了公众对其的可接受度。

就使用价值而言,小堆不仅可以发电,其还体现在如取暖供热、工业供热、供汽、制氢、海水淡化、内陆苦碱水治理、海洋石油平台和核动力船舶供电<sup>[6-7]</sup>等方面,可以极大程度满足核能投资体的各类功能需求。

除了安全性和使用价值,小堆成本也是决定其

产业命运的一项关键因素。目前一座大堆的建造成本约 120 亿元,建设周期平均 5-6 年,而一座小堆的建造成本约 30 亿,建设周期平均 2-3 年,随着规模化的批量建造,其成本和周期还有进一步的下降空间。无疑小堆的资金成本和时间成本相较于大堆都有着十分明显的优势,尤其针对当前许多能源匮乏的发展中国家,其难以承担和解决大堆建造的资金问题,同时又对核能有较为迫切的需求,小堆的出现就变得必不可少。加上目前全球几十个有意发展核能的国家中,有大部分国家的电网再过数年也难以满足大堆发展的需求。因此,选择小堆替代大堆也是势在必行。

#### 4.2 小堆未来的广袤市场

美国 Ux 咨询公司曾预测,到 2030 年全球核电小堆装机容量将达到 8.8 GWe,2040 年达到 22.1 GWe<sup>[8]</sup>。Rolls-Royce 公司也曾预测,到 2035 年全球核电小堆市场空间为 5280 亿美元。美国芝加哥大学等国际研究机构也预测,到 2050 年,核电小堆将占核电总装机容量的 25%。

在国外,以俄罗斯为例,其规划未来还将建设一批浮动式核电站,为大型工业项目、港湾城市、海上平台等提供能源。包括印尼、马来西亚、阿尔及利亚和阿根廷等在内约 20 个国家对此表现出了浓厚的兴趣,同时亚洲也被认为可能是海上核电站的最大市场。

在国内,中国船舶工业经济研究中心曾预测,未来十年我国将建设不少于 20 余座海上核动力浮动平台,按照每座造价 20 亿~30 亿元造价,总造价大约为 400 亿~600 亿元。中国城镇供热协会技术委员会也预测,到 2050 年,我国北方城镇供热面积将达到 200 亿平方米,考虑小堆在热电联供上的优势以及对燃煤锅炉的限制,假设到 2050 年供热存量

中 4% 由小堆提供,即 8 亿平方米。一个 ACP100 核电小堆可以为 500 万平方米的建筑面积、10 万人供暖。则到 2050 年用于热电联供的陆上小堆装机容量需求将达 16 GW,相当于 160 个 ACP100 小堆。

各机构的研究均表明小堆在未来几十年有着极其巨大的市场。

## 5 结语

在“一带一路”沿线中,目前已经有 28 个国家计划发展核能,受政治、经济、军事等因素影响,中国的核电小堆走出去将占有极为有利的局面。但值得注意的是,当前开发小堆的数十个国家中已经有部分国家在短期内有着小堆示范的计划,证明未来小堆市场将形成较为强烈的竞争态势。不过从长远的角度看,小堆市场的竞争也将促进我国核能研究和高端制造的深远发展,同时也为全球的核能发展注入新活力。

### 参考文献:

- [1] IAEA. Status of Small and Medium Sized Reactor Designs [R]. Vienna;IAEA,2012
- [2] 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
- [3] IAEA. Status of Small Reactor Designs without On-site Refueling [R]. IAEA-TECDOC-1536, Vienna, IAEA, 2007
- [4] IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments [R]. IAEA, 2014
- [5] IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments [R]. IAEA, 2018
- [6] 李佳佳,刘峰,赵芳. 国外海上浮动核电站的产业发展现状[J]. 船舶工程,2017,39(4):7-11
- [7] 周蓝宇,齐实,周涛. 小型模块化反应堆发展趋势及前景[J]. 科技创新与应用,2017(21):195-196
- [8] Ux Consulting. SMR Market Outlook [R]. Roswell; UxC. 2013

欢迎投稿,欢迎订阅!