

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM



2021

第35卷 总第137期

東方電氣評論

DONG FANG DIAN QI PING LUN

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

ISSN 1001-9006



9 771001 900217

03

中国东方电气集团有限公司 主办
四川省动力工程学会

东方电气评论

第三十五卷第一期

二〇二一年三月

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



公开 ISSN 1001-9006
发行 CN 51-1333/TM

第35卷第1期(总第137期)
出版日期:2021年3月25日

国内邮发代号:62-187
国内定价:8.00元



2021

第 35 卷第 1 期 总第 137 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: 王政 杨永

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

秘书长: 杨永

主管: 中国东方电气集团有限公司

主办: 中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会

主编: 王为民

副主编: 王政 杨永

本期责任编辑: 王为民

英文编辑: 王为民

编辑出版: 《东方电气评论》编辑部

地址: 成都市高新西区西芯大道 18 号

邮编: 611731

电话: 028-87898262/63

传真: 028-87898267

电子信箱: dfdqpl@dongfang.com

印刷单位: 成都市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

钠介质热交换器九管样机模态试验和仿真研究
 彭凡 王立闻 郑武等(1)
 土壤修复技术浅析 田建 吴家桦 胡春云等(5)
 催化层裂纹对燃料电池膜电极耐久性的影响研究
 谢光有 朱磊峰 李婷(9)

燃煤发电

50 MVar 分布式调相机润滑油系统的设计研究
 黄国徽 薛长奎 李勇(13)
 EL-CID 电磁铁心故障检测试验的应用研究
 陈展 于洪斌 刘航 刘晓(17)
 东方电气重型燃气轮机发展历程与经验研究
 李建华 胡妮妮 胥波(22)
 换热管管束固有频率试验与分析计算对比研究
 王博 莫堃 刘标等(26)
 燃气轮机空气温度测量值的精度分析与改进措施 吴志方(30)
 先进高效超超临界煤粉锅炉技术创新发展
 刘宇钢 刘银河 莫春鸿等(34)

汽轮机

超临界再热型双抽背压式汽轮机运行策略
 罗方 宋风强 侯明军等(40)
 导流环结构对低压排汽缸气动性能的影响分析
 彭国伟 黄元东(45)
 开式整体叶轮的多轴数控加工工艺技术研究
 吴中竟 段昌德 乔杰等(49)
 某型单支撑大功率背压机组轴系振动特性分析
 曹寒 赵先波 祁乃斌等(55)

风力发电

风电场实验数据采集系统研究 许福霞 李玉霞 陈凤(58)
 TRIZ 理论在风电偏航系统改进中的应用和探讨
 孙仲泽 苏宁列 阳小林(61)

水力发电

大型混流式水轮发电机组活动导叶漏水量的分析研究
 宋敏 李浩亮 张洪(65)
 某混流式水轮机转轮上腔压力优化设计
 黄世海 邓鑫 李浩亮等(70)
 水泵水轮机转轮上下腔平压方式研究 刘冬 李浩亮 黄世海等(73)

其他

基于机器学习的通信网告警关联分析综述 丁宏 周宏林(77)
 廉洁风险防控在岗位与制度流程中的应用研究
 姜丽娜 陈健 赵晓波等(85)
 简讯 (21)(33)(44)(60)(88)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*q*A4*88*zh*p*¥8.00*750*20*2021-01

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



2021

2021-3-25 Vol. 35 No. 1
(Quarterly, since 1987)

CONTENTS



BASIC RESEARCH

- Modal Test and Simulation of Nine-tube Prototype of Liquid Sodium Heat Exchanger *PENG Fan, WANG Liwen, ZHENG Wu, et al*(1)
Analysis of Soil Remediation Technology
..... *TIAN Jian, WU Jiahua, HU Chunyun, et al*(5)
Study on the Effect of Cracks in Catalyst Layer on the Durability of PEMFC Membrane Electrode Assembly *XIE Guangyou, ZHU Leifeng, LI Ting*(9)

THERMAL POWER/COAL-FIRED POWER

- The Design Research of 50 MVar Distributed Synchronous Compensator's Lubricating Oil System *HUANG Guowei, XUE Changkui, LI Yong*(13)
Application Research of Electromagnetic Core Imperfection Detection Test
..... *CHEN Zhan, YU Hongbin, LIU Hang, et al*(17)
Development Course and Experience of DEC Heavy Duty Gas Turbine
..... *LI Jianhua, HU Weiwei, XU Bo*(22)
The Comparative Study of Natural Frequency Experiment and Calculation Analysis for Tube Bundle of Heat Exchanger
..... *WANG Bo, MO Kun, LIU Biao, et al*(26)
Accuracy Analysis and Improvement Measures of Gas Turbine Air Temperature Measurement *WU Zhifang*(30)
Innovation and Development of Technologies for Advanced and High-efficient Ultra-supercritical Coal-fired Boiler in China
..... *LIU Yugang, LIU Yinhe, MO Chunhong, et al*(34)

TURBINE

- The Operation Strategy of Supercritical Reheating Double Extracting Back-pressure Turbine *LUO Fang, SONG Fengqiang, HOU Mingjun, et al*(40)
Effect of Guide Structure on Aerodynamic Performance of Exhaust Hood in Steam Turbine *PENG Guowei, HUANG Yuandong*(45)
Research on Multi-axis N/C Machining Technology of Open-integrated Impeller
..... *WU Zhongjing, DUAN Changde, QIAO Jie, et al*(49)
Analysis of Vibration Characteristics of A Single Support High Power Back-pressure Unit *CAO Han, ZHAO Xianbo, QI Naibin, et al*(55)

WIND POWER

- Research on Acquiring Experimental Data Acquisition System for Wind Farms
..... *XU Fuxia, LI Yuxia, CHEN Feng*(58)
Application and Discussion of TRIZ Theory in Improvement of Yaw System of Wind Turbine *SUN Zhongze, SU Ningjie, YANG Xiaolin*(61)

HYDRO POWER

- Analysis and Research on Guide Vane Water Leakage in Large Francis Hydro-turbine Unit *SONG Min, LI Haoliang, ZHANG Hong*(65)
Optimum Design of Upper Cavity Pressure of the Runner of a Francis Turbine
..... *HUANG Shihai, DENG Xin, LI Haoliang, et al*(70)
Research on Flat-pressing Mode of Upper and Lower Cavities of Pump-turbine Runner *LIU Dong, LI Haoliang, HUANG Shihai, et al*(73)

MISCELLANEOUS

- Survey of Alarm Correlation Analysis for Communication Networks Based on Machine Learning *DING Hong, ZHOU Honglin*(77)
Application Research of Honest Risk Prevention and Control In Post Work Flow
..... *JIANG Lina, CHEN Jian, ZHAO Xiaobo, et al*(85)
NEWS IN BRIEF (21)(33)(44)(60)(88)

EDITORIAL BOARD

Chairman: WANG Weimin

Vice Chairmen: WANG Zheng, 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: WANG Zheng, YANG Yong

Executive Editor: WANG Weimin

English Editor: WANG Weimin

Edited and Published by:

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

Postal Code: 611731

Tel: 028-87898262 87898263 **Fax:** 028-87898267

E-mail: dfdqpl@dongfang.com

Overseas Distribution by:

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

钠介质热交换器九管样机模态试验和仿真研究

彭凡¹ 王立闻¹ 郑武² 张晟宇² 廖佰凤³ 曹雪幡⁴

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001;

3. 东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455; 4. 东方电气股份有限公司, 成都 611731

摘要:热交换器的动态特性与电站的安全性能和运行效率密切相关,为考核流体诱发结构振动,本文通过九管样机进行模态试验获得空气、水环境中换热管的固有振动特性,得到空气和水环境中换热管基频分别为 102.410 Hz 和 77.349 Hz,然后利用试验数据推导出液钠介质中换热管的基频修正值为 74.711 Hz;最后利用有限元分析方法验证了试验结果的高可靠性,试验与仿真计算的前 2 阶固有频率结果相对误差在 1% 以内,仿真分析结果可作为结构设计和优化阶段的重要参考。

关键词:钠介质热交换器;换热管;模态试验;仿真

中图分类号: TL364

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)01-0001-04

Modal Test and Simulation of Nine-tube Prototype of Liquid Sodium Heat Exchanger

PENG Fan¹, WANG Liwen¹, ZHENG Wu², ZHANG Shengyu², LIAO Baifeng³, CAO Xuefan⁴

(1. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China; 2. Harbin Institute of Technology, 150001, Harbin, China;

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

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

Abstract: The dynamic characteristics of the heat exchanger are closely related to the safety performance and operating efficiency of the nuclear power plant. In order to assess the fluid-induced structural vibration, a modal test through a nine-tube prototype is conducted to obtain the natural vibration characteristics of the heat exchange tube in the air and water environment. The fundamental frequencies of the heat exchange tubes in the air and water environment are 102.410 Hz and 77.349 Hz respectively, and the correction value of the fundamental frequency of the heat exchange tubes in the liquid sodium derived by the above experiment data is 74.711 Hz; finally, the high reliability of the test results is verified by the finite element analysis, the relative error of the first two natural frequency results of the test and simulation calculations is within 1%, and the simulation analysis results are important references in the structural design and optimization stage.

Key words: liquid sodium heat exchanger; heat exchange tube; modal test; simulation

当前钠冷快堆技术发展较快,其安全性能一直是业内关注的重点^[1],钠介质热交换器作为钠冷快堆一回路的主要换热设备,安全性能的评估与其振动特性密切相关,并且随着行业的发展,热交换器逐渐趋于大型化和高参数化,但这也对热交换器结构设计的要求越来越高,流体冲刷容易诱发换热管

共振,长期的高响应容易出现应力疲劳断裂和损伤磨破等现象^[2],一旦出现将极大影响电站的安全和运行效率。可见热交换器前期设计阶段需要考核其流致振动性能^[3],一般情况下考核的第一步就是分析管束结构的固有频率,国内外学者针对换热管模态特性进行了不少研究^[4-5]。本文主要采用试验

收稿日期: 2020-06-01

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0107300)。

作者简介: 彭凡(1995-),男,2019年毕业于哈尔滨工业大学航天科学与力学系固体力学专业,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从事振动测试、仿真和故障诊断工作。

和仿真分析方式获取热交换器九管样机模态特性,为结构流致振动评估提供参考数据。

1 方法

1.1 试验件

在热交换器运行过程中,换热管受高温钠流体的冲刷,常易发生流致振动。当换热管固有频率与流体激振频率相近时,会引起换热管共振,造成换热管损伤。进行产品流致振动风险评价的第一步即为确定换热管的固有频率。针对热交换器产品原型,选取具有代表意义的九管样机单元,九管样机与原型机之间具有相似的流场和固体约束边界。本试验测试对象是热交换器三排各三根换热管组成的九管试验件。试验件的结构三维示意图如图1所示,主要是由9根换热管、支撑结构、管板、槽钢和水槽组成,总计10跨,可在空气和水环境中进行模态试验。

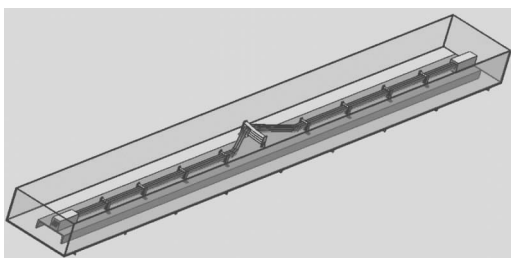


图1 九管样机试验件结构三维示意图

1.2 测点布置

综合考虑试验样机跨数和跨距,确认九管样机传感器布局位置和数目,测试空气和水环境两个工况下的模态数据,得到样机的振动响应数据。在数据分析阶段,通过专有模态识别方法,得到换热管振动特性(固有频率、振型、阻尼比等)。

一般情况下换热管跨中位置振幅最大,故在每跨中间布置加速度传感器,同时弯管处约束偏弱,弯管区域及弯管附近的直管段容易出现振动响应偏大情况,因此弯管段两跨各均匀布置3个测点,弯管相邻的直管段均匀布置两个测点,总计16个测点,测点的水平和垂直方向分别布置一个加速度传感器,单根换热管传感器布置数量32个。考虑到管束结构的密集程度,模态试验采用微型压电式传感器,并粘贴于换热管外表面,具体型号及参数见表1。

表1 模态试验测量仪器仪表清单

序号	名称	数量	主要配置和参数
1	高精度动态数据采集系统	通道数 48 路	AD 精度:24 位或双 24 位; 最高采样频率:每通道 102.4 kHz;
2	微型压电式加速度传感器	32 只	灵敏度:1 mV·m ⁻¹ ·s ⁻² ;量程范围:500 g; 频率范围:2~10 000 Hz;重量:1.2 g。
3	力锤	1 只	灵敏度:0.199 mV·N ⁻¹ ;量程:25 000 N; 谐振频率:40 kHz;线性度:±2%。

1.3 试验方法

本次九管样机模态试验采用图2所示的模态测试系统,使用力锤敲击法对试验管施加激励,力锤敲击后压电式加速度传感器产生电信号,通过高精度数据采集设备高频率采集信号,最后传至振动分析软件中进行信号实时显示、信号处理等工作。试验所需主要仪器设备还包括高精度48通道动态数据采集仪和力锤,具体参数详见表1。

九管样机总计10跨,单点激励时距离敲击点较远位置响应可能不明显,因此本试验采用多点激振多点拾振的测试方法,即力锤固定点激振,单向加速度传感器多点拾振,3个激励点分别位于图3相对应的1号、4号、12号测点附近。

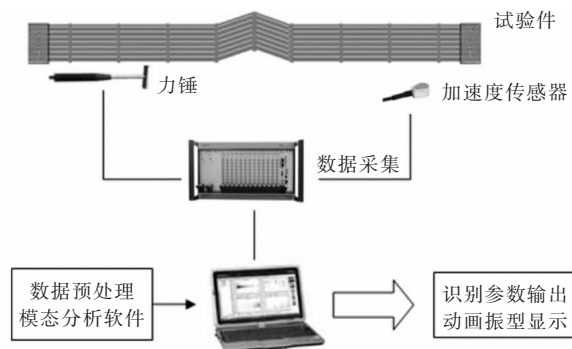


图2 模态试验测试系统



图3 加速度传感器测点布置图

本次九管样机模态试验主要依据图4所示的路线进行,总共分为5个步骤,力锤敲击3次完成一组换热管模态测试工作,至少重复5组。试验过程中,数据采集系统对激振力和振动响应数据进行实时采集处理,试验结束后计算频响函数,再导入模态分析软件,通过曲线拟合,由计算机进行参数识别,得到各阶模态参数(峰值、频率、阻尼等)和相应的

模态振型动画,形象地描述出系统的振动型态。参数识别是选择合适的数学模型和拟合方法,以及根据频响函数集总平均曲线的峰值选取模态频率的初始估计值。

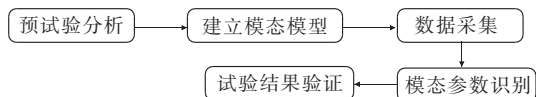


图4 模态试验分析方法

2 模态试验结果及分析

2.1 空气和水环境中模态试验

完成试验前的安装调试工作后分别进行空气和水环境中的换热管模态测试工作,测试结果显示空气和水环境中5组重复试验数据离散性较小,整体趋于稳定,说明本次模态试验方法可行,数据可靠性高。表2所示为空气、水环境中换热管固有频率和阻尼比数据列表,九管样机换热管空气、水环境中第1阶固有频率分别为102.410 Hz和77.349 Hz,水环境中的固有频率明显低于空气环境的固有频率,此外测试结果表明水环境中结构阻尼比空气环境的大,这与实际相符。

表2 九管样机空气、水环境中换热管固有频率和阻尼比列表

阶数	空气		水	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1	102.410	2.012	77.349	6.886
2	115.476	2.107	86.364	4.836
3	125.120	3.159	113.612	3.623
4	131.726	1.386	125.582	2.143
5	141.214	4.111	131.533	2.836
6	150.679	2.051	142.661	1.656
7	160.724	1.107	157.146	1.614
8	176.665	1.620	166.496	1.465
9	184.608	1.768	173.697	1.415
10	189.679	0.775	179.295	1.678

2.2 结果分析

本次九管样机模态试验得到的是换热管在水和空气环境中的固有频率、阻尼比和振型,然而样机换热管外部环境均为液钠,实际运行工况与试验工况不符。为获得换热管在液钠介质中的固有频率值,首先确定空气和水环境下共同出现的阶数频率,然后将九管样机模态试验得到的频率数据带

入式(1),获得附加质量系数 C_M ,再利用公式(2)得到液钠环境中换热管固有频率的修正值^[6]。

$$f_{\text{空气}} \sqrt{\frac{m_1}{EI}} = f_{\text{水}} \sqrt{\frac{m_1 + m_i + m_0}{EI}} \quad (1)$$

$$f_{\text{空气}} \sqrt{\frac{m_1}{EI}} = f_{\text{钠}} \sqrt{\frac{m_1 + m_{iNa} + m_{0Na}}{E_T I}} \quad (2)$$

换热管内外介质的附加质量项 $m = m_1 + m_i + m_0$,其中: m_1 为单位长度换热管质量,kg/m; m_i 为单位长度换热管内流体质量,kg/m; m_0 为单位长度管外流体质量,kg/m。

同时把换热管的弹性模量 E 作温度修正 E_T ,由于换热管内外液钠的持续热传导,换热管内外温度实际上不是一个稳定值,采取管内外平均温度处理,主要计算参数取值见表3。

表3 主要计算参数取值表

参数	液钠密度 kg/m ³	换热管密度 kg/m ³	弹性模量 E GPa	弹性模量 E_T GPa
取值	856	7 980	195	169

将材料参数、结构尺寸、模态试验结果代入以上两式,即可获得液钠环境下换热管固有频率修正值,具体数据见表4。

同时为了进一步验证模态试验结果的可靠性,利用换热管截面特征和尺寸信息建立仿真分析模型,将换热管两端设置为固定约束,支撑板处限制水平和垂直两个方向(X 和 Y)位移,中间弯管处根据约束实际情况限制其垂直方向(Y 方向)位移,划分梁单元进行模态仿真分析,分析模型如图5所示。



图5 九管样机有限元模型

表4为空气、水、液钠环境中换热管固有频率的仿真与试验数据,总体上仿真与试验结果接近,前两阶固有频率误差均在1%以内,前10阶固有频率误差均不超过5%,这进一步说明了试验结果的高可靠性,同时与有限元分析结果形成了相互验证,也表明了本次仿真分析结果准确度高,仿真分析数据可作为热交换器设计、制造和优化等阶段的重要参考。

表4 三种工况下换热管固有频率的仿真与试验数据对比

阶数	空气			水			空气液钠(修正值)		
	试验 Hz	仿真 Hz	误差 %	试验 Hz	仿真 Hz	误差 %	试验 Hz	仿真 Hz	误差 %
1	102.410	102.940	0.51	77.349	77.159	0.25	74.711	75.180	0.62
2	-	108.320	-	-	81.188	-	-	78.503	-
3	-	108.860	-	-	81.596	-	-	78.897	-
4	115.476	113.060	2.14	86.364	84.741	1.92	83.365	81.938	1.74
5	125.120	127.050	1.52	-	95.229	-	-	94.488	-
6	131.726	137.060	3.89	-	102.730	-	-	99.332	-
7	141.214	139.650	1.12	-	104.670	-	-	101.210	-
8	150.679	151.140	0.31	113.612	113.280	0.29	108.779	109.530	0.69
9	160.724	155.630	3.27	-	116.650	-	-	114.080	-
10	-	164.500	-	125.582	123.300	1.85	121.441	119.220	1.86

注:误差 = |试验 - 仿真| / 仿真 × 100%

对比仿真结果不难发现空气和水环境中的模态试验结果均存在丢阶现象,并且水环境中这种现象更为明显,这是模态参数识别算法和外界干扰等多种因素导致的。三种环境中换热管的固有频率数据(仿真)对比见图6,图中显示水和液钠环境中的换热管固有频率较为接近,水中固有频率值略微大于液钠介质中的固有频率,这是管内外介质和弹性模量差异性共同导致的结果,液钠介质中九管样机换热管固有频率值可适当参考水中试验值。

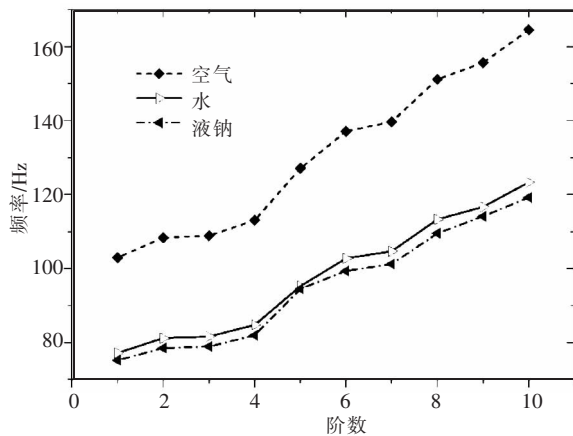


图6 三种环境中换热管的固有频率仿真数据对比

图7为九管样机换热管模态试验与仿真前二阶振型对比图。试验和仿真得到的振型趋势保持一致,仿真结果为理想化的振型,一阶振型表现为对称分布,换热管中间位置振幅较高,然后逐渐向两端降低。实际模态试验中振型受敲击位置、敲击力大小、参数识别算法等因素影响,实际获得的振型与仿真的结果存在振动幅度上的差异,但振型方向

趋势相似。

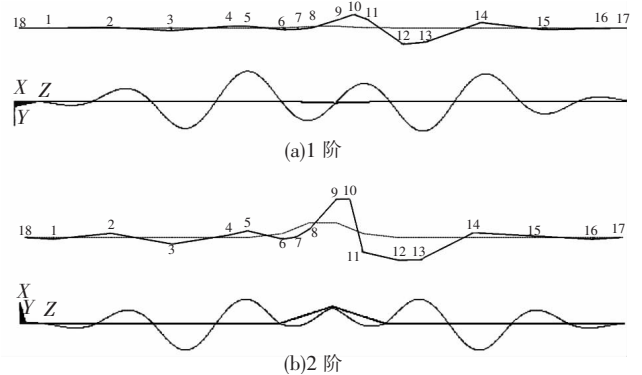


图7 换热管试验和仿真前2阶振型对比

3 结语

本文通过设计钠介质热交换器九管模态试验样机进行一系列模态试验(换热管固有振动特性试验),并进行换热管模态仿真对比分析,得出以下主要结论:

(1)通过试验成功获得空气、水环境下热交换器九管样机换热管的固有振动特性(固有频率、振型和阻尼比),空气环境中换热管基频为:102.410 Hz、水环境中换热管的基频为:77.349 Hz;并利用空气和水环境中的模态试验数据推导出液钠中换热管的基频修正值为:74.711 Hz。

(2)通过试验和仿真两种方法进行对比验证,验证了各自分析结果的准确性。数据显示试验与仿真计算的前2阶固有频率结果相对误差在1%以

(下转第8页)

土壤修复技术浅析

田建 吴家桦 胡春云 谢斐 张媛

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要:本文介绍了我国土壤污染的现状和修复的市场容量,总结了国内外现有的主要土壤修复技术,并对这些方法进行了评价和比较。对土壤修复今后的发展方向进行了展望。

关键词:土壤污染;土壤修复;重金属;有机污染物

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)01-0005-04

Analysis of Soil Remediation Technology

TIAN Jian, WU Jiahua, HU Chunyun, XIE Fei, ZHANG Yuan

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

Abstract: This article mainly introduces the current situation of soil pollution and the market capacity of soil remediation in China, summarizes the main existing soil remediation technologies at home and abroad, and evaluates and compares these methods. The future development of soil remediation is also prospected in this article.

Key words: soil pollution; soil remediation; heavy metals; organic pollutants

土壤是人类社会赖以生存的重要物质基础。随着经济的快速发展和工业化进程的加速,我国大量的土壤均受到不同程度的污染。土壤污染严重危害人类和动植物的生存环境,对污染土壤的修复已经刻不容缓。

1 我国土壤污染的现状

跟据2014年环保部、国土部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国土壤环境总体不容乐观,全国土壤占位超标率16.1%,以无机物污染为主,有机物污染次之,复合型污染比重较小。近几年我国土壤修复市场空间不断增长^[1],2017年中国土壤修复行业市场规模达151.45亿元,2018年达270亿元。随着各城市工业场地土壤污染的详查和建档的完毕,土壤实际修复的市场仍具有高爆发的潜力,预计到2024年我国土壤修复行业市场规模将达到860亿元。

2 土壤修复技术现状

土壤修复是指利用物理、化学和生物的方法转移、吸收、降解和转化土壤中的污染物,使其浓度降低到可接受水平,或将有毒有害的污染物转化为无害的物质。土壤修复技术按照土壤的位置可分为原位修复和异位修复两大类。按照处理原理可分为物理修复技术、化学修复技术、生物修复技术以及联合修复技术等。

2.1 物理修复技术

2.1.1 固化/稳定化(Solidification/Stabilization, S/S)技术

S/S技术^[2]通过将S/S材料与受污染土壤混合,运用物理或化学的方法将土壤中的污染物固定起来,或者将污染物转化成化学性质不活泼的形态,进而阻止污染物在土壤环境中迁移、扩散等过程。S/S技术可处理重金属等无机污染物和杀虫

收稿日期:2020-06-22

作者简介:田建(1993-),男,2019年毕业于四川大学化学工程学院化学工程专业,本科,助理工程师。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司主要从事节能环保技术研究工作。

剂、除草剂、多环芳烃等有机污染物。常用的 S/S 修复材料主要有粘结剂材料和添加剂材料,粘结剂材料包括水泥类和火山灰类材料,主要作用是将污染物固化在固化体内部;添加剂材料包括活性炭、碳酸盐、混凝土添加剂等,主要作用是进一步提高 S/S 技术的固化/稳定化效果。S/S 技术可采用原位修复或者异位修复。

2.1.2 热脱附/热解吸技术

热脱附/热解吸技术^[3]指通过直接或间接热交换,将土壤加热到足够的温度后使得污染物从土壤中挥发或分离,进入气体/液体处理系统的过程。该技术主要处理的对象为挥发性、半挥发性有机污染物和无机污染物。目前国内外的热脱附案例主要应用于苯系物、含氯有机物和 PAHs 的污染场地修复工程中,热脱附/热解吸技术可采用原位和异位两种方式,其中,应用较多的原位热脱附技术有电阻热脱附技术(ERH)、热传导热脱附技术(TCH)和蒸汽热脱附技术(SEE),这3种加热技术能使土壤升温到不同的温区,可处理的污染物种类也不同,见图1。

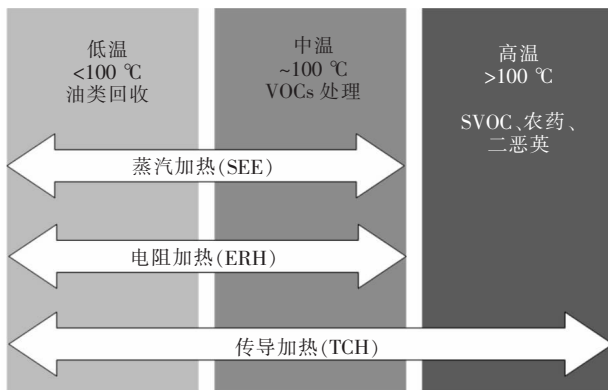


图1 不同修复技术的加热温度及适用污染物

2.1.3 气相/多相抽提技术

气相抽提(Soil Vapor Extraction, SVE)技术是一种原位修复技术,其原理是将新鲜空气通过进气井注入土壤污染区域,利用真空泵/引风机产生负压,由空气解吸并夹带土壤中的有机物,经抽气井流回到地面上收集并处理,典型的 SVE 技术处理流程见图2。

多相抽提(Multi-Phase Extraction, MPE)技术是一种原位修复技术,其原理是通过使用真空提取等手段,同时抽取地下污染区域的土壤气体、地下水

和浮油层到地面进行相分离、处理, MPE 技术处理流程见图3。

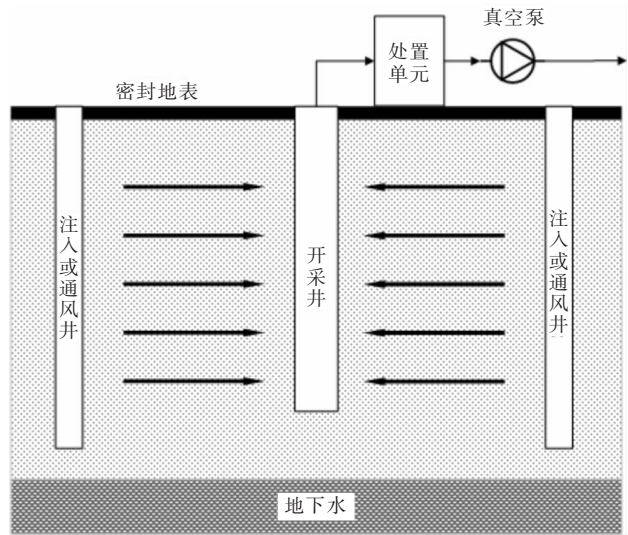


图2 土壤气相抽提技术示意图

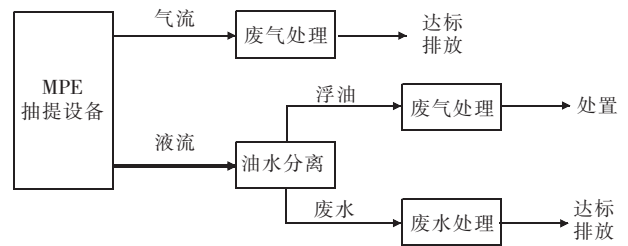


图3 MPE 处理系统工艺流程图

SVE/MPE 技术的主要处理对象为土壤中的半挥发性或挥发性有机物。

2.1.4 水泥窑协同处置技术

水泥窑协同处置技术^[4]是将满足或经过预处理后满足入窑要求的污染土壤投入水泥窑,在进行水泥熟料生产的同时实现对污染土壤的无害化处置。水泥窑协同处置可处理有机污染物和无机污染物,但入窑土壤的重金属最大允许投加量有限值,水泥窑协同处置是一种异位处置技术。

2.1.5 电动修复技术

电动修复技术处理污染土壤的基本原理与电池相似,在土壤污染区域中插入电极,电极两端通以直流电源形成电场,污染物在电场的作用下向电极两端富集,最后利用离子交换、抽出等方法收集处理。电动修复技术可用于修复的土壤中的重金属离子及有机污染物,是一种原位修复技术。目前该技术还未得到广泛应用,处于实验室研发阶段。

2.2 化学修复技术

2.2.1 化学氧化修复技术

化学氧化修复技术的原理是利用氧化剂将土壤中的污染物氧化,从而转化为低毒、低移动性的产物。将氧化剂注入污染土壤中,通过氧化剂在土壤中的扩散从而使氧化剂与污染物发生化学反应而去除污染物的方法叫原位化学氧化;将土壤挖掘出来再与氧化剂混合进行反应的方法叫做异位化学氧化。目前主要应用的氧化剂有高锰酸钾、芬顿试剂^[5]、臭氧和过硫酸盐四种。

2.2.2 原位化学还原修复技术

土壤污染经常伴随着地下水的污染,在较深的土壤中,对地下水具有污染效应的化学物质经常在土壤下层较深较大范围内呈斑块状扩散,随着地下水的流动,污染物质可能进一步扩散至未受污染的土壤,使得污染面积增大。目前欧美等发达国家兴起一种在地下构建可渗透性反应墙的技术,使得污染物随着地下水流经反应墙的时候被还原或者固定。目前这种技术常用于处理铀、镉、铬酸盐和一些氯代试剂,常用的还原剂有 SO_2 、 H_2S 气体和 Fe^0 胶体等。

2.2.3 化学淋洗修复技术^[6]

原位化学淋洗技术与前面所述 SVE 技术相似,其原理是指通过压力将化学淋洗液注入到土壤中,再将反应后带有污染物的液体从抽提井抽出,进行进一步的污水处理过程。将土壤挖掘后再进行化学淋洗反应的过程叫做异位化学淋洗技术。目前,以表面活性剂作为化学淋洗剂可处理有机污染物,以螯合剂或酸作为化学淋洗剂可处理重金属等无机污染物。

2.3 生物修复技术

2.3.1 植物修复技术

植物修复技术属于原位修复。某些特定的植物根系可以吸收、转化土壤中的污染物,利用植物修复,可去除污染土壤中的重金属和某些特定的有机污染物,如石油烃、多环芳烃等。植物对重金属的修复可分为植物固定、植物挥发和植物吸收三种方式。例如,耐 Al 植物的根系周围 pH 升高,可将 Al^{3+} 固定形成羟基 Al 聚合物,以抑制 Al 在土壤中的进一步扩散。植物对有机物的处理主要是通过木质化作用使其在新的组织中贮藏,也可使其矿化

或者参与代谢。

2.3.2 生物堆技术

生物堆是一种微生物修复技术^[7],可以是原位修复也可以是异位修复。土壤中的微生物对某些特定的有机污染物有降解作用,但是降解率不高,采用人工强化的方法,例如,驯化菌剂或者强制通风的方式,增加微生物对污染物的降解作用。微生物修复成本较低、高效、不会产生二次污染。生物堆技术适用于处理石油烃等易生物降解的有机物。

2.3.3 生物通风技术

生物通风技术属于原位修复。通过向污染土壤中供给空气或氧气,依靠微生物的好氧活动,促进污染物降解;同时利用土壤中的压力梯度促使挥发性有机物及降解产物流向抽气井,被抽提去除。

2.4 联合修复技术

面对同一块土壤遭受不同污染物污染的情况,往往采用两种或两种以上修复方式结合,以达到更加高效的处理效率。例如,化学氧化 + 生物修复技术已经广泛应用于多环芳烃污染土壤的修复。

2.5 技术路线对比

对各种处理技术进行对比,主要技术适用对象及成本见表 1。

3 结语

土壤修复技术的发展已经趋于成熟,国内的土壤修复市场正在逐步放开,但是目前启动的体量仍然较小,土壤修复行业朝着稳中向好的趋势发展。未来,土壤修复技术可能会朝着以下 4 个方向发展:

(1)水土共治。土壤和地下水是一个统一体,雨水渗透或者地下水的迁移必定会导致污染物的进一步扩散,只重视土壤污染物的修复而忽略地下水的治理,最终是治标不治本,容易导致土壤的再次污染。

(2)从单项向综合技术的转变。如前所述,单一的土壤修复技术已经不能满足受多种污染物污染过的土壤了,采用多种修复方式结合,是一种更加高效、经济的方式。

(3)从异位向原位修复的转变。异位修复技术快速、高效,但是土壤修复体量巨大,异位修复增加挖掘、运输、回填成本,固定设备投资也大。随着房

表1 主要土壤修复技术对比

修复技术	主要处理对象	技术缺点	技术类型	修复成本/元·t ⁻¹
固化/稳定化	无机、有机污染物	不能削减污染物总量,有二次污染风险,土壤体积增大	原位/异位	200 ~ 800
热脱附/热解吸	挥发性、半挥发性污染物	对土壤质地有要求,投资运行昂贵	原位/异位	原位修复根据加热方式区别较大 异位修复运行成本 400 ~ 500
气相/多相抽提	挥发性、半挥发性有机物	SVE 对土壤质地有要求 MPE 系统复杂,对水文地质条件要求高	原位	SVE: 100 ~ 300 MPE 高于 SVE
水泥窑协同处置	有机、无机污染物	入窑物料污染物种类、含量要求高	异位	运行成本 400 ~ 500
电动修复	重金属离子、有机污染物	技术实施要求高,国内未见相关工程实例报导	原位	150 ~ 500
化学氧化	难生物降解有机物	加药量控制要求高、药剂扩散可能不均匀、二次污染	原位/异位	运行成本 300 ~ 1 500
原为化学还原	铀、镉、铬酸盐和氯代试剂	加药量控制要求高、二次污染	原位	500 ~ 1 500
化学淋洗	有机、无机污染物	土壤质地有要求,二次污染,滞水区效率不高	原位/异位	原位 500 ~ 1 500 异位运行成本 400 ~ 1 900
植物修复	部分重金属和有机物	时间长,表层修复	原位	100 ~ 500
生物堆	可生物降解有机物	时间长,外源微生物驯化,土壤条件是否影响微生物生存	原位	300 ~ 400
生物通风	可生物降解有机物	时间长,外源微生物驯化,土壤条件是否影响微生物生存	原位	100 ~ 200

地产行业发展趋势趋于平稳,原位修复将逐渐成为主导。

(4) 基于设备化的快速场地修复技术。土壤修复技术繁多,每一种技术涉及到多种处理设施和监测设备,设备化的场地修复技术是土壤修复技术走向市场化的必经之路。

参考文献:

[1] 卞梦健. 我国土壤修复潜在市场规模庞大[J]. 资源与人居环境, 2019, (1): 47 - 50
[2] 张晓婉, 王岩, 解恒等. 水泥基复合材料铬污染土壤的固化/稳定

化修复技术研究[J]. 中国金属通报, 2019, (5): 245 - 246 + 248
[3] 周永信, 廖长君, 梁银春等. 有机污染场地原位热脱附技术应用研究[J]. 化工管理, 2019, (30): 46 - 47
[4] 陈慧. 水泥窑协同处置污染土技术及应用探讨[J]. 水泥工程, 2019, (1): 40 - 41
[5] 宋刚练, 江建斌, 祝可成. 芬顿氧化法修复上海某工业场地的技术应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2017, 28(2): 106 - 110
[6] 卢光华. 冶金工业汞、砷重毒性污染土壤高效修复的应用基础研究[D]. 北京科技大学, 2019
[7] 张磊, 张栋, 展漫军等. 模拟生物堆法处理硝基苯等有机污染土壤的研究[J]. 环境科技, 2015, 28(6): 53 - 55

(上接第4页)

内,前10阶相对误差最大不超过5%,试验与仿真分析获得的换热管振型方向趋势保持一致。

(3) 三种工况下仿真分析与试验结果一致性良好,文中的仿真分析方法可有效应用于换热管结构设计及优化阶段。

参考文献:

[1] 何佳闰, 郭正荣. 钠冷快堆发展综述[J]. 东方电气评论, 2013, 27(3): 36 - 43

[2] Goyder H G D. An assessment method for unstable vibration in multispan tube bundles[J]. Journal of fluids and structures, 2003, 18(5): 555 - 572
[3] 程林. 热交换器内流体诱发振动[M]. 北京: 科学出版社, 1995
[4] 童鲁海. 管壳式热交换器的振动特性分析及模态试验[J]. 机电工程, 2009, 26(7): 46 - 48
[5] Jo J C, Jung M J, Kim W S, et al. Dynamic characteristics of steam generator U-tubes with defect[J]. Nuclear Engineering and design, 2005, 235(7): 821 - 831
[6] GB151 - 2014, 管壳式换热器[S]

催化层裂纹对燃料电池膜电极耐久性的影响研究

谢光有¹ 朱磊峰² 李婷²

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

摘要:催化层成型干燥过程中由于内外热应力不平衡,极易形成裂纹。本文通过控制成型工艺,制备了具有不同程度裂纹缺陷的催化层。采用加速耐久性测试方法,研究了不同程度裂纹对燃料电池膜电极耐久性的影响。经过1 000次高低电位(1.0~1.5 V)循环扫描,催化层具有网络状裂纹的膜电极较无裂纹样品,极化性能衰减率增大2倍,电化学活性面积的衰减率增大1倍。

关键词:燃料电池膜电极;催化层;裂纹;耐久性

中图分类号:TM911.4

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)01-0009-04

Study on the Effect of Cracks in Catalyst Layer on the Durability of PEMFC Membrane Electrode Assembly

XIE Guangyou¹, ZHU Leifeng², LI Ting²

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

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

Abstract: Cracks are easily generated in catalyst layer due to the thermal stress between surface and inside during catalyst ink coated on membranes. Catalyst layer containing cracks in different degree of severity are prepared in this paper. The effect of cracks on the durability of membrane electrode assembly is studied by the accelerated durability test. After 1 000 cycles of potential scanning between 1.0 ~ 1.5 V, compared with CCM containing no cracks, the decay rate of the performance electrode with networked cracks increases by two times, and the decay rate of ECSA is double.

Key words: PEMFC membrane electrode assembly; catalyst layer; cracks; durability

质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)可实现化学能向电能的高效转化,热电联机效率高达95%以上^[1],兼具零排放、安全可靠、易于操作维护等突出优势,被认为是21世纪最具发展前景的新型发电技术,可广泛应用于车用动力、家用热电联产、分布式能源等诸多领域^[2]。

燃料电池膜电极是由质子交换膜和阴阳极催化层组成。其中催化层是燃料电池发生氢氧电化学反应,实现化学能向电能转换的核心区域,也是影响燃料电池功率密度和运行寿命的关键功能部位^[3-4]。通常,催化层的制备工艺主要有两种:①直接将催化

剂浆料涂覆于质子交换膜表面(catalyst coated membrane, CCM)或者气体扩散层表面(gas diffusion electrode, GDE);②先将催化剂浆料涂覆在转印基材上,干燥后再通过热压转移到质子交换膜上(decals process)^[5]。催化层在成型过程中需要构建纳米-微米尺度的多孔结构,用来提供支撑电化学反应的活性面积和保障水、气扩散的传输通道。无论基于哪种工艺路线,薄的催化层在干燥固化过程中,由于表面和内部干燥速率不一致,导致内外热应力差异,极易形成裂纹。因此,裂纹作为催化层中存在的典型结构缺陷,会显著影响膜电极的性能和寿命。

催化层的裂纹对电池性能也可能存在积极作

收稿日期:2020-09-28

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

用。相关研究表明,具备有序排列裂纹的膜电极由于提高了水传输效率,较常规膜电极性能更佳^[6]。但相关学者通过 X 射线或 FE-SEM 等方法观察到,由于受到更大的交变应力作用,催化层裂纹处的质子交换膜的耐久性衰减更快^[7]。此外,催化层干燥成型过程中产生的裂纹通常为无规则形状和无序分布,因此裂纹是影响膜电极耐久性的重要因素之一。

本文制备了具有不同程度裂纹的催化层。采用膜电极加速耐久性测试方法,分析了具有不同程度裂纹的膜电极的性能衰减过程与规律,研究了催化层裂纹对膜电极耐久性的影响,为催化层制备过程对裂纹进行有效控制提供依据。

1 实验过程

1.1 CCM 的制备

催化剂浆料主要包含催化剂(40wt% Pt/C, Hispe[®] 4000, Johnson Matthey)、PFSA 分散液(D1020,固含量 20wt%,科穆化学)、异丙醇(色谱纯,ThermoFisher A451-4)和 H₂O(电阻率 > 10 MΩ)四种组分。

将制备好的浆料通过超声喷涂机(Prism 500, USI)直接涂覆到质子交换膜两侧,制得 CCM 样品(5 cm × 5 cm)。阴极铂载量 0.4 mg/cm²,阳极铂载量 0.1 mg/cm²。将制备的 CCM 样品置于烘箱中除去催化层中残留的溶剂,即完成样品制备。喷涂过程中通过调节喷涂参数制得无裂纹(CL-N)、分散状 I 型裂纹(CL-I)及网络状 Y 型裂纹(CL-Y)三种缺陷程度的催化层。

1.2 单电池组装与活化

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

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

1.3 膜电极加速耐久性测试

对活化后的单电池进行电位扫描。电池温度

80 °C;阳极通氢气(0.8 slpm),阴极通氮气(0.8 slpm),气体湿度 100RH%,气体压力 0 kPa;扫描范围 1.0 ~ 1.5 V,每个循环 2 s,扫描速率为 500 mV/s。累计扫描 2 000 个循环,分别测试 0、100、500、1 000、1 500 和 2 000 次循环后的极化曲线与循环伏安曲线。

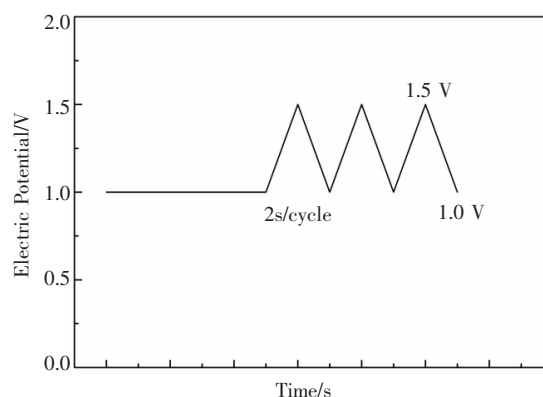


图1 膜电极高低电位扫描谱图

1.4 极化性能测试

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

1.5 循环伏安测试

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

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

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

其中:ECSA 为所测电极的电化学活性面积,单位为 m²g_{Pt}⁻¹; [Pt] 为单位面积工作电极上的 Pt 质量;A 为单位面积电极的氢脱附峰面积,单位为 mA·V/cm²;v 为扫描速率,单位为 mV/s;Q₀ 为吸附电量常数 0.21。

1.6 电子扫描显微镜观察

将样品用导电胶粘贴于样品台架上,通过

TESCAN VEGA3 型号电子扫描显微镜进行形貌观察。

2 结果与讨论

燃料电池运行过程中造成催化层衰减的主要因素是高电位。通过电位扫描模拟燃料电池的运行过程,来加速评估催化层的耐久性。本位对基于相同材料体系制得的具有不同缺陷程度的3种膜电极进行加速耐久性测试,监测测试过程中极化性能、电化学活性面积及催化层表面形貌的变化情况。通过3种样品衰减过程的对比分析,研究催化层的裂纹程度对膜电极耐久性的影响。

2.1 催化层形貌

随着扫描循环次数的增加,催化层受到高电位腐蚀的持续时间延长,腐蚀程度逐渐加剧。由于燃料电池阴极催化层的腐蚀较阳极更加明显,对性能的影响也更为显著,因此对比分析了 CL-N、CL-I 和 CL-Y 3 种样品阴极催化层在耐久性测试前后的形貌变化,如图 2 所示。SEM 表征结果显示,经过 2 000 次循环扫描,和初始形貌对比,3 种催化层均发生严重腐蚀,出现明显的电化学腐蚀痕迹和催化层开裂。进一步对比 CL-N、CL-I 和 CL-Y 3 种样品在耐久性测试前后的形貌变化,可以看到,初始时催化层裂纹程度越严重,经过耐久性测试后催化层的缺陷程度变得更加恶化。无裂纹的 CL-N 经过循环扫描后,除了有明显的电化学腐蚀痕迹,催化层仍保持一定的完整性,仅存在局部的微裂纹(图 2(b));CL-I 衰减后裂纹从初始状态的分散状 I 型发展为网络状的 Y 型(图 2(d)),缺陷程度明显加剧;初始状态就呈现网络状裂纹的 CL-Y 测试后开裂程度进一步恶化,开裂更加明显,裂纹宽度显著增大。该结果表面,催化层成型过程中产生的裂纹在燃料电池运行过程中会进一步发展并演变为更加严重的缺陷。

2.2 极化性能

随着电位扫描循环次数的增加,催化层受到电化学腐蚀时间延长,极化性能会逐渐衰减。首先,对比分析了 CL-N、CL-I、CL-Y 3 种样品的极化性能随循环次数的变化情况,如图 3 所示。结果显示,随着电位扫描循环次数的增加,各样品的极化性能均逐渐下降。进一步对比图 3(a)、(b)、(c) 中极化曲

线衰减的差异,可以看出催化层初始裂纹程度越明显,性能衰减的速率越快。经过 2 000 次循环,CL-N 虽然性能明显衰减,但仍能输出完整的极化曲线;而 CL-Y 仅能支撑 0.3 A/cm^2 的电流密度,已无法正常运行。

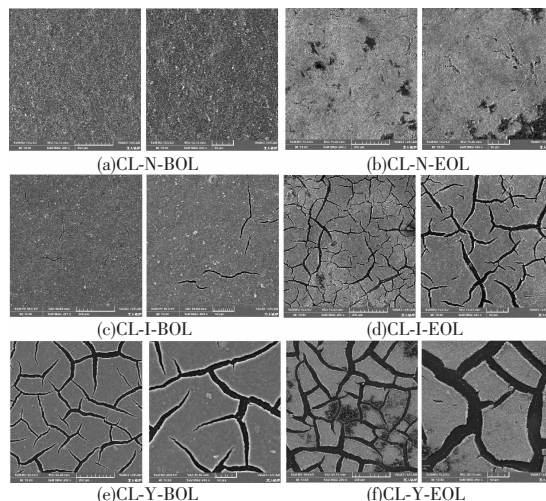


图 2 CL-N、CL-I、CL-Y 耐久性测试前后的阴极催化层形貌

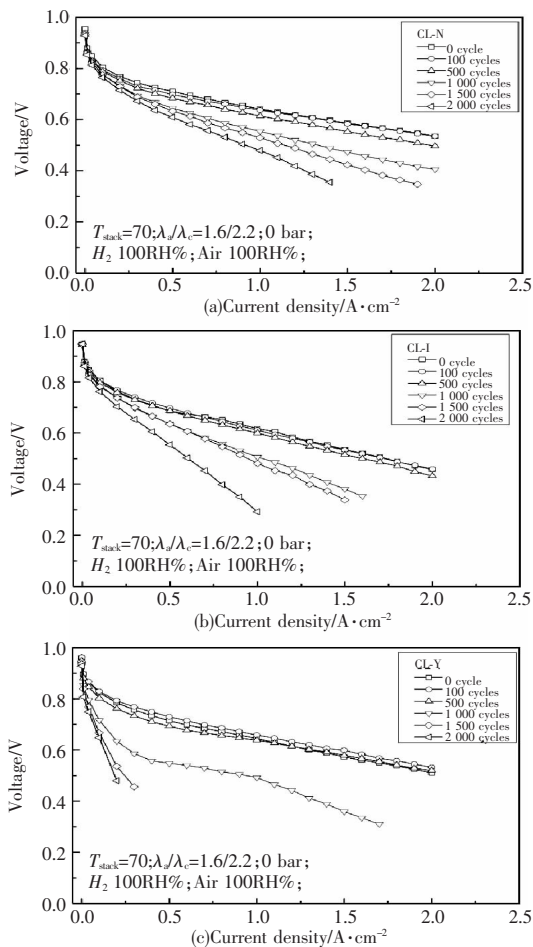


图 3 CL-N、CL-I、CL-Y 的极化曲线随循环次数增加的变化趋势

将 1 000 和 2 000 次循环电位扫描后, CL-N、CL-I、CL-Y 在电流密度 0.1 和 1.0 A/cm² 时的性能衰减率统计于表 1 中。数据显示, 经过相同的循环次数, 0.1 和 1.0 A/cm² 时的性能衰减率均随着催化层初始裂纹程度的加剧而逐渐增大。以燃料电池常用的工作点 1.0 A/cm² 进行对比, 经过 2 000 次循环, 与无裂纹的 CL-N 对比, 具有分散状 I 型裂纹的 CL-I 衰减率增大了 1 倍, 而具有网络状 Y 型裂纹的 CL-Y 的衰减率增大了约 2 倍。

表 1 CL-N、CL-I、CL-Y 的极化性能衰减率

Sample	CL-N		CL-I		CL-Y		
Cycle number	1 000	2 000	1 000	2 000	1 000	2 000	
Degradation Rate/%	0.1 A/cm ²	3.48	4.97	3.72	5.46	13.10	21.36
	1.0 A/cm ²	13.57	25.27	17.99	52.67	23.72	>70

2.3 电化活性面积

随着电位扫描循环次数的增加, 催化层电化腐蚀逐渐加剧, 电化活性面积随之逐渐减小。在耐久性测试中, 通过循环伏安法测试了 CL-N、CL-I 和 CL-Y 3 种催化层的电化活性面积 (ECSA) 变化情况。同样由于燃料电池阴极催化层衰减较阳极更加明显, 重点对比和分析了各样品阴极催化层 ESCA 的变化差异, 如图 4 所示。可以看到, 随循环

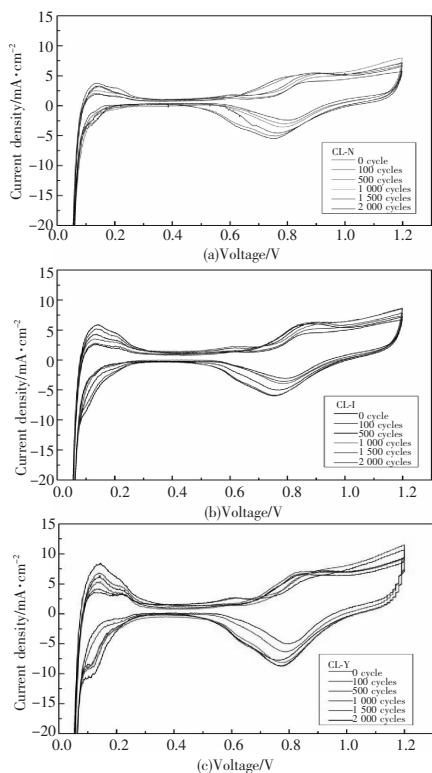


图 4 CL-N、CL-I、CL-Y 的循环伏安曲线随循环次数的变化

次数增加, 各样品的氢吸附峰均逐渐减小, 表明其电化活性面积逐渐缩小。

为进一步定量对比 3 种样品 ECDSA 的衰减速率, 将 100、1 000 和 2 000 次循环后, 各样品阴极催化层的 ECDSA 衰减率统计于表 2 中。结果显示, 经过相同的循环次数, 3 种样品的 ECDSA 衰减率均随催化层裂纹程度的加剧而逐渐增大。经过 1 000 次循环, 相较于无裂纹的 CL-N, 具有分散状 I 型裂纹的 CL-I 的 ECDSA 衰减率增大了 77.7%, 具有网络状 Y 型裂纹的 CL-Y 的衰减率增大了一倍多。此外, 在催化层腐蚀衰减过程中, ECDSA 的变化整体表现出起始衰减速率较快, 随后衰减速率逐渐减缓的趋势。该变化现象说明在燃料电池运行过程中起始阶段的快速衰减需要重点关注, 是影响膜电极全生命周期运行寿命的关键因素。

表 2 CL-N、CL-I、CL-Y 的电化活性面积 (ECDSA) 衰减率

Sample	CL-N	CL-I	CL-Y	
ECDSA Degradation Rate /%	100 cycles	4.93	16.79	15.84
	1 000 cycles	25.62	45.54	53.91
	2 000 cycles	46.31	52.28	65.02

3 结语

本文研究了催化层成型干燥过程中形成的不同程度的裂纹缺陷对膜电极耐久性的影响。经过加速耐久性测试, 裂纹越显著, 催化层的结构完整性越差, 极化性能和电化活性面积衰减越快。较催化层中无裂纹的膜电极, 催化层呈网络状裂纹的膜电极性能衰减率增大了 2 倍, 电化活性面积衰减率增大了 1 倍。

参考文献:

[1] 衣宝廉. 燃料电池—原理、技术、应用 [M]. 化学工业出版社, 2003
 [2] 刘奎仁, 韩庆. 新能源技术 [M]. 化学工业出版社, 2010
 [3] Frisk JW, Hicks MT, Atanaski RT, et al. MEA Component Durability [R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2004
 [4] Li X, Sabir I. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field design [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 30 (4) : 359 – 371

(下转第 16 页)

50 MVar 分布式调相机润滑油系统的设计研究

黄国微 薛长奎 李勇

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文针对 50 MVar 分布式调相机的布置环境及安全运行要求, 对调相机润滑油系统进行设计研究, 计算了油箱容量、润滑油泵的流量及压力、油冷却器的换热面积, 为系统设备选型提供理论依据。

关键词: 分布式调相机; 润滑油系统; 油泵压力及流量; 油箱容量; 换热面积

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)01-0013-04

The Design Research of 50 MVar Distributed Synchronous Compensator's Lubricating Oil System

HUANG Guowei, XUE Changkui, LI Yong

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

Abstract: According to the layout environment and safe operation requirements of the 50MVar distributed synchronous compensator, this paper researches the design of synchronous compensator's lubricating oil system and calculates the tank capacity of the lubricating oil system, the flow and pressure of the lubricating oil pump, and the heat exchange area of the oil cooler, which provides a theoretical basis for the selection of system equipment.

Key words: distributed synchronous compensator; lubricating oil system; flow and pressure of the lubricating oil pump; tank capacity; exchange area

随着首批 300 MVar 调相机陆续投运, 调相机在直流输电工程中的作用日益突出, 其快速的动态响应特性为直流输电提供有力保证。为了实现送、授端各关键节点电压水平的普遍改善, 降低新能源厂站过电压水平及脱网风险, 提高特高压直流输电功率, 一种新型的 50 MVar 分布式隐极同步调相机的动态无功补偿装置被提出研究。调相机作为大型旋转设备, 轴承冷却和润滑必不可少, 稳定可靠的润滑油系统对调相机的安全运行至关重要。

润滑油系统作为调相机的重要辅助系统, 持续稳定地向调相机轴承提供润滑冷却油液, 为调相机在各种工况下安全可靠运行提供保障。分布式调相机拟配置于新能源厂站, 多位于我国北方干旱缺

水且风沙较大的地区, 针对其特殊运行环境, 润滑油系统也需作相应的特殊设计。

1 系统构成及输入参数

调相机润滑油系统由润滑油箱、润滑油泵组、油冷却器、油过滤器、排烟风机、监测仪表、阀门及管件组成, 各部件由不锈钢管路连接, 构成一个完整的系统。其中, 润滑油泵配置 2 台交流油泵和 1 台直流应急油泵, 油过滤器、排烟风机、油冷却器均采用 1 用 1 备冗余配置, 系统原理见图 1。

为了优化现场管路布局, 便于现场安装及运行维护, 所有系统设备集成在一起形成一个集装装置, 装置整体设置防护罩以适应室外布置的要求,

收稿日期: 2020-06-22

作者简介: 黄国微(1987-), 男, 2010年毕业于重庆大学自动化专业, 本科, 工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司工程技术事业部从事系统设计及应用工作。

薛长奎(1987-), 男, 2012年毕业于华中科技大学水利工程专业, 硕士, 工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司工程技术事业部从事系统设计及应用工作。

防止雨雪和风沙对设备的侵蚀,集装设备外形见图2。

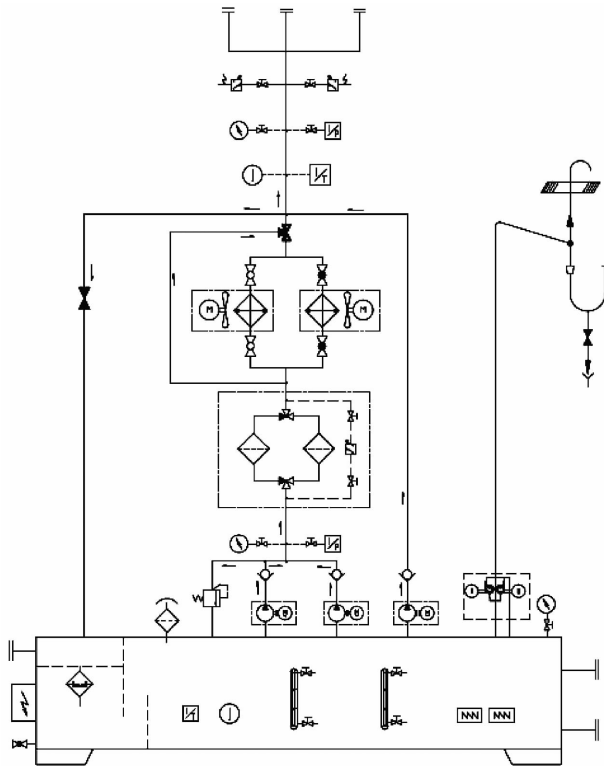


图1 系统原理图

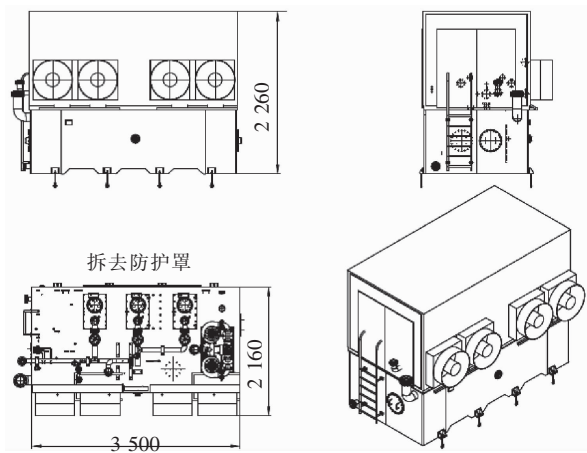


图2 集装装置外形图

为满足调相机在各种工况下均能安全稳定运行,选取极端工况下的参数进行相应计算,具体参数见表1。

2 油泵的流量及压力计算

本系统选用离心泵作为润滑油泵,其作为变量泵,能根据压力变化自适应输出相应流量,其瞬态及稳态性能优越,能持续稳定地为调相机供给润

滑冷却油液。

表1 输入参数

参数名称	单位	代号	数值
额定工况下调相机轴承损耗功率	kW	P	68
惰转过程中平均轴承损耗功率	kW	H	20
惰转运行时间	min	t	40
环境温度	℃	T_0	30
轴承进油温度	℃	T_1	40
回油温度	℃	T_2	55
最高允许油箱温度	℃	T_3	75
轴承供油压力	MPa	P_1	0.1

2.1 油泵额定流量计算

本系统选用32#汽轮机油作为润滑冷却介质,润滑油流量需要满足调相机额定工况运行时轴承损耗散热的要求,则润滑油流量为:

$$Q = \frac{P}{C\rho\Delta T_1} \quad (1)$$

式中: ρ 为润滑油密度,886 kg/m³; C 为润滑油比热容,1.92 kJ/kg℃; ΔT_1 为进出调相机轴承的润滑油温差, $\Delta T_1 = T_2 - T_1$ ℃。

计算得润滑油流量为159 L/min。考虑到盘车运行时,调相机转速低于5 r/min,此时调相机轴承所需润滑油流量比额定工况下流量小,按额定工况计算的润滑油流量足够轴承和盘车装置同时使用。由此,选定油泵额定流量为160 L/min。

2.2 油泵额定压力计算

根据管路的初步布置方案,管路相关参数见表2。

表2 管路参数

管段	管内径 d /mm	管长 l /m	90° 弯头数	异径 三通数	阀门数
母管	50	30	6	1	6
支管	32	15	4	0	0

2.2.1 管内流动状态判定

根据流量及管径,通过计算可以判断油液的流动类型。雷诺数:

$$Re = \frac{vd}{\gamma} = \frac{1.274Q}{\gamma d} \times 10^4 \quad (2)$$

式中: Q 为管内流量,母管流量为160 L/min,支管流量80 L/min; γ 为运动粘度,0.32 St。

计算得母管雷诺数 $Re_1 = 2\ 123$,支管雷诺数

$Re_1 = 1\ 659$, 均小于临界雷诺数 $Re_{(L)} = 2\ 320$, 所以管内油液流动类型均为层流^[1]。

2.2.2 沿程压力损失

$$\Delta P_L = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{\rho v^2}{2} \quad (3)$$

式中: λ 为沿程阻力系数, $\frac{64}{Re}$; v 为管内平均流速, $\frac{4Q}{\pi d^2}$ 。

计算得母管沿程压力损失 $\Delta P_{L1} = 14.82$ kPa, 支管沿程压力损失 $\Delta P_{L2} = 16.83$ kPa。总的沿程压力损失为 $\Delta P_L = \Delta P_{L1} + \Delta P_{L2} = 31.65$ kPa。

2.2.3 局部压力损失

$$\Delta P_r = \sum \zeta \times \frac{\rho v^2}{2} \quad (4)$$

式中: ζ 为局部阻力系数。

对管道系统中阀门、弯头、三通、过滤器、冷却器等各部件局部阻力求和得 $\Delta P_r = 318.24$ kPa。

2.2.4 总压力损失

$$\Delta P = \Delta P_L + \Delta P_r \quad (5)$$

计算得总压力损失为 0.349 MPa, 油泵额定压力为系统总压力损失与轴承供油需求压力之和, 为 $\Delta P + P_1 = 0.449$ MPa。由此选定额定压力为 0.45 MPa, 额定流量为 160 L/min 的离心泵为本系统的润滑油泵。

3 油箱容量计算

油箱的容量须满足全站停电情况下机组的安全惰转。此时, 通过直流油泵保持润滑油的润滑功能, 但油冷却器失去冷却功能, 轴承损耗会使油温不断升高, 为保证机组的安全运行, 机组惰转过程中油温不得超过最高允许油箱油温。

惰转过程中, 通过热量平衡^[2]:

$$H_0 = H_1 + H_2 \quad (6)$$

式中: H_0 为惰转过程轴承损耗热量, $H_0 = H \times t$, kJ。 H_1 为油箱自然散热量; H_2 为润滑油吸收的热量。

$$H_1 = \Delta T_2 \times k \times A \times t \quad (7)$$

式中: ΔT_2 为油箱油温与环境温度的温差, 油箱油温取惰转过程中油温线性平均值, $\Delta T_2 = (T_2 + T_3)/2 - T_0$, °C; k 为油箱传热系数, W/(m²·K), 通风很差时, $k = 8 \sim 9$, 通风良好时, $k = 15$, 由于油箱室

外布置, 取 $k = 15$; A 为润滑油箱散热面积, 油箱尺寸高、宽、长之比为 $(1:1:1) \sim (1:2:3)$, 油面高度达油箱高度的 0.8 倍时, 油箱散热面积近似计算为 $A = 6.66 \sqrt[3]{V^2}$, m²。

$$H_2 = V \times \rho \times C \times \Delta T_3 \quad (8)$$

式中: V 为油箱容量, m³; ΔT_2 为惰转前后油箱油温差, $\Delta T_3 = T_3 - T_2$, °C。

由公式(6)、(7)、(8), 计算得油箱容积 $V \approx 1.2$ m³, 油箱循环倍率为 6 , 满足油箱设计要求。

4 油冷却器换热面积计算

由于 50 Mvar 分布式调相机一般配置在风电、光伏等新能源电站, 运行环境多为干旱缺水地区, 所以选用板翅式空冷器作为本系统的油冷却器。板翅式空冷器结构紧凑, 换热效率高, 无需水源, 便于系统设备的集成布置。

4.1 热量衡算

空气吸收热量等于润滑油放出热量, 等于轴承损耗放出的热量, 则空气消耗量:

$$Q = \frac{P}{C \times \rho \times \Delta T_4} \quad (9)$$

式中: ρ 为空气密度, 1.16 kg/m³; C 为空气比热容, 1.0 kJ/kg·°C; ΔT_4 为进出冷却器空气温差, 取 7 °C。

计算得空气消耗量为 $30\ 147$ m³/h。

4.2 换热器结构参数选定

选取宽度为 $1\ 050$ mm, 长度为 $1\ 300$ mm 翅片板, 相关参数见表 3。

表 3 换热器结构参数

参数名称	空气侧	油侧
有效宽度	1 000	1 000
有效长度	1 200	1 000
翅片高度 h /mm	9.5	4.7
翅片厚度 δ /mm	0.2	0.3
通道数 n	40	20
自由通道截面积 A_e /m ²	0.328	0.074 8
当量直径 De /mm	2.58	2.45
每层单位面积的总传热面积 $F_{\omega 2}$ /m ²	12.7	6.1
每层单位面积的二次传热面积 F_{ω} /m ²	10.94	4.4
总传热面积 F /m ²	609	122

4.3 换热计算^[3]

4.3.1 给热系数的计算

$$\alpha = 3\ 600 \times St \times C \times G \quad (10)$$

式中: C 为流体比热容, $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$; G 为单位面积质量流速, $G = Q\rho/A_e, \text{kg/m}^2\cdot\text{s}$; Q 为流体体积流量, m^3/h ; St 为斯特顿准数, $St = j/Pr^{2/3}$, j 为传热因子, 为雷诺准数 Re 的函数, 可直接采用实验 $j-Re$ 曲线查取^[4]; Pr 为普朗特准数, $Pr = \mu C/\lambda$; Re 为雷诺准数, $Re = (GD_e)/\mu g$; μ 为体粘度, 空气侧 $1.88 \times 10^{-5} \text{Pa}\cdot\text{s}$, 油侧 $2.83 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$; λ 为流体导热系数, 空气侧 $0.025 \text{W/K}\cdot\text{m}$, 油侧 $0.15 \text{W/K}\cdot\text{m}$; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, 9.8m/s^2 。

计算可得: 空气侧给热系数 $\alpha_1 = 12.78 \text{kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$, 润滑油侧给热系数 $\alpha_2 = 415 \text{kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 。

4.3.2 翅片全效率计算

$$\eta = 1 - \frac{F_{o2}}{F_o}(1 - \eta_f) \quad (11)$$

式中: η_f 为翅片效率, $\eta_f = (\tan h(ml))/ml$; m 为无因次肋高, $m = \sqrt{(2\alpha/(\lambda_m\delta))}$; l 为无因次肋高, 对于空气侧, $l = h_1$, 对于润滑油侧 $l = h_2/2$; λ_m 为翅片材料导热系数, 铝材为 $735 \text{kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 。

计算得空气侧翅片全效率为 $\eta_1 = 0.772$, 润滑油侧翅片全效率 $\eta_2 = 0.978$ 。

4.3.3 传热系数计算

空气侧:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1\eta_1} + \frac{1}{\alpha_2\eta_2} \cdot \frac{F_1}{F_2}} \quad (12)$$

润滑油侧:

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2\eta_2} + \frac{1}{\alpha_1\eta_1} \cdot \frac{F_2}{F_1}} \quad (13)$$

计算得 $K_1 = 20.75 \text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, $K_2 = 103.6 \text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ 。

(上接第12页)

- [5] Kocha SS. Handbook of Fuel Cell: Fundamentals, Technology and Application[M]. Vielstich W, Lamm A, Gasteiger H A. Editors, Vol. 3, John Wiley & Sons, New York, 2003
- [6] Tsushima S, Hirai S. An overview of cracks and interfacial voids in membrane electrode assemblies in polymer electrolyte fuel cells

4.4.4 平均对数温差计算

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (14)$$

式中: Δt_1 为润滑油进出口温差, 15°C 。 Δt_2 为空气进出口温差, 7°C 。 计算得平均对数温差 $\Delta t_m = 10.5^\circ\text{C}$ 。

4.4.5 传热面积计算

$$F = \frac{P}{K\Delta t_m} \quad (15)$$

计算得空气侧散热面积为 312m^2 , 润滑油侧散热面积为 62.5m^2 。 后备系数约为 2。 考虑到 30% ~ 50% 的备用系数、热损、污垢阻力等影响, 采用备用系数为 2 的换热器, 是适宜的。

5 结语

本文通过对分布式调相机特殊运行环境的分析研究, 设计了适用于分布式调相机的润滑油系统, 并选取调相机极端工况的运行参数对调相机润滑油系统主要设备参数进行计算, 确保润滑油系统能够满足调相机的安全可靠运行要求。

参考文献:

- [1] 成大先. 机械设计手册[M]. 第五版. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [2] 贾小平. 300 MVar 调相机润滑油系统温度计算[J]. 东方电气评论, 2018, 32(3): 70-72
- [3] 王汉松. 板翅式换热器[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984
- [4] 上海化工设计院制氧机设计小组. 板翅式换热器的设计计算[J]. 石油化工设备简讯, 1972, (4): 27-33

[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2015, 10(1): JTST0002

- [7] Banan R, Zu J, Bazylak A. Humidity and Temperature Cycling Effects on Cracks and Delaminations in PEMFCs[J]. Fuel Cells, 2015, 15(2): 327-336

EL-CID 电磁铁心故障检测试验的应用研究

陈展 于洪斌 刘航 刘晓

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:为了检验发电机定子铁心质量,在制造过程中和安装现场,对发电机定子铁心进行试验是必不可少的。目前国内针对定子铁心更多地是采用常规试验方法,但是常规铁损试验所需的设备容量大、试验线路复杂,而且经济性较差、效率低下。而采用电磁定子铁芯故障探测仪(EL-CID)铁心试验只需提供约4%的额定磁通量,即可完成对铁心故障的诊断,其所需的励磁电源容量较小且容易配备和携带。为了更好地利用 EL-CID 检测方式进行铁心质量的判定,本文通过模拟多种故障状况下的试验,论证了 EL-CID 的使用条件和影响因素,为实际工作中 EL-CID 的应用提供更好的参考依据。

关键词:发电机定子;EL-CID;铁心;故障;异物;损伤

中图分类号:TM31

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)01-0017-05

Application Research of Electromagnetic Core Imperfection Detection Test

CHEN Zhan, YU Hongbin, LIU Hang, LIU Xiao

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

Abstract: To inspect the stator core assembly of generator, it is imperative to conduct test for core in manufacture and power plant. At present, for stator core, we preferentially adopt routine test at home, but such routine core loss test requires equipments with large capacity and complex test circuit, which is less economical and inefficient. By contrast, EL-CID core test merely applies 4% of rated flux to diagnose the tested object, what's more, it equips with the power source with comparatively smaller capacity and portable advantage. In order to efficiently use EL-CID judgment method for core quality, this paper testified its usage condition and effecting factors through tests simulating multi-kinds of fault states, so as to provide EL-CID test with more robust references.

Key words: generator stator; EL-CID; core; fault; foreign matter; damage

铁心是发电机的重要组成部分,一般都由 0.35 mm 或 0.5 mm 相互绝缘的硅钢片叠压而成。发电机运行时,定子铁心中的交变磁场在铁心中产生磁滞损耗和涡流损耗,损耗越大,发电机效率越低,同时,铁心温度越高,温度越高会加速绝缘老化,影响发电机使用寿命。之所以硅钢片的厚度比较薄,目的就是为减少涡流的流通面积,降低损耗和发热。如果发电机定子铁心硅钢片发生多片短路故障,定子磁场产生的局部涡流损耗将导致故障点过热,从而加速绝缘老化甚至烧毁铁心,最终导致发

电机定子短路。定子铁损试验是检验定子铁心装配质量的重要手段,也是检验铁心自身绝缘性能的重要工序。依据规范要求,在发电机交接试验、局部或全部更换定子绕组前后以及在发现定子铁心有损伤等缺陷时必须进行铁损试验,发现并处理铁心缺陷部位,避免故障扩大化。

1 传统试验方法

根据被试发电机定子铁心外径、内径、长度、铁心齿高等参数计算铁心有效截面积。计算试验规

收稿日期:2020-07-29

作者简介:陈展(1987-),男,2009年毕业于西华大学电气工程与自动化专业,工学学士,工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司质量检验部工作,主要从事大型汽轮发电机出厂及型式试验、转子动平衡工作。

定转子磁密(一般大型汽轮发电机为 1.4 T,水轮发电机为 1.0 T)所对应的试验电压、励磁线圈的匝数、励磁电缆所需横截面积、试验设备容量等。试验时,将定子铁心缠绕计算所得励磁线圈数,将交流电通入励磁绕组。此时,交变电流在定子铁心中产生磁场,从而产生涡流和磁滞损耗,使铁心发热,通过在规定试验时间内测量到的铁心有功损耗,计算出单位重量比损耗,同时利用红外线热成像仪拍摄定子铁心发热情况,可获得铁心温升以及局部温差等数据。由此判断铁心叠片质量优劣。

2 EL-CID 试验方法

2.1 试验原理

EL-CID 设备通过使用励磁线圈环绕铁心以产生环形磁通(图 1)。通过被试发电机基本参数,可计算出达到 4% 额定磁通的励磁电压。将 Chattock 电位计置于铁心表面,通过测量磁电位差来判断铁心是否存在故障。测量到的磁电位差包括两部分。励磁部分提供了一个在铁心表面相对恒定的磁场。同时,铁心内任何故障电流也会在铁心表面形成磁电位差。在 4% 额定磁通区域内,故障电流形成的磁电位差与励磁强度成正比。这两种讯号都会被 Chattock 检测到,其输出信号等比与它两端的磁位差。

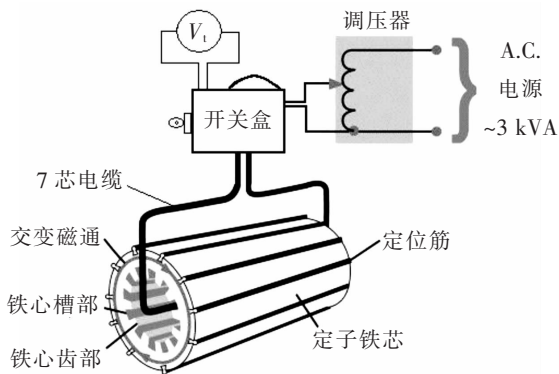


图 1 EL-CID 试验示意图

具有典型故障电流路径的铁心的横截面如图 2 所示,铁心故障点与定位筋形成故障电流的流通回路。

电磁铁心故障检测仪接收 Chattock 电位计信号,并将他与取自励磁电流的参考信号进行分析。检测信号与参考信号同相的部分主要是来自励磁

产生的磁场。该部分成分相对较大,且无论铁心有无故障存在,他都会存在铁心各部位。而因故障所引起的电流与励磁电流有 90° 相位差,这就是 QUAD 故障电流(图 3)。

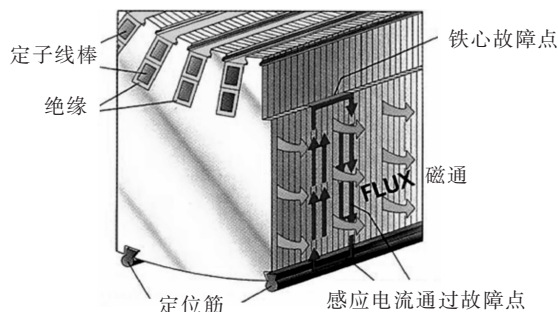


图 2 铁心截面上的故障电流

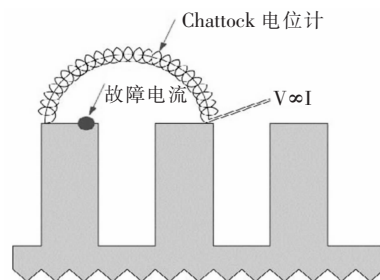


图 3 定子齿上的 Chattock 电位计位置

2.2 判断标准

根据 GB/T20835-2016《发电机定子铁心磁化试验导则》资料性附录 C 中对 EL-CID 故障电流判定的参考依据,故障电流幅值绝对值超过 100 mA,且 Phase 电流与故障电流反向时,认为铁心存在故障。4% 额定磁通时,故障电流 100 mA 等效于高磁密铁损试验铁心相同部位温差 5 K ~ 10 K。

3 应用研究

EL-CID 试验作为《GB/T20835-2016 发电机定子铁心磁化试验导则》的资料性附录推荐,在实际的应用中是否就能够完全替代传统的试验方法,从表 1 中列出的几个方面进行试验,再得出结论。

3.1 异物类试验

(1) 首先我们选取一段正常的铁心,在放置异物前先对其进行一次 EL-CID 检测,获取原始数据,方便后续与模拟各类铁心可能存在的故障情况下试验数据进行对比(图 4)。

表 1 试验类型清单

故障类型	故障程度
正常铁心	3.1.1 选取一段正常铁心进行试验作为对比组
异物类	3.1.2 硬币
	3.1.3 碳钢焊条
	3.1.4 “L”型铁丝一头插入通风槽放置在齿部表面
	3.1.5 “U”型铁心在槽底跨接一段铁心
损伤类	3.1.6 “U”型铁心在槽底跨接三段铁心
	3.2.1 槽底划伤
	3.2.2 铁心齿面损伤
外界元器件影响	3.2.3 铁心齿面损伤处短路
	3.3 测温元件对 EL-CID 试验数据的影响

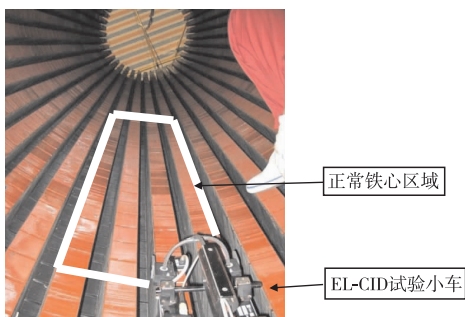


图 4 进行正常铁心区域放置异物前试验
试验数据如图 5。

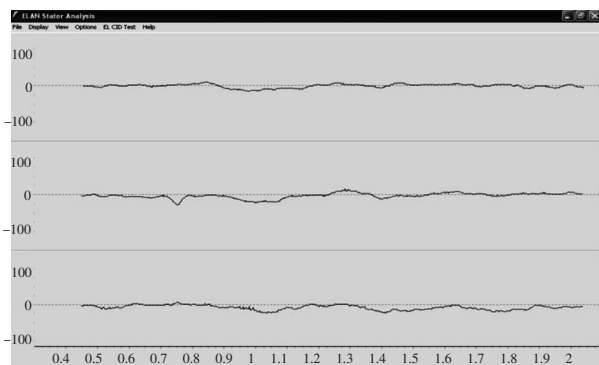


图 5 正常铁心区域放置异物前试验数据

试验数据显示故障电流均小于 100 mA, 且没有典型的故障电流曲线。此段铁心情况正常。

下面我们开始模拟铁心槽底存在异物的情况。

(2) 将硬币放置在槽底 (未造成铁心硅钢片短路)

我们将两枚硬币放在铁心槽底 (图 6), EL-CID 试验故障电流数据显示与放置硬币前没有明显区别。

我们再将硬币放置前后, 三槽的测试数据进行对比, 硬币放置前后数据没有明显变化。

硬币放置在槽底, 但并没有造成铁心硅钢片短路。EL-CID 不能检测出此类情况。但在实际运行

情况下, 由于电磁力的作用, 此类异物可能导致线棒绝缘和硅钢片绝缘被破坏, 造成发电机定子短路。

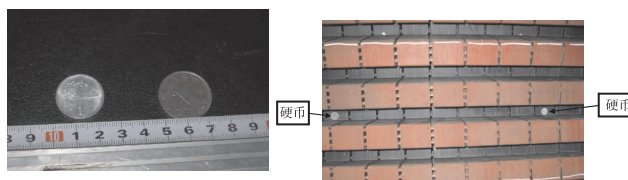


图 6 放置硬币

(3) 将碳钢焊条放置在槽底 (未造成铁心硅钢片短路)



图 7 放置碳钢焊条

将长度约 16 cm、D2 的碳钢焊条直接放置在槽底 (图 7) 进行 EL-CID 试验。从测试数据上看, 有一些微小的变化, 但未见明显故障。

(4) 将“L”型铁丝一头插入通风槽放置在齿部表面 (图 8)。

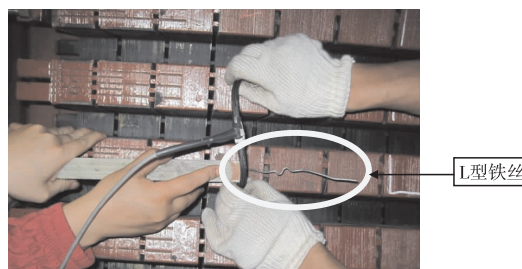


图 8 放置“L”型铁丝

故障电流在通风槽附近发生反向。故障电流达到数百毫安。通风槽内存在异物, EL-CID 能检测出明显的故障电流。

(5) 将“U”型铁心在槽底跨接一段铁心 (图 9)。

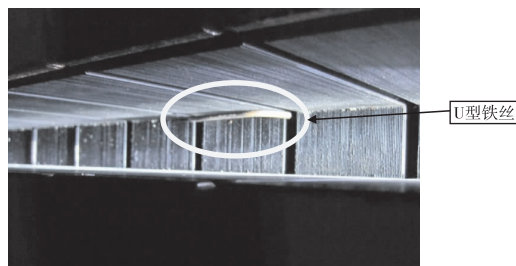


图 9 放置“U”型铁丝跨接一段铁心

EL-CID 试验数据呈现出标准的故障曲线, 最大故障电流达数千毫安。

(6)将“U”型铁心在槽底跨接三段铁心(图 10)。

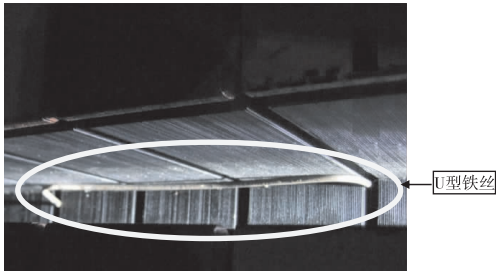


图 10 放置“U”型铁丝跨接三段铁心

EL-CID 试验数据呈现出标准的故障曲线,最大故障电流已经超出 Chattock 电位计量程范围。

综上:定子铁心内若存在异物,EL-CID 试验不能将所有情况都检查出来。异物存在的位置及状态对测试数据有很大影响。

3.2 模拟铁心存在损伤的 EL-CID 试验

(1)槽底划伤

用硬物将定子槽底划伤(图 11),EL-CID 测试数据未见异常。槽底铁心表面虽然遭到破坏,但并没有形成片间短路。

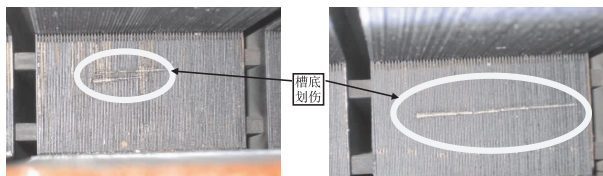


图 11 槽底划伤

(2)铁心齿面损伤

我们使用工具在铁心齿面造成了更大的破坏(图 12)。

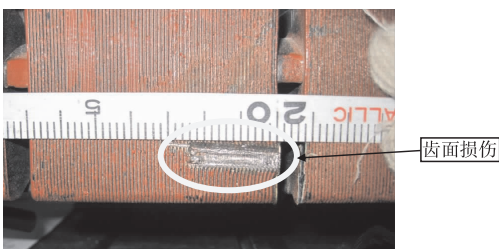


图 12 铁心齿面损伤

EL-CID 试验检测到的故障电流略微增大,但未超过故障判断推荐标准的 100 mA。

(3)在铁心齿面损伤处固定一段铁丝,造成片间短路(图 13)。

当齿面约 20 mm 长铁心完全短路时,用 EL-CID 测试检测到的故障电流约为数百毫安,故障特

征与齿面典型故障特征一致。

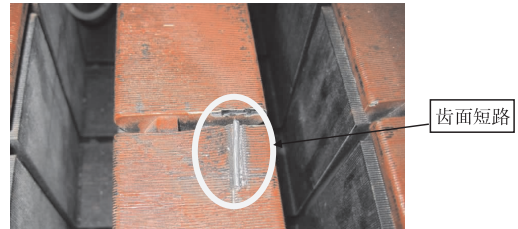


图 13 铁心齿面短路

对于大型汽轮发电机,达到 4% 额定磁通所对应的试验电压仅为几十伏这个数量级,而大型汽轮发电机定子铁心硅钢片数的数量级至少是万,分担到每片上的电压非常低,只有当一定数量的硅钢片短路后才能形成明显的故障电流,才能通过 EL-CID 试验检测出来。

3.3 测温元件对 EL-CID 试验数据的影响

在定子铁心 EL-CID 试验中,我们多次发现在定子汽励两端某些槽出现曲线“异常”,故障电流曲线在端部上翘但又不超过 100 mA。这些“异常”槽是有规律的出现的,他们在端部分三个部分,且以圆周 360 度对称。

将“异常”曲线展开分析,发现所有“异常”曲线并非定子铁心故障的典型曲线。

经查阅定子测温元件布置图,我们发现这些曲线“异常”是由于埋设的测温元件引起的,并非定子铁心本体有缺陷。

EL-CID 试验中 Chattock 电位计所感应到的故障电流为 mA 级,极易受到外部干扰。被试发电机定子除铁心以外的其他结构件(包括测温元件等)若形成回路也会对试验结果产生干扰。一定要注意此类干扰和故障电流的区别。

4 结语

通过上述试验和应用研究,可见 EL-CID 试验对于发电机定子铁心检查有很好的参考依据。

4.1 在制造厂内的定子铁心磁化试验

(1)叠片装压完成后

需通过试验对发电机定子铁心装压过程的质量进行判定。

(2)下线装配结束后

需通过试验对发电机在下线装配过程中是否

对铁心造成损伤进行判定。

在制造厂进行铁心磁化试验时,由于有相对固定的试验工位、设备和线路,采用常规高磁密铁损试验比在发电机现场便捷,一般在一小时左右可完成试验。

4.2 在电厂进行的定子铁心磁化试验

(1) 对运行多年的铁心进行判定

需通过试验判定发电机定子铁心质量是否存在故障或缺陷,为修理提供准确的数据和依据。

(2) 修理后的铁心质量判定

需通过试验判定修复后的铁心质量是否满足技术要求,为修复结果提供判据。

在电厂进行定子铁心高磁密铁损试验时,所需试验设备要根据现场情况进行而定。准备临时试验线路需要耗费大量的人力及时间,在修理过程中往往需要进行多次试验,每次试验完成后需要拆

线、下次试验又重新接线。对于损伤较为严重的定子铁心,高磁密铁损可能还会对定子铁心造成二次损伤,扩大故障范围。

而采用 EL-CID 试验会方便很多。EL-CID 施加 4% 额定磁通,试验过程中一般不会形成较大的电流烧毁铁心。试验电缆较细,准备工作完成后不必拆线,只需要将调压器电压降零,分断开关后,操作人员便可进入定子膛内进行修理。经多次修理多次试验,可对比历史数据,判定修理效果。最终故障电流达到推荐值(小于 100 mA),再进行一次高磁密铁损试验作最终判定。

参考文献:

- [1] GB/T20835 - 2016, 发电机定子铁心磁化试验导则[S]. 北京:中国标准出版社,2016

集团要闻

国内首台超超临界 660 MW 汽轮机改造成功

2021 年 2 月 5 日报道。近日,国内首台超超临界 660 MW 等级通流改造机组——景德镇 2 号汽轮机完成改造后性能考核试验,该项目采用东方电气集团东方汽轮机有限公司最新的第四代通流改造技术。

试验初步结果表明,机组改造后的缸效率、热耗率等性能指标全面优于合同要求。与改造前相比,在额定负荷、75% 负荷和 50% 负荷下,机组供电煤耗分别降低约 8.9、9.3 和 17.4 克每千瓦时,年综合节煤量约 4.02 万吨,全负荷经济性大幅提升,解决了煤电机组面临的调峰与经济性的难以平衡的痛点,经济效益与社会效益显著。

在以“安全、绿色、高效”为发展目标的各类能源不断加强互补协调背景下,火电机组一方面要坚持绿色高效发展,提高能源利用效率,另一方面要提高灵活调峰性能,促进非化石能源的开发消纳。面对电力市场发展的新形势,东方汽轮机深刻理解煤电领域新需求,在国内首台超超临界 660 MW 汽轮机改造中,充分发挥喷嘴调节方式在调峰运行中的优势,实现了全负荷高效。通过对汽轮机本体结构、通流气动、汽封形式等多方面全面升级,采用通流智能优化设计,集成高效通流智能优化平台,大幅提升机组经济性、安全性。

景德镇 2 号机组的成功改造,是继完成国内首台 1 000 MW 级机组全通流改造后,东方汽轮机在超超临界改造领域的又一重要突破,在更好平衡煤电机组调峰与经济性之间矛盾中起到引领和示范作用。

东方电气深入贯彻新发展理念,立足科技自强自立,坚持燃煤发电核心技术的自主研发,基于国内唯一的多级空气透平试验台,先后成功研发具有自主知识产权的东方第三代和第四代汽轮机技术,形成了高效通流研发体系,走出了一条“理论设计——厂内试验验证——改造机组验证——新机应用推广”的具有东方特色的科技创新之路。

现阶段我国尚有大量的引进型、煤耗高的超超临界发电机组正在服役,采用东方电气领先的改造技术后,将大幅提高机组的全负荷经济性和深度调峰能力,对促进我国能源结构转型升级、助力我国实现碳中和战略目标具有重要意义。

来源:东方电气网

东方电气重型燃气轮机发展历程与经验研究

李建华¹ 胡妮妮² 胥波¹

1. 东方电气股份有限公司, 成都 611731; 2. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文回顾了燃机产业技术引进, 国产化能力形成, 融合创新起步到最终取得成功的过程, 聚焦研究东方电气燃机产业自主创新实践和特点, 以供行业和企业创新工作参考。

关键词: 燃气轮机; 天然气发电; 技术引进; 融合创新

中图分类号: TK474.8

文献标识码: B

文章编号: 1001-9006(2021)01-0022-04

Development Course and Experience of DEC Heavy Duty Gas Turbine

LI Jianhua¹, HU Weiwei², XU Bo¹

(1. Dongfang Electric Co., Ltd., 611731, Chengdu, China; 2. Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: This paper reviews the process from the technology introduction of gas turbine industry, the formation of manufacturing localization capacity, and the integration of innovation from the beginning to the final success, focusing on the practice and features of Dongfang Electric's independent innovation, so as to provide a reference for the innovation work of the industry and enterprises.

Key words: gas turbine; natural gas power generation; technology introduction; integration and innovation

燃气轮机是高端设计、先进材料、先进制造等技术集成的重大动力装备,也是能源领域重大动力装备领域的最高端产品,在国家的能源战略、能源安全和环境保护中具有重要地位。燃机产业是增强制造业核心竞争力的国家战略性高技术产业,发展燃气轮机对我国先进制造业和先进能源技术的良性发展至关重要。长期以来仅美国通用电气(GE)、德国西门子(SIEMENS)、日本三菱重工(MHI)等公司完全掌握重型燃气轮机设计、制造、试验等尖端技术,形成了高度垄断的格局。

我国燃气轮机的设计、试验和制造工作起步较晚。在2002年以前,中国能源装备制造企业尚不具备燃气轮机的设计、制造能力,电力咨询机构和终

端用户亦缺乏天然气发电运行和设计方面的经验。无论是技术水平还是市场前景均基础薄弱,燃气轮机生态体系的建立面临诸多困难,在不借助外力的情况下短期之内难以通过自身力量克服。表1主要梳理了燃气轮机生态体系建设各环节的主要困难。

2002年以来,中国东方电气集团有限公司主动服务国家战略,通过引进世界领先的燃机制造技术,把握国际先进燃机技术发展动向,重型装备核心制造能力的不断提升,为自主技术重型燃机的制造打下坚实基础。通过自主知识产权燃机研发,形成自主设计、工艺、制造以及研发团队,形成引进机型的自主发展能力,在燃机产业化能力建设方面走

收稿日期:2020-10-12

作者简介: 李建华(1972-),男,1994年毕业于上海理工大学机械制造系机械设计专业,本科,高级经济师。现在东方电气股份有限公司燃机事业部主要从事天然气发电管理工作。

胡妮妮(1972-),女,1992年毕业于四川广播电视大学机械工程专业,专科,高级工程师。现在东方汽轮机有限公司产品研发中心主要从事燃气轮机产品设计工作。

胥波(1982-),男,2008年毕业于清华大学热能工程系动力工程及工程热物理专业,硕士,高级工程师。现在东方电气股份有限公司燃机事业部主要从事技术管理工作。

出了独具特色的融合创新之路。

当前我国已经进入燃气轮机发展的新时期,认真学习、消化吸收多年来燃气轮机行业取得的丰硕

成果,总结燃机产业发展经验,对推动自主创新、掌握核心技术、推进产业技术升级进步具有重要的参考和借鉴意义。

表1 燃气轮机生态体系主要内容及难点

项目	内容	难点
1. 设计研发	1) 压气机设计和试验研究: 试验台测量系统、控制系统、拖动系统、数据采集系统等试验设施、整体方案设计(包括气动、结构、强度、转子、测量方案的设计等) 2) 燃烧器设计和试验研究 3) 透平气动试验 4) 透平冷却试验 5) 二次空试验 6) 高温透平叶片精铸、喷涂 7) 全尺寸高温高压燃烧器试验台 8) 整机试验台	1) 燃机相关技术高度专业性、专用性和系统性,以及相关技术的高度敏感性(部分技术与国防核心技术相关)使得燃机技术高度专有 2) 设计研发技术的突破是制约中国能源装备制造企业的最大瓶颈
2. 设备制造	1) 燃机装备制造工艺及装备,包括:总装厂房、试车台位、重型加工厂房、焊接及试验设备、燃气轮机转子总装配、动平衡及转子加工(叶轮、拉杆/轴等)关键部件制造设备等 2) 辅机设备配套及供货能力,包括燃机各类配套系统,泵、阀、系统等	1) 外方仅授权冷端部件制造技术转让给合作企业,高温部件相关技术转让给外方控股合资公司 2) 制造体系的形成需要构建主机、辅机、材料等生态系统的形成
3. 高温部件及原材料	1) 透平动静叶片毛坯铸造技术: 单晶、定向结晶技术 2) 燃烧室制造毛坯及制造	1) 高温核心部件毛坯制造瓶颈,国内无毛坯制造企业或不具备合格毛坯提供能力 2) 高温材料母合金问题也无法有效解决
4. 控制系统	1) 控制系统硬件设备 2) 控制系统软件组态及调试 3) 调试技术	控制系统软硬件技术作为核心部分被外方控制
5. 运行维护	全生命期运行维护技术	燃机电厂运维是影响产业发展的瓶颈,是外方长期盈利的主要模式
6. 人员培训	设计、研发、制造、运维全序列人才队伍建设	专业人才培养是自主创新的最根本保证

1 第一阶段:技术引进与国产化制造(2002 ~ 2008)

为推进我国重型燃气轮机产业化,满足电力工业发展要求,国家发改委于2001年10月发布了《燃气轮机产业发展和技术引进工作实施意见》(计产业[2001]2194号),通过采用以“市场换技术”方式,先后组织了24个项目、共56台机组的燃机技术本地化捆绑招标工作。我国三大动力集团的东方电气集团和日本三菱重工、哈尔滨电气和美国GE、上海电气集团先后分别与德国Siemens和意大利Ansaldo合作引进生产重型燃气轮机。经过十几年的发展,燃气轮机工程应用和国产化制造已经达到了很高的水平,逐步具备了燃气轮机本地制造、工程建设和冷端部件的维护能力。

和三菱重工签订技术许可证协议以后,东方电气制定了长远的投资计划,构建了完整的燃气轮机

本地化产业格局。2000年到2008年,工厂针对燃气轮机项目,新增各类固定资产投资86000余万元,建成并安装了重型燃气轮机自主化基地建设所需厂房及设备,包括总装厂房、试车台位、重型加工厂房、焊接及试验设备、燃气轮机转子总装配、动平衡及转子加工(叶轮、拉杆/轴等)关键部件制造设备等。同时,东方和三菱完成了高温部件合资工厂的建设,形成了重型燃气轮机高温部件本地化制造和维修的能力。

东方电气技术人员通过到三菱重工接受各项相关培训,包括燃气轮机总装技术、试车技术、材料体系、部件制造技术、焊接技术、探伤技术、叶片装配技术等,累计超过4067人日、525人次,逐步培养了大约1500名燃气轮机相关专业人才。此外,三菱还根据项目需要派出了专业人员到东方汽轮机厂进行工厂培训及FAI首件检查,对东方汽轮机有限公司燃气轮机分供方体系建立以及计划监控等

各方面提供技术指导。作为东方电气的技术支持方,三菱重工成立了专门的中国工作组,解决与此相关以及项目执行中存在的问题。

2008年,东方汽轮机有限公司完成国内首根自主制造燃机核心部件——燃机转子,标志着燃气轮机技术消化和吸收第一阶段的工作基本完成。

第一阶段的发展对中国天然气产业至关重要,为自主创新提供了基础和条件:

(1)制造能力:东方电气通过设备和厂房投资、人员培训、生产制造,掌握了本体制造工艺与生产、辅助系统及设备制造与生产、配套设备设计制造与生产。

(2)原材料供应能力:形成了完善的原材料供应链和供应体系。

(3)运行和维护能力:企业端快速形成了自主调试、自主运维能力,为用户端培养了大批经验丰富的电厂运维队伍。

(4)工业体系与生态体系建立:国内各主力设计院均全面掌握燃机电厂设计技术和相关标准规范;形成了专业的电建及安装单位;用户全面了解并掌握了燃机电厂建设及运行维护要求;辅助系统及相关配套系统形成。

(5)应用市场形成:中国能源需要清洁高效天然气发电技术,自2002年技术引进后天然气发电装机容量快速增加,成为清洁能源的模范和典型。

2 第二阶段:产业升级与融合创新起步(2008~2014)

2.1 技术革新和产业升级

第一阶段以来,三菱重工燃气轮机产品技术性能指标相对落后,在国际、国内燃机市场竞争中不具优势。在2007年以前进行的四次打捆招标项目中,三菱和东方团队的市场占有率一直处于落后的局面。为了打破不利局面,三菱和东方决定进行技术革新。

据 Gas Turbine World 2005 年发布的联合循环性能数据,MHI 的 M701F4 机型领先于同等级其他品牌燃机产品。M701F4 具体数据见表 2 (ISO 工况)。

M701F4 在 2008 年成功中标华能北京热电厂二

期项目,除了燃机性能指标领先外,汽轮机带 3S 离合器的抽、凝、背灵活运行方式也属国内首创。该项目的顺利实施,将国内燃机性能提升了一代,联合循环效率一举从 57% 左右提升至 59% 以上。M701F4 燃机产品的成功推出,开启了中国燃机产业技术竞争新格局。迫于 M701F4 的竞争压力,GE、西门子也纷纷改进其产品技术性能,推出新型 F 级改进型机型,在一定还程度上促进了国内天然气发电行业的快速发展。

表 2 M701F4 燃气轮机与主要竞争机型性能指标对比

燃机厂家	燃机产品	联合循环出力 /kW	联合循环效率/%	热耗 kJ/kW·h
GE	9FA	390 800	56.7	6 350
Siemens	SGT5-4000F	407 000	57.7	6 239
MHI	M701F4	450 000	59.0	6 120

2.2 燃机技术融合创新的起步

经过十多年的发展,东方电气已构建完整的燃气轮机产业链,具备燃机、汽轮机、发电机的批量成套供货能力,掌握了重型燃机冷端部件制造技术。但燃气轮机高温部件制造及维修、控制系统等核心技术仍受制于人。在通过技术引进获得了燃机技术人才队伍,积累了大量的基础性知识和实证性经验的基础之上,东方电气在 2008 年决定开展具有完全自主知识产权的国产燃机研发工作。2009 年到 2014 年,东方电气在高温合金材料及成型、大型轴流式压缩机设计及试验、燃烧、TBC 涂层等关键技术均取得一定进展。

3 第三阶段:国际合作与融合创新的成功

3.1 重型燃机技术引进促进国际合作,三菱战胜 GE 成为世界第一

2014 年开始,燃机产业发展进入第三阶段。东方电气在重型燃机技术和产品上与三菱重工合作不断深入,合作序列覆盖了三菱所有最新研发产品,包括 F 型、J 型等最先进产品,合作范围突破了国内市场,积极应对了国际能源市场低迷的冲击,东方燃机累计获得了中国 40% 的市场订单,成为中国气电产业第一。东方电气与三菱重工组建的合资公司也持续盈利,不仅服务于国内市场,也覆盖了三菱海外服务市场。借助在中国市场的合作业

绩,三菱重工在 2018 年战胜 GE 公司,夺取了当年 100 MW 等级以上燃机市场占有率世界第一的宝座(图 1)。

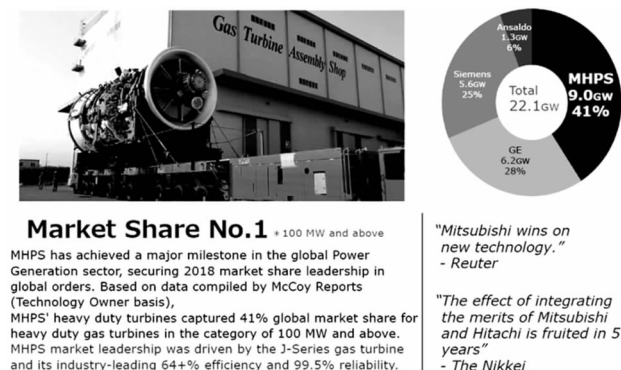


图 1 2018 年 MHPS 获得 100 MW 等级以上燃气轮机市场占有率第一

3.2 小型燃机自主融合创新带动产业升级,东方电气 F 级 50 MW 燃机取得重大突破

东方电气通过技术转让与合作,形成燃机制造能力,初步建立国内燃机配套体系,培养了自己的燃机专业团队,形成了专业知识和经验的积累,解决了市场和应用问题,在技术层面解决了制造能力问题、产业生态建立问题、原材料供应等问题。并在此基础上,建立了核心技术所需要的试验研发平台,走出了独具特色的融合创新之路。

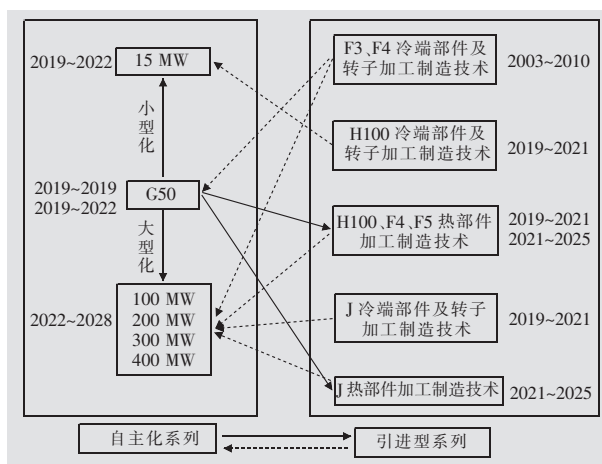


图 2 东方电气燃气轮机融合创新图

如图 2 所示,东方电气 50 MW F 级自主燃机项目立项实施以来,东方电气建设了国内领先的压气机试验台、全尺寸高温高压燃烧器试验台、全尺寸透平挂片试验台、叶栅气动性能试验台、二次

空气系统旋转试验台、高温冷却试验台、透平级试验台、冷却流量测试试验台以及燃机原型机整机试验台。50 MW 主机(压气机、燃烧器和透平)的设计和试验已取得了里程碑式收获,通过各项试验验证设计的原理和关键设计技术方法;建立了主机的工程设计体系、设计规范、标准和可供参考的文献材料;建立了 F 级重型燃机部件研发试验平台并形成了规范试验系统;更重要的是培养了一批优秀的燃机研发人才。燃气轮机研发体系中最核心、最关键的研发设计环节在东方电气的努力下得到了突破。

4 结语

东方电气在国家政策引导下,通过与三菱重工的制造技术引进合作,从专业人才培养、燃机生态体系建立,到自主建立设计研发体系和试验验证体系,进而完成核心技术突破,东方电气的融合创新具有独特的行业特色和企业特色。

(1) 融合创新离不开技术引进

燃气轮机技术高度复杂,技术引进培养的人才队伍和生态体系难能可贵,融合创新必须以此为基础,搭建创新所必需的试验验证平台和设计研发体系、规范、标准。

(2) 技术引进不能解决自主研发根本问题

因为国外燃机巨头对于燃机核心技术坚持不转让、不合作的态度,燃机设计研发平台和试验验证体系的建立,必须独立自主。

(3) 融合创新必须选择正确的技术路径

东方电气燃机产品的自主创新,其技术性能定位于 F 级水平,这与引进的技术相当。但出力等级确定为 50 MW,和引进技术产品不存在冲突。技术路线不同,不存在知识产权纠纷,与引进技术不形成竞争关系。

(4) 融合创新需要政府与市场支持

融合创新需要持续深化并巩固对外合作,离不开中国能源大市场对外方的吸引,也离不开国内市场对融合创新技术应用的支持和市场培育。中国燃气轮机产业的融合创新发展之路依然任重道远。

换热管管束固有频率试验与分析计算对比研究

王博¹ 莫堃² 刘标² 王立闻² 曹雪幡¹ 冯玲²

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

摘要: 振动分析对于换热器的安全评估至关重要, 振动分析中的关键问题为系统模态特性的获取。为有效评估换热器的安全可靠, 本文选取特征单元进行一系列换热管模态测试试验, 获得换热管在空气和水环境中水平和垂直两个方向上的固有频率、阻尼比和振型等数据。在此基础上, 进行换热管模态仿真和理论计算, 分析表明3种方式得到的固有频率结果具有良好的 consistency, 固有频率试验结果与仿真计算结果(前2阶)相对误差在2%以内, 验证了各自分析结果的有效性。本文得到的实验数据可为换热管模态计算方法提供验证数据, 并为微动磨损分析提供关键参考数据。

关键词: 直流式换热器; 模态试验; 固有频率; 仿真

中图分类号: TK172

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)01-0026-04

The Comparative Study of Natural Frequency Experiment and Calculation Analysis for Tube Bundle of Heat Exchanger

WANG Bo¹, MO Kun², LIU Biao², WANG Liwen², CAO Xuefan¹, FENG Lin²

(1. Dongfang Electric Co., Ltd., 611731, Chengdu, China; 2. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: The vibration analysis is very important for the safety evaluation of heat exchanger. The key in vibration analysis is the acquisition of system modal characteristics. In order to effectively evaluate the safety and reliability of the once-through heat exchanger, a series of modal tests of heat exchange tubes are carried out on feature unit. On this basis, the modal simulation and theoretical calculation of heat exchange tube are carried out. The analysis show that the natural frequency results obtained by the three methods are in good agreement with each other, and the relative error of the natural frequency between experimental results and the simulation results (the first 2 orders) is within 2%. The validity of the analysis results are verified. The experimental data obtained in this paper provides verification data for the modal calculation method of heat exchange tube and important reference data for fretting wear analysis.

Key words: steam generator; modal test; natural frequency; simulation

流致振动是换热管损伤发生的主要外因, 进行样机流致振动风险评价的第一步即为换热管固有频率的确定。不少学者针对换热管模态开展了一系列深入研究^[1-2], 李昭针对换热管支撑失效存在的不等频率管束问题研究了不同位置和数量支撑失效对换热管固有频率和振型的影响^[3]; Xuan H 进行换热管模态仿真分析, 然后比较了仿真结果与两相流试验中测得的传热管固有频率结果, 并在试验结果的基础上修改了流致振动分析程序^[4]; 苏文献

等通过仿真得到换热管的固有频率, 其得到的结果与相关标准和经验公式计算结果保持一致, 验证了有限元分析换热管固有频率的可靠性^[5]; Goyder 指出流弹不稳定性评估方法的核心是对换热管进行模态分析^[6]; 邵海磊通过数值模拟得到了传热管前6阶固有频率和振型, 并进行了内部加水和不加水两种工况下的传热管固有频率试验研究, 得到了U型传热管固有频率与固定位置、数量和约束程度的关系^[7]。为有效解决换热管损伤问题, 有必要开展

收稿日期: 2020-07-19

作者简介: 王博(1986-), 男, 2013年毕业于西安交通大学能源与动力工程学院动力工程及工程热物理专业, 硕士, 工程师。现在东方电气股份有限公司核设备设计所主要从事核设备热工水力方面的研发工作。

换热管固有频率研究工作,为之后流致振动和微动磨损分析提供重要参考数据。

1 试验方法

1.1 样机

本实验基于直流式换热器产品原型,选取具有代表意义的十一管样机单元进行模态试验,十一管样机模型如图1所示。十一管试验样机由11根换热管、支撑板、管板、定距管、隔板垫板和水槽组成。换热管、支撑板结构及支撑板间距均保持与原型一致,以最大限度的还原换热管的实际支撑和约束状态。试验样机共计21跨,换热管分为3层布置,第一个支撑隔板支撑只约束下层4根换热管,其余换热管保持悬空,第二个支撑隔板支撑只约束上层4根换热管,第三个支撑隔板支撑只约束中层换热管,剩余支撑隔板均按前三个支撑隔板方式依次布置,由此形成21跨模态试验样机。

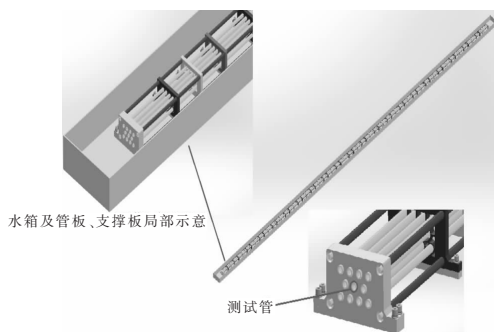


图1 十一管模态试验样机结构三维示意图

1.2 测点布置

对于两端固定约束的换热管,换热管支撑位置振幅微小,跨中位置振幅响应最大。为有效获得换热管模态特性,确定跨中位置为加速度测点,总计21个测点,具体布置方式如图2所示。每个测点布置两个加速度传感器,分别测量水平和垂直两个方向的加速度响应。

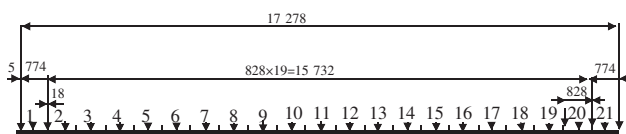


图2 加速度测点布置图

1.3 试验方法

本实验采用敲击激振法进行空气和水环境中的模态试验,通过专有模态识别方法得到换热管的

振动特性(固有频率、振型、阻尼比等),试验总体技术路线如图3所示。

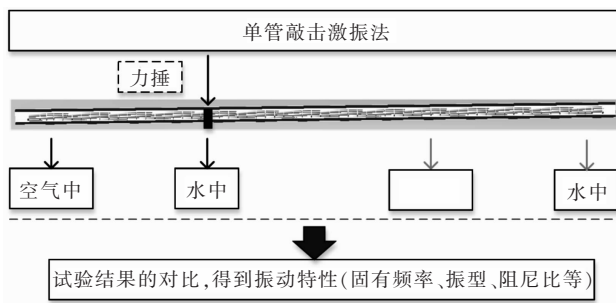


图3 总体技术路线

由于测试的换热管支撑跨数多,单次敲击时距离敲击点较远位置的测点响应偏小,无法准确获取测试管模态数据,因此模态试验采用多点激振、多点拾振的测试方法,即单次模态试验分别敲击换热管7个不同位置点,每次敲击时加速度传感器多点拾振,由此获得频响函数。为保证测试数据的可靠性,换热管模态试验至少重复5次。

2 试验

通过以上所述的试验方法分别进行空气和水环境中的模态试验,获得换热管的固有频率、阻尼比和振型数据如下。

2.1 空气中试验

表1为空气环境中换热管水平和垂直方向的固有频率和阻尼比数据。采用5组模态试验数据进行数据处理,5组固有频率数据标准差在0.2以内,模态试验数据重复性良好,说明模态试验方法合理,测试结果可靠性高。

表1 十一管样机空气环境中水平和垂直方向换热管的固有频率和阻尼比列表

阶数	水平方向		垂直方向	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1	54.317	1.196	55.687	3.999
2	55.111	2.697	56.673	4.490
3	57.815	1.847	59.190	4.454
4	60.136	2.297	61.724	4.649
5	62.603	1.452	64.485	4.143
6	66.858	1.956	71.583	6.261
7	70.447	2.625	73.763	6.510
8	75.838	2.001	79.545	5.430
9	80.454	1.611	82.693	4.775
10	84.816	2.270	87.373	3.416

其中十一管空气环境中换热管水平方向第1阶固有频率为54.317 Hz;垂直方向第1阶固有频率为55.687 Hz。换热管水平和垂直两个方向的固有频率相差不大,水平方向换热管固有频率略低于垂直方向。这是由于水平方向换热管与垂直方向换热管在支撑条件上略有差异,垂直方向由于换热管自身重力的影响,其支撑约束边界要略强于水平方向支撑。

2.2 水环境中试验

表2为水环境中换热管水平和垂直两个方向的固有频率和阻尼比数据,其中十一管水环境中换热管水平方向第1阶固有频率为47.227 Hz;垂直方向第1阶固有频率为48.013 Hz。表中数据显示水平方向换热管固有频率同样略低于垂直方向,这与空气中的模态试验结果一致。

表2 十一管样机水环境中垂直方向换热管固有频率和阻尼比列表

阶数	水平方向		垂直方向	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1	47.227	1.802	48.013	5.459
2	48.706	3.597	49.027	6.138
3	49.844	2.453	50.695	5.670
4	52.492	2.489	53.754	7.008
5	54.072	2.197	54.665	5.518
6	57.947	2.917	60.028	6.698
7	61.397	3.751	62.149	5.172
8	65.492	3.492	68.214	6.952
9	69.278	3.019	71.980	6.217
10	74.319	2.886	74.788	6.453

3 仿真、理论计算及结果分析

为了进一步验证模态试验结果的可靠性,本文分别采用仿真与理论计算的方式对十一管样机的固有频率进行分析计算。

3.1 仿真分析

模型简化:将换热管两端简化模拟为固定支撑,支撑板处简化模拟为简支支撑。建立十一管样机(与实际直流式换热器支撑板组数量一致)的有限元模型进行仿真对比分析,如图4所示。

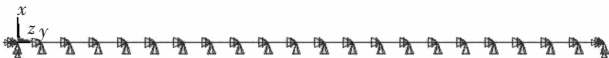


图4 十一管样机模态分析有限元模型

结合仿真与试验的模态分析结果,得到图5所

示空气、水环境中的前十阶固有频率对比图,图中E,S分别表示试验和仿真结果。总体上仿真与试验结果趋势相近,各阶频率相差不大。

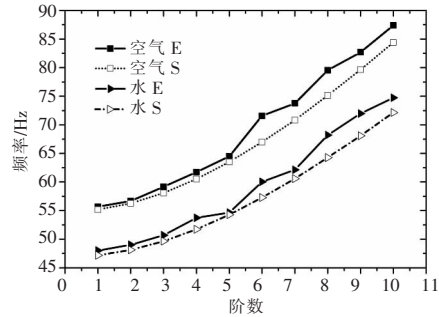
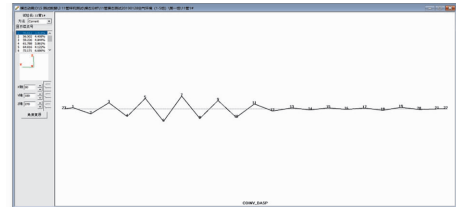
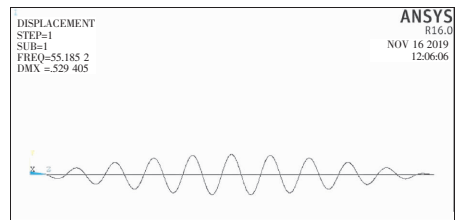


图5 空气、水环境固有频率试验与仿真结果对比

图6、图7为十一管样机试验与仿真换热管前二阶振型对比图。图中不难发现试验和仿真振型

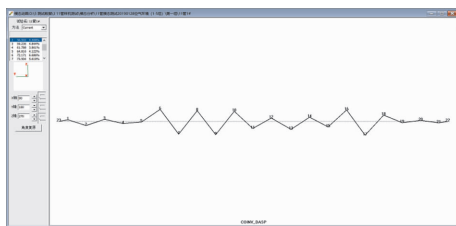


(a) 实验结果

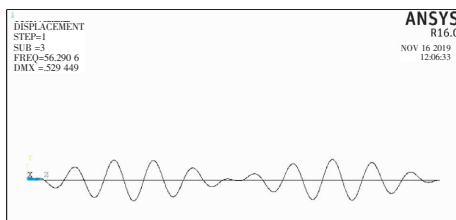


(b) 仿真分析

图6 十一管样机换热管振型对比图(第一阶振型)



(a) 实验结果



(b) 仿真分析

图7 十一管样机换热管振型对比图(第二阶振型)

结果基本吻合,也进一步验证了各自分析结果的可靠性。一阶振型中换热管振动方向趋势保持一致,只是管振幅大小出现差异,可能与模态试验中各敲击位置和敲击力大小有关,仿真结果表明一阶振型主要表现为中间跨度较高的摆动幅度,然后振幅逐渐由中间向两固定端降低,换热管振型呈对称分布;其它阶振型中试验结果也与仿真结果趋势保持一致。

3.2 理论计算

根据国家标准《GB/T151 热交换器》2014 版中附录 C《流体诱发振动》推荐应用的计算方法进行固有频率计算,如式(1)所示。

$$f_n = 35.3 \lambda_n \sqrt{\frac{E(d_0^4 - d_i^4)}{ml^4}} \quad (1)$$

式中: f_n 为换热管的固有频率,Hz; λ_n 为频率常数,rad; E 为材料的弹性模量,MPa; d_0 为换热管外径,m; d_i 为换热管内径,m; m 为换热管单位长度质量,kg/m; l 为跨距,m。

为更直接了解各种模态分析方法数据的偏差程度,对试验、仿真、理论 3 种方式获得的模态结果进行误差分析,具体数据见表 3。

表 3 十一管样机理论计算结果及相对误差

阶数	空气环境			水环境		
	理论 Hz	误差 1 %	误差 2 %	理论 Hz	误差 1 %	误差 2 %
1	55.122	0.91	0.11	47.400	1.77%	-0.47
2	56.236	0.70	0.08	48.357	1.88	-0.48

注:误差 1 表示试验与仿真的相对误差;2 表示仿真与理论的相对误差。

由表 3 所列固有频率对比结果可以发现固有频率仿真与理论计算结果(前 2 阶)相对误差较小,均不超过 1%,说明仿真结果与理论结果非常接近;模态试验结果与仿真计算结果(前 2 阶)相对误差最大不超过 2%,满足工程设计精度要求,说明仿真结果具有较高准确性,本次分析中将换热管支撑板处约束简化为简支是合理的,仿真分析结果可作为直流式换热器前端设计与结构优化的参考依据;3 种方式得到的固有频率结果一致性良好,验证了试验结果的有效性。

4 结语

本文研究通过换热管固有振动特性试验、理论和仿真结果进行相互验证工作,得出以下主要结论:

(1)通过试验成功获得空气环境和水环境中十一管样机换热管的固有振动特性(固有频率、振型和阻尼比);空气环境中换热管基频为:54.317 Hz,水环境中换热管的基频为:47.227 Hz;总体上十一管样机换热管水平方向固有频率略低于垂直方向的固有频率。

(2)通过试验、理论和仿真 3 种方法进行交叉对比验证,既确保了本次模态试验结果的有效性,又验证了有限元模态分析方法的可靠性。固有频率试验结果与仿真计算结果(前 2 阶)相对误差最大不超过 2%,满足工程设计精度要求;同时试验与仿真获得的振型方向趋势保持一致,进一步说明仿真结果合理可靠,仿真数据可作为前期样机设计与优化的参考。

(3)本试验得到的固有频率数据可用于修正与验证换热管模态计算方法;同时得到的固有频率和阻尼比数据还可作为换热管微动磨损计算的输入数据。

参考文献:

- [1] 许范广. 基于 ANSYS 的换热器管束振动模态分析[J]. 广州化工, 2010, 38(8): 245 - 246
- [2] Park S H, Noh J P, Huh S C, et al. Vibration Signal Analysis by Defect Type of Heat Exchanger [J]. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2016
- [3] 李昭. 不等频率管阵流体弹性不稳定性研究[D]. 天津大学, 2018
- [4] Xuan H, Huan-huan Q, Feng-chun C, et al. Study on Flow Induced Vibration Analysis and Evaluation for Heat Transfer Tube of Steam Generator in Two Phase Flow [C]//2018 26th International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2018
- [5] 苏文献, 陈功. 换热管固有频率计算方法[J]. 上海理工大学学报, 2015, 37(6): 535 - 539
- [6] Goyder H G D. An assessment method for unstable vibration in multispan tube bundles[J]. Journal of fluids and structures, 2003, 18(5): 555 - 572
- [7] 邵海磊. 换热器传热管流致振动碰磨分析与试验研究[D]. 郑州大学, 2016

燃气轮机空气温度测量值的精度分析与改进

吴志方

东方电气自动控制工程有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:燃气轮机的功率与空气温度有很大的关系,对于控制系统在控制燃气轮机功率时,输入的空气温度信号的测量精度必须足够精准,才能实现燃气轮机功率的精准控制。本文结合某控制系统实例对空气温度信号测量回路的精度进行了分析,给出了提高测量精度的改进方法。通过提高空气温度信号的测量精度,实现对燃气轮机功率精准控制,提高燃气轮机效率,为燃气轮机电厂带来更高的经济效益。

关键词:空气温度;测量精度;改进

中图分类号:TK477

文献标识码:B

文章编号:1001-9006(2021)01-0030-04

Accuracy Analysis and Improvement Measures of Gas Turbine Air Temperature Measurement

WU Zhifang

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

Abstract: The power of gas turbine has a great relationship with air temperature. When the control system controls the power of gas turbine, the measurement accuracy of input air temperature signal must be accurate enough to realize the accurate control of gas turbine power. In this paper, combined with a control system example, the accuracy of air temperature signal measurement loop is analyzed, and the improvement method to improve the measurement accuracy is given. By improving the measurement accuracy of the air temperature signal, the power of the gas turbine can be accurately controlled, and the efficiency of the gas turbine can be improved, which will bring higher economic benefits to the gas turbine power plant.

Key words: air temperature; measurement accuracy; improvement

燃气轮机的工作过程是,压气机连续地从大气中吸入空气并将其压缩;压缩后的空气进入燃烧室,与喷入的燃料混合后燃烧,成为高温燃气,随即流入燃气涡轮中膨胀做功;燃气轮机是对大气环境十分敏感的动力装置,空气环境的变化可以对燃气轮机的性能产生非常大的影响。

1 空气温度变化对燃气轮机功率的影响

1.1 实际空气温度的变化对燃气轮机功率的影响

由燃气轮机原理可知,大气温度 T 增加时,燃

气轮机的功率 P 和效率 η 均下降, T 降低时, P 和 η 均提高。主要有以下 3 个方面的原因:①大气温度升高时,即使机组的转速和透平前的燃气初温保持恒定,压气机的压缩比也有所下降,这将导致透平做功减少;②大气温度升高,虽然压气机的压比降低,但压气机的耗功却增高。即大气温度升高时,燃气轮机的净出力减小;③大气温度升高,空气的比容增加,导致压气机吸入空气流量减少,空气流量的减少导致燃气轮机出力减少。某型号燃气轮机大气温度与功率的关系如图 1 所示。

收稿日期:2020-08-31

作者简介:吴志方(1982-),男,2004年毕业于江苏大学自动化专业,工学学士,高级工程师。现在东方电气自动控制工程有限公司热动工程部主要从事燃机热控方面的工作。

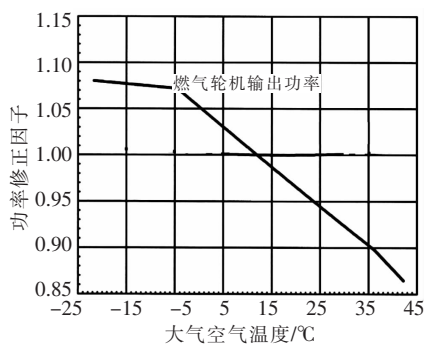


图1 空气温度与燃气轮机输出功率关系

2.2 控制系统中空气温度测量信号的变化对燃气轮机功率的影响

燃气轮机控制系统是燃气发电厂的神经系统,用以保证机组的安全和可靠运行,是机组设备的重要组成部分。燃气轮机控制的基本思路是:控制进入燃气轮机的燃料量和空气量,以实现燃气轮机转速和输出功率的控制,使燃气轮机处于理想的运行姿态。在控制系统中,燃气轮机燃料量的控制与空气量的控制都会引入空气温度参数,燃料量的控制简图如图2所示,燃气轮机燃料量的控制由燃机实际负荷、环境空气温度以及空气流量控制阀开度信号组成,大气压力用作压力的补偿。

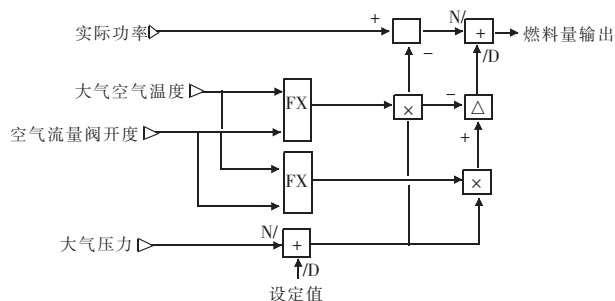


图2 空气温度与燃气轮机燃料量控制的关系

空气量的控制如图3所示,空气流量控制阀控制信号是燃机负荷和压气机进口空气温度信号的函数,随着燃气轮机负荷的增加逐渐开大,这将会在锅炉启动期间获得较高的排气温度,使余热锅炉产生较大的蒸汽流量。这种直接控制的方法在燃机升负荷和降负荷时具有响应快的优点,空气流量的控制可以使燃气轮机处于部分负荷运行时获得较高的联合循环效率。另外通过调节进入燃烧室的空气流量,控制燃气轮机控制燃料/空气比,可以保持火焰稳定燃烧。

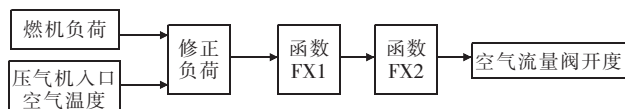


图3 空气温度与空气流量控制的关系

2 控制系统中空气温度测量信号精度分析

在控制系统中,控制系统对控制信号的处理占据着十分重要的地位,直接关系到控制系统的控制水平,涉及机组安全运行。在实际控制系统设计中,测量精度的处理需要控制系统设计人员根据运行工艺,控制系统硬件参数,仪表传感器参数等认真分析,研究,提高控制系统的控制精度,以实现燃气轮机的运行姿态的精准控制。空气温度与燃气轮机的燃料量控制和空气量控制有着密切关系,空气信号处理的精度关系到燃气轮机的整体性能,某控制系统对空气温度信号处理的简图如图4所示。

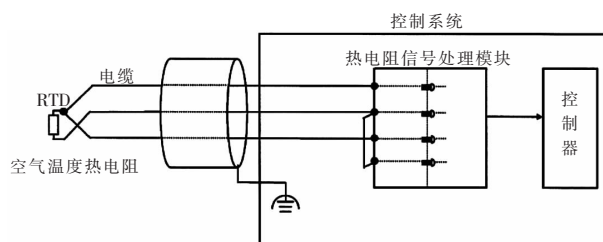


图4 控制系统对热电阻信号的处理

某控制系统热电阻 RTD 信号处理模块参数如表1所示。

表1 控制系统热电阻模块硬件参数

序号	热电阻 RTD 信号处理模块	
	项目	参数
1	输入范围	(-40) ~ 60 deg C
2	相对精度	± 0.1% FSD
3	温度漂移	小于 ± 400 ppm/deg C

控制系统的测量精度根据上述参数,计算如下:总精度(%) = 相对精度 + 温度漂移 × 典型温度特性(15 deg C);总精度(deg C) = 输入范围 × 总精度(%);总精度(%) = 0.1% + 0.04% × 15 deg C = 0.7%;总精度(deg C) = (60 + 40) × 0.7% = 0.7 deg C;经过上述计算,控制系统对于热电阻输入信号的总精度为0.7deg C。根据燃气轮机的控制要求,0.7 deg C的测量误差将会影响燃气轮机的控制,影响燃气轮机的功率输出。根据燃气轮机运行

工艺要求,控制系统对该空气温度的信号精度应控制在0.4以内。控制系统空气信号精度超出要求的根本原因是热电阻信号处理模块温度漂移为400 ppm/deg C。

3 控制系统中空气温度测量信号精度改进

控制系统常用的信号处理模块有6种,分别是AI(模拟量4~20 mA输入),AO(模拟量4~20 mA输出),DI(数字量输入),DO(数字量输出),RTD

(热电阻输入),TC(热电偶输入)。不同类别的模块应用于不同场合,不同模块的温漂,相对精度等参数不完全相同。同一类别的模块一旦设计生产,受A/D芯片,分辨率,线性误差,转换时间等因素影响,降低温度漂移等参数将变得非常困难。上述空气温度热电阻信号处理模块为RTD模块,要想降低该模块的温度漂移参数,技术上难以实现。研究发现,AI(4~20 mA输入)模块的温度漂移参数明显优于热电阻RTD模块,参数对比如表2所示。

表2 控制系统 AI 模块硬件参数

序号	项目	热电阻 RTD 信号处理模块	AI(4~20 mA 输入)模块
		参数	参数
1	输入范围	(-40)~60 deg C	4~20 mA
2	绝对精度	±0.1% FSD	±0.1% FSD
3	温度漂移	小于±400 ppm/deg C	小于±100 ppm/deg C

通过在回路中增加信号转换器,如图5所示。将RTD热电阻信号转换为4~20 mA信号,使热电阻信号回路上使用温漂系数更低的AI(4~20 mA输入)模块,以提高控制系统对空气温度信号测量的精度。

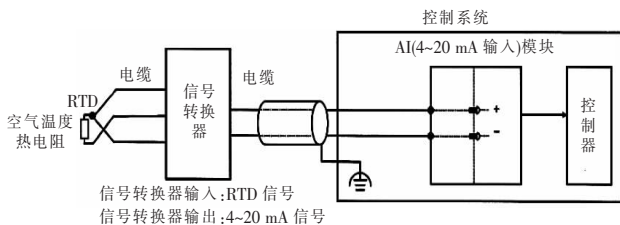


图5 RTD回路使用4~20 mA模块方案

信号转换器的作用是向3线制热电阻传感器提供恒流源,对所获得的直流信号进行放大,线性补偿,并将其转换成隔离的直流4~20 mA信号,信号转换器的原理如图6所示。

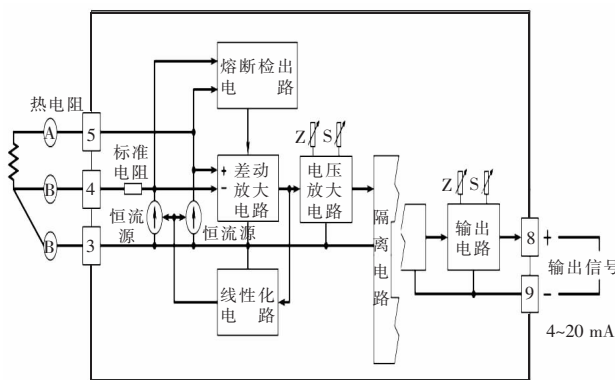


图6 信号转换器原理

由于增加了信号转换器设备,信号转换器本身也存在精度,温漂等问题,对于控制回路的精度影响将不再是单独的AI(4~20mA输入)模块,需要将信号转换器与输入模块两个设备合并计算精度。不同厂家的信号转换器在精度,温漂等硬件参数都不相同,代表型信号转换器参数如表3所示。

表3 信号转换器参数

序号	项目	普通型信号转换器	高精度型信号转换器
		参数	参数
1	输入范围	(-200)~660 deg C	(-200)~660 deg C
2	输入精度	±0.2%	±0.01%
3	输出精度	±0.2%	±0.04%
4	温度漂移	低于±150 ppm/deg C	小于±100 ppm/deg C

信号转换器的精度计算方法为:信号转换器精度精度(%)=(输入精度×(860度/100度)+输出精度)+温度特性×温度漂移(15 deg C);普通信号

转换器总精度(%)=0.2%×(860/100)+0.2%+0.015%×15 deg=2.145%;高精度信号转换器总精度(%)=0.01%×(860/100)+0.04%+

$0.01\% \times 15 \text{ deg} = 0.276\%$; 通过上述数据对比, 普通型信号转换器精度已经超出要求, 只能选择高精度信号转换器 + AI(4 ~ 20 mA 输入) 模块的方案实现精度的提高。

通过图 6, AI(4 ~ 20 mA 输入) 模块的参数, 得出 AI 模块的总精度为:

$$\text{AI 模块总精度}(\%) = 0.1\% + 0.01\% \times 15 \text{ deg} = 0.25\%;$$

$$\text{两个设备总精度}(\%) =$$

$$\sqrt{(\text{AI 模块的总精度})^2 + (\text{信号转换器总精度})^2};$$

采用高精度信号转换器 + AI(4 ~ 20 mA 输入) 模块最终的精度为:

$$\text{总精度}(\%) =$$

$$\sqrt{0.25 \times 0.25 + 0.276 \times 0.276} \% = 0.372\%;$$

总精度(deg C) = $(60 + 40) \times 0.372\% = 0.372 \text{ deg C}$; 0.372 满足控制系统对该空气温度的信号精

度应控制在 0.4 以内的要求。

5 结语

对于燃气轮机控制系统在控制燃气轮机功率时, 输入的空气温度信号的测量精度必须足够精准, 才能实现燃气轮机功率的精准控制。控制系统采用常规 RTD(热电阻输入) 模块处理空气温度信号时, 测量精度不能满足要求控制系统。通过改进测量回路, 采用高精度信号转换器 + AI(4 ~ 20 mA 输入) 模块的方案, 能有效提高回路测量精度, 实现对燃气轮机功率精准控制, 提高燃气轮机效率, 为燃气轮机电厂带来更高的经济效益。

参考文献:

- [1] 杨顺虎. 燃气-蒸汽联合循环发电设备及运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 310-312

集团要闻

东方电气助力华龙一号全球首堆成功商运

2021 年 1 月 30 日, 华龙一号全球首堆福清核电 5 号机组投入商业运行, 汽轮发电机组出力优于合同保证值, 各项技术指标均符合设计要求, 运行状态良好。

这标志着东方电气具有完全自主知识产权、性能世界一流的百万千瓦等级核电汽轮发电机组自主研发工作取得圆满成功。也标志着我国在三代核电技术领域跻身世界前列, 成为继美国、法国、俄罗斯等国家之后真正掌握自主三代核电技术的国家, 我国核电技术水平和综合实力已跻身世界第一方阵, 建设核工业强国迈出了坚实一步。

为服务国家战略, 积极践行央企使命和担当, 东方电气 10 多年前即启动了核电汽轮发电机组的自主研发设计工作, 先后完成了汽轮机焊接转子、世界最长的 1 828 mm 汽轮机末级动叶片、发电机、汽水分离装置等研发, 具备了核电汽轮发电机组成套自主研发设计能力。同时, 东方电气积极开展了蒸汽发生器、稳压器等设备关键焊接技术、部件制造和检测技术等新工艺技术研发, 完善了核岛主设备自主制造能力。

为全力做好福清 5 号机组核蒸汽冲转、并网及 168 小时试运行等重大工程节点的保驾护航工作, 东方电气组建了华龙一号示范工程首堆-福清核电 5 号机组核冲转、并网发电保驾护航服务领导小组与技术支持团队, 集团公司领导多次带队到福清现场指导工作, 服务团队成员发扬东方电气“24 小时服务精神”, 成立了“华龙一号保驾护航党员先锋队”, 克服疫情影响, 坚守岗位, 与福清业主、工程公司及安装单位密切配合, 保证现场重大节点得以顺利实现, 服务工作受到了用户的高度评价。

凭借优秀的技术方案和供货业绩, 东方电气为华龙一号全球首堆-福清核电 5 号机组提供了常规岛汽轮机、发电机、汽水分离再热器、凝汽器, 核岛蒸汽发生器、稳压器、PRS 换热器、安注箱和硼注箱等关键设备, 成功助力华龙一号全球首堆投入商业运行。

来源: 东方电气网

先进高效超超临界煤粉锅炉技术创新发展

刘宇钢^{1,2,3} 刘银河¹ 莫春鸿^{2,3} 冉燊铭^{2,3} 潘绍成^{2,3} 王婷^{2,3}

1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049; 2. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 成都 611731;

3. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

摘要: 中国为提高燃煤发电机组效率, 进行了 20 年的超超临界锅炉技术研究。以 600 °C 超超临界锅炉的国产化为契机, 进行了 620 °C 高效一次再热和二次再热锅炉的研制和批量应用, 并成功攻克了壁温偏差精细化控制和二次再热汽温调节技术, 为发展更高蒸汽参数超超临界锅炉奠定了基础, 正在进行的更高参数 630 °C 锅炉示范工程应用, 有助于提高中国超超临界锅炉制造技术水平。

关键词: 超超临界锅炉; 壁温偏差; 蒸汽参数

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)01-0034-06

Innovation and Development of Technologies for Advanced and High-efficient Ultra-supercritical Coal-fired Boiler in China

LIU Yugang^{1,2,3}, LIU Yinhe¹, MO Chunhong^{2,3}, RAN Shenming^{2,3}, Pan Shaocheng^{2,3}, WANG Ting^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an, China;

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

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

Abstract: China developed the ultra-supercritical boiler technology to improve the efficiency of coal-fired power plant units in 20 years. As the developing of localization of 600 °C ultra-supercritical boiler, the development and batch application of 620 °C high efficiency once-reheat and double-reheat boilers are carried out in China, and the technologies of wall temperature deviation fine control and double-reheat steam temperature regulation are successfully conquered, which creates foundation for the development of ultra-supercritical boiler with higher steam parameters, and helps to improve the technical level of ultra-supercritical boiler manufacturing in China.

Key words: ultra-supercritical boiler; wall temperature deviation; steam parameters

世界首台超超临界发电机组于二十世纪五十年代在美国诞生, 装机容量 125 MW, 蒸汽参数 31 MPa/621 °C/566 °C/538 °C^[1-2]。此后十年间欧洲、俄罗斯与日本也相继有超临界机组投运。然而由于初期机组容量和蒸汽参数增长超出了金属材料的技术限值, 导致机组事故率普遍较高, 超临界发电技术于七八十年代几乎处于停滞状态。而后随着金属材料水平的提高, 超临界发电技术又有

了长足发展, 日本和欧洲新建的机组容量 500 ~ 1 000 MW, 主、再热蒸汽温度也普遍达到 600 °C 等级^[3]。当前美国、日本和欧洲均在开展 700 °C 超超临界发电技术研究, 虽然出于材料技术水平未完全过关和成本极其昂贵的限制, 进度不理想, 但从未放弃^[4-6]。

中国于 1992 年在华能石洞口二厂引进了国内首台超临界机组, 装机容量 600 MW, 蒸汽参数 24. 2

收稿日期: 2020-10-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0604403)。

作者简介: 刘宇钢(1983-), 男, 2010年毕业于西安交通大学热能工程系动力工程及工程热物理专业, 硕士, 西安交通大学在读博士, 高级工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司技术中心主要从事电站锅炉设计及超净排放方面的研究工作。

MPa/538 °C/566 °C,开始了超临界发电技术的应用与研究^[2]。锅炉作为发电机组三大主设备之一,其技术创新始终是先进高效煤电机组技术发展的关键部分。

中国(超)超临界锅炉技术的发展是一个引进、消化、吸收、再创新的过程。国内东锅、哈锅与上锅等三大锅炉厂于2000年左右陆续开展了煤电超临界锅炉技术的引进工作。2004年由东锅供货的国内首台国产化超临界锅炉在沁北电厂投运,装机容量600 MW,蒸汽参数24.2 MPa/538 °C/566 °C^[7];2006年由哈锅供货的国内国产化首台超超临界锅炉在玉环电厂投运,装机容量1 000 MW,蒸汽参数26.25 MPa/600 °C/600 °C^[8]。此后的10年间,中国新建了一批大容量、高参数煤电超(超)临界机组。

锅炉总体布置是其它一切技术措施的承载,主要有Π型和塔式两种。早期Π型布置已被普遍采用,国际上主要老牌锅炉厂都是此布置方式,包括英国Babcock、美国CE、日本BHK与三菱等。塔式炉主要为燃用高水分褐煤发展起来的,是针对解决风扇磨煤机抽高温炉烟的问题而产生的炉型,早期主要由法国Alstom、德国Babcock、丹麦FLSmidth/BWE等制造^[8-9]。这两种炉型在中国均被成功应用,其中Π型布置占绝大多数。

水动力安全直接影响锅炉安全稳定运行。(超)超临界直流锅炉水冷壁需适应变压运行,总体分为启动初期循环运行、中低负荷亚临界直流运行和高负荷超临界直流运行等3个阶段,面临多种复杂工况的安全考验。水冷壁的布置形式有螺旋管圈和垂直管屏,具体管子结构有光管和内螺纹管两种^[10-11]。内螺纹管螺旋管圈水冷壁以其设计灵活性和运行高安全性被普遍应用^[12-13]。

燃烧技术是高效燃烧和低污染物排放的决定性因素。在大型煤粉锅炉中,对冲燃烧和切圆燃烧是两种应用最为广泛的燃烧方式。国际切圆燃烧主要以Alstom、三菱为代表;对冲燃烧主要以美国Babcock、日立BHK、IHI等为代表^[14-20]。两大技术流派基本上平分秋色,在工程应用中也各有特点。

蒸汽参数达标直接关乎机组效率,是影响发电能耗的关键因素。过热汽温主要通过煤水比来进行调节,再热蒸汽温度调节主要有尾部烟气挡板调

节和燃烧器摆动调两种方式^[21-22]。尾部烟气挡板调温能够确保50%~100% BMCR 负荷再热汽温达到额定值。由于燃烧器的摆动幅度有限以及与受热面的匹配设计要求高,往往采用此调温方式的塔式锅炉在80% BMCR 负荷以下再热汽温就达不到设计值。

中国通过超(超)临界锅炉的研制和批量化应用,完全掌握了设计、制造、安装、调试及运行的成体系的完整技术,于此同时着手开展620 °C、二次再热及更高参数先进高效超超临界锅炉技术创新和应用研究,成绩斐然。

1 620 °C 高效超超临界锅炉技术

为进一步提升煤电机组效率,在600 °C超超临界锅炉成功国产化及大批量投运的基础上,进行了620 °C 高效超超临界锅炉自主研制。

世界首台万州1#机组1 000 MW 620 °C 锅炉于2015年投入商业运行,其主蒸汽压力及再热蒸汽参数较600 °C 锅炉有一定幅度提高,对比如表1所示。

表1 620 °C 与 600 °C 锅炉主要设计参数对比

项目/单位	参数	
	620 °C	600 °C
主蒸汽压力/MPa	29.4	26.25
主蒸汽温度/°C	605	605
再热汽出口温度/°C	623	603
给水温度/°C	300~315	~300

620 °C 与 600 °C 锅炉总体布置及技术特点基本相同,以万州1#机组锅炉为例说明,如图1及表2所示。

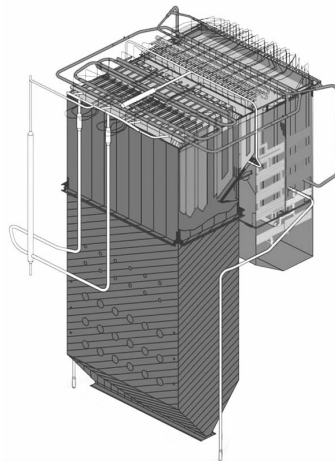


图1 620 °C 锅炉总体布置

表2 620℃锅炉技术特点

项目	技术特点
炉型	II型单炉膛
燃烧方式	对冲燃烧
调温方式	尾部双烟道挡板调温
水冷壁形式	下部内螺旋管螺旋管圈+上部垂直
启动系统	带启动循环泵

620℃在继承600℃锅炉总体优势技术的基础上,重点技术攻关主要包括3方面:燃烧技术升级至第三代OPCC燃烧技术,实现了锅炉高效、低污染物排放运行;蒸汽参数提升导致马氏体管材P92集箱壁厚达150mm,经过制造工艺研究,确保超厚管道的焊接质量及可靠运行;最为关键的是精准的壁温偏差控制技术。620℃与600℃锅炉相比并没有增加新的材料种类,要求锅炉高温级受热面壁温偏差控制更为严格,从烟侧和工质侧两方面采取以下措施:

(1)采用II型总体布置与对冲火焰燃烧匹配设计,最大限度平衡炉膛内烟气左右侧热力偏差。耦合使用新一代OPCC燃烧技术,采用了能够水平摆动的上层燃尽风,均衡燃尽区域氧量分配促使煤粉充分燃尽,确保炉膛出口高温级受热面处于均匀烟气速度场和温度场,炉膛出口左右两侧烟温可控制在30℃~50℃^[7]。

(2)优化受热面布置级数、次序及面积设计,尤其应控制高温级受热面的焓增及温升,消减管间基础汽温偏差。

(3)精确匹配集箱连接形式和内径、精准开设节流孔,匹配管间流量、热负荷、结构的偏差因素,熨平管间汽温与壁温偏差^[23]。

尤其是对于高温再热器出口管集箱管的小管接头T92,工质出口温度623℃距其允许运行最高温度649℃仅有26℃的裕度。于是高温再热蒸汽出口汽温偏差控制尤为关键。通过采取以上措施,万州1#机组锅炉高再出口汽温偏差得到精准控制,同屏管间最大偏差10℃,不同屏管间最大偏差15℃,距报警温度有合理的裕度。

通过以上措施的采取,万州1#机组锅炉壁温偏差控制良好,全工况范围内长期维持再热蒸汽623℃运行。其余关键性能指标优良,锅炉实测效率94.64%、NO_x为170mg/Nm³。

此后中国实现了620℃高效超超临界锅炉的批量化应用,截止2019年底660MW投运约40台、在建约120台,1000MW投运约20台、在建约70台。

2 二次再热锅炉技术

在620℃锅炉技术成功研制和批量应用验证的基础上,对于二次再热锅炉来说,其攻关重点为两级再热蒸汽温度的调节。针对二次再热锅炉两级再热汽温的调节,国际上主要有3种方式:①尾部三烟道烟气挡板调节;②切圆燃烧上下摆动燃烧器调节;③再循环烟气调节。

尾部三烟道烟气挡板调温方式相较切圆燃烧上下摆动燃烧器调节的优点是:无燃烧器摆动幅度的限制因素,调节灵活性高,可确保50~100%BMCRL两级再热汽温达设计值,宽负荷范围内机组经济性更有保障。相较再循环烟气调节,亦有突出优势:①无额外的易磨损、耗能的再循环风机设备,减少初投资和维护成本,故障率低,减少非停;②厂用电少,经济性更高,最大限度利用采用二次再热所提升的效益^[23-24]。

尾部三烟道挡板调节通过分设在尾部三个分烟道上的挡板开度大小来调节再热汽温,布置示意图如图4所示。尾部三个烟道内分别布置一次低再、二次低再、低过,各低再或低过后布置省煤器。受热面布置的位置和数量根据吸热比例来确定,根据各级受热面的吸热量并与各级受热面布置相匹配,一次低再布置在前烟道内,二次低再布置在中烟道内,低过布置在后烟道内。在每个烟道出口分别布置烟气调节挡板,共3组挡板。

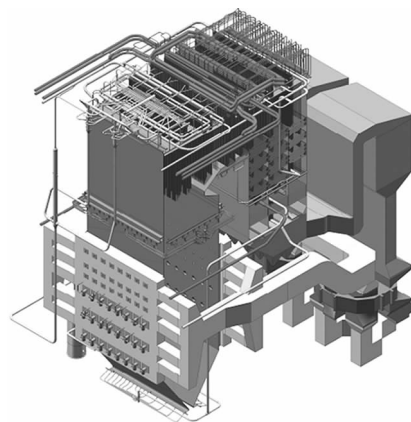


图2 三烟道挡板锅炉总体结构

在二次再热机组再热器调温控制中,相对固定二次低再侧的挡板开度,只调节低过侧的挡板和一次再热的挡板,维持二再烟气挡板开度基本不变,用低过侧烟气挡板调节过热器侧与再热器侧吸热量,用一次低再的烟气挡板调节一再和二再的吸热量。即用低过侧烟气挡板调节一次再热汽温与二次再热汽温的平均值,用一次低再的烟气挡板调节一再汽温与二再汽温的偏差为零。在这种方案下,一再烟气挡板和低过烟气挡板可以始终保持在调节性能较好的开度范围内。该调节方式与万州 1# 机组 620 °C 双烟道基本相同,使得二次再热锅炉调温与一次再热锅炉调温控制一样简便。使再热蒸汽温度调节高效可靠,响应速度快。

世界首台 660 MW 蚌埠 3# 机组尾部三烟道挡板调温二次再热汽温锅炉于 2018 年投入商业运行,实

现了两级再热汽温全负荷工况高效、高灵敏、高精度的维持额定蒸汽参数的调节。

表 3 二次再热与 620 °C 锅炉主要设计参数对比

项目/单位	参数	
	二次再热	620 °C
主蒸汽压力/MPa	32.5	29.4
主蒸汽温度/°C	605	605
一次再热蒸汽出口温度/°C	623	623
二次再热蒸汽出口气温/°C	623	/
给水温度/°C	~330	300~315

二次再热与 620 °C 高效一次再热锅炉蒸汽参数对比如表 3 所示,主蒸汽压力有一定幅度提升,主、再热蒸汽温度均保持一致。故而仅通过成熟管材规格改变即可适应。目前中国二次再热锅炉已经基本上实现了批量应用,技术日趋成熟,主要情况汇总如表 4 所示。

表 4 中国二次再热锅炉情况汇总

项目	容量	蒸汽参数	项目状态	炉型及调温方式
华能安源	2 × 660 MW	32.45 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	已投运	Π 型,烟气再循环 + 挡板
国电蚌埠	2 × 660 MW	32.45 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	已投运	Π 型,三烟道烟气挡板
国电宿迁	2 × 660 MW	34.65 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	已投运	塔式,燃烧器摆动 + 挡板
华润阜阳	2 × 660 MW	32.68 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	在建	塔式,燃烧器摆动 + 挡板
粤电惠来电厂	2 × 1 000 MW	33.3 MPa/605 °C/613 °C/613 °C	在建	Π 型,烟气再循环 + 挡板
广东河源电厂	2 × 1 000 MW	33.2 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	在建	Π 型,烟气再循环 + 挡板
中兴电力蓬莱	2 × 1 000 MW	33.5 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	在建	Π 型,三烟道烟气挡板
大唐鄂城	2 × 1 000 MW	36.75 MPa/620 °C/633 °C/633 °C	在建	Π 型,三烟道烟气挡板
华能莱芜	2 × 1 000 MW	32.45 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	已投运	塔式,烟气再循环 + 挡板
大唐国际雷州	2 × 1 000 MW	33.2 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	在建	Π 型,烟气再循环 + 挡板
神国华清远	2 × 1 000 MW	33.5 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	在建	Π 型,烟气再循环 + 挡板
华电句容	2 × 1 000 MW	33.5 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	已投运	塔式,烟气再循环 + 挡板
江西丰城电厂	2 × 1 000 MW	33.3 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	在建	塔式,烟气再循环 + 挡板
国电博兴	2 × 1 000 MW	32.45 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	在建	Π 型,烟气再循环 + 挡板
国电泰州	2 × 1 000 MW	34.21 MPa/605 °C/613 °C/613 °C	已投运	塔式,燃烧器摆动 + 挡板
北海电厂	2 × 1 000 MW	33.1 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	在建	塔式,燃烧器摆动 + 挡板
华电莱州	2 × 1 000 MW	33.6 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	已投运	塔式,燃烧器摆动 + 挡板
大唐东营	2 × 1 000 MW	32.45 MPa/605 °C/623 °C/623 °C	在建	塔式,燃烧器摆动 + 挡板
申能平山	1 × 1 350 MW	32.58 MPa/612 °C/631 °C/625 °C	在建	塔式,燃烧器摆动 + 挡板

3 更高蒸汽参数锅炉研制展望

高温级受热面用奥氏体材料 SA-213S30432 与 SA-213TP310HCbN 和高温大管道用铁素体材料 SA-335P92,是超超临界锅炉的关键用材且其国产化材料已被批量应用,支撑了 600 °C ~ 620 °C 蒸汽锅炉发展。然而 620 °C 锅炉已经将其用到了极

致。综合考虑许用应力、抗蒸汽氧化性能以及制造工艺可实现等方面的因素,更高蒸汽参数锅炉高温区域用材料很有必要引入新材料。

700 °C 锅炉研制不仅因高温区域受压件需要较大范围的使用价格昂贵的镍基合金,而且国际钢厂针对这些材料大管道的生产能力也不能完全匹配大容量锅炉设计要求^[25-26]。在中国电力行业提出

了分步骤实施的计划,先开展中间参数大型燃煤发电机组的研究与集成工作,以进一步提高发电效率,并为700℃机组研发积累设计、制造、安装等方面的经验。

目前正在开展更高参数630℃国家电力示范项目锅炉的工程应用研制^[23,27]和科技部国家重点研发计划700℃锅炉的预研工作。630℃、700℃与620℃锅炉主要设计参数对比如表5所示,呈现主蒸汽压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度等“3个更高”。其在提升发电机组效率的同时,对锅炉研制提出更高要求。

经过前期620℃高效及二次再热锅炉的成功研制和工程应用验证,对锅炉总体布置、壁温偏差精细化控制及两级再热蒸汽温度调节关键技术已成功攻克。对于更高参数锅炉来说,其研究重点在于新材料的研选和应用制造工艺研究。

表5 更高参数与二次再热锅炉主要设计参数对比

项目/单位	参数		
	700℃	630℃	620℃
	二次再热	二次再热	二次再热
主蒸汽压力/MPa	36.75	36.75	32.5
主蒸汽温度/℃	705	620	605
一次再热蒸汽出口温度/℃	723	633	623
二次再热蒸汽出口气温/℃	723	633	623
给水温度/℃	~330	~330	~330

3.1 630℃锅炉研制

针对630℃锅炉来说,高温级受热面引入新材料S31035,高温大管道引入中国自主化新材料G115,即可满足630℃参数锅炉选材需求^[23,27]。虽其部分应用新材料,但大、小管依旧属于马氏体和奥氏体材料范围,成本可控。在材料应用研究方面,东锅已完成高温级受热面新材料S31035与集箱大管道G115的应用试验研究,包括理化试验、金相、时效、疲劳等,掌握了全面的新材料应用数据,为工程应用提供准确基础性支撑。尤为重要的是锅炉制造厂深度参与G115的试制工作,掌握了全面的材料特性数据,形成了完整的确保材料使用、验收合格的采购技术规范及验收规范。在制造工艺研究方面,东方锅炉已完成S31035高温受热面、T91水冷壁、G115管道集箱的等关键工艺研究,并完成了相关部件的工程应用试制,特别是锅炉制造

厂深度参与开发了G115匹配的焊材,掌握了G115管道集箱焊接的细节处理,完全满足工程化应用、批量化生产的要求。

3.2 700℃锅炉研制

针对700℃锅炉来说,高温级受热面及大管道需较大范围的使用铁-镍基或镍基管材目前主要的候选新材料有Alloy617B、IN740H、Haynes282、GH984G^[28-37]等。其中GH984G是中国自主研发的,由中国科学院金属研究所对前期已应用的GH2984,结合700℃锅炉要求^[37],进行改良而开发的铁-镍基时效强化高温合金^[37]。对于此类新材料特别是厚壁大管道,焊接及热处理工艺重点攻关内容。美国SMC公司曾在东锅举行了IN740H焊接专题会,通过技术人员现场焊接,攻克了IN740H焊接难点,高温镍基合金的焊接工艺取得重要进展。东锅还负责实施了700℃高温材料验证试验平台的现场焊接工作,积累了700℃高温材料的现场安装经验。

为了减少贵金属材料的用量,特别是针对锅炉与汽机间的连接管道用量大,西门子公司提出锅炉卧室布置型式^[38],华能清能院提出锅炉M型布置^[39],东锅提出了倒U型的布置方式^[40]等系列探索。

4 结语

东方锅炉通过600℃超超临界锅炉成功国产化及大批量投运,完成了620℃高效超超临界锅炉自主研发和批量化应用,完全掌握了锅炉总体设计技术,攻克了精细化壁温偏差控制技术,实现了高效超超临界锅炉技术达到国际先进水平。

通过两级再热汽温调节技术突破,实现了二次再热锅炉成功投运,总体技术水平达到国际先进水平,特别是尾部三烟道挡板调温技术已处于国际领先水平。

630℃超超临界燃煤发电机组示范研究及建设稳步推进,更高参数超超临界火力发电机组研制已取得阶段性成果,并向700℃目标迈进,将巩固中国先进超超临界锅炉技术的领先地位。

参考文献:

[1]蒋敏华,黄斌.燃煤发电技术发展展望[J].中国机电工程学报,

- 2013,32(29):1-8
- [2] 陈辉,王文祥,严毅. 当前 1 000 MW 超超临界锅炉的主要技术特点[J]. 锅炉制造,2009,(1):10-14
- [3] 朱宝田,赵毅. 我国超超临界燃煤发电技术的发展[J]. 华电技术,2008,30(2):1-4
- [4] 徐炯,周一工. 700 ℃ 高效超超临界技术的发展[J]. 中外能源,2012,17(6):13-17
- [5] 毛健雄. 700 ℃ 超超临界机组高温材料研究的最新进展[J]. 电力建设,2013,34(8):69-75
- [6] Siefert J A, Tanzosh J M, Ramirez J E. Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants [C]//Proceedings from the 6th International Conference 2010. Ohio: ASM International,2011:1045
- [7] 黎懋亮,易广宙. 东方 1 000 MW 高效超超临界锅炉设计方案[J]. 东方电气评论,2015,29(4):26-30
- [8] 张殿军. 哈锅超超临界锅炉技术的发展及展望[J]. 电站系统工程,2011,27(1):1-5
- [9] 徐通模,袁益超,陈干锦. 超大容量超超临界锅炉的发展趋势[J]. 动力工程,2003,23(3):2363-2369
- [10] 田子平. 日本的大容量超临界压力电站锅炉[J]. 锅炉技术,2000,31(1):2-11
- [11] 王为术,赵鹏飞,陈刚等. 超超临界锅炉垂直水冷壁水动力特性[J]. 化工学报,2013,64(9):3213-3219
- [12] 俞谷颖,张富祥,陈端雨等. 超临界直流锅炉炉膛水冷壁布置方式的比较[J]. 动力工程,2008,28(3):334-338
- [13] 超超临界燃煤发电技术研究课题编写组. 超超临界燃煤发电技术的研究[R]. 北京:国家电力公司、中国华能集团公司,2005
- [14] 超超临界燃煤发电技术研究课题编写组. 我国发展超超临界发电机组的技术选型研究[R]. 北京:国家电力公司、中国华能集团公司,2003
- [15] 火电结构优化和技术升级研究课题编写组. 火电结构优化和技术升级研究[R]. 北京:中国电力工程顾问(集团)有限公司,2002
- [16] 徐敏杰,胡兆光,谭显东等. 中国中长期能源和电力需求及碳排放情景分析[J]. 中国电力,2012,45(4):101-107
- [17] 冯伟忠. 我国超超临界机组的发展[J]. 上海电力学院学报,2011,27(5):417-422
- [18] 章明川,牛天况,范卫东等. II 型布置切圆燃烧锅炉超大型化发展的一些动向及分析展望[J]. 锅炉技术,2001,32(2):1-6
- [19] 刘宝珠,吕洪泉,吴履琛. 高效超超临界锅炉技术综述[J]. 锅炉技术,2002,(2):10-13
- [20] Robert Swanekamp. Return of the Supercritical Boiler[J]. Power, 2002,146(4):32-40
- [21] 林宗虎,陈立勋. 锅内过程[M]. 西安:西安交通大学出版社,1989
- [22] 樊泉桂. 超超临界及亚临界参数锅炉[M]. 北京:中国电力出版社,2007
- [23] 莫春鸿,刘宇钢,王冬平等. 更高参数二次再热超超临界锅炉关键技术探讨[J]. 中国电力,2018,51(9):73-77
- [24] 王月明,牟春华,姚明宇等. 二次再热技术发展及应用现状[J]. 热力发电,2017,46(8):1-15
- [25] 林富生,谢锡善,赵双群等. 我国 700 ℃ 超超临界锅炉过热器管用高温合金选材探讨[J]. 动力工程学报,2011,31(12):960-968
- [26] 郭岩,王博涵,侯淑芳等. 700 ℃ 超超临界机组用 Alloy 617 时效析出相[J]. 中国电机工程学报,2014,34(14):2314-2318
- [27] 电力规划设计总院. 650 ℃ 超超临界燃煤机组发电技术可行性研讨会会议纪要[Z]. 2016-5-24
- [28] Baker B A, Gollihue R D, Sanders J M, et al. Coal: World Energy Security; 34th International Technical Conference on Clean Coal and Fuel Systems 2009 [C]. New York: Curran Associates, Inc, 2010:399
- [29] Tung D C, Lippold J C. Superalloys 2012 [C]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2012:563
- [30] Viswanathan R, Coleman K, Raou. Materials for ultra - supercritical coal-fired power plant boilers[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2006,83(18):778-783
- [31] Natesan K, Park J H. Fireside and steam side corrosion of alloys for USC plants[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007,32(16):3689-3697
- [32] Bugge J, Kjær S, Blum R. High-efficiency coal-fired power plants development and perspectives [J]. Energy, 2006, 31(5):1437-1442
- [33] Abe F. Research and development of heat-resistant materials for advanced USC power plants with steam temperatures of 700 ℃ and above[J]. Engineering,2015,22(2):150-156
- [34] Klöwer J, Husemann R U, Bader M. Development of nickel alloys based on alloy 617 for components in 700 ℃ power plants [J]. Procedia Eng. ,2013,55(3):226-231
- [35] Zhao S Q, Xie X S, Smith G D, et al. Research and improvement on structure stability and corrosion resistance of nickel-base super alloy INCONEL alloy 740[J]. Mater. Des. ,2006,27(6):1120-1128
- [36] Liu Z D, Chong Y, Bao H S, et al. Boiler tube for 700 ℃ steam parameter thermal power generating unit and preparation method thereof [P]. Chin Pat,103276251,2013
- [37] 王常帅,郭莉莉,唐丽英等. GH984G 合金在 700 ℃ 水蒸汽中的氧化行为[J]. 金属学报,2019,55(7):893-901
- [38] 熊杨恒. 新型超超临界机组卧式锅炉技术特点分析[J]. 热力发电,2016,35(4):1-3
- [39] 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司. 适用于超高汽温蒸汽参数的倒置煤粉锅炉布置结构:中国,CN201110090155.5 [P]. 2011-08-10
- [40] 东方电气集团东方锅炉股份有限公司. 一种用于火力发电站的锅炉:中国,CN201120273092.2 [P]. 2011-07-29

超临界再热型双抽背压式汽轮机运行策略

罗方¹ 宋风强² 侯明军¹ 胡益章³ 王勇³ 宫传瑶¹

1. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 东方电气股份有限公司, 成都 611731;

3. 华电国际电力股份有限公司天津开发区分公司, 天津 300270

摘要:持续推广背压式汽轮机供热技术,是推进节能减排工作的重要方向之一,将大型火电汽轮机中增加再热、回热系统优化、分级调节供热等提高效率的措施应用到背压式汽轮机上,可进一步提高能效水平。与此同时,上述节能措施增加了系统的复杂程度,也给机组运行增加了难度。本文以某工程配套的超临界再热型双抽背压式汽轮机为例,对其运行策略进行分析,以供同类机组参考。

关键词:背压式汽轮机;运行;启动

中图分类号:TM621

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)01-0040-05

The Operation Strategy of Supercritical Reheating Double Extracting Back-pressure Turbine

LUO Fang¹, SONG Fengqiang², HOU Mingjun¹, HU Yizhang³, WANG Yong³, GONG Chuanyao¹

(1. Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China; 2. Dongfang Electric Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

3. Huadian International Power Co., Ltd., Tianjin Development Branch, 300270, Tianjin, China)

Abstract: It is one of the important directions to promote energy saving and emission reduction promoting the heating technology of back-pressure turbine continuously. Transferring the measures increasing efficiency, such as reheating, heat regenerative system optimization, graded regulation of heating, from large thermal turbine to back-pressure turbine can improve the energy efficiency furtherly. Furthermore, the energy saving measures above-mentioned increase the complexity of the system, but also increase the difficulty of unit operation. This paper takes the supercritical reheating double extracting back-pressure steam turbine for some project as an example to analyze its operation strategy for reference of similar units.

Key words: back pressure turbine; operation; startup

目前已投运的背压式汽轮机,进口蒸汽参数普遍在高温、超高压及以下,通常不带再热,热力系统较为简单,有较大的提效空间。国内某石化园区在执行项目,采用了超临界参数、一次再热、两级可调整抽汽等提效措施的全新背压机方案,整体循环效率提升显著。单台该型号的超临界再热型背压式汽轮机,与一台 350 MW 级超临界 CFB 锅炉及一台发电机组成一个单元,每单元配置 2 × 50% BMCR 容量的汽动给水泵和 1 台 50% BMCR 容量的启动

(备用)电动给水泵。每台机组设置 1 个蒸汽回收器,主要接收给水泵汽轮机的排汽、低压旁路排汽、背压式汽轮机启动及变工况的溢流排汽;系统补水和疏水也进入该回收器。

本期工程新建 3 台该类型机组,为园区石化企业及海水资源开发公司提供 4.5 MPa 及 1.4 MPa 两档可调整工业抽汽。全厂最大设计热负荷为:第一级 4.5 MPa (汽机出口 5.0 MPa) 工业蒸汽 1 400 t/h,第二级 1.4 MPa (汽机出口 1.8 MPa) 工业蒸汽

收稿日期:2020-06-15

基金项目:中国华电集团有限公司重大科技项目计划(CHDKJ19-01-88)。

作者简介:罗方(1982-),男,2003年毕业于西安交通大学能源与动力工程学院热能及动力工程专业,本科,高级工程师。现在东方汽轮机有限公司产品研发中心从事汽轮机及新能源装备研发工作。

600 t/h;最小热负荷:第一级 4.5 MPa 工业蒸汽 980 t/h,第二级 1.4 MPa 工业蒸汽 420 t/h。单台背压式汽轮机额定进汽量下最大热负荷为:4.5 MPa 工业蒸汽 484.4 t/h,1.4 MPa 工业蒸汽 209 t/h。此外,该工程还配套 3 台燃气锅炉,可共同对外供蒸汽 390 t/h,其压力为 4.5 MPa,亦可减温减压供 1.4 MPa 工业蒸汽。全厂具备两台背压式汽轮机搭配锅炉对外供热,另一台机组停机检修的能力。每台机组配有两级旁路,高压旁路为 87% BMCR 容量,低压旁路为 96% BMCR 容量;高压旁路具备停机不停炉后向供热管网提供额定供热量的能力,大大提高了全厂供热的可靠性。

下文将基于上述工程条件,着重对该超临界再热型双抽背压机的运行控制策略进行分析探讨,为后期机组调试及同类型机组的设计提供参考。

1 超临界再热型双抽背压机方案简介

1.1 背压机技术方案及热力系统简介

该超临界再热型双抽背压式汽轮机,由一个高压模块和一个中压模块组成,高压含调节级及 13 个压力级,中压 13 个压力级;以抽汽点为界,各段通流容量梯级递减,形成供热压力的自然调节。即额定工况下,各抽汽点的压力接近所需工业抽汽压力,以减少各阀门及旋转隔板的调节量,使得机组供热可靠性、经济性得以保证。

表 1 主要技术参数

项目	参数
机组型号	CCB157-24.2/5.0/1.8/0.15/566/453
额定功率	157 MW
机组参数	24.2 MPa/566 °C/453 °C
VWO 流量	1 172 t/h
抽汽压力	一级 5.0 MPa,二级 1.8 MPa
额定供热量	一级 467 t/h,二级 200 t/h
排汽压力	0.15 MPa

回热系统由 3 个高压加热器,1 个高压除氧器,1 级低压加热器及排汽末端连接的 1 个大气式除氧器组成。排汽端回热管路上设置了通往蒸汽回收器的溢流阀,如图 1 所示。由于热力系统配置有高、低压两级除氧器;背压机停机过程中,只要保证高、低压除氧器及给水泵汽轮机汽源正常,即可满足锅炉对回水温度及含氧量的要求,从而满足停机不停

炉的供热要求。

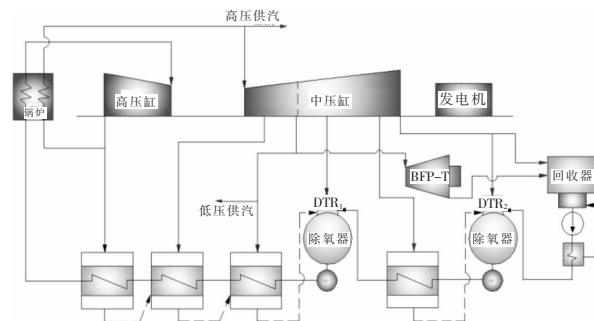


图 1 超临界再热型双抽背压机热力系统图

机组配有两个高压主汽阀和四个主汽调节阀;中压主汽阀与调节阀采用分体结构,各自的阀壳组焊成一体,左右侧各布置一组,中压第 6 级采用旋转隔板,参与调节 1.8 MPa 工业抽汽流量及压力,总体布置如图 2 所示。

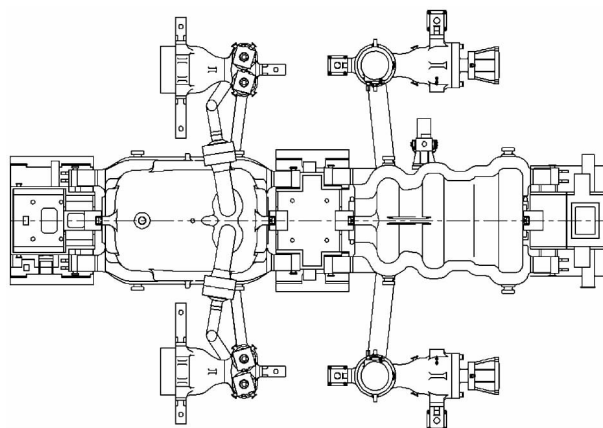


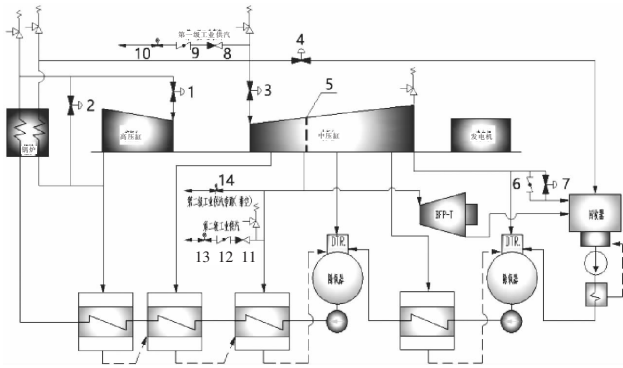
图 2 超临界再热型双抽背压机外形图

不同于现役背压机,通常以排汽端作为末级供热抽汽口。由于工业抽汽背压机通常有大量的补水,若以较高压力的排汽加热补水,存在较大的换热温差,该部分蒸汽的有效能利用不充分,带入系统的不可逆损失增加。该机型在中压第 6 级(旋转隔板)后,还设有 7 个压力级作为低压回热段,蒸汽在该段通流级中继续做功,并向高压加热器、一级低压加热器和大气式除氧器提供回热蒸汽;该方案使得换热温差减小、蒸汽做功能力得以回收,系统效率得以提升。末级采用大气式除氧器,与表面式加热器相比,换热更为迅速,变工况运行时有利于排汽端压力的控制。当排汽压力超过 0.15 MPa 时,回热管路上的溢流阀打开,多余蒸汽进入回收器,正常运行状态不允许出现溢流。低压回热级段的设计虽有利于经济性的提升,但增加了背压机运行

控制的难度。

1.2 背压机设计特点及系统配置

由于背压机进汽量约等于供热抽汽总量、给水泵汽轮机用量及回热系统用汽量之和,故高压缸通流容量基本同超临界 350 MW 等级机组。由于第一级工业供热从再热热段抽出,故中压进汽量等于第二级工业供热量、给水泵汽轮机用量及两级高加、一级低加、两级除氧器用汽量之和。各段通流容量按蒸汽量递减,逐段缩小来设计;通过通流面积的变化自然形成压差,使得额定供热工况下各抽汽点处的压力基本接近所需供汽压力(图3)。



注:主汽调节阀1、高压旁路调节阀2、中压调节阀3、低压旁路调节阀4、旋转隔板5、溢流快关调节阀6、溢流调节阀7、第一级工业抽汽止回阀8、第一级工业抽汽快关调节阀9、第一级工业抽汽用户侧调节阀10、第二级工业抽汽止回阀11、第二级工业抽汽快关调节阀12、第二级工业抽汽用户侧调节阀13、第二级工业抽汽旁路调节阀14。

图3 超临界再热型双抽背压机控制装置系统图

与现役的常规背压机不同,增加再热循环及低压回热级段,使整体循环效率有了较大提升;但热力系统更为复杂,运行控制难度增加。该机型的主汽调节阀、中压调节阀、旋转隔板均参与热负荷的调节,各负荷之间的非线性耦合关系较强,使得动态响应特性发生了较大变化,控制更为复杂。与凝汽式的可调整抽汽机组不同,背压机无冷端凝汽设备(该机型正常运行不允许排汽溢流),按以“热定电模式”运行,供热抽汽量、回热系统用汽量需时刻与进汽量保持平衡。多重因素影响下,使得该机型的控制难度较大。

基于前述的设计理念,该机型运行调节的基本原则是主汽调节阀控制进汽量及供热总量,按“以热定电”模式运行。中压调节阀与热网管道调节阀

参完成第一级工业抽汽的压力与流量调节。同时,第二级工业抽汽量及中压各级回热抽汽量也受中压调节阀开度的控制,旋转隔板则用于第二级工业抽汽压力及流量的精确(辅助)调节,主要在变工况运行中保证供汽品质。背压机通往回收器的溢流管路上并联设置一只液动快关溢流阀,和一只用于排汽端压力精确控制的小口径气动调节阀。由于热用户工艺流程对供汽压力、温度要求较高,不能以牺牲供热调节品质来简化运行控制,故采用中压调节阀与旋转隔板双级分调。本文介绍的运行控制方案,主要是通过调整启动停机流程以及供热的投切顺序,并确定合理的各供热调节机构动作优先级,从而实现控制目标。

由于热力系统及供热管系的热惯性较大,而背压机轴系的转动惯量小于同功率等级抽凝式机组;为确保事故工况紧急停机的需要,增加了锅炉 PCV 阀的数量,设置了第二级供热抽汽管路的排空旁路系统以及背压机排汽端排空阀。紧急事故停机时,通过锅炉侧 PCV 阀、第二级供热抽汽旁路及排汽端排空阀及时泄压,确保安全停机。

1.3 启动停机及供热投切流程

该超临界再热型背压式汽轮机以高、中压缸联合模式启动,初期主汽调节阀、中压调节阀按比例开启,低压旁路调节阀联锁中压调节阀前压力(暂定 2.3 MPa),旁路蒸汽通往蒸汽回收器,给水泵由 50% 电泵拖动。遵循压力从排汽端向前建立的原则,开启溢流阀使得通流内有一定的蒸汽流量,再按照先投第二级抽汽再投第一级抽汽的顺序供热。全程需保证中压调节阀前后压差与机组推力均不超限,各抽汽调节装置处不超温。根据热平衡初算,排汽端溢流量达到 100 t/h 左右时,具备投第二级供热的条件;当第二级供热量达到 120 t/h 左右时,具备稳定投第一级供热的条件。上述数值留有一定的裕量,需根据调试阶段的实际情况再行调整,各执行机构动作指令所对应的监测值也需在调试阶段根据实验进一步修正。启动、供热流程及控制方案如图 4 所示。调试阶段可根据现场实际情况采用简化流程。如排汽溢流阀可在带所需供热负荷后再进行关闭,此时主汽调节阀随着溢流阀的关闭速度缓慢关小,以保证系统的流量平衡。

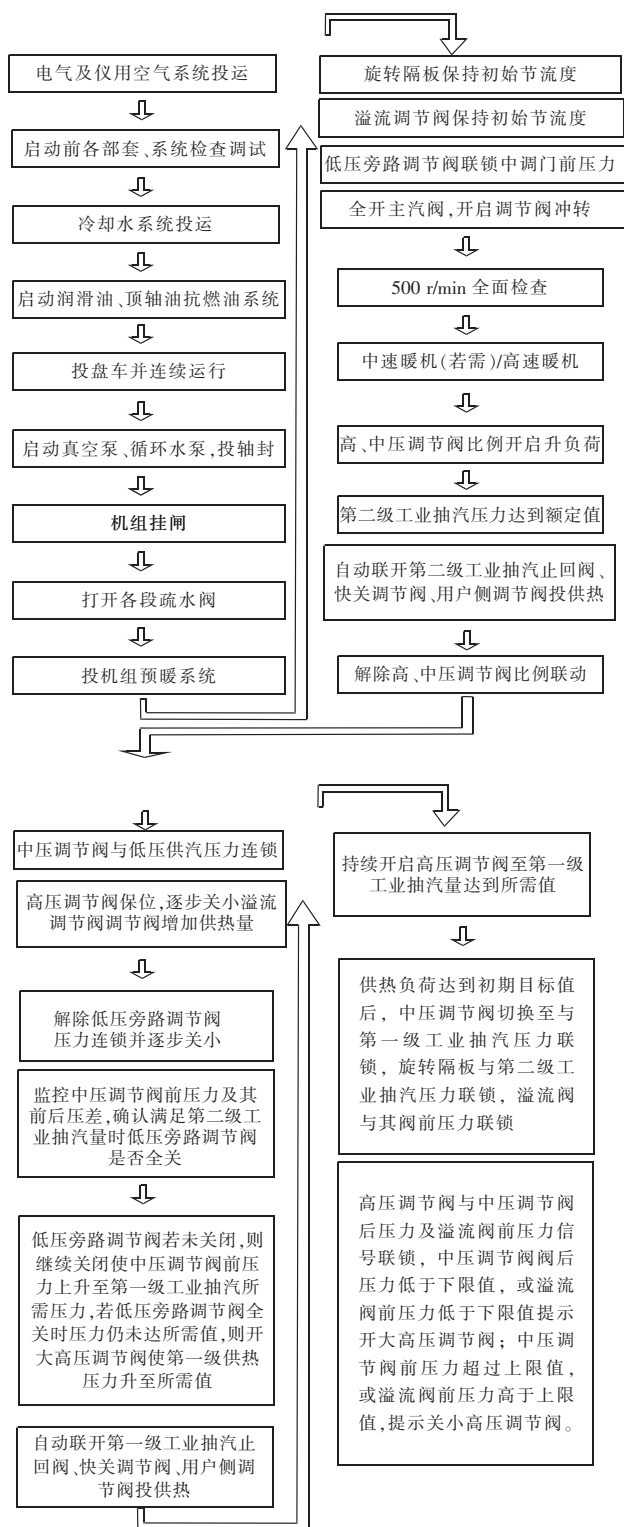


图4 超临界再热型双抽背压机启动及投供热流程图

通过合理设置各执行机构动作指令所关联的监测信号上、下限值,来确定其动作的优先级,使各执行结构有序参调,适应变工况运行。第一级的热负荷波动,先由其关联的中压调节阀进行调节;第二级的热负荷波动,由旋转隔板进行调节;当超出

各级执行机构的调节能力时,则中压调节阀后压力及溢流阀前压力超出动作值,主汽调节阀参与调节,使系统恢复平衡。

切除供热停机时,可控制主汽调节阀将两段热负荷等比例降至~40%;如需分别切除则先减第一级热负荷,再减第二级热负荷;给水泵切换至电泵,供热蒸汽通过溢流阀排往蒸汽回收器,机组转入带溢流的纯凝状态,然后逐步停机。第一级热负荷切除后,为避免旋转隔板超温,建议将再热温度控制在425℃以下。

2 热电联产智慧化运营技术展望

智慧化电厂技术需从智能设备层、智能控制层、智能生产监管层和智能管理层进行系统架构,在时效性、前瞻性、安全性方面都有着传统管理体系不可比拟的优势,尤其在热电联产电厂的创新管理方面提供了广阔的空间。该超临界再热型双抽背压机所属的工程,出于控制建设成本及技术成熟度的考虑,未按照智慧化电厂的标准进行建设;但智慧化热电联产控制技术在供需侧协调等方面可预见的优势,必将在后续项目中体现。

基于全面感知、互联网、大数据等技术,深度融合多源数据,实现对海量数据的计算、分析及深度挖掘,提升电厂运行决策能力。根据园区热用户的实时负荷需求,利用智能化控制手段将管理要求及时反馈到生产控制层,实现电厂生产与热用户需求的实时动态管理,可实现电厂的最佳经济运行。热电联产电厂,尤其是面向园区众多用户时,供需关系更加复杂,只有借助智慧电厂运行管理的前瞻性,才能更好地实现供需的动态平衡,进一步提高供汽品质及系统可靠性。

3 结语

《能源发展“十三五”规划》提出:加强终端供能系统的统筹规划和一体化建设,在新城镇、新建工业园区、新建大型公用设施、商务区和海岛地区等新增功能区域,实施终端一体化集成供能工程。《热电联产管理办法》(能源局[2016]617号)强调,以工业热负荷为主的工业园区,应通过规划建设公用热电联产项目实现集中供热。“十四五”时期,将

是我国经济由高速增长向高质量发展转型的关键时期,国家的能源发展也将进入全面深化改革的攻坚期,以传统能源为主的单一纵向延伸发展模式已不能满足能源发展的战略需求;亟待构建综合能源系统,打通电、热、气多种能源子系统间的技术壁垒,促进多种能源互补互济和多系统协调优化。对现有的燃煤热电联产技术升级,必将成为推进煤炭清洁化利用,促进能源转型发展的重要立足点之一。高效超临界再热型背压式汽轮机,集成应用了近年来火电汽轮机的先进技术,整体经济性大幅提升。与现役超高压背压机相同的供热量下,单台超临界背压机以约 150 g/kWh 的发电煤耗多提供一倍左右的发电量;经济性指标优于目前最先进的超超临界二次再热机组,符合煤电清洁生产的大趋势。该机型继承了背压机在能源梯级利用、零冷源损失的优点,采用合理的供热调节方式,对外分级

供热(或制冷)等,将在工业园区构建一体化集成供能系统建设方面发挥巨大优势。

智慧化电厂技术的在热电联产项目中的应用,能有效地解决系统优化后带来的控制、调度复杂化难题,使热、电生产与需求侧相协调,实现高效的动态平衡。采用先进的智能控制技术,根据环境条件、环保指标、用户需求变化等,自动调整控制策略和管理方式,以适应机组及园区企业的各种运行工况,进一步提高供热品质及设备的运行安全,符合“提高能效、环保优先”的煤电清洁利用要求。

参考文献:

- [1]蔡颐年. 蒸汽轮机[M]. 机械工业出版社,1988:3
[2]中国动力工程学会. 火力发电设备技术手册 - 第二卷汽轮机 [M]. 机械工业出版社,1998:12

集团要闻

东方电气海外风电总承包项目“三连签”

2021年,东方电气集团面对复杂多变的国际形势,积极布局海外可再生能源市场,为全球应对气候变化贡献力量。近日,东方电气集团国际合作有限公司相继签订并实施越南宏秀、长海3、长海4等陆上、海上风电总承包项目合同,赢得海外风电市场开拓开门红!

越南宏秀风电项目:越南宏秀风电项目由东方国际与越南宏秀风电股份有限公司签订,为陆上风电项目,位于越南广治省,除风场建设外,还配套建设一座110 kV变电站。该项目采用4.5 MW东方电气直驱风机,是东方电气在越南签订的首个风电项目,也是东方电气4.5 MW风机首次出口海外。

长海3、长海4风电项目:由东方国际与越南槟知风电股份有限公司签订,是东方电气首个海外海上风电项目,采用东方电气4.5 MW直驱风机。项目所在地位于湄公河入海口的近海地区,该地区风资源丰富,该项目的开展有利于进一步对该区域的项目进行开发。近日,项目第一次设计联络会在越南岘港召开。东方国际克服疫情影响,采用远程与当地同步协调方式就风机布置、送出、运输、施工等各项具体技术细节,迅速、高效地与业主达成了共识,推进项目建设进入快车道,为项目按期建成、投运发电打下了坚实的基础。项目各业主方对东方电气的工作效率和专业精神予以高度赞赏。

在越南发布风电第一轮电价补贴政策后,东方国际积极谋划、主动作为,大力推动越南风电市场开发,各协作企业克服疫情影响,不问假日、不分昼夜,创新思路、同心同力,用职业素养、专业态度、优秀方案赢得了业主信任。

来源:东方电气网

导流环结构对低压排汽缸气动性能的影响分析

彭国伟 黄元东

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:本文以某改造汽轮机为背景,应用数值模拟以及理论计算的方法对低压缸排汽通道进行研究,分析了低压缸导流环的起始扩散角度、外直径对排汽缸相关性能的影响。结果表明:随着导流环起始扩散角的减少,导流环外直径的增大,排汽缸的静压恢复系数均会得到提高,当起始扩散角为 15° 时,导流环外直径为5 600 mm,流线与导流环贴合更好,流场分布稳定,静压恢复系数数值最大;优化导流环结构可以使低压排汽的静压恢复系数提高37.1%,总压损失系数降低了39%,排汽性能更优。

关键词:排汽缸;导流环;汽轮机;有限元

中图分类号:TM621

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)01-0045-04

Effect of Guide Structure on Aerodynamic Performance of Exhaust Hood in Steam Turbine

PENG Guowei, HUANG Yuandong

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

Abstract: Based on the background of a modified steam turbine, By using numerical simulation and theoretical calculation methods to study the exhaust steam passage of the low pressure cylinder, this paper analyzes the influence of the initial diffusion angle and outer diameter of the guide ring in the exhaust steam passage of the low pressure cylinder. The results show that as the initial diffusion angle of the diversion ring decreases and the outer diameter of the diversion ring increases, the static pressure recovery coefficient of the exhaust cylinder will increase. When the initial diffusion angle is 15° , the outer diameter of the diversion ring The diameter is 5600mm, the streamline fits better with the diversion ring, the flow field distribution is stable, and the static pressure recovery coefficient is the largest; the optimization of the diversion ring structure can increase the static pressure recovery coefficient of low pressure exhaust steam by 37.1%, and the total pressure loss coefficient Reduced by 39%, the exhaust steam performance is better.

Key words: exhaust cylinder; guide ring; turbine; Finite Element

低压排汽缸的内部结构较为复杂,其特定的结构使排汽气流方向发生急剧转弯,产生了汽流周向和径向压力梯度,形成大尺度旋涡,导致排汽缸内的能量损失增加。低压排汽缸主要由导流环,蜗壳、辅助结构构成,其连接着末级叶片和凝汽器,好的排汽缸设计能够将末级汽流的余速动能尽可能的转化为压力能,达到良好的扩压效果。当凝汽器的背压一定时,更好的扩压性能意味着叶片末级可以实现更大的焓降,从而提高整体的热效率。国内

外对低压缸排汽造型的研究历史很长,因此文献报道也相对较多。王平子的汽轮机低压排汽缸的设计和计算翻译了原苏联资料,提供了低压排汽缸基本结构尺寸的估值方法和性能曲线^[1]。陈阳的低压排汽缸宏观尺寸规律总结了某型低压排汽缸的计算研究方法和低压缸关键尺寸的推荐值^[2]。董标的超临界600MW机组低压缸排汽通道优化中通过总结文献资料阐述了排汽损失系数每升高0.1,就可使汽轮机低压缸效率降低0.1%~0.15%^[3]。

收稿日期:2020-08-27

作者简介:彭国伟(1986-),男,2012年毕业于兰州理工大学金属材料系材料加工专业,硕士,工程师。现在东方电气集团东方汽轮机有限公司产品研发中心部门主要从事汽轮机本体设计工作。

本文以某改造汽轮机为例,通过优化导流环结构,分别研究导流环的起始扩散角以及外直径对排汽缸的静压恢复系数以及总压损系数的影响,为汽轮机低压导流环的设计和性能研究提供有价值的参考。

1 理论模型以及评价指标

1.1 总体模型以及宏观尺寸

低压排汽缸主要是由导流环、导流环加强筋、顶部导流板、外缸组成,见图1;排汽缸宏观尺寸见图2;改造前后排汽缸尺寸对比见表1。

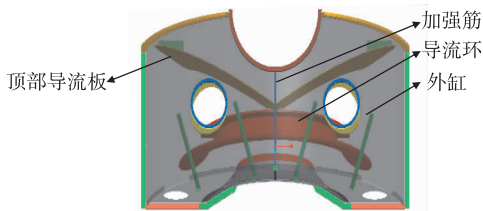


图1 低压排汽缸组件

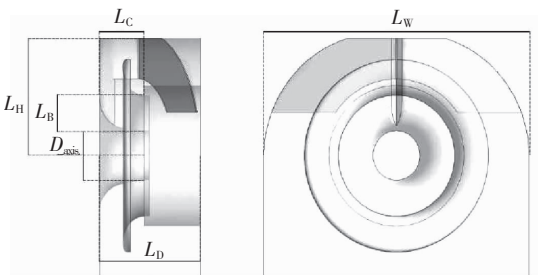


图2 低压排汽缸宏观尺寸

表1 低压排汽缸宏观尺寸对比

	推荐值	改造前	改造后	备注
L_D/mm		3 110	3 110	完整缸长度的一半
L_B/mm		770	715	末级动叶片高度
L_H/mm		3 540	3 540	上半缸高度
L_W/mm		9 200	9 200	排气缸横向宽度
L_C/mm		1 183	1 183	内缸外端距外缸壁面的轴向距离
$D_{\text{axis}}/\text{mm}$		1 905	1 905	叶根直径
L_D/L_B	3 ~ 4	4.04	4.35	评估缸轴向长度
L_C/L_B	1.5 ~ 2	1.54	1.65	评估叶片到外缸距离
$(L_H - 0.5D_{\text{axis}})/L_B$	2.9 ~ 3.2	3.36	3.62	评估汽缸高度
$(L_W - 0.5D_{\text{axis}})/L_B$	6.8 ~ 7.2	10.71	11.53	评估汽缸宽度
进口面积/ mm^2		6 470 895	5 885 146	入口环形面积
出口面积/ mm^2		28 612 000	28 612 000	出口面积
出口与入口面积比	3 ~ 3.2	4.42	4.86	评估整体扩压

1.2 评价指标

为了从定量角度描述汽轮机排汽缸的性能,引入两个特性参数,静压恢复系数 C_1 和总压损失系数 C_2 ,定义如下:

$$\text{静压恢复系数: } C_1 = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{P_{O_{\text{in}}} - P_{\text{in}}}; \text{总压损系数:}$$

$$C_2 = \frac{P_{O_{\text{in}}} - P_{O_{\text{out}}}}{P_{O_{\text{in}}} - P_{\text{in}}};$$

式中, P_{out} 和 P_{in} 分别表示出口静压与进口静压, $P_{O_{\text{out}}}$ 、 $P_{O_{\text{in}}}$ 表示出口、进口总压; C_1 越大,表示排汽导流环扩压作用对排汽缸回收动能的能力越强, C_2 越小,汽流在排汽导流环中由动能转化压力能而引起的压损越小,排汽缸的性能越好。

2 排汽导流环优化分析

为了研究排汽导流环本身结构(图3)对排汽性能的影响,本文拟改变排汽导流环起始扩散角以及导流环外直径两个变量,通过数值分析计算流体在排汽导流环中流场分布进而给出导流环的起始扩散角以及导流环外直径的最佳值,且与改造前排汽导流环对排汽性能影响进行分析对比。图3中 B 表示导流环的起始扩散角, R 表示导流环的外直径。

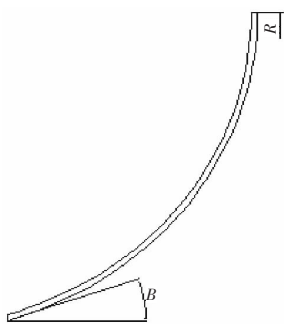


图3 导流环

2.1 起始扩散角对排汽性能的影响

在导流环直径和轴向长度不变的情况下,导流环的起始扩散角的变化,导致排汽导流内部空间汽流流场发生变化,为了定量描述起始扩散角对排汽性能的影响,分别对表2中起始扩散角分别为 15° 、 20° 、 25° ;导流环外直径均为为 $D5600$ 数值模拟流场变化情况以及对排汽静压恢复系数以及总压损失系数进行计算。

图4、图5分别为排汽缸改造前、后优化算例过中心轴且与水平面呈 45° 角时的平面流线图,优化算例分别为导流环的外直径 $R=2800\text{ mm}$ 时起始扩散角度 α 分别为 15° (算例3)、 20° (算例2)和 25°

(算例1)。改造前图4从流场流线分析可以看出其流线并没有贴着导流环流动,存在脱流情况且在图表注A处出现了明显的分离,且总压损失系数最大,静压恢复系数最小,导流效果不理想。优化算例图5 15° 时,流线与导流环贴合较好,且在导流环尾部直线段即旋涡A与主流的分界线,旋涡A进入主流区域区域最小,对流场的阻碍作用最小,减少主流的能量耗散,排汽的静压恢复系数最大,总压损失系数较小。综上分析,导流环的起始扩散角对排汽缸的气动性能有影响,起始扩散角为 15° 时为最佳。

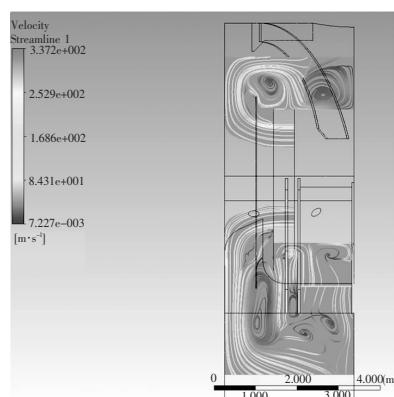


图4 平面流线图

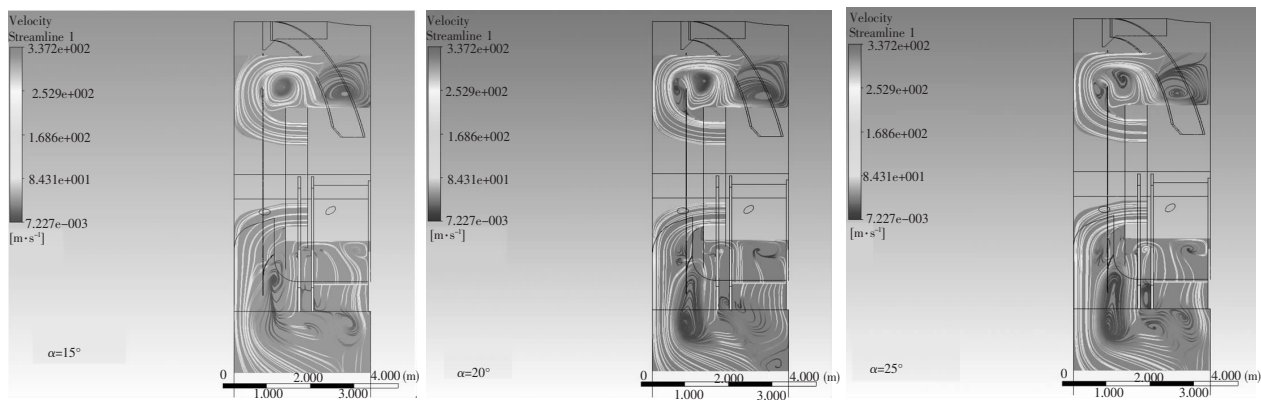


图5 平面流线图

表2 各优化算例性能对比表

	改造前	算例1	算例2	算例3
$\alpha/^\circ$	26	25	20	15
R/mm	2 600	2 800	2 800	2 800
P_{in}/Pa	13 083.3	12 893.7	12 523.8	12 147.7
P_{out}/Pa	13 026.7	13 028.2	13 024.2	13 022.4
$P_{O_{in}}/\text{Pa}$	15 099.4	14 949.4	14 647.1	14 342.5
$P_{O_{out}}/\text{Pa}$	13 307.7	13 228.8	13 275.7	13 248.2
静压恢复系数	0.028	0.065	0.236	0.399
总压损失系数	0.888 7	0.837	0.645 9	0.498 6

2.2 导流环直径对排汽性能的影响

导流环起始扩散角以及轴向长度不变的情况下,通过改变导流环直径长度,会使排汽缸的气动性能发生改变,为了定量描述导流环直径长度对排汽性能的影响,分别对表3中导流环外直径为 $R2800$ 、 $R2384$ 、 $R2200$,数值模拟流场变化情况以及对排汽静压恢复系数以及总压损失系数进行计算。

图6分别为优化算例过中心轴且与水平面呈

45°角时的平面流线图,其中各优化算例导流环的起始扩散角均为 15°,导流环外直径分别为 $R = 2\ 800$ mm(算例 3)、 $2\ 384$ mm(算例 2)、 $2\ 200$ mm(算例 1),从流场流线分析可以看出 $R = 2\ 800$ mm(算例 3)由于其导流环的外直径较大,阻碍了旋涡 A 向左扩散,算例 2 以及算例 1 旋涡 A 均有向左侧扩散的现象,对流场的阻碍作用相对较大,造成主流的能量耗散;图 7 分别为优化算例下过中心轴且与水平

面呈 45°角时的总压分布云图,各种算例下的流量和出口压力相同,3 种算例下出口处的总压是相等的, $R = 2\ 800$ mm(算例 3)的进口总压中红色区域最小,所以其进口总压最小,总压损失最小,静压恢复系数最大。综上分析,导流环的外直径对排汽缸的气动性能有影响,随着导流环外直径的增大,排汽缸的气动性能得到提升,导流环的外直径为 $R = 2\ 800$ mm时为最佳。

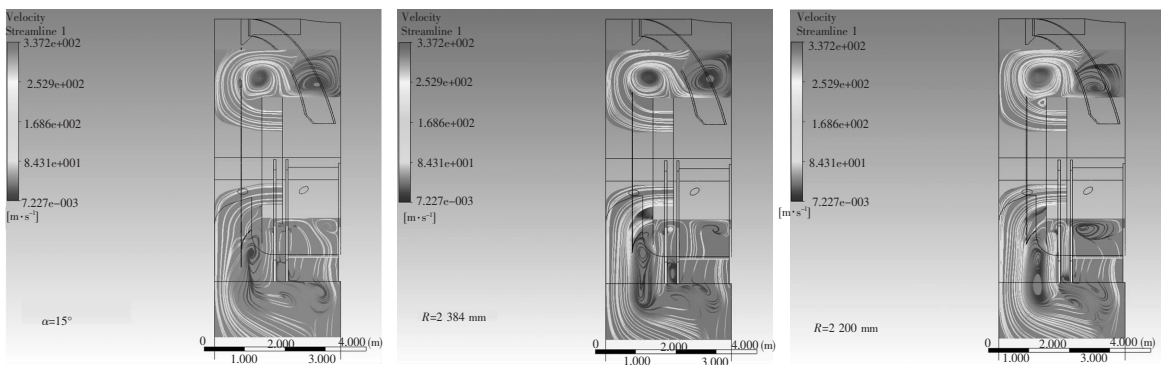


图 6 平面流线图

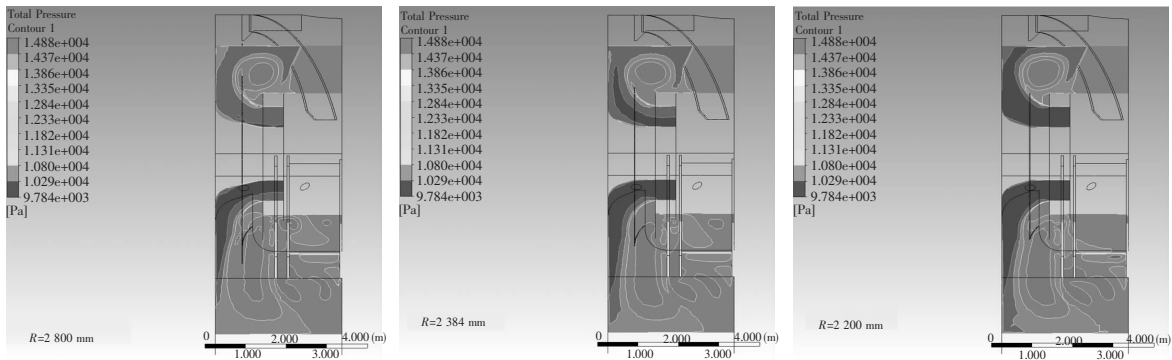


图 7 总压分布云图

表 3 各优化算例性能对比表

	改造前	算例 3	算例 2	算例 1
$\alpha/^\circ$	26	15	15	15
R/mm	2 600	2 800	2 384	2 200
P_{in}/Pa	13 083.3	12 147.7	12 305.5	12 616.2
P_{out}/Pa	13 026.7	13 022.4	13 025.2	13 025.1
$P_{o_{in}}/\text{Pa}$	15 099.4	14 342.5	14 460.4	14 713.4
$P_{o_{out}}/\text{Pa}$	13 307.7	13 248.2	13 254.3	13 299.3
静压恢复系数	0.028	0.399	0.334	0.195
总压损失系数	0.888 7	0.498 6	0.559 7	0.674 3

3 结论

本文以某改造汽轮机为研究对象,应用数值分析软件对低压缸末级和排汽缸进行数值模拟,来研

究导流环的起始扩散角、排汽导流环的外直径对排汽缸的气动性能进行研究,形成以下结论:

(1) 导流环的起始扩散角会对低压缸的排汽性能有影响。在选取得几种算例中,扩散角在增大时,旋涡 A 对主流影响作用最大,会造成主流的流动损失,造成主流能量耗散。当起始扩散角为最小选定值 15°时,总压损失系数最小,静压恢复系数最大。因此起始扩散角度 15°为最佳值。

(2) 导流环的外直径会对低压缸的排汽性能有影响。在选取的几组算例中,导流环的外直径在增大时,导流环对阻碍旋涡 A 起阻碍进入主流作用越强,且进口总压分布区域越小,总压损失系数最小,

(下转第 54 页)

开式整体叶轮的多轴数控加工工艺技术研究

吴中竟 段昌德 乔杰 吴伟

东方电气集团东方电机有限公司,四川 德阳 618000

摘要:本文针对开式整体叶轮的数控加工,通过加工工艺研究,确定了加工工序和机床、刀具选用策略,并基于三维编程软件UG实现了高效、优质的多轴数控编程,最终成功加工出质量良好的整体叶轮,验证了该技术的可行性。

关键词:整体叶轮;UG;多轴联动;数控加工

中图分类号:TG659

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)01-0049-06

Research on Multi-axis N/C Machining Technology of Open-integrated Impeller

WU Zhongjing, DUAN Changde, QIAO Jie, WU Wei

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

Abstract: In this paper, for the NC programming of the open-integrated impeller, through the study of machining process, the processing procedure and the machining center, the tool selection strategy is determined. An efficient and optimal way of multi-axis NC programming is adopted based on the software of UG, and an experimental open-integrated impeller of high quality is produced, which proves the feasibility of the study.

Key words: integrated impeller; UG; multi-axis machining; NC programming

整体叶轮作为透平机械的核心部件,已经被广泛地应用于国防工业、能源工业及其它领域,如发动机、压缩机及水泵叶轮等。与传统的分体式叶轮结构相比较,整体叶轮将叶片和轮毂设计成一个整体,无需焊接或装配,整体强度更高,有助于提高产品性能,但同时也增加了加工难度。由于整体叶轮结构的复杂性,其加工技术一直是制造业的难点之一。

多轴数控铣削、电火花加工、电解加工、精密铸造法和电子束焊接法等都是整体叶轮制造的主要方法^[1],各有其独特的优势和局限性。其中多轴数

控铣由于其加工效率高、表面质量好等优点,目前已成为叶轮制造的首选制造方法,美国通用电气、洛克希德·马丁、普拉特·惠特尼公司、英国罗尔斯·罗伊斯公司、法国达索公司等制造业巨头都在研制整体叶轮时采用了该技术,反映了国际数控加工领域内的最新技术和最高水平^[2]。

近年来我国数控技术和数控机床快速发展,国内少数企业已开始使用四轴、五轴联动和“3+2”轴联动的数控加工方法完成包括航空发动机、汽车涡轮、鼓风机叶轮等关键部件的加工,然而整体水平与欧美发达国家相比尚有一定差距^[3]。因此,通过

收稿日期:2020-12-25

作者简介:吴中竟(1989-),男,2011年毕业于重庆大学机械设计制造及其自动化专业,硕士,工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司研究试验中心工作,主要从事数字化制造技术和增材制造技术研究。

段昌德(1979-),2002年毕业于甘肃工业大学机电一体化专业,硕士,高级工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司研究试验中心工作,主要从事数字化制造技术研究。

乔杰(1982-),男,2011年毕业于重庆大学机械制造及其自动化专业,硕士,工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司工艺部工作,主要从事数控工艺研究。

吴伟(1966-),男,正高级工程师,现在东方电气集团东方电机有限公司主要从事数字化制造技术和增材制造技术研究。

合理的工艺规划和基于编程软件的多轴联动数控编程技术,实现开式整体叶轮的高效、优质加工成型,将对叶轮制造这一关键难点进行攻克,为我公司掌握核心制造技术的同时也对其他叶轮类或复杂曲面类零件加工具有重要的参考价值。

1 整体叶轮加工工艺研究

整体叶轮包括闭式叶轮、半闭式叶轮和开式叶轮等结构,如图1所示,多由非可展直纹面和空间曲面构成,其叶片扭曲程度高,通常采用X型大扭转角结构,相邻叶片空间狭小,其材料通常包含钛合金、不锈钢等难加工材料,因此给数控加工带来了较大困难。

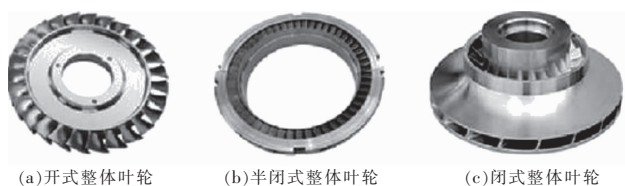


图1 整体叶轮的各类结构

1.1 叶轮模型分析

水泵叶轮是典型的整体叶轮,待加工的开式水泵叶轮三维模型如图2所示,采用7叶片结构,试验件材料为铸铜合金,各参数如表1所示。

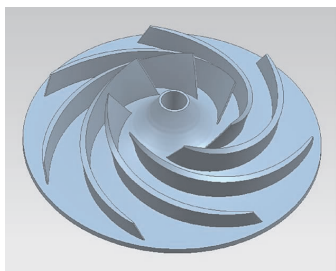


图2 某开式水泵整体叶轮

表1 叶轮各项参数

	mm		
	最大	最小	平均
直径	582	50	/
叶片高度	113(叶片进口)	38(叶片出口)	/
叶片厚度	13.2	3.5(叶片出口)	10.7
前后缘圆角	3	3	3
根部圆角	6	6	6
相邻叶片距离	79	33	52.8

由表1分析可得,该叶轮的加工特点如下:

(1)相邻叶片间的区域狭窄,加工刀路规划时易与相邻叶片发生干涉,难以采用刚性较好的大直

径刀具一次加工成型,部分区域需分段加工,对曲面一致性有一定影响。

(2)叶片形状扭曲,前、后缘圆角曲率变化大,难以实现工作面与背面整体环绕加工,需对整体叶片进行适当的分割面处理后再分段加工。

(3)叶片精加工需采用多轴联动,但刀轴选择约束条件较多,对机床的加工范围、定位精度也有一定要求。

(4)叶片属于典型薄壁件,刚性较差,应考虑多工序分层切削和合理余量控制,同时选用材料为铜合金,在加工中由于切削力、温度变化等因素易产生变形,因此应通过一定措施防止加工变形,必要时可采取热处理或时效处理消除应力。

(5)由于叶轮表面质量要求较高,主要集中在叶片表面、根部和流道面区域,工艺要求其表面粗糙度不低于 $Ra 3.2\mu m$,尺寸误差控制在 $\pm 0.2 mm$ 以内,故需综合考虑数控设备和工艺安排是否能达到指定的精度要求。

综上所述,选用精密数控加工设备,通过适当的工艺规划和多轴联动数控程序编制,制定合理的工艺技术方案,将成为整体叶轮加工的关键。

1.2 加工工序划分

整体叶轮在毛坯铸造成型后需先经过车序加工,去除表面毛刺、黑皮和一定余量,并对基准面进行精加工,保证与工装夹具的高精度配合,其余部分按指定尺寸粗车排量,如图3所示。

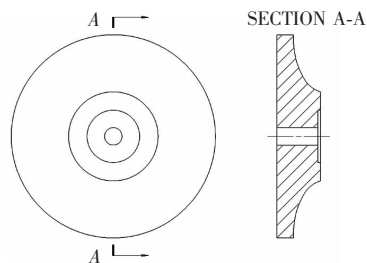


图3 叶轮车削毛坯

由于叶面和轮毂面加工精度较高,按照先粗后精、先主后次的工艺原则,将叶轮的加工划分为6个阶段:①粗车排量;②精车基准面及配合面;③粗铣叶面及轮毂;④半精铣叶面及轮毂;⑤精铣叶面及轮毂;⑥清根铣削叶片根部圆角。

在数控铣削过程中,对叶轮各区域的加工也应按一定原则划分:首先铣削叶片背面,其次铣削工

作面,然后铣削轮毂面,在粗铣、半精铣、精铣均按相同顺序完成后,最后对叶根部位进行清根加工,保证各区域的加工精度,也避免产生较大的残余应力导致加工变形。

1.3 加工机床选择

机床的选择应首先考虑机床功能、行程和精度等,同时兼顾加工效率和经济性。在毛坯粗车阶段,选用普通立式或卧式车床,最大回转直径大于叶轮直径 582 mm 即可,因此选用国产 CW6163C 型普通卧车。在数控铣削时,多轴加工中心的多轴合成运动可使刀具在空间内任意控制,工件一次装夹即可完成多工序的铣削、钻、镗、铰孔等任务,有效保证曲面的加工精度,并避免材料过切和残留,因此选用德国 DMG 公司的 DMU 125P 五轴联动数控加工中心,如图 4 所示。该机床采用 XYZ 三轴和主轴摆动(A 轴)及圆工作台回转(C 轴)的结构,具有转速高、进给快、结构稳定、五轴联动技术成熟的特点,满足开式整体叶轮的各项技术要求。

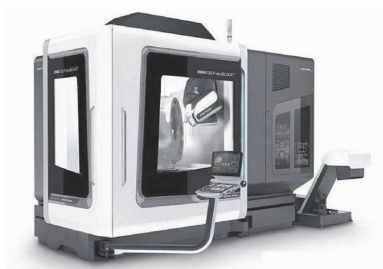


图 4 DMU125P 五轴加工中心

1.4 加工刀具选择

刀具的选用对加工效率和加工精度有着直接影响。粗铣阶段,由于需要快速去除余量,选用大直径可转位铣刀盘进行第一次开粗,另选用小直径可转位铣刀盘进行二次开粗去除残留余量。由于整体叶轮叶片曲面结构复杂,采用铣刀盘定轴加工难以精确贴合叶片表面,将在部分区域留下不均匀的加工余量,而球头铣刀的头部圆弧更有利于加工自由曲面,因此在半精铣阶段应选用球头铣刀,通过多轴联动加工保证各部位的余量均匀,同时考虑到叶片间通道较窄,大直径刀具无法加工,所以在半精加工时选用 $D20R10$ 的球头铣刀,精加工则选用 $D16R8$ 的球头刀。考虑到叶片的根部圆角为 6 mm,最后选用 $D12R6$ 的球头刀进行清根,所有刀具如表 2 所示。

表 2 刀具参数

加工阶段	刀具类别	刀具直径	伸出端长度
			mm
粗加工	可转位铣刀盘	$D52R5$	155
		$D25R5$	220
半精铣	整体球头刀	$D20R10$	160
精铣	整体球头刀	$D16R8$	160
清根铣	整体球头刀	$D12R6$	168

2.2 基于 UG 的数控编程技术研究

目前通用的数控编程软件包括 UG、PRO-E、Cimatron、MasterCAM 等,也有专用于整体叶轮制造的五轴加工软件,包括德国 Open Mind 公司的 Hyper mill 软件、美国 Concepts NREC 公司的 MAX-PAC 模块等。鉴于整体叶轮加工的复杂性,为保证加工效率和质量,将采用定轴和多轴加工相结合的方式,此处选用 UG NX7.5 版本进行数控编程。

Unigraphics(简称 UG)是一个大型 CAD/CAM/CAE(计算机辅助设计/辅助制造/辅助工程)软件系统,其功能覆盖从概念设计到产品制造的全过程,包括强大的工业设计、工程制图、三维建模、虚拟仿真和数控加工等功能,目前已广泛应用于航空航天、汽车、船舶、模具制造和电子等工业领域^[4]。其强大的数控功能包含从两轴加工到五轴加工的多种数控加工方法,为整体叶轮的加工提供了完善的解决方案。

在将整体叶轮毛坯进行车序加工后,得到叶轮铣削毛坯,此时使用 UG NX7.5 进行铣削程序编制,包括粗加工、半精加工、精加工和清根铣削,主要考虑各工序的加工刀路规划。

2.1 叶轮粗加工

粗加工的主要目的是快速去除毛坯余量,要求进给量和切削深度尽可能大,以便在较短的时间内去除更多余量,本例中,最终叶轮仅占毛坯重量的 40% 左右,意味着有近 60% 的加工余量留待去除,因此,提高粗加工效率对缩短叶轮加工周期具有重要意义^[5]。

UG 提供了专用的 mill_multi_blade(多轴铣削叶轮)模块进行分层渐进式开粗,该模块只能使用球头刀具。选用 multi_blade_rough(多轴叶片开粗)操作,定义 $D36R18$ 的球头刀,选择叶片、轮毂后,在驱动方法中设定切削方向和步距,刀轴选择自动模式,设定其余切削参数和非切削运动后,通过观察

生成的刀路,再考虑是否需通过调整前倾角或侧倾角来改变刀轴,加工刀轨如图5所示。

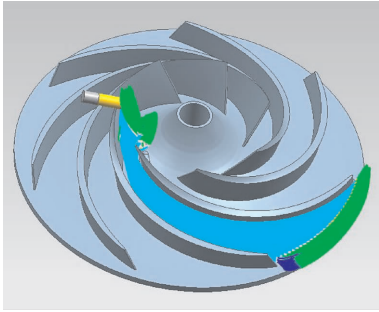
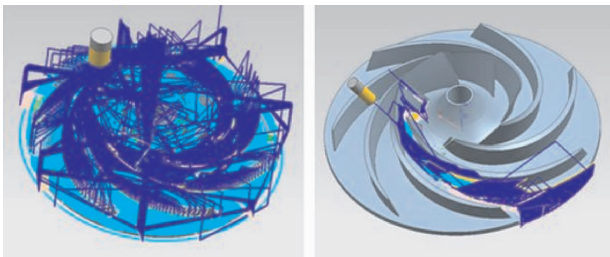


图5 球头刀粗加工刀轨

然而由于粗加工余量大,使用球头刀联动加工时刀具直径受限于叶片中间的通道,因此只能选择小直径球头刀,对刀具材料和切削性能要求高,且加工步距和切削深度不能过大,最终导致粗加工效率低下。所以采用 cavity_mill(型腔铣)定轴加工,先选用大直径 D52R5 的可转位铣刀盘进行三轴铣削,再使用 D25R5 可转位铣刀盘,主轴倾斜一定角度进行 3+2 定轴的二次开粗,去除由于前一把刀具直径较大而加工不到的残留余量,刀轨如图6所示。二次开粗的加工为基于 IPW(in process workpiece, IPW)的毛坯方式,IPW 是前一把刀具加工后的残留毛坯,能实时显示当前的毛坯余量,自动分析待加工区域,仅在有余量的部位产生刀轨,去除空走刀,因此更具高效性。同时主轴倾斜角度的选定原则为一次尽量加工到更多区域,且刀具、刀柄不与相邻叶片产生干涉。相比分层渐进式加工,型腔铣可以更高效地去除大部分余量,刀具选择也有更大余地,但加工后部分区域余量较大且不规则,需后续半精加工再去除余量^[6-7]。



(a)D52R5 粗加工刀轨

(b)D25R5 二次开粗刀轨

图6 可转位铣刀盘粗加工刀轨

2.2 叶轮半精加工

半精加工的目的是去除粗加工后的不规则余量,同时为精加工保留均匀、合适的加工余量,主要

加工部位为叶片曲面和轮毂面。

建立 D20R10 球头铣刀,使用 UG 的 blade_finish(叶片精铣)专用模块操作,刀轴为自动方式,通过调整侧倾安全角和前、后倾角即可获得较为光滑的刀轨,如图7所示。然而其刀轴可控性较差,特别是叶片前、后缘圆角处,由于曲率变化大,自动生成的刀轨将在很小的刀具中心线位移时产生大幅度摆动,极易产生过切且表面质量不佳,考虑到机床的摆动轴行程限制和与相邻叶片干涉问题,根本无法实现。

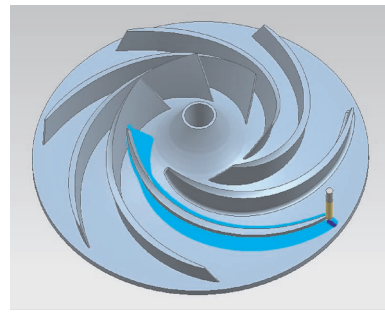


图7 叶片半精铣加工刀轨

因此选用 variable_contour(变轴轮廓铣)操作,驱动方法为曲面驱动,选定叶片曲面为驱动面,投影矢量为垂直于驱动体,刀轴选择插补方式。插补矢量的定义方式为:在叶片与轮毂的交线,以及叶片边缘的指定位置定义一系列的矢量,刀具通过指定点的矢量来控制刀轴方向,其余点的刀轴由 U、V 双向线性插值或样条插值自动获得,在曲率变化较大的位置可适当增加定义矢量。

通过自定义刀轴矢量,在相邻叶片间的通道内合理摆动刀轴,使刀具尽可能接近两侧的叶片而不产生过切,同时避免刀轴突变,保证加工过程中的平滑变化,刀轴就能很好地按照加工需要而得到控制,最大限度减少叶片面与轮毂面的待加工区域。值得注意的是,由于采用叶片整体环绕加工会在圆角部分出现短行程内的大幅摆动,因此需进行分割面处理,将叶片分割为工作面、背面、前端圆角和后端圆角,其中工作面、背面选用多轴联动加工,前、后端圆角选用“3+2”轴定轴加工的方式,各刀轨如图8所示。

轮毂的半精加工采用多轴联动铣削,刀轴通过自定义插补矢量确定,原则是保证刀轨平滑过渡的同时加工到所有区域,且不与相邻叶片干涉,轮毂

和叶片根部间的余量留待后续清根加工,加工刀轨如图9所示。

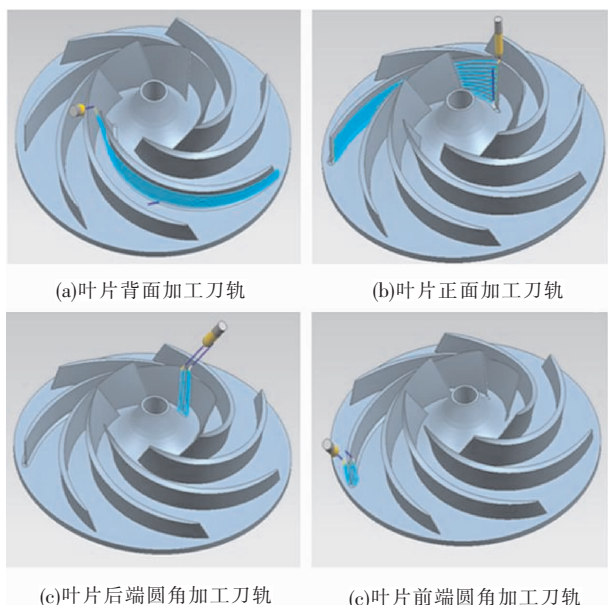


图8 叶片半精铣刀轨

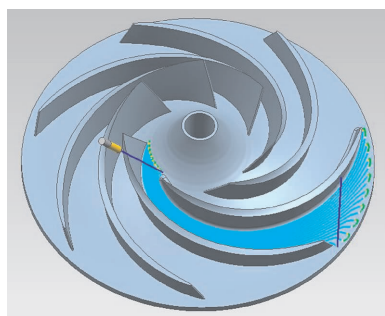


图9 轮毂半精加工刀轨

通过插补驱动多轴联动加工和“3+2”定轴加工相结合的方式,解决了自生成刀轨可控性差、无法应用于实际加工的问题,避免了过切等情况,实现了叶轮各表面的高效、优质半精加工,也为后续精加工留下了均匀余量。

2.3 叶轮精加工

半精加工后,叶轮整体余量均匀,精加工采用D16R8球头铣刀,选用操作与半精加工相同,将残留余量和切削步距设置更小,使加工刀路更密集,表面质量更高,刀轨如图10所示。

2.4 清根加工

叶根位于叶片与轮毂夹角区域,为固定值或可变的倒圆角,清根加工将进一步消除叶根部位的残留余量,保证叶根与叶片、轮毂表面质量一致。待加工叶轮根部圆角半径为6 mm,故采用D12R6球

头铣刀,选用变轴轮廓铣操作,驱动方法为曲面驱动,选定叶根圆角曲面为驱动面,投影矢量为垂直于驱动体,刀轴选择插补方式,刀轨如图11所示。

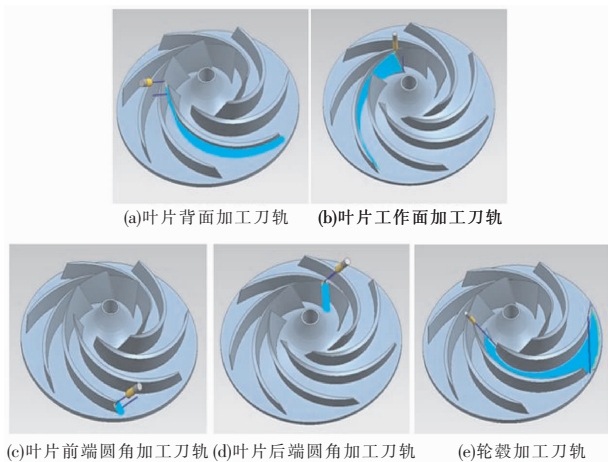


图10 精加工刀轨

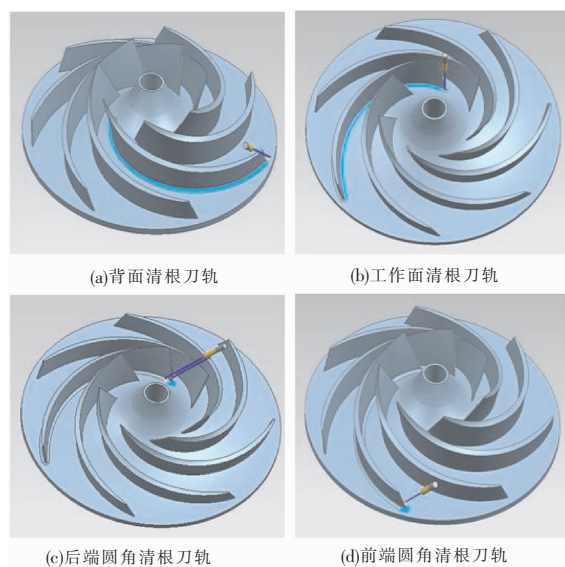


图11 叶轮清根加工刀轨

程序编制时还应注意以下3个方面:①由于叶片根部也存在前后端圆角曲率变化大的情况,因此依然选择多轴联动和“3+2”定轴加工相结合的方式,工作面、背面根部由多轴联动加工,前后端圆角根部定轴加工;②根部的残留余量和加工步距应与精加工设置相同,保证叶轮整体的一致性;③由于叶根余量较大,可将清根再分为粗、精加工,去除较大余量后再进行精铣,可得到较好的表面光洁度。

3 加工验证

按照规划的加工路线,通过数控编程生成程序

后导入机床加工,最终得到开式水泵整体叶轮试验件如图 12 所示。

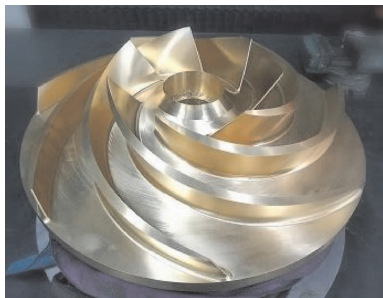


图 12 开式水泵整体叶轮试验件

经三维型线检测,叶轮表面质量良好,无过切和余量残留,几何特征(前后端和根部圆角)完整,表面粗糙度达到 $Ra3.2 \mu m$,尺寸偏差如表 3 所示:

表 3 叶轮尺寸偏差表

	mm		
	最大	最小	平均
综合误差值	0.152 1	0.016 3	0.064 8
X 方向误差值	0.174 8	0.013 5	0.036 1
Y 方向误差值	0.152 1	0.010 6	0.030 7
Z 方向误差值	0.136 7	0.002 5	0.044 2

从以上数据可以分析得出:整体叶轮表面尺寸平均误差为 $0.064 8 \text{ mm}$,在工艺要求的 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 范围内,尺寸精度达到预期目标,满足加工技术要求。

(上接第 48 页)

静压恢复系数最大。因此导流环的外直径为 $R2800$ 时为最佳值。

(3)当导流环的起始扩散角为 15° ,外直径为 $R2800$,作为导流环的优化方案,与改造前排汽缸的气动性能进行对比,排汽缸的静压恢复系数较改造前提高了 37.1% ,总压损失系数较改造前降低了 39% ,气动性能得到明显的改善。

4 结语

低压缸的排汽导流环由于处于结构较为复杂的低压内、外缸环境中,有时为了满足低压内缸、外强度以及刚度的需求,排汽导流环要进行适应性设

4 结语

本文通过分析开式整体叶轮的加工特点,制定了合理的工艺路线,并通过基于 UG 的多轴联动数控加工技术研究,最终成功实现整体叶轮的高效、优质加工成型,产品质量优异,满足设计要求。该技术的研究,攻克了开式整体叶轮制造的关键难点,促进整体叶轮加工向高质量、高效率 and 低成本的方向发展,掌握核心制造技术的同时也对其余叶轮类或复杂曲面类零件的加工提供了重要的技术参考。

参考文献:

- [1] 段昌德. 闭式叶轮整体加工技术[J]. 东方电机, 2014, (2): 31-38
- [2] 刘军. 闭式导叶轮的数控加工关键技术研究[D]. 西南交通大学, 2017:3-4
- [3] 徐家文, 赵建社. 航空发动机整体构件特种加工新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011:8-9
- [4] 赵长明. 数控加工中心加工工艺与技巧[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011:6-7
- [5] 吴明友. UG NX6.0 中文版数控编程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010:1
- [6] 沈自林, 沈庆云, 傅贵武. 基于 UG 的风扇叶轮加工技术研究[J]. 机械工程师, 2008, (1):25-26
- [7] 李群, 陈五一, 单鹏等. 基于 UG 的复杂曲面叶轮三维造型及五轴数控加工技术研究[J]. 航天制造技术, 2007, 8(4):40-44

计,这势必会造成低压排汽内部流场混乱,本文结合理论分析和实际需要,确定了影响低压导流的主要因素,即排汽导流的起始扩散角以及导流环的外直径。优化导流环结构后明显提高了排汽导流的静压恢复系数以及降低低压排汽压损。

参考文献:

- [1] 王平子. 汽轮机低压排汽缸的设计和计算[J]. 东方汽轮机, 2002, (2):1-6
- [2] 陈阳. 低压排汽缸宏观大尺寸规律总结[J]. 东方汽轮机, 2018, (2):7-12
- [3] 董标等. 超临界 600 MW 机组低压缸排汽通道优化[J]. 东北电力技术, 2017, 38(2):41-43

某型单支撑大功率背压机组轴系振动特性分析

曹寒 赵先波 祁乃斌 苏正 陈延强 杨灵

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:本文以某型单支撑大功率背压机组轴系为研究对象,首先对轴系各转子进行了模化,然后采用有限元方法计算了轴系的横向弯曲临界转速和不平衡量响应;同时采用连续质量的传递矩阵法计算了轴系的扭振固有频率,计算了短路工况下轴颈的剪切力,并进行了轴系振动安全性分析。

关键词:背压机; 单支撑; 轴系; 振动

中图分类号:TM621;TK261

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)01-0055-03

Analysis of Vibration Characteristics of A Single Support High Power Back-pressure Unit

CAO Han, ZHAO Xianbo, QI Naibin, SU Zheng, CHEN Yanqiang, YANG Ling

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

Abstract: In this paper, the shafting of a single support high-power back-pressure unit is studied. Firstly, the rotors of the shafting are modeled, and then the critical speed and unbalance response of the shafting are calculated by the finite element method. At the same time, the torsional natural frequency of the shafting is calculated by the transfer matrix method of continuous mass, the shear force of the journal under the short circuit condition is calculated, and vibration safety analysis is carried out.

Key words: back-pressure unit; single support; shafting; vibration

当前全球兴起的能源变革和转型对发电设备提出了新的要求,发电装备面临着推动绿色低碳发展和能源结构升级的新任务。目前我国火电机组技术水平经过十几年的高速发展,技术进步相对放缓。采用高效通流技术和先进结构技术的大型定制化背压机,将是煤炭高效清洁利用新的发展领域,促进热电联产技术的进一步发展,成为促进我国的能源工业发展及节能减排方面重要力量。

目前国内在运行的背压机功率普遍在 100 MW 以下,基本采用高温高压参数(主汽压力 8.83 MPa, 温度 535 ℃ 以下)非再热的机型。本文所述机组为 170 MW 超临界再热型双抽背压机组,将进口蒸汽

参数提升至 24.2 MPa、566 ℃,采用定制化的创新技术方案,并集成应用目前最先进的汽轮机通流及结构技术,同时,轴系采用单支撑结构,有效缩短了长度,节约了建造成本。

本文针对背压再热机型的特殊轴系结构,综合考虑了多种影响因素,对轴系各转子模化后进行了振动特性的计算、分析和研究。

1 横向弯曲振动频率

该型再热背压机组轴系布置如图 1 所示,轴系的计算模型采用沿轴向的一维有限元模型,分为 135 段、136 个节点,模化后的轴系结构如图 2 所示,各轴承形式和所承载荷见表 1。

收稿日期:2020-09-04

基金项目:中国华电集团有限公司重大科技项目计划(CHDKJ19-01-88)。

作者简介:曹寒(1985-),女,2009年毕业于西安交通大学机械设计与制造专业,工学硕士,高级工程师。现主要从事汽轮机转子与轴承相关研发、设计及汽轮机现场故障处理工作。

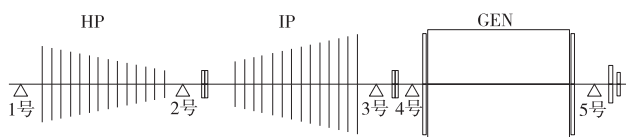


图1 某型再热背压机组轴系布置

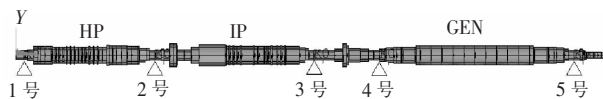


图2 轴系横振模化示意图

表1 轴系各轴承型式和基本参数

轴承序号	轴承型式	轴承内孔直径	轴承宽度
1	椭圆轴承	300	150
2	椭圆轴承	360	225
3	椭圆轴承	360	200
4	椭圆轴承	430	350
5	椭圆轴承	430	350

临界转速的计算采用有限元法^[1],计算内容包括轴系的临界转速以及对应的振型和对数衰减率等,临界转速计算结果如表2所示。

表2 轴系横振临界转速计算结果

序号	频率 Hz	对应转速 $r \cdot \text{min}^{-1}$	模态 和阶次	对数 衰减率	Q 因子
1	18.93	1135.91	GEN 第一阶	0.35	5.37
2	22.58	1354.87	IP 第一阶	0.30	8.53
3	23.70	1422.19	GEN 第一阶	0.16	19.95
4	24.25	1455.14	HP 第一阶	0.44	7.08
5	27.85	1671.22	IP 第一阶	1.13	3.32
6	30.37	1822.07	HP 第一阶	0.45	7.05
7	40.44	2426.38	GEN 第二阶	1.01	3.11
8	62.01	3720.43	IP 第二阶	0.94	3.36

图3是高压、中压和电机转子在轴系中的第一阶和第二阶振型。

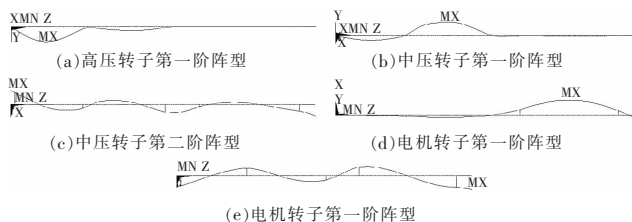


图3 各转子在轴系中的振型

根据有关文献^[2], Q 因子的设计允许范围如表3所示。从表2的计算结果可以看出,工作转速附近临界转速对应的 Q 因子都在设计允许范围内,因此机组可以安全稳定的运行。

表3 Q 因子设计标准

Q 因子范围	预期的运行情况
$Q < 2.5$	检测不到峰值响应,连续运行没有问题
$2.5 < Q < 5.0$	可检测到峰值响应,响应不大,转子经良好平衡后可在此转速下长期、连续运行
$5.0 < Q < 10.0$	易检测到峰值响应,高速平衡后可在此转速下长期、连续运行
$10.0 < Q < 25.0$	中等峰值响应,可能要现场平衡
$Q > 25.0$	需要新的平衡技术,或改进设计

注:当临界转速远离工作转速时(85%工作转速 \geq 临界转速 \geq 115%工作转速), Q 因子大于许允 Q 因子也可以^[2]。

2 轴系弯曲振动不平衡响应分析

根据大机组轴系振动设计导则,一阶不平衡量等于跨内质量乘以规定的偏心矩 $8 \mu\text{m}$ 。计算得到高压转子和中压转子的一阶不平衡量,响应监测点设置在汽机转子的3个轴承轴颈处。将一阶不平衡量分别加在高压转子和中压转子的中间位置,计算得到汽机转子各轴承轴颈处的响应曲线如图4所示,图4中的主要数据列于表4中。

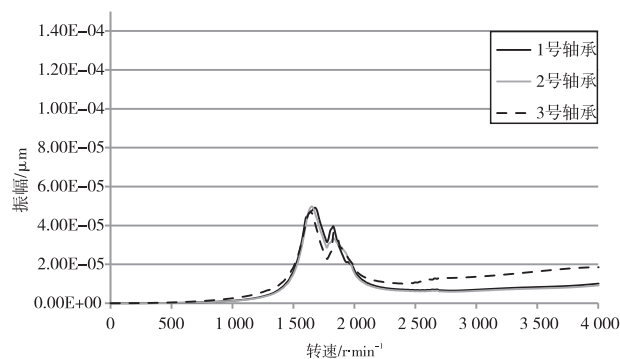


图4 加一阶不平衡量汽机转子各轴承处轴颈的响应曲线

从计算结果可以看出,在高压转子和中压转子加一阶不平衡量时汽机转子各轴承轴颈处的响应值都满足大机组设计导则要求。

表4 加一阶不平衡量时汽机转子各轴承轴颈处的最大响应值

轴承序号	最大响应峰峰值	3 000 r/min 时最大响应峰峰值
1号轴承	49	7
2号轴承	46	6.4
3号轴承	44	13.6

3 轴系扭振固有频率分析

轴系的扭振固有频率,首先将转子分段模化,

然后采用连续质量的传递矩阵法进行计算。扭振固有频率计算结果见表5,振型如图5~图8所示,计算得到的扭振频率均在避开范围外,有足够的安全性。

表5 扭振固有频率计算结果

模态	扭振频率 Hz
1阶	30.2
2阶	66.8
3阶	140.4
4阶	173.1

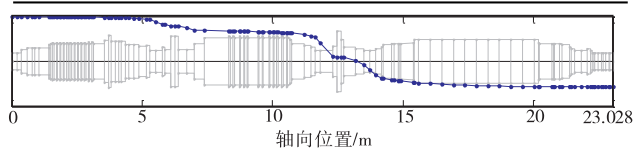


图5 该机组轴系扭振第一阶振型(30.2 Hz)

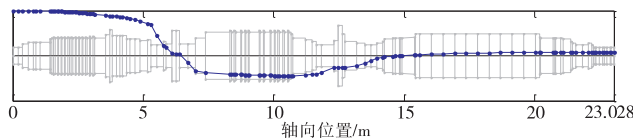


图6 该机组轴系扭振第二阶振型(66.8 Hz)

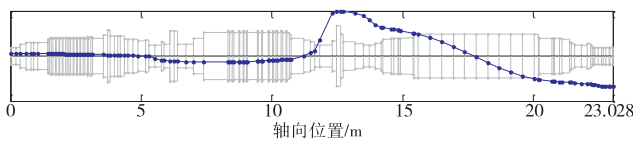


图7 该机组轴系扭振第三阶振型(140.4 Hz)

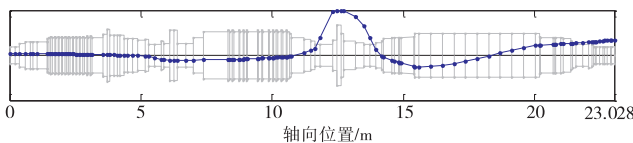


图8 该机组轴系扭振第四阶振型(173.1 Hz)

4 两相短路时轴颈剪切力计算

将扭矩激励分布加载在发电机转子上,机组在正常满负荷工况下,发电机所受的额定扭矩可由发电功率和转速计算得到。计算得到该大功率背压发电机组所承受的额定扭矩为两相短路时的扭矩,表达式为:

$$T = 7.613 \cdot e^{-5.04t} \sin \omega t - 3.806 \cdot e^{-3.91t} \sin 2\omega t + 0.745 \cdot e^{-5.18t}$$

计算得到两相短路时最大扭矩为 1.74×10^6

N·m,出现在3号轴承轴颈处,最大剪切应力为189.9 MPa,小于许用应力^[3],因此轴系的最大剪应力满足设计规范要求。

表6 两项短路时各轴承轴颈处扭矩和剪切应力

位置	最大扭矩 N·m	最大剪切应力 MPa
1号轴承轴颈	2.59×10^3	0.49
2号轴承轴颈	1.14×10^6	124.4
3号轴承轴颈	1.74×10^6	189.9
4号轴承轴颈	1.53×10^6	98.3
5号轴承轴颈	1.16×10^4	0.80

5 结语

由上述计算结果,可得以下结论:

(1)采用有限元法计算了某型轴系横向弯曲振动临界转速,考虑转子的剪切效应、回转力矩和陀螺力矩的影响,计算得到工作转速附近临界转速对应的Q因子都在设计允许范围内,因此机组可以安全稳定的运行^[4]。

(2)在高压转子和中压转子加一阶不平衡量,不平衡响应计算结果在3000 r/min下,汽机转子各轴承振动满足大机组设计导则要求。

(3)采用连续质量传递矩阵法计算了轴系的扭转固有频率,计算得到的扭振频率均在避开范围外,机组安全性满足要求。

(4)计算得到两相短路时的最大剪应力在3号轴承轴颈处,为189.9 MPa,小于许用应力,轴系的最大剪应力满足设计规范要求。

参考文献:

- [1]钟一鄂,何衍宗,王正等.转子动力学[M].北京:清华大学出版社,1987
- [2]申秀兰.国产首台600 MW超临界汽轮发电机组轴系振动特性的研究[J].动力工程,2009,29(7):640-644
- [3]陈瑞克.1000 MW超超临界汽轮发电机组轴系的稳定性[J].华电技术,2008,30(5):19-24
- [4]祁乃斌.某型燃气-蒸汽联合循环机组轴系振动特性研究[J].汽轮机技术,2010,52(2):116-119

风电场实验数据采集系统研究

许福霞¹ 李玉霞¹ 陈凤²

1. 东方电气风电有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文基于实验数据采集的需求, 研究了自动化数据采集工具。通过实验需求数据整理, 依托采集工具自动获取历史数据等相关需求数据, 无需人工干预。结果表明, 通过该自动采集工具, 让数据采集变得更方便、更智能、更简单。数据采集工具的采集结果满足实验室对实验数据的要求, 并可根据需求进行配置和选择, 对有效获取实验数据具有重要意义。

关键词: 实验数据; 采集工具; 自动化; 智能

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)01-0058-03

Research on Acquiring Experimental Data Acquisition System for Wind Farms

XU Fuxia¹, LI Yuxia¹, CHEN Feng²

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

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

Abstract: Based on the needs of experimental data collection, an automated data collection tool is studied in this paper. Through experiment demand data collation, and relying on the demand on the collection tool, the relevant demand data is automatically obtained through the collection tool, including historical data, without human intervention. The results show that this automatic collection tool makes data collection more convenient, smarter and simpler. The data collection tool fully meets the laboratory's requirements for experimental data, and is configured and selected according to needs, which is important for the efficient acquisition of data.

Key words: experimental data; acquisition tool; automation; intelligence

目前, 实验环节在整个工业生产、工业控制领域都是极为重要的环节, 决定了产品出厂质量好坏的重要环节。除此之外, 随着工业 4.0 时代的到来, 各个行业也在紧紧跟随国家智能制造的政策。智能实验平台的搭建也是越来越迫切需要, 不仅仅能够提供自动化能力, 同时也能保证实验结果更加正确, 为产品出厂提供更加可靠、更加精准的保障。

然而, 如何让我们实验结果更加逼近我们真实产品的情况? 那就是通过大量数据, 进行模型仿真, 从而不断优化我们的实验平台, 让我们的模型更加准确, 更加逼近我们的产品真实情况。所

以, 获取各种关键数据是保证整个实验过程的关键和核心。如果采用传统的人为搜集数据模式, 会带来几个问题, 分别有: ①数据采集工作繁琐又花时间, 会给采集人员带来很多繁琐工作; ②整个数据来源是否正确, 完全依赖数据采集人员的工作态度和工作效率; ③采集数据的规整、分类和初步处理需要由数据处理工程师或则实验数据使用工程师进行分类和处理。这些问题不仅仅会带来一些繁琐的人为工作量, 同时会让采集数据的正确性降低。所以, 开发一套可进行数据初步处理, 可自动定时通过条件筛选功能的数据采集工具是及其必要的。

收稿日期: 2020-06-29

作者简介: 许福霞(1980-), 女, 2006年毕业于湖南大学电气学院电气工程及其自动化专业, 本科, 工程师。现在东方电气风电有限公司研发中心主要从事风电机组测试技术。

1 数据采集工具硬件设计

数据采集工具主要是通过软件实现功能,硬件要求不高,仅仅只需要一台满足基础配置的电脑即可。甚至还可使用手机进行指令传送,采集数据并存储到指定电脑的指定路径。所以,数据采集工具硬件需要满足基本配置即可。

2 数据采集工具软件框架介绍

本文研究的数据采集工具主要依托实验数据需求,并配置可视化操作界面,让实验工程师,根据自己所需数据要求,进行操作,并选择时间段、数据名等相关条件下发数据采集指令。采集工具按照界面下发的指令,进行数据采集,并根据前端下发的指令,进行数据筛选,并自动存储。整个过程,只需要实验工程师进行指令设置,完全无人参与。数据采集工具的软件设计架构见图1。

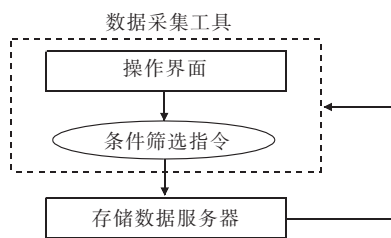


图1 数据采集工具软件框架

整个软件设计框架简单适用,以上框架仅仅是采集工具的基础框架,在该框架基础上可以衍生远程获取数据。只要保证网络安全,以及外网可达的情况下,便可在该框架基础上实现远程获取数据。以风电行业风机数据获取为例,远程获取数据的软件框架图如图2。

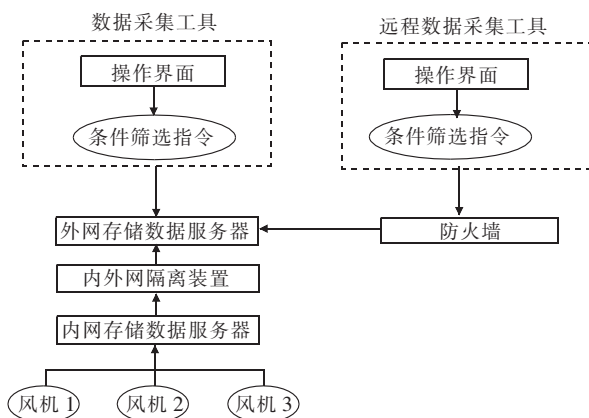


图2 远程数据采集工具软件框架

远程数据采集工具软件实现,必须要保证整个网络安全并满足电监令的网络安全规范标准。远程获取数据需要通过远程下发获取数据指令,并按照指令规则进行数据采集并存储,然后再返回到本地,从而使用。

3 数据采集工具软件设计

整个系统采用 Python 编程语言进行程序开发,并通过 HTML5 语言搭建可视化界面,并进行无缝对接,保证通过界面可准确、快速传达指令要求。

可视化界面根据实验工程师实验数据需求,进行合理布局,条件筛选逻辑合理完成。具体编程截图如图3。

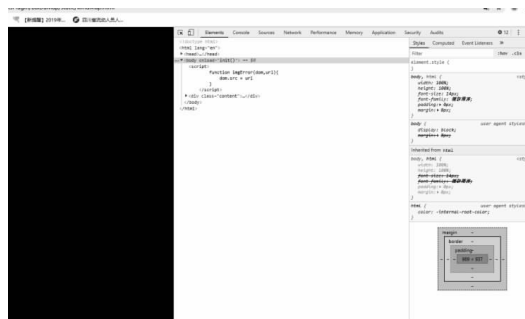


图3 HTML5 编程界面截图

后端采用 Python 编程,无缝对接前端下发指令,并执行。按照前端下发的指令完成数据采集,并存储到电脑的指定位置。程序编程界面如图4。

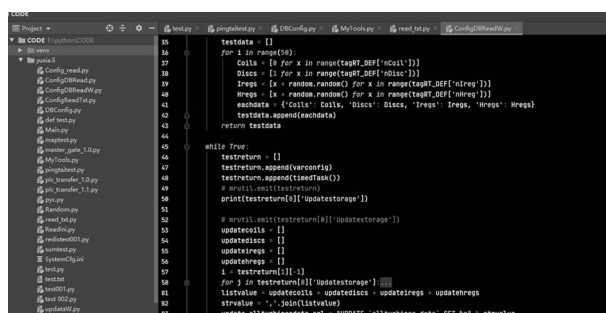


图4 Python 编程界面截图

4 数据采集工具使用

根据实验市数据使用工程师需求,进行系统设计,并开发出数据采集工具产品,产品操作界面如图5。

当然,该系统还可扩展,并在该软件设计框架下,按照实验市数据工程师要求进行优化和再开

发。通过数据采集工具可为实验数据提供一个有利采集工具,为实验数据采集提供了保障。



图5 产品操作界面截图

5 结语

本文就数据采集工具软件的开发和作用进行了研究,研究结论如下:

(1)该工具可实现远程或则本地有效获取实验

数据。

(2)该工具可自动获取所需数据,减少人为参与和时间耗费。

(3)该工具可按照实验数据需求完成所需数据采集并传回,同时可在不影响实验工程师工作的时间内进行数据采集,有效节约了实验工程师的有效时间。

(4)该工具可进行数据进行初步筛选和数据初步处理,可为实验工程师提供更加精准、有用的数据。

实验是产品出厂质量的保证,而数据又是实验过程的必需品。所以,数据采集工具也是整个工业领域内不可或缺的工具。它不仅能远程获取数据,也可以为我们实验工程节约宝贵的时间,让他们有更多的时间和经历去做有意义的事情。

集团要闻

东方电机绩溪抽水蓄能机组研制任务圆满收官

2021年1月31日23时,安徽绩溪抽水蓄能电站6号机组顺利完成15天考核试运行,具备投入商业运行条件,标志着东方电机绩溪高水头、大容量、高转速抽水蓄能机组研制任务圆满收官。

绩溪抽水蓄能机组研制任务圆满收官,再次彰显了东方电机高水头、大容量、高转速抽水蓄能机组研制国内领先、世界一流的水平。此前,绩溪项目“一年五投六并网”,创造了行业新纪录,东方电机绩溪项目团队以“牛气冲天”的成绩为即将到来的新春佳节献上了厚礼。

抽水蓄能电站是目前最具经济性的大规模储能设施,是清洁能源高效开发利用的重要手段。抽水蓄能机组被喻为行业“皇冠上的明珠”,其研发和制造,是水力发电行业最复杂、最难啃的“硬骨头”。

绩溪抽水蓄能电站安装6台单机300MW可逆式水泵水轮机-发电电动机组,是国内首批完全自主研发的650m超高水头、高转速、大容量抽水蓄能可逆式机组,全部机组及辅助设备均由东方电机成套供货。机组试运行期间和投入商业运行后稳定高效、参数优异,得到了现场参建各方的高度赞扬。机组运行期间,用户曾称赞“听到美妙的声音,感受到工业之美”,这是对东方电机抽水蓄能机组研发、设计、工艺、制造、现场安装调试等项目执行各环节最好的肯定。绩溪抽水蓄能电站全部机组投产,每年可节约标准煤21.6万吨,减排二氧化碳约47.5万吨、氮氧化物约1.079万吨、二氧化硫约2.879万吨。东方电机将一如既往以“绿色动力 驱动未来”为使命,推动能源清洁低碳安全高效利用,为实现“碳达峰、碳中和”目标贡献“东方”力量。

来源:东方电气网

TRIZ 理论在风电偏航系统改进中的应用和探讨

孙仲泽 苏宁列 阳小林

东方电气风电有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:在风电机组偏航系统设计中,按照满足驱动载荷设计,轴承外齿与驱动齿齿面强度常常不足,尤其是对于电机启动工况更甚。因此常常需要考虑增加驱动的数量,或者增大齿宽,这样带来成本的增加。基于 TRIZ 这一创新的方法论,进行头脑风暴,对驱动结构进行有方向性的优化改进,得出较多的新方案,供设计工程师评估和验证。本文以风电偏航系统为对象展开该方法论的探讨,供其他领域参考。

关键词:TRIZ; 创新方法; 风电机组; 偏航系统; 齿面

中图分类号:TM614

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)01-0061-04

Application and Discussion of TRIZ Theory in Improvement of Yaw System of Wind Turbine

SUN Zhongze, SU Ninglie, YANG Xiaolin

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

Abstract: In the yaw system design of wind turbines, according to the design of driving load, the strength of outer teeth of bearing and driving teeth is often insufficient, especially for motor starting conditions. Therefore, it is often necessary to consider increasing the number of drivers, or increasing the tooth width, which increases the cost. Based on the innovative methodology of TRIZ, brainstorming is carried out to optimize and improve the driving structure in a directional way, and many new schemes are obtained for evaluation and verification by design engineers. In this paper, the yaw system of wind power is taken as the object to discuss the methodology for reference in other fields.

Key words: TRIZ; innovative method; wind turbine; yaw system; tooth surface

风电机组偏航系统在机组控制系统的控制下实现风轮和机舱绕垂直方向的转动,从而使叶轮准确对风,最大限度获取风能。常规的偏航驱动系统由驱动电机、偏航减速机和回转轴承(也成偏航轴承)组成,风机控制器控制驱动电机,经减速器减速后由其输出齿轮驱动偏航轴承的外齿,实现偏航动作。

近年来,随着风电上网电价的逐渐下调以及优质风资源的逐渐减少大风轮机组的不断出现,导致风电整机厂商既要降低成本又要面临不断增大风轮直径带来机组偏航部分载荷增大相应增加用料成本的矛盾,这一矛盾给整机企业带来一定的困扰。

TRIZ 理论是近年来才传入国内,是由前苏联一位从事专利统计,同时也是一位发明家的阿奇舒勒先生对数万种发明进行分析总结出的一套理论。该理论在冷战时期作为一项国家机密在冷战时期前苏联的军事技术发展起到巨大作用。经过不断的充实和发展,该理论包含了技术矛盾、物理矛盾、物场模型等子理论以及各国家发展的不同流派。作为一种创新的方法论,它并不能直接得出发明的结果,而是为头脑风暴提供较为全面的指向性,能够让创新设计师快速的得到意想不到的结果,从而为改进优化提供充足的素材。

收稿日期:2020-09-15

作者简介:孙仲泽(1987-),男,2011年毕业于哈尔滨工业大学机械电子工程专业,硕士,高级工程师。现在东方电气风电有限公司风电研发中心从事结构设计。

1 创新问题解决流程

1.1 系统思维

谈到创新,必然要从系统上来考虑问题。著名科学家钱学森先生在《系统工程》中对系统有过准确的定义,是由若干要素以一定结构形式联结构成的具有某种功能的有机整体^[1]。系统内必然存在各个组件,各组件发挥各自的功能。系统可能包含子系统。系统的上级系统可称为超系统。

系统分析是对目标系统的功能进行建模的过程,分析的结果就是建立的功能模型,其中明确了功能关系、需要改善的功能结构等。

1.2 流程

对于目标的系统的改进问题,首先需要将问题提出,然后对该问题利用分析方法从不同的角度进行分析,得出问题的对立面(矛盾)。只要问题分析的够清晰透彻,便可应用上面提到的技术矛盾、物理矛盾和物场模型理论进行头脑风暴,再根据头脑风暴指明的创新方向构造出多种新方案,从这些备选方案中筛选评估得出需要的方案并最终实现(图1)。

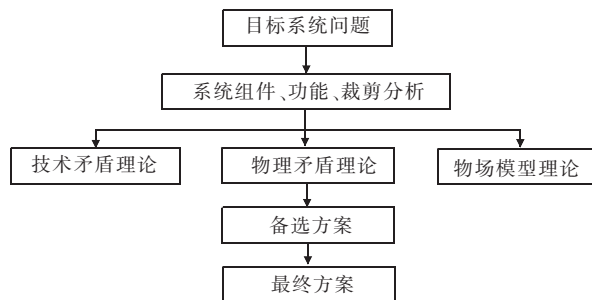


图1 创新问题的解决流程

2 偏航系统问题的提出

2.1 问题描述

在新机组设计中,随着机组功率等级的不断提高,按照满足驱动载荷设计,轴承外齿与驱动齿齿面强度常常不足,尤其是对于电机启动工况更甚^[2]。因此常常需要考虑反复选型和变更设计,多数都是通过增加驱动数量,增加参与啮合的齿数,增高齿面安全系数,这样成本增加了。目前国内风电整机制造商,多数都是采用类似的结构,同样面临类似的问题。

因此,问题可以描述为:偏航驱动系统设计应

保证驱动能力和齿面强度同等系数设计,成本最优,目前的瓶颈在齿面啮合处。

2.2 常规方案

为了把问题分析的更透彻,把常规的方法汇总如下:

(1)增加驱动和偏航轴承外齿齿宽,但因为驱动齿面修形为鼓形的原因,提升水平有限,且大尺寸的轴承和齿轮(直径数米)制造困难。

(2)增加驱动齿轮(含驱动电机+减速器)数量,使参与啮合的齿数增加,每个齿分担的载荷下降,目的实现,但带来成本增加的问题。

(3)增加软启动设备,采用变频器使电机启动过程平缓,使齿面载荷趋于平稳,但成本增加,且提升水平有限。

2.3 目标设定

采用新方案,使驱动能力和齿面强度达到同等系数,做到成本最优。

3 问题分析

利用 TRIZ 里的专用分析工具,先进行组件分析。如图2示意,ABCD四种组件,他们之间的关系在利用类似坐标系交点方式,有相互关系的组件在交点处做圆圈记号。得出图3的偏航系统的组件模型图。

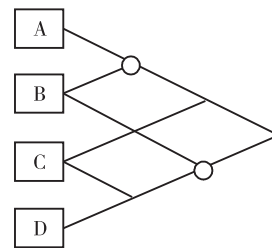


图2 组件结构关系示意图

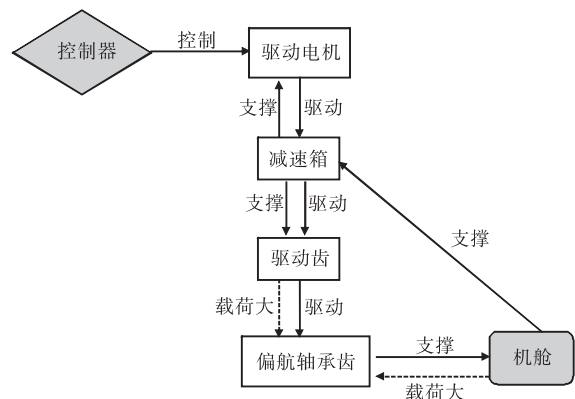


图3 组件和功能模型图

图中,实线箭头表示有利的作用,虚线箭头表示不利的作用。机舱为系统的作用对象,控制器作为偏航系统的超系统,分别以不同的外框形状表示。从图中可以清晰的看出系统的各组件和功能,为后续的解决方法提供了极大便利。

4 解决过程分析

对于常用的几种解决方法理论,这里做简单的说明,限于篇幅原因不做赘述,详见相应的书籍。下文的分析也只阐述技术矛盾和物场模型的分析过程。

(1) 技术矛盾理论

阿奇舒勒先生从上万种发明中统计抽象出一定的“规律”,总结为 40 种发明原理。以类似于坐标系的方式,形成矛盾矩阵。横坐标为数十个排列的恶化的参数,纵坐标为同名称的改善的参数,将最有效的发明原理中的几种列在纵横坐标交点框内,以提示发明的方向。当查表得到这几种原理后,进行有方向性的头脑风暴,便可以轻而易举的得出几种新的方案。

(2) 物理矛盾理论

物理矛盾是指某一物理参数的矛盾两面性。

解决物理矛盾的核心是实现矛盾双方的分离,有空间分离、时间分离、条件分离和整零分离。

(3) 物场模型理论

物场模型是指物 1 和物 2 以及它们之间的能量场,这个场可以是相互作用的磁场、引力场等。物与物之间存在的有用、不足、过度和有害的功能以不同的线性表达,形成物场模型。根据不同的模型归纳出 76 个标准解。标准解法是阿奇舒勒在 TRIZ 研究后期的最重要的课题,是 TRIZ 的高级理论之一。

4.1 技术矛盾原理

按技术矛盾原理的思路,分别对常规的方案在矛盾矩阵中查表列出解决过程:

(1) 增加驱动齿轮数量,使得承载齿数增加,分担载荷。表述为改善了应力,恶化了物质的量。

(2) 增加齿宽,使齿轮承载能力提高。改善了应力,恶化了可制造性。

(3) 软启动方案,通过降低启动力矩值,减小启动载荷。表述为改善了力,恶化了对象复杂性。

在矛盾矩阵中查表得出相应的发明原理。将查表所得的原理汇总在表 1 中,并进行联想和构造新方案。

表 1 矛盾矩阵表结论

改善参数 \ 恶化参数	26 物质的量	32 可制造性	36 对象复杂性
11 应力和压力	10 预先作用原理 14 曲率增加原理 36 相变原理	1 分割原理 35 物理和化学参数变化原理 16 未达到或过度的原理	-
10 力	-	-	26 复制原理 35 物理和化学参数变化原理 10 预先作用原理 18 机械振动原理

根据曲率增加原理,可以改变齿面的曲率半径,想到“内齿啮合驱动”的方案,将偏航驱动设置在偏航轴承内侧,可增加两个啮合齿轮的重合率,示意图如图 4。

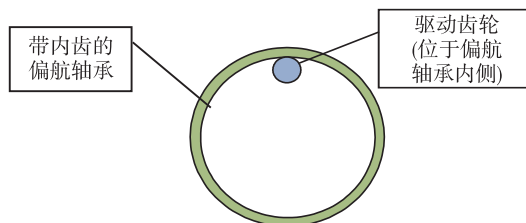


图 4 内驱示意图

根据分割原理,得到“一个减速箱输出两个驱动齿轮”的方案(图 5)。

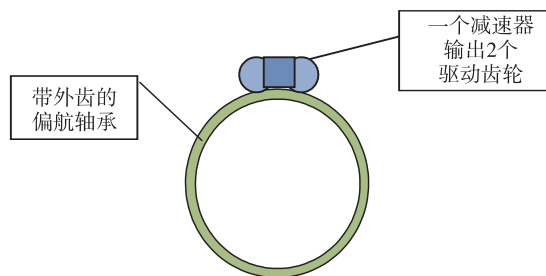


图 5 一个减速箱输出两个驱动齿轮示意图

根据复制原理提示,采用蜗杆涡轮传动的方

案。应用涡轮蜗杆原理,使参与承载的齿数大大增加,减少了单个齿面的载荷。

同时发现,有些原理并不能给予方向性的提示,这也实属正常。另外根据40个原理中的“气动与液压原理”得出液压驱动方案,完全摒弃了齿面的所有问题,同时使回转轴承制造成本大大降低。考虑偏航系统要旋转2圈,因此采用3套液压驱动杆交替驱动的方案,避免死角问题,如图6所示。

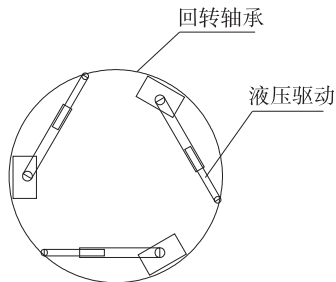


图6 液压驱动示意图

4.2 物场模型理论

按物场模型理论分析的思路,建立偏航驱动系统的模型,如图7所示偏航驱动和偏航轴承之间以机械场联系在一起,但驱动对轴承存在有害作用,示意为波浪线。

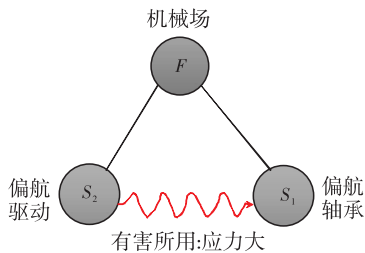


图7 偏航驱动系统的物场模型

(1)运用标准解 No. 15 并联的物-场模型:“一个可控性很差的系统已存在部分不能改变,则可并联第二个场。”如图8所示。如首先容易利用的风的气动力,使风机被动偏航。可采用小型风机增加尾翼的方式,可以大大减少片偏航载荷。

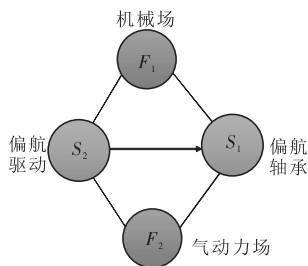


图8 增加气动场的模型

(2)运用标准解 No. 9 “在一个系统中有用及有害效应同时存在, S_1 及 S_2 不必互相接触,引入 S_3 来消除有害效应。”如图9示意,联想得到:①利用履带围绕在两个驱动周围,履带的可延展性包裹部分被驱动的外齿,如图10所示;②或者采用全链条传动,同样使参与承载的齿数大大增加,减少了单个齿面的载荷,如图11所示。

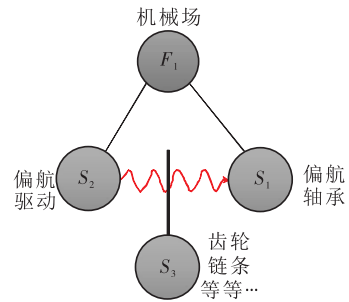


图9 引入第三个物的模型

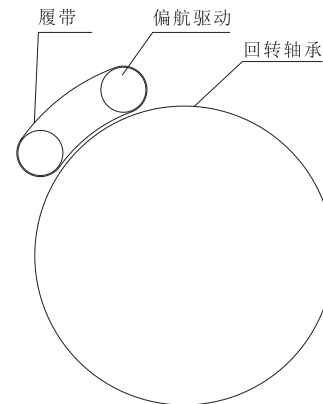


图10 增加履带方案

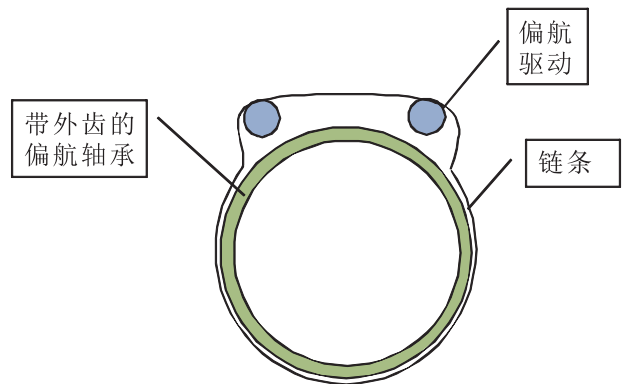


图11 全链条方案

4.3 方案汇总和对比

如表2所示,所有的备选方案,进行必要的评估

(下转第69页)

大型混流式水轮发电机组活动导叶 漏水量的分析研究

宋敏 李浩亮 张洪

东方电气集团东方电机有限公司,四川 德阳 618000

摘要:活动导叶漏水量影响到水力能量的利用、机组的正常运行、机组部件的破坏等多个方面,是混流式水轮发电机组的一项重要参数。活动导叶漏水量通常通过真机试验获取,在设计阶段的预测、分析与优化缺乏方法。本研究以结构静力学和CFD有限元分析为主,理论计算为辅,对导叶尾部不同结构形式对立面间隙漏水量的影响和法兰盘间隙对端面漏水量的影响进行分析和预测。结果表明,导叶尾部经过优化可显著减小立面间隙漏水量,法兰间隙的大小和端面漏水量正相关。最终得到减小活动导叶漏水量的优化方法,并能够有效预测机组的总漏水量。

关键词:活动导叶;有限元分析;立面间隙;法兰盘间隙;漏水量

中图分类号:TM612

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)01-0065-05

Analysis and Research on Guide Vane Water Leakage in Large Francis Hydro-turbine Unit

SONG Min, LI Haoliang, ZHANG Hong

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

Abstract: The guide vane water leakage strongly influenced the water energy utilization, effective operation, material damage and other issues of hydro-turbine. Thus, the guide vane water leakage is an important factor for hydro-turbine, which is usually measured in prototype tests but lack of prediction, analysis and optimization methods in design stage. Based on the structural statics and CFD finite element analysis (FEA) method and theoretical computation, this study analyzes the water leakage at guide vane vertical-surface gap with different trailing-edge shapes and the water leakages at flange plate gap. Results show that the optimum guide vane scheme obviously reduces water leakage quantity in vertical surface and the water leakage in end gap, which is relative to the flange plate gap size. The method is effective in achieving the optimization design of guide vane for reducing water leakage and predicting the water leakage quantity.

Key words: guide vane; FEA; vertical-surface gap; flange plate gap; water leakage

导水机构是水轮机的重要组成部分之一,作为导水机构中的重要部件,活动导叶的功能是形成和改变进入转轮水流的环量,以保证水轮机具有良

好的水力性能。工程中,活动导叶对水流引导的相关研究很多,当活动导叶具有良好的导水性能时,机组内部不良流态规模较小,机组水力效率较高,

收稿日期:2020-12-25

作者简介:宋敏(1979-),男,2002年毕业于甘肃工业大学流体系,工程硕士,高级工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事水轮机技术研发和技术管理工作。

李浩亮(1986-),男,2011年毕业于上海交通大学电子信息与电气工程学院,工学学士,理学学士,工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事水轮机技术开发工作。

张洪(1991-),男,2014年毕业于中国农业大学流体机械及工程专业,工学硕士,工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事水轮机技术开发工作。

运行稳定性与安全性较强^[1-3]。除此之外,活动导叶还具有流量调节与控制的功能。具体而言,活动导叶关闭时,应有良好的密封性能,漏水量不应超过该机组的合同规定值,否则漏水量会造成水能资源浪费,也会加剧间隙空蚀破坏,严重情况还可能造成机组蠕动或者无法正常关闭,然而导叶漏水量的相关研究较少,尤其是漏水量的优化控制和计算方法,尚未有深入细致的研究与讨论。

中国国家标准规定,新安装的圆柱式导水机构导叶漏水量不应大于额定流量的千分之三^[4]。通常只有在机组安装调试完成后,通过闸门水位压差测量法^[5]、通气孔测量法(时间容积法)^[6]、节流孔测量法^[7]等方法对真机机组漏水量开展测量。在设计阶段下,导叶漏水量缺乏有效和成熟的分析优化手段,如何将导叶漏水量控制在规定范围内,成为了机组设计中的一大问题。水力机械的相关研究中,间隙流动的研究是一大热点,结合三维流动分析的方法,可以有效的模拟预测水轮机、水泵等机组的间隙流动特征^[8-10]。本文在此基础上,考虑间隙流动以及结构对间隙的影响情况,结构静力学和CFD有限元分析为主,理论计算为辅,依据某水电机组的真实参数,对活动导叶漏水量开展研究。导水机构关闭时活动导叶的漏水量主要受导叶立面间隙,导叶端面间隙、导叶法兰盘间隙、密封结构及材质等诸多因素的综合影响。大型混流式水轮发电机组活动导叶通常设有金属+橡胶组合式端面密封阻止漏水,漏水量的主要影响因素为导叶立面间隙漏水和导叶法兰盘间隙绕流漏水。因此,本文对这两项关键影响因素进行详细分析研究,从而较为全面的预测水轮机组导叶漏水量,为机组设计阶段针对导叶漏水量的优化控制和预测提供解决方案。

1 立面间隙漏水量分析

1.1 仿真对象与设置

某大型混流式水轮机组安装有24个活动导叶,活动导叶由导叶体、上端轴、下端轴组成,活动导叶的上端轴与连接机构相接,通过控制环操作进行活动导叶的开启和关闭。活动导叶在关闭状态时,每个导叶的首尾搭接形成沿圆周方向的封闭状态,实

现切断机组水流的作用(图1)。

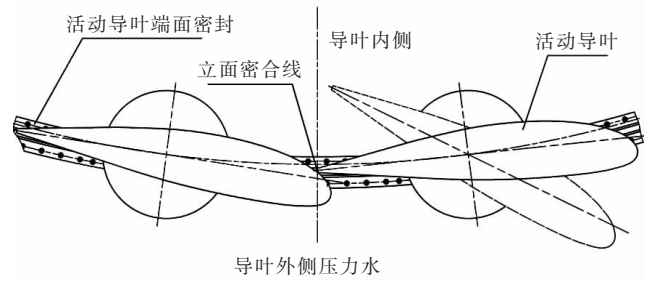


图1 活动导叶关闭状态



图2 活动导叶有限元仿真对象

仿真分析时,选取两两相邻的五个导叶为简化模型进行分析(图2所示)。最外侧两个导叶头尾搭接位置设定为整体圆柱坐标系下的径向耦合,其余导叶的头尾搭接位置设置为线到面的动摩擦接触,载荷和边界条件按照真实情况加载,通过增大导叶的操作力矩来模拟导叶的压紧行程。在此设定下,中间位置导叶的立面间隙结果可视为接近真实结果,该间隙可用作漏水量相关计算与分析,计算过程采用结构静力学有限元分析方法。

1.2 结构方案对比

结构方案分为传统方案和优化方案两组。如图3所示,传统方案的活动导叶头尾搭接面未做特殊处理。理想状态下,在活动导叶关闭时,导叶尾部与相邻导叶头部从上到下完全接触密合,没有间隙。实际情况下,在接力器压紧行程产生的导叶关闭压紧力作用下,导叶产生扭转变形且上下变形不一致。此时,两导叶之间密合部位变形也出现从上至下不一致的现象,因此在密合位置形成一定的立面间隙。

为了减小导叶压紧之后立面间隙的上下不一致,减小总间隙,采用图4所示的优化结构方案,即对导叶的尾部进行优化。导叶尾部密合线预留一个楔形斜面,使导叶尾部断面厚度形成上窄下宽的形状,在导叶理论关闭位置,导叶尾部与相邻导叶

头部从上到下形成一个楔形初始间隙。在接力器压紧行程产生的导叶关闭压紧力的作用下,导叶产生扭转变形,通过合理的楔形间隙尺寸,使密合部位从上到下接触密合,从而最大程度的减小立面间隙大小,导叶尾部楔形斜面的形状和大小将依据有限元分析来最终确定。

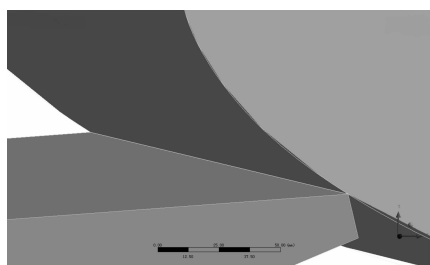


图3 传统“导叶立面密封”方案

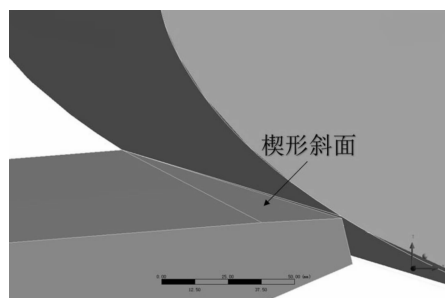


图4 优化后“导叶立面密封”方案

1.3 立面间隙漏水量预测

在预测立面间隙漏水量时,需要获取活动导叶的立面间隙几何特征。首先,需要通过有限元计算得到正常停机工况下的活动导叶变形量,然后使用特定算法求解出活动导叶密合位置的立面间隙。本研究中,可以发现在两导叶密合位置,由于接力器压紧,使得该位置出现显著的导叶变形,有限元计算所得传统方案与优化方案活动导叶密合位置的变形如图5与图6所示(将计算区域局部变形趋势放大58倍)。传统方案在导叶密合位置,导叶头部和尾部都呈弧形变形,导叶尾部变形更大,密合位置出现较为明显的立面间隙;优化方案在导叶密合位置的变形明显区别于传统方案,导叶尾部弧形变形趋势变小,导叶头部变形区域靠近上部,密合位置的立面间隙不明显。在此基础上,提取接触区域节点的位置数据和变形量数据,根据上述两组数据可以得到接触区域相关节点在变形后的具体间隙。传统方案的立面间隙面积为496.31 mm²,优化方案的立面间隙面积为46.13 mm²。

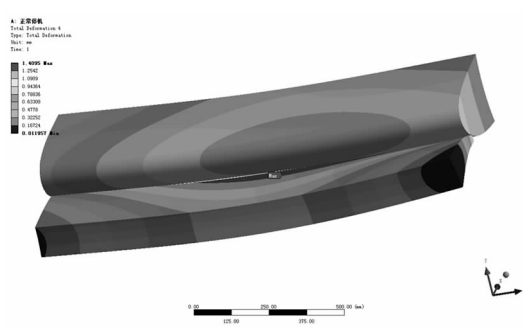


图5 传统方案活动导叶接触区域变形(趋势放大58倍)

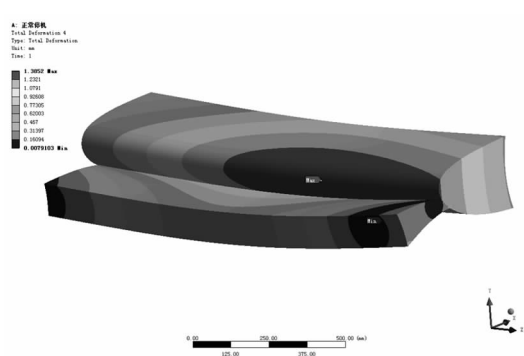


图6 优化方案活动导叶接触区域变形(趋势放大58倍)

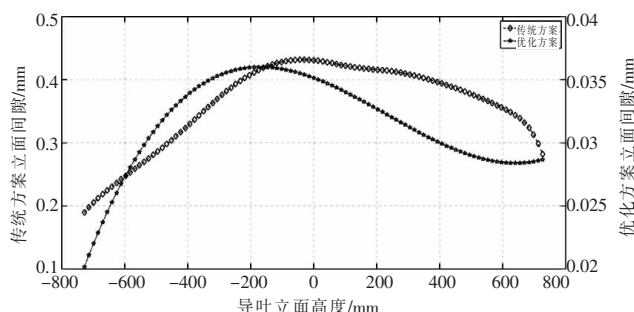


图7 两方案活动导叶立面间隙

活动导叶立面间隙漏水量 Q_z 的预测按照小孔射流理论计算^[11],其计算公式为:

$$Q_z = \mu \sqrt{2g \cdot \Delta H A} = \mu \sqrt{2g \cdot \Delta H} \sum_{i=1}^{24} A_i \quad (1)$$

式中, μ 为经验系数,通常取 0.62^[12]; A_i 为第 i 个导叶的立面间隙面积,这里假设所有导叶的立面间隙面积相同; A 为立面间隙泄漏截面面积; g 为重力加速度; ΔH 导叶间隙前后水位高差。

本研究中的大型混流式水轮机组安装有 24 个活动导叶,对 24 个导叶立面间隙的漏水量进行累加可以得到机组活动导叶立面间隙的总漏水量 Q_z 。由表 1 可见,传统方案的立面间隙总漏水量约为 0.465 9 m³/s,优化方案的立面间隙总漏水量为 0.043 3 m³/s,仅为传统方案的 9.3%,机组正常关

闭时活动导叶的立面间隙和立面间隙漏水量都得到了显著的降低。

表1 轴向水推力数值计算结果

方案	立面间隙总面积/mm ²	立面间隙总漏水量/m ³ ·s ⁻¹
传统方案	11 911.44	0.465 9
优化方案	1 107.12	0.043 3

2 法兰盘间隙绕流漏水量分析

除了活动导叶立面间隙引起的间隙及泄漏以外,活动导叶法兰盘间隙处也存在一定的泄漏。活动导叶的中轴颈和下轴颈与导叶本体交接位置有法兰盘,法兰盘与顶盖、底环相应导叶轴孔之间存在间隙(图8所示),机组上游侧水流可以通过此处间隙流到下游侧。由于加工误差和装配误差等因素的制约,此处最小许用间隙为 a mm。本研究中,将径向间隙尺寸分别设置为 a mm, $2a$ mm 和 $3a$ mm 三种方案,进行敏感性对比分析。

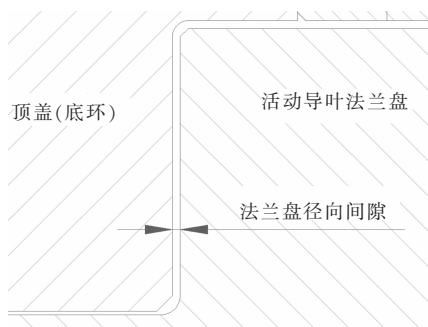


图8 活动导叶轴颈法兰盘间隙示意图

基于计算流体动力学,对法兰盘间隙模型漏水量进行分析,间隙进口设置为压力进口边界,间隙出口设置为压力出口边界,其余区域设置为无滑移壁面。通过计算得到单个法兰盘间隙的漏水量和整个机组因为法兰盘间隙产生的漏水量,如表2所示。由表2可得,总法兰盘间隙漏水量随间隙尺寸增大而增大。若以 Q_f (单位为 m^3/s) 代表总法兰盘间隙漏水量, h_f (单位为 mm) 代表间隙尺寸,可得两因素关系式如下线性关系:

$$Q_f = b_1 h_f + b_2 \quad (2)$$

式中, b_1 与 b_2 为常数, $b_1 = 0.204 3$, $b_2 = 0.051 8$ 。由此可见,总法兰盘间隙漏水量与间隙尺寸两因素呈显著的正相关。

表2 活动导叶法兰盘间隙漏水量

$m^3 \cdot s^{-1}$

方案	单个法兰盘间隙漏水量	总法兰盘间隙漏水量
间隙 a mm	$5.269 3E - 03$	0.252 9
间隙 $2a$ mm	$9.727 9E - 03$	0.466 9
间隙 $3a$ mm	$1.378 1E - 02$	0.661 5



图9 法兰盘间隙绕流流态

3 真机导叶漏水量

该大型混流式水轮机组活动导叶头尾交接位置采用的是传统方案,法兰盘径向间隙为 $2a$ mm,可知理论计算的活动导叶总漏水量立面间隙漏水量 $0.465 9 m^3/s$ 与法兰盘间隙绕流漏水量 $0.466 9 m^3/s$ 之和为 $0.93 m^3/s$;该电站经过容积法测得导叶漏水量为 $0.97 m^3/s$ 。分析计算的活动导叶漏水量和真机测试得到的活动导叶漏水量非常接近。

4 结语

通过分析活动导叶漏水量最主要的两个影响因素:立面间隙漏水量与法兰盘间隙绕流漏水量,可以大致得到整个机组的漏水量,且与真机导叶漏水量非常接近。

活动导叶立面间隙受接力器压紧的影响较大,将传统活动导叶等截面尾部变成上窄下宽的楔形斜面结构,导叶关闭、接力器压紧后,优化方案的活动导叶的立面间隙面积和立面间隙漏水量大幅减小,仅为传统方案的 9.3% 左右;法兰盘间隙绕流的漏水量和法兰盘间隙的大小线性正相关,受加工工艺和现场安装的影响,设计阶段要设计合理的法兰盘间隙;通过对机组活动导叶进行优化设计,可以达到有效减小活动导叶漏水量的目的。

参考文献:

[1] Li D, Gong R, Wang H, et al. Analysis of vorticity dynamics for hump characteristics of a pump turbine model [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(8): 3641 - 3650

[2] 陶然, 肖岩富, 杨魏等. 可逆式水泵水轮机泵工况的驼峰特性 [J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(11): 927 - 930

[3] Yao Y, Xiao Y, Zhu W, et al. Numerical analysis of a model pump-turbine internal flow behavior in pump hump district [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014, 22(3): 032040.

[4] GB/T 15468 - 2006, 水轮机基本技术条件 [S].

[5] 莫剑, 田海平, 付亮. 水轮机导叶漏水量的测评方法研究 [J]. 湖南电力, 2010, 30(4): 11 - 13

[6] 赵辉, 储百生, 陈林. 基于水轮机导叶漏水量简易测定方法的探

讨 [J]. 水电站机电技术, 2016, (10): 9 - 10

[7] 曹卫华, 赵越, 陈金霞. 测量水轮机导叶漏水的标准节流孔板法 [J]. 大电机技术, 2008, (3): 34 - 37

[8] Zhang D S, Shi W D, Chen B, et al. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump [J]. Journal of Hydrodynamics Ser. B, 2010, 22(1): 35 - 43

[9] Rivetti A, Lucino C, Liscia S, et al. Pressure pulsation in Kaplan turbines: Prototype-CFD comparison [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(6): 062035

[10] 廖伟丽, 许联峰, 刘胜柱. 基于雷诺应力微分模型模拟轴流式水轮机轮缘间隙流动 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 38 - 43

[11] 康振国. 水电机组误启动原因分析及对策 [J]. 水力发电, 2016, 42(11): 76 - 79

[12] 陈崇彬. 基于钢管道上平段容积法导叶漏水量测量与计算 [J]. 中国水能及电气化, 2014, (8): 63 - 66

(上接第 64 页)

和论证,即可成为有效的系统改进之道。

表 2 方案汇总和可行性对比

序号	方案名称	优缺点	是否可行
1	内齿啮合驱动	简单,但提升有限,需改变格局	是
2	一个减速箱输出两个驱动齿轮	需增加一个驱动齿轮,重新设计	是
3	蜗杆涡轮传动	简单实用,需改变结构	是
4	液压驱动	可靠,需改变格局	是
5	下风向风机	不适用大型风力发电机组	否
6	增加尾翼	减少部分偏航载荷,增加新物	是
7	增加履带包裹	增加新物,设计较复杂	否
8	链条传动	增加新物,链条设计	是

5 结语

综上所述,通过学习 TRIZ 理论并应用到实际存在的风电偏航系统改进设计中,从系统组件模型分析到利用技术矛盾、物场模型分析工具提出了解决目前偏航齿面承载强度不足问题的 8 种新方案。如果这几种方案中通过评估某一方案真正实施,可以较明显的减少机组成本,带来可观的经济效益。

同时,通过 TRIZ 这一创新的方法论在风电领域的应用,为拓展到其他领域提供参考。

参考文献:

[1] TRIZ 进阶与实践:大道至简的发明方法 [M]. 赵敏,张武城,王冠殊. 北京:机械工业出版社,2015. 10

[2] 董江东. 多工况风电偏航减速机齿轮齿接触机理研究 [D]. 湖南大学,2011

欢迎投稿,欢迎订阅!

某混流式水轮机转轮上腔压力优化设计

黄世海 邓鑫 李浩亮 吴晓莉 邵何锡

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文以国内某混流式改造机组为研究对象, 为降低转轮上腔的压力值, 通过增加转轮泄水孔孔数和增大孔径, 以及在泄水锥面开孔的方式优化该位置的水力特性。采用 CFD 软件对结构优化前、后的水力模型进行了对比分析计算。结果表明, 结构优化后转轮上腔处的压力得到了有效降低, 流经止漏环的漏水量也明显减少。研究结果具有一定的工程应用价值。

关键词: 混流式水轮机; 转轮上腔; 结构优化; CFD 分析

中图分类号: TM612

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)01-0070-03

Optimum Design of Upper Cavity Pressure of the Runner of a Francis Turbine

HUANG Shihai, DENG Xin, LI Haoliang, WU Xiaoli, SHAO Hexi

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

Abstract: In this paper, a retrofitted Francis turbine in China is studied by increasing the number of runner drain holes and the apertures, as well as punching holes on the runner cone to optimize the hydraulic characteristics and reduce upper cavity pressure of the runner. The comparative analysis and calculation of the hydraulic model before and after structural optimization are carried out with CFD software. The results show that, after the optimization of the structure, upper cavity pressure of the runner is reduced effectively, the leakage through the wearing ring is also decreased significantly. The research results have some engineering application value.

Key words: Francis turbine; upper cavity of the runner; optimum structure; CFD analysis

混流式水轮机能适应很宽的水头范围, 而且结构紧凑, 运行可靠, 效率高, 是水电站应用最广泛的一种机型。近年来, 上世纪投运的很多电站由于使用年限较长, 设备老化率逐渐增加, 导致机组经常出现内部流态紊乱, 机组综合效率下降严重^[1]。因此, 采用新技术对这部分机组进行增容改造, 显得非常有必要^[2]。

随着计算机科学的进步, CFD 仿真技术得到了快速发展, 在某些工程领域已取代了部分模型试验。目前, 无论是新电站的研发设计还是老电站的增容改造, CFD 仿真技术都发挥着巨大作用, 为水轮机压力脉动、空化空蚀、性能预估、优化设计等方面的研究提供了强大的技术支撑。这不仅大大提

高了水轮机的综合性能, 还缩短了研发周期^[3,4]。

本文选择国内某混流式改造机组为研究对象, 为解决改造后转轮上腔压力过高, 影响机组运行中推力轴承轴瓦温度较高的问题, 提出了增加转轮泄水孔孔数和增大孔径, 以及在泄水锥面开孔的优化方案, 并通过 CFD 软件对结构优化前、后的水力模型进行了对比分析。

1 优化方案

原已投运的设计方案中, 转轮上的泄水孔为 12 个, 泄水锥面上未开孔。为降低转轮上腔的压力值, 优化方案将转轮上的泄水孔由原来的 12 个增加到 16 个, 并将孔径增大至原来的 1.1 倍。此外, 在

收稿日期: 2020-12-25

作者简介: 黄世海(1977-), 男, 2000年毕业于甘肃工业大学机械设计专业, 本科, 高级工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司产品开发部从事水轮机设计工作。

泄水锥面下端圆周均布开设 16 个 $D100$ 的竖孔,使泄水锥内的水体与转轮叶片间的水体连通。具体优化方案示意图如图 1 所示。

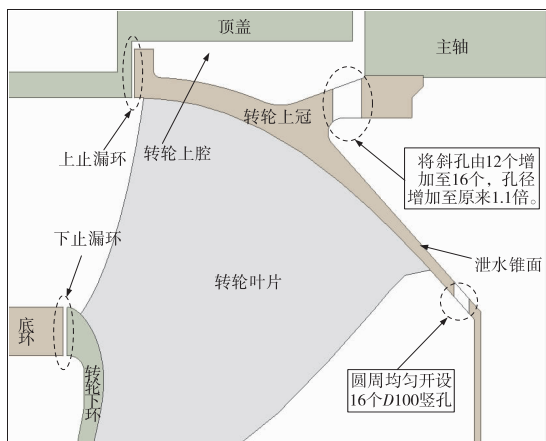


图 1 结构优化方案示意图

2 数值计算模型

2.1 基本方程

目前,水轮机水力设计与分析计算过程中,采用的水力模型是假定过流通道的几何形状。通过计算流体动力学分析方法对 N-S 方程进行数值求解,再根据计算结果对水力模型进行迭代优化直至达到预期目标,最后获得流场的速度、压力、流量等水轮机内部流动参数^[5]。本文采用商业 CFD 软件 ANSYS-CFX 对转轮上腔的水力模型进行分析计算,湍流模型选择工程上应用最为广泛的 $k-\varepsilon$ 模型^[6],其方程为:

连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

k 方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \mu_j k - \left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \rho P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \mu_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \rho \frac{\varepsilon}{k} C_{1\varepsilon} P_k - \rho C_{2\varepsilon} \varepsilon \quad (4)$$

其中,涡团粘性系数为 $\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$

$$\text{湍动能生成项为 } P_k = \frac{\mu_i}{\rho} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j}$$

式(1)至式(4)中, ρ 为流体密度; x 为坐标轴, μ 为时均速度;式中各经验系数取值为: $C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

2.2 计算工况和边界条件

由于模型圆周对称,为减少计算工作量,结构优化前,取 1/12 模型进行计算,结构优化后,取 1/16 模型进行计算,模型两侧对称面做旋转耦合约束。为提高数值模拟的精确性,水力模型的网格划分采用高精度的六面体结构网格,并对连接部位的网格进行优化。本文主要考察正常运行工况和两个极限工况下(极限工况一为机组运行时可能存在的最大水头工况,极限工况二为上、下游洪水水位设计工况)转轮上腔的压力分布和上、下止漏环的漏水量。机组转速为 214 rpm,数值模型计算收敛精度平均残差小于 10^{-5} 。数值模拟边界条件按图 2 施加,结构优化后,机组各工况施加的载荷如表 1 所示。结构优化前,计算模型无 Dout 边界条件,且 Ain 处的进口流量为结构优化后的 4/3 倍,其它边界条件则与结构优化前的相同。

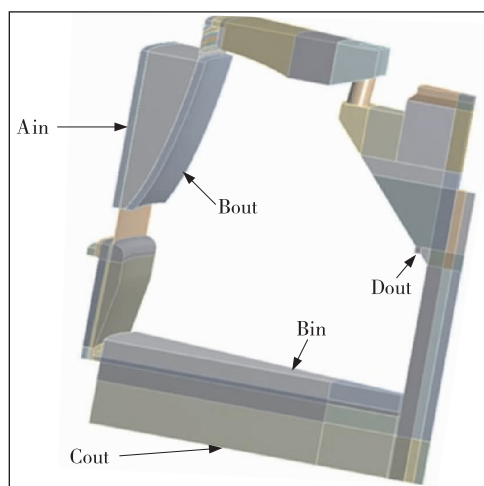


图 2 水力模型与边界条件

表 1 各计算工况边界条件

边界域	边界类型/单位	正常工况	极限工况一	极限工况二
Ain	进口流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	22 155	20 872	19 110
Bin	进口压力 P_1/MPa	0.106	0.175	0.365
Bout	出口压力 P_2/MPa	0.528	0.696	0.712
Cout	出口流速 $V/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	13.135	12.374	11.330
Dout	出口压力 P_3/MPa	0.094	0.163	0.352

3 计算结果分析

由图3至图5可知,转轮上腔压力在径向方向几乎是线性递减的。如图3,结构优化前,正常工况下转轮上腔的最大水压为0.365 MPa,这与电站现场的实测压力值0.36 MPa几乎一致,这也证明了计算模型的准确性。图3至图5的数据表明,不同工况下,结构优化后转轮上腔的水压均有降低。其中,正常工况下转轮上腔的最大水压降低了16.7%。极限工况一和极限工况二最大水压则分别降低了20.5%和4.2%。

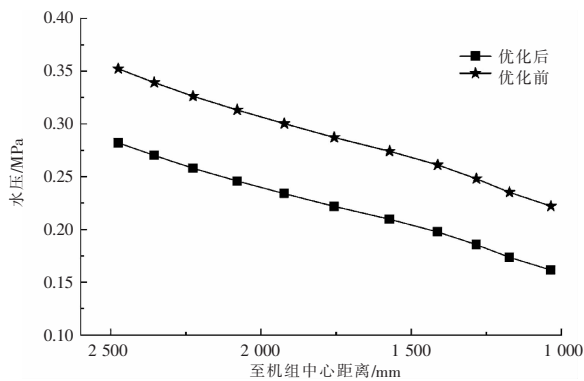


图3 正常工况转轮上腔水压分布

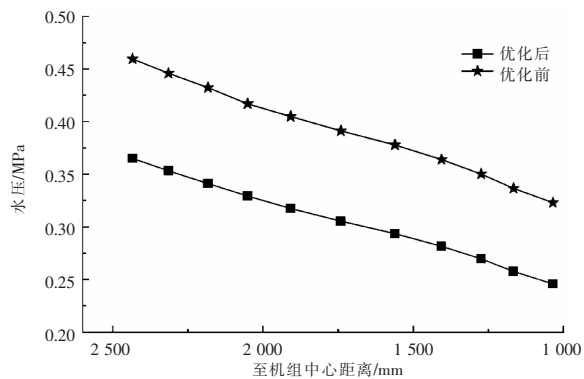


图4 极限工况一转轮上腔水压分布

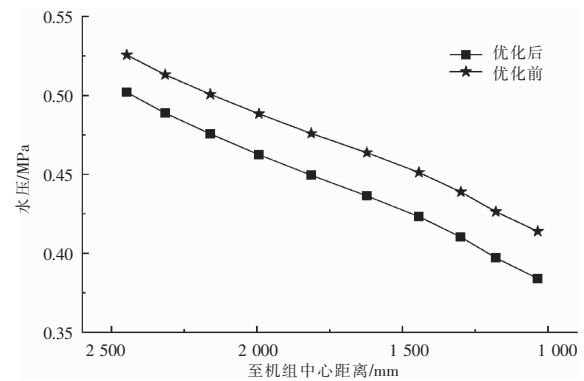


图5 极限工况二转轮上腔水压分布

从图6的统计数据可知,结构优化后,转轮上腔的平均水压也得到了降低,正常工况下转轮上腔的平均水压降低了23.9%,极限工况一和极限工况二转轮上腔的平均水压分别下降了20.5%和7.2%。转轮上腔水压降低的同时,也可以降低推力轴承的轴瓦温度。从图7可知,正常工况下,顶盖上止漏环的漏水量在结构优化后降低了26.5%,在极限工况二则降低了44.7%,下止漏环的漏水量下降得更为明显,三种工况下都接近80%。

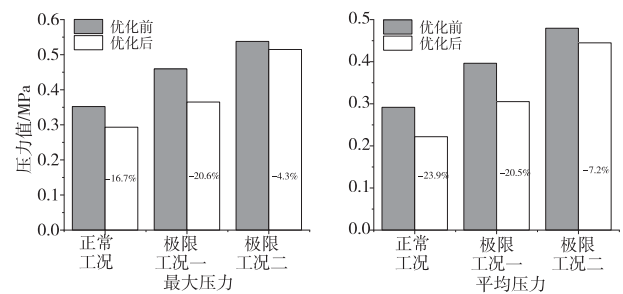


图6 转轮上腔水压力对比

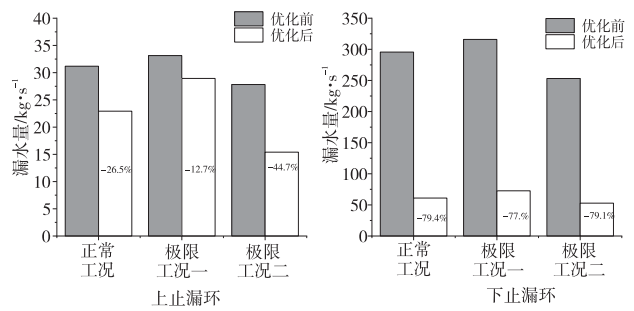


图7 止漏环漏水量对比

4 结语

增加转轮泄水孔数量和增大孔径,以及在泄水锥面上均匀开设一定数量的圆孔,可以有效降低转轮上腔的压力分布和止漏环的漏水量。以本文的研究对象为例,机组正常运行工况下,过流面最大压力降低了16.7%,平均压力降低了23.9%,上止漏环漏水量下降了26.5%,下止漏环漏水量下降了79.4%。本文的研究结果为混流式机组的增容改造工作提供了一定参考。

参考文献:

[1] 彭忠年,陈锐,莫为泽等.混流式水轮机水力设计技术的研究和应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2018,16(5):479-486

(下转第76页)

水泵水轮机转轮上下腔平压方式研究

刘冬 李浩亮 黄世海 周顺

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要:水泵水轮机转轮进口到上下止漏环之间的上下水推力不平衡,会引起机组正向水推力过大或特定工况下反向推力过大而造成机组抬机的现象,现比较有效的解决方案有间隙平压和平压管平压两种。本文主要研究了两种平压方式对水力特性、水推力及转轮泄漏量的影响,结合其影响程度分析出了最优设计方案。

关键词:水泵水轮机; 转轮上下腔平压; 间隙平压; 平压管平压

中图分类号: TM612

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)01-0073-04

Research on Flat-pressing Mode of Upper and Lower Cavities of Pump-turbine Runner

LIU Dong, LI Haoliang, HUANG Shihai, ZHOU Shun

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

Abstract: From pump turbine runner inlet to the upper and lower stop ring, the upper and lower water thrust imbalance causes too large forward thrust or reverse thrust under certain operating conditions, resulting in the phenomenon of turbine jack up. Two effective solutions are clearance flat pressure and flat pressure pipe flat pressure. In this paper, the influence of two flat pressure modes on hydraulic characteristics, hydraulic thrust and runner leakage is studied, and the optimum design scheme is analyzed.

Key words: pump turbine; runner upper and lower cavity flat pressure; clearance flat pressure; flat pressure pipe flat pressure

水泵水轮机转轮进口到上下止漏环前水压力和水压力接触面积相比常规水轮机有很大的差异。如果转轮上下腔压力差异较大,则会造成转轮进口到上下止漏环之间上下水推力不平衡,出现机组正向水推力过大或特定工况下反向推力过大而造成机组抬机现象,对机组安全稳定运行造成影响。转轮上下腔压力差原理一般认为是转轮上下止漏环型式和过流面形状的不同,造成转轮上下腔泄漏量的不同,因此当同样压力的水流通过上冠和下环进口间隙时,会造成减压量不同,从而形成转轮上下腔的压力差。

在水泵水轮机上增加外平衡管设计,此设计可使转轮上下腔联通,一旦转轮上下腔有压力差,压力水就会自动平压,来达到上下腔压力平衡的目的。

的。但此方法理论研究基础薄弱,还没有建立转轮上下腔外平衡管量化计算的理论体系,因此基于对转轮上下腔外平衡管的需求,同时为今后水泵水轮机转轮上下腔外平衡管技术提供理论支持和宝贵的设计经验,有必要对外平衡管技术的机理作进一步的理论分析和计算研究,同时对增大间隙方法的机理也应作进一步的理论分析和计算研究,对两种方法的减压效果进行量化对比计算,进一步优化顶盖、转轮上下腔及止漏环结构设计。

1 水泵水轮机水力特性数值分析研究概述

1.1 水泵水轮机转轮平压问题研究思路

了解水泵水轮机转轮上冠流道及下环间隙内

收稿日期: 2020-12-25

作者简介: 刘冬(1989-),男,2011年毕业于中国农业大学水利与土木工程系热能与动力工程专业,本科,工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司产品开发部主要从事水轮机设计工作。

部流动特性,认知水泵水轮机在不同工况下,转轮间隙尺寸与间隙流道内部水压力及泄流量的关系;在确定的间隙设计值基础上,增设转轮上冠流道与下环间隙之间的平压管,进行平压管及转轮间隙整体内部流动水压力特性数值模拟分析,认知在特定的转轮间隙条件下,平压管对转轮水推力的影响,为水泵水轮机转轮平压方案设计提供依据。

研究分两阶段进行,首先研究转轮间隙尺寸与间隙流道内部水动力特性,分析转轮间隙值对水压力及泄漏量的影响^[1-5];第二阶段,在确定的有利转轮间隙设计值基础上,增设转轮上冠流道与下环间隙之间的平压管,进行转轮间隙内部流动水压力特性数值模拟分析^[6-9]。

1.2 计算工况

根据研究思路,在未配置平压管的方案中,选取水轮机运行工况作为分析转轮水推力的条件,共计42个工况点,再加计4个间隙方案,共建立4个不同尺寸间隙的模型,168次数值模拟计算。

确定配置平压管的方案中,间隙值选取为20mm,建立配置平压管的计算域模型,水轮机运行工况作为分析转轮水推力的条件,共计42个工况点,42次数值模拟计算。

2 水推力计算结果及分析

水泵水轮机顶盖结构从外形看基本都属于箱型结构^[10-11],承受控制环、水导轴承和主轴密封等结构的重力;水力不平衡、转动部件不平衡和电磁拉力不平衡等径向作用力;还承受活动导叶前和无叶区之间的相对高压水压力,止漏环前和止漏环后的相对低压水压力;水泵水轮机机组运行过程中工况转换复杂,各个工况载荷有所差别,本文以水泵水轮机最典型的水轮机工况作为分析工况。

依据前述方法,按无平压管和有平压管两方案对水泵水轮机转轮上冠流道及下环间隙内部流动进行数值模拟,下面分别介绍流动数值模拟结果。

2.1 转轮平压方案转轮上下腔流道内部流动图

为了直观了解转轮上冠流道和下环间隙内

部流动,选取水轮机额定工况,通过数值模拟获取转轮上冠流道和下环间隙内部流动数值模拟图^[12]。

2.1.1 无平压管方案转轮上冠流道和下环流道内部流动模拟图

图1至图4为无平压管方案的计算域内流动特性可视化图。由图显示,内部流动特征符合客观规律,未发现有违背流体动力学基本理论的流动,由此可为说明计算方法是正确、可信的理由之一,同时也辅助认知转轮上冠流道及下环间隙内部流动特点^[10]。

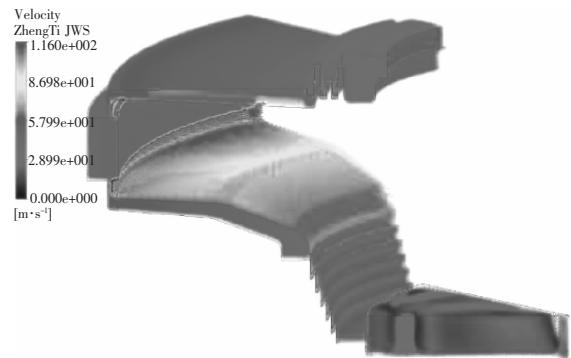


图1 间隙方案计算域内速度矢量图

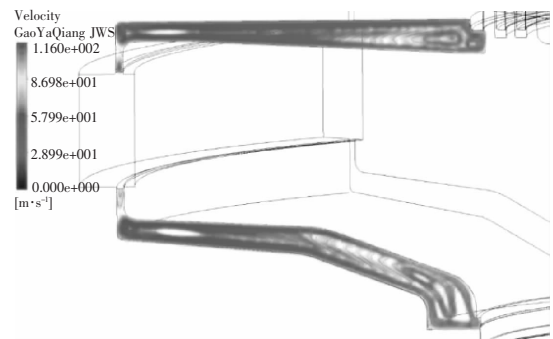


图2 间隙方案计算域内高压腔流线图

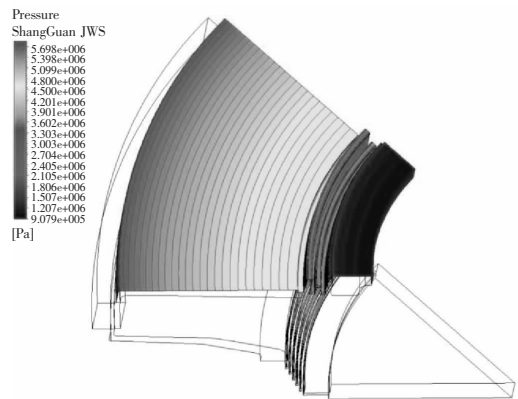


图3 间隙方案上冠流道计算域内部流动压力云图

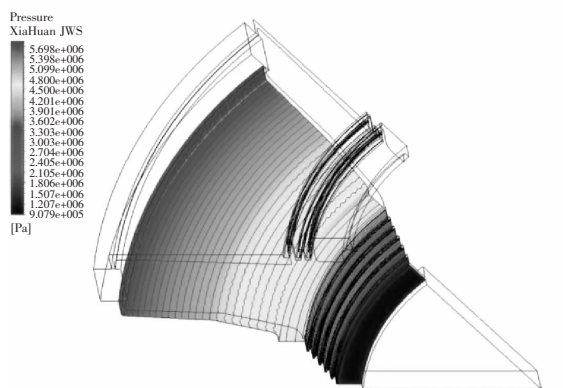


图4 间隙方案下环间隙流道计算域内部流动压力云图

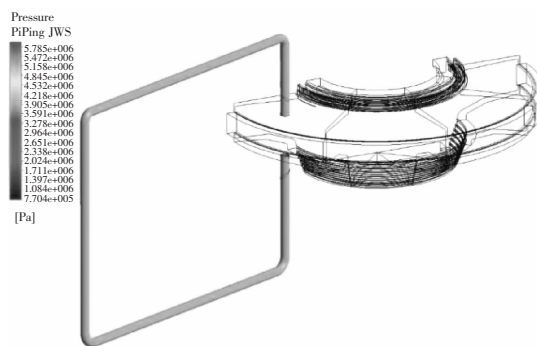


图8 平压管方案平压管计算域内部流动压力云图

2.1.2 有平压管方案转轮上冠流道和下环流道内部流动模拟图

图5至图8为有平压管方案的计算域内流动特性可视化图。



图5 平压管方案计算域内部流动速度矢量图

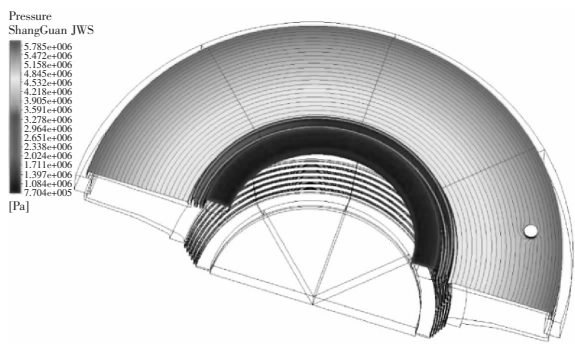


图6 平压管方案上冠流道计算域内部流动压力云图

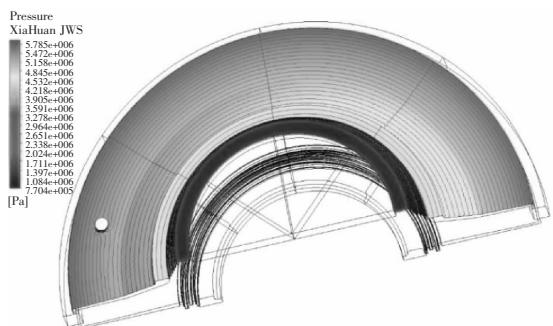


图7 平压管方案下环间隙流道计算域内部流动压力云图

3 结论

结上述计算有如下结论：

(1) 转轮上下腔流道的水推力，在各水头下随出力的增加单调变化规律性很好，水推力随负荷增加而逐渐增加；当出力达到最大出力70%时，水推力逐渐平稳；转轮上冠流道与下环流道的水推力合力变化波动较大，规律性不明显。

(2) 在20 mm间隙下，各个水头下进行计算对比，发现有、无平压管的水推力值相差不大，本计算采用的2-D125平压管方案对水推力的影响不显著。

(3) 所有42个工况下，最大和最小水推力对应的转轮间隙尺寸统计柱状图见图9和图10所示。

各工况下，出现最小水推力对应的转轮间隙值统计：转轮间隙6 mm有7个，占比16.7%；转轮间隙10 mm有9个，占比21.4%；转轮间隙15 mm有21个，占比50%；转轮间隙20 mm有5个，占比11.9%，各统计值对比柱状图如图9所示。

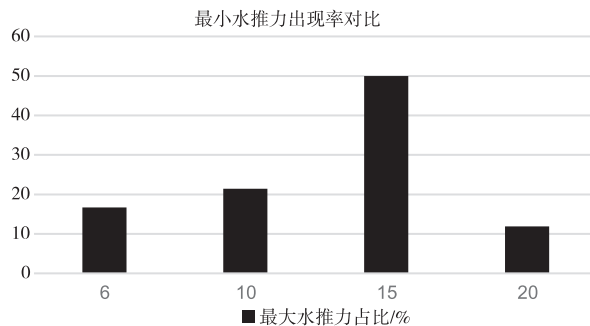


图9 最小水推力对应的转轮间隙值出现率柱状图

各工况下，出现最大水推力对应的转轮间隙值统计：转轮间隙6 mm有3个，占比7.1%；转轮间隙10 mm有2个，占比4.8%；转轮间隙15 mm有2个

占比4.8%;转轮间隙20 mm有35个,占比83.3%,各统计值对比柱状图如图10所示。

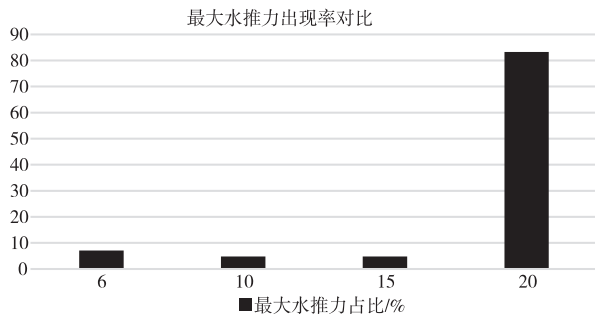


图10 最大水推力对应的转轮间隙值出现率柱状图

虽然各间隙出现的水推力差值不大,但从上述情况可以得出结论:转轮上冠下环间隙取值为15 mm时最优,应避免取值为20 mm。

(4)转轮间隙泄漏量随负荷增加而逐渐增加,随间隙增大逐渐增大;间隙尺寸已定,当出力达到最大出力70%时,转轮间隙总泄漏量增加速率趋缓,在最大出力时有所减小。

(5)在出力小于最大出力70%之前,无平压管方案的转轮间隙总泄漏量大于有平压管方案的;在出力大于最大出力70%之后,无平压管方案的转轮间隙总泄漏量小于有平压管方案的转轮间隙总泄漏量。

(6)不同转轮间隙值时,相应工况下的泄漏量相差不大,对水轮机的容积效率影响不显著,因转轮间隙泄漏量产生的容积效率最大/最小约为99.19%和98.30%。

4 结语

因时间和条件限制,上述结论仅依托于单个转轮在水轮机工况下进行分析所得,但通过此次

(上接第72页)

[2]邓金杰,文树洁,杨庭豪等.水电站水轮机顶盖取水泵板结构分析[J].东方电气评论,2018,32(4):44-49

[3]王朋辉,徐大雷,张步恩.灌流式水轮机压力脉动及流场特性数值模拟[J].中国农村水力水电,2018,(8):208-211

[4]盛其虎,孙科,张学伟等.潮流能水轮机水动力分析方法[J].海

研究,我们已经掌握了对水泵水轮机上下腔平压方式进行分析的方法,后续会针对不同转轮在不同水头及多个工况下的水力特性、水推力及泄漏量情况进行深入研究,以得到更广泛性的趋势和结论。

参考文献:

[1]戴勇峰,王海,张克危等.混流可逆式转轮密封装置的泄漏量及其对机组运行的影响[J].水力发电学报,2005,(2):100-104

[2]吴钢,张克危,戴勇峰.转轮间隙及密封结构对混流式水电机组安全运行的影响[J].大电机技术,2005,(1):44-48+52

[3]敏政,梁昌平,董志强等.混流式水泵水轮机泄漏量的计算及分析[J].排灌机械工程学报,2014,32(8):679-684

[4]Riera W, Castillon L, Marty J, et al. Inlet Condition Effects on the Tip Clearance Flow With Zonal Detached Eddy Simulation[J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(4):041018.1-041018.10

[5]Wu H, Feng J J, Wu G K, et al. Numerical investigation of hub clearance flow in a Kaplan turbine[J]. Iop Conference, 2012, 15(7):2026

[6]Li J, Yan X, Li G, et al. Effects of pressure ratio and sealing clearance on leakage flow characteristics in the rotating honeycomb labyrinth seal[C]//ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air, & American Society of Mechanical Engineers, 2007:1199-1206

[7]吴次光.漫湾水电站机组顶盖取水的实践经验[J].云南水力发电,1995,(3):35-40

[8]邓金杰,文树洁,杨庭豪等.苗尾水电站水轮机顶盖取水泵板结构分析[J].东方电气评论,2018,32(4):44-49

[9]杨二豪,吴钢,杨庭豪等.黄登水电站水轮机转轮上冠泵板对顶盖取水的影响[J].水电能源科学,2016,34(10):150-153

[10]戴勇峰,王海,张克危等.混流可逆式转轮轴向水推力研究[J].水力发电学报,2005,(2):105-109

[11]刘德有,游光华,王丰等.混流可逆式水轮机转轮轴向水推力计算分析[J].河海大学学报:自然科学版,2004,(5):557-561

[12]刘朝.水轮机转轮间隙流动数值模拟及参数化网格生成[D].华中科技大学,2011

洋技术学报,2014,33(4):105-111

[5]张慧珍,卢磊.基于CFD的超低水头轴流式水轮机转轮增容改造研究[J].水力发电,2018,44(5):65-68

[6]王玉成,廖志芳,蒋劲.双层对冲式效能阀的抗空化性能研究[C].2018年水力机械信息技术交流会议论文集,2018:139-148

基于机器学习的通信网告警关联分析综述

丁宏¹ 周宏林²

1. 中国移动通信集团四川有限公司, 成都 610000; 2. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要:告警关联分析是通信网故障管理的重要手段,通过告警关联分析网络维护人员能够进行告警压缩和故障定位。它是智能运维的关键技术之一,因此全面而系统地对告警关联分析的步骤和算法进行总结非常必要。本文首先对基于机器学习的通信网告警关联分析的步骤进行了介绍,然后对告警预处理、告警关联分析算法、告警关联规则生成等步骤中目前学者研究的主要问题和方法进行了分析比较。接下来对基于大数据处理框架的告警关联分析实现进行了对比,最后对告警关联分析的研究进行了总结和展望。

关键词:告警关联分析; 关联规则挖掘; 机器学习; 数据挖掘; 故障管理

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2021)01-0077-08

Survey of Alarm Correlation Analysis for Communication Networks Based on Machine Learning

DING Hong¹, ZHOU Honglin²

(1. China Mobile Group Sichuan Co., Ltd., 610000, Chengdu, China; 2. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: Alarm correlation analysis is the main technology for fault management in telecommunication networks. By means of alarm correlation analysis, the network maintainer easily reduces the redundant alarms and locates the root alarm. It is also one of the key technologies for AIOps. Therefore, it is significant to summarize the procedure and algorithm for alarm correlation analysis. As a first step, this paper introduces the general procedure for machine learning-based alarm correlation analysis in telecommunication network. In the following, the current research status for several key steps like alarm preprocessing, correlation analysis algorithm, and correlation rule generation are introduced and compared in detail. Then, the implementation of alarm correlation analysis based on big data processing framework has been summarized. Finally, the conclusion is drawn and the future research direction of alarm correlation analysis is also proposed.

Key words: alarm correlation analysis; correlation rule mining; machine learning; data mining; fault management

近年来互联网技术高速发展,作为基础设施的通信网的发展也越来越迅速,通信网所提供的服务深入到了人们生活的方方面面,通信网的重要性也随之凸显。随着 5G 时代的到来,通信网不再仅仅是人与人之间沟通的桥梁,还将承载物与物之间的通信,实现真正的万物互联。通信网也不仅仅影响到人们的生活,还会在人类的生产工作当中发挥更加重要的作用。因此如何保障通信网的稳定运行,科学地进行故障管理变得越来越重要。

通信网具有网络规模大,网络设备类型多,网络连接复杂等特点。通信网承载的业务类型繁多,网络中的一个微小故障就可能影响一大片网络设备所承载的众多业务,从而给运营商带来巨大的经济损失。因此如何在通信网故障发生后能够快速定位故障根因,并且能够对重大故障进行快速识别和预测成为故障管理中的一个难题。通信网的一次故障往往会产生一系列的告警,这些告警中有表象告警,有冗余告警,也有根因告警。告警关联

收稿日期: 2020 - 09 - 15

作者简介: 丁宏(1983 -),男,2009年毕业于北京大学信息科学技术学院通信与信息系统专业,硕士,工程师。现在四川移动网络管理中心主要从事网管系统研发的工作。

分析就是对一次故障中产生的一系列告警进行压缩和根因识别的手段。传统的告警关联是通过网管专家梳理告警关联规则后,再对一系列告警进行关联规则匹配。但是由于通信网络十分复杂,新的网络设备不断入网,网元设备间的连接关系也在不断变化,人工梳理的告警关联规则往往存在规则覆盖不全,不能适应网络变化等问题。因此急需智能化的故障管理手段来进行告警关联分析。近年来人工智能技术快速发展,通过机器学习算法能够从大量的、低价值密度、有噪声的数据中提取出有价值的信息。因此基于机器学习的通信网告警关联分析方法成为一个热门的研究领域。

本文将首先介绍告警关联分析的基本概念以及基于机器学习的告警关联分析的步骤。然后再围绕告警关联分析的关键步骤介绍主要研究的问题及解决方案,分析各种方案的优缺点并进行比较,最后对研究现状进行总结并对未来研究进行展望。

1 告警关联分析

在介绍告警关联分析之前需要明确故障和告警是网络管理中两个不同的概念。故障是网络运行中的异常状态,故障都需要维护人员进行及时处理。告警是网络设备发生特定事件后的事件通报,告警只是表明可能有故障发生,但并不是一定有故障发生。故障发生后会引起一系列的告警。一个故障还可能引发其他故障^[1]。通信网的告警关联分析就是要探寻成千上万的告警之间的关联关系,从而可以确定故障的根因告警。告警关联分析是通信网故障管理中的关键技术,通过对告警关联的分析方法进行研究,可以获取有效的告警关联分析手段,从而对故障根因进行准确定位,提升故障处理效率,并对冗余告警进行压缩,减少故障工单派发电量,从而减轻网络维护人员的故障处理负担。

目前传统的告警关联分析方法是基于专家梳理的告警关联规则,对告警进行关联规则匹配,但是人工梳理的规则往往存在规则梳理不完整,梳理的规则不能适应通信网络的快速变化等问题。近年来随着大数据处理技术的不断普及,基于机器学习的告警关联规则挖掘成为研究的热门领域。基于机器学习的告警关联分析主要步骤如图 1 所示,

首先需要针对通信网告警的特点对告警训练数据进行预处理,生成告警事务数据;然后选择合适的告警关联分析算法,对告警事务数据进行训练,通过对模型参数调优,生成告警关联规则并得到关联规则库。在推理阶段,将需要推理的告警通过预处理后与关联规则库中告警关联规则进行匹配,确定根因告警。

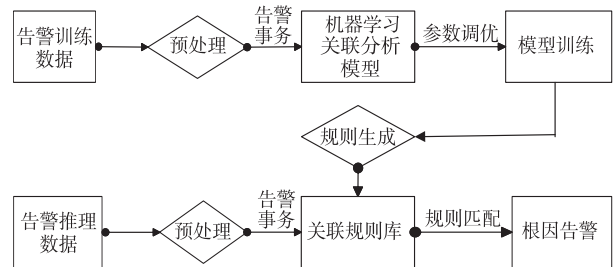


图 1 基于机器学习的告警关联分析步骤

以下将按照告警关联分析的步骤逐一对告警关联分析中研究的问题和研究现状进行介绍。

2 告警预处理

数据预处理是数据挖掘中的重要步骤之一。通常获取的数据都存在着格式不规范,数据字段缺失等问题,为提升数据的质量,进而提升数据挖掘算法的准确性,需要在数据挖掘前对数据进行预处理。

通信网告警数据有以下 5 个特点:

(1) 告警数据属性多,一条告警中有多达几十个字段,然而与告警关联有关系的字段并不多,通常包括告警发生时间、告警消除时间、设备名称、设备类型、告警标题、端口名称、告警级别等。

(2) 告警冗余性较高,发生一次故障时,相连的多个设备可能同时发出同一种告警。一个故障还可能引起一连串连锁故障,从而产生多个告警。另外很多低级别的次要告警和重要告警同时产生,可能导致重要告警不能被及时发现。

(3) 告警数据不完整,由于人为或者网络设备自身的原因可能导致上报的告警数据不完整,另一方面由于设备故障或者链路中断等故障,也会导致告警可能没有完整上报。

(4) 告警数据时间不同步,由于部分网络设备未进行时钟同步,或者由于时钟同步程序故障都会导致各网络设备间的时钟存在差异,这也给网络告

警关联分析带来极大困难。

(5) 告警存在不平等性, 严重告警会导致故障发生, 次要或冗余告警只起到提示或预警的作用。往往严重告警发生的频率低, 而次要或冗余的告警发生频繁。

正因为以上通信网告警的特点, 在进行告警关联分析前需要对告警数据进行预处理, 提取对告警关联分析有重要作用的关键字段, 剔除部分次要级别的告警以及同一时间段内重复类型的告警, 去除告警时间明显异常的告警。除此之外, 针对告警时间不同步的特点还需进行告警事务提取; 针对告警不平等的特点需要对告警权重进行评估; 对于复杂的通信网络, 还需要在告警预处理时应用网络拓扑连接关系。以下将分别进行介绍。

2.1 告警事务提取

在进行告警关联分析前, 需要找到每次故障所产生的一系列告警的集合, 称之为告警事务。告警事务是告警关联分析算法输入的必要形式。由于故障之间存在时间上的重叠, 同时告警有时间不同步的特点, 因此如何提取告警事务成为告警关联分析中的一个研究课题。文献[2]和文献[3]均采用了滑动时间窗的方法生成告警事务。滑动时间窗涉及两个参数, 一个是滑动时间窗的宽度, 另一个是滑动时间窗步长。提取告警事务时, 从告警序列时间起点开始查找, 时间点落在时间窗内的告警则认为属于同一个告警事务, 如果有重复的告警标题, 则去除冗余的告警, 只保留不同的告警标题。滑动时间窗提取告警事务的示例如图2所示, 示例中告警标题为A-E, 滑动窗口宽度为10, 滑动步长为7, 通过3个滑动窗口分别得到了3个告警事务[T1, T2, T3]。

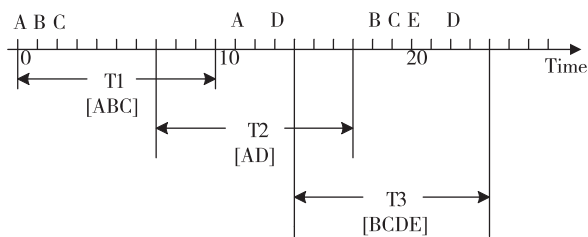


图2 滑动时间窗提取告警事务示例

提取到的告警事务的质量和数量与滑动窗口宽度和步长的设置息息相关。滑动窗口设置过大

会导致告警事务中告警数量很多, 后续算法计算复杂; 滑动窗口设置过小会导致告警事务中无法包含足够的告警关联信息。另一方面, 滑动窗口步长设置过小会导致生成过多相似的告警事务, 滑动窗口步长设置过大会导致可能遗漏部分告警关联信息。因此需要对滑动窗口的宽度和滑动窗口步长进行合理设置。文献[4]提出了基于双约束的滑动时间窗提取告警事务的方法, 它采用了类似 K-Means 算法的方法将告警数据按照告警发生时间划分为告警相对集中的多个时间段。再针对每个时间段内的告警单独设置合适的滑动窗口宽度和步长两个参数。但该方法需要人为确定告警时间段的分段数量。文献[5]采用 DBSCAN^[6] 算法对告警按照时间进行分段, 该算法不需要人为指定分段的个数, 但是文献中没有给出具体的设置滑动窗口宽度和步长的具体方法。

文献[7]采用了设置最大时间间隔约束的方法来对告警事务进行划分。如图3所示, 设置最大时间间隔 g 为2, 所有时间间隔大于2的告警都不被认为是属于同一个告警事务, 因此提取到告警事务为 [T1, T2, T3]。该方法相较于滑动时间窗的方法所需参数较少, 但需要逐一遍历告警, 实现效率较低。

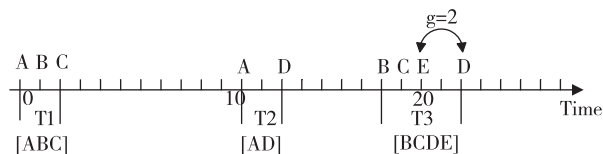


图3 最大时间间隔提取告警事务示例

2.2 告警权重评估

由于告警具有不平等性, 重要的告警发生的频率较低, 而不重要的告警发生频率很高。因此在进行告警关联分析时不能将告警看作平等的对象, 需要对重要性不同的告警设置不同的权重。如何合理地设置告警权重成为告警关联分析预处理中一个重要研究问题。

告警权重评估的方法有很多, 包括基于规则的告警权重评估方法和机器学习的方法。文献[8]将影响告警权重因素分为3种, 分别是告警级别、告警节点重要程度和告警数据新鲜度, 其中告警级别体现了告警的重要程度, 告警节点重要程度体现了发

生告警的网络设备的重要程度,告警数据新鲜度体现了告警的时间新旧程度。然后对这3个因素制定了相应的权重规则,并加权求和得到告警的最终权重。基于规则的告警评估方法存在较大的主观性,不能客观反映告警的相对权重。文献[9]通过统计每个告警中关键属性在训练数据中出现的概率,再对每个属性的概率的导数求乘积得到各告警的权重值。该方法消除了告警出现频率不同的对告警关联分析的影响,但并没有根据告警的重要程度来确定告警权重。文献[10]选取了告警对设备的影响程度、对业务的影响程度、告警级别3个属性,并利用熵值法[11]对告警进行了权重评估。但该方法选取的3个属性都有较强的主观性,因此得到的权重评估值也存在较强的主观性。

基于机器学习进行告警权重评估的方法主要包括神经网络、SVM、AHP等。文献[12]采用有监督的神经网络算法,选择了设备级别、设备类型、设备连接网元数量3个特征作为告警特征向量进行告警的权重评估,该方法需要网络管理专家对特征向量训练数据所对应的告警权重进行标记后才能训练模型,从而得到告警权重评估结果。文献[13]为了避免专家打标可能带来的数据获取困难和数据标签存在的主观因素,采用K- Means算法对告警特征向量进行聚类,将聚类后的类别编号作为每个告警特征向量的标签,然后再利用神经网络算法进行训练,但该方法中聚类的个数仍然需要人为指定,具有一定的主观性。文献[14]选择了告警类型、网络层次、专业3个特征,分别采用神经网络、SVM、AHP3种机器学习算法生成告警权重,并对权重结果应用于关联规则算法后效果进行了比较,由于AHP方法生成的告警权重值较小,导致挖掘出的规则数量少,因此AHP算法不适合通信网告警关联分析中的权重评估,SVM算法相较于神经网络算法,生成的告警权重值应用于关联规则挖掘算法中能够获得数量更多、重要性也更高的关联规则,因此更适合通信网的告警关联分析应用。

2.3 告警拓扑应用

通信网网络结构十分复杂,分为无线网、传输网、核心网、动环网等,各专业的网络设备相互连接,各专业内部也有不同类型的网络设备互联。在

同一时间段内可能同时发生多起故障,涉及不同专业的多个网络设备,为区分不同区域内同时发生的故障,在进行告警事务提取时不仅需要时间的因素,还需要考虑空间或者网络拓扑的限制条件。文献[15]采用K- Means算法对网络设备的地理位置进行聚类,从而形成不同的子网,在一个子网内的网络设备被认为是拓扑相连的。这种拓扑划分方式对处于边沿的设备划分并不准确。文献[16]将网络划分为多个子网后,标记网关设备,对于子网内设备只在子网内进行拓扑搜索,对于网关设备告警才在全网进行拓扑搜索,从而减小了拓扑搜索的范围。文献[17]按照通信网络的不同专业建立专业内拓扑连接关系,并利用传输端口表实现跨专业的拓扑关联。在生成告警事务时考虑网络拓扑连接因素,可以避免将不同子网中同时发生的故障告警划分到同一告警事务当中,使后续进行告警关联分析的结果更加准确可靠。但引入了空间或网络拓扑限制条件后,告警关联分析的复杂度也会增加很多。因此在策略选择时需要告警关联分析的准确度和复杂度进行权衡。

3 告警关联分析算法

告警事务生成后就可以运用机器学习算法进行告警关联分析,文献[18]基于有监督的神经网络算法对通信网的告警关联规则进行了分析,以是否有某种标题类型的告警作为特征生成特征向量,已告警关联的根因作为标签,但是通信网中很难获得大量的有标记的告警关联数据来对神经网络进行训练,同时由于通信网络快速变化可能导致告警关联标签准确性不高,因此神经网络算法进行关联分析不太适用于通信网告警分析的应用场景。无监督的关联规则挖掘是数据挖掘中的重要方法之一,其最早应用于电商网站的购物篮分析问题。随着研究的深入,无监督的关联规则挖掘也被应用于其他领域,例如气象分析、时尚穿衣搭配等领域,在通信网告警关联分析领域也较为适用。

评价告警关联分析算法的优劣主要包括以下3个方面:

(1)效果:好的告警关联分析算法可以发现更多有效的告警关联规则,同时也具有更高的关联准

确性。

(2)效率:由于通信网告警数量巨大,关联规则分析算法效率十分重要,效率高的关联规则分析算法能够快速发现关联规则,使关联规则具有更强的时效性。

(3)适应性:能够适应通信网络不断变化的特点,实现对关联规则的快速更新。

目前对告警关联分析的研究也主要是针对以上评价算法优劣的3个方面展开。由于通信网告警具有时间不同步的特点,但逻辑上又是具有先后发生顺序的,因此告警关联分析的研究大致可以分为两类。一类是依据告警时间不同步的特点,将一次故障发生的一系列告警作为无序告警进行分析。另一类是依据告警逻辑上具有先后发生顺序的特点,将一次故障发生的一系列告警看作是有序告警进行分析。这两类分析方法都各有优缺点,无序告警分析丢掉了告警先后发生的信息,但能够规避时间不同步的问题。序列告警分析虽然利用的告警信息更全面,但可能受到时间不同步的干扰。另外还有一部分学者研究了告警关联分析算法在通信网络快速变化场景下的适应性。以下将对无序告警关联分析、有序告警关联分析和增量告警关联分析分别介绍。

3.1 无序告警关联分析

由于通信网告警具有时间不同步的特点,很多学者将发生在同一时间窗内的告警看作同时发生的告警来进行处理。主流的无序关联分析算法包括 Apriori^[19]、FP-Growth^[20]、Eclat^[21]等。Apriori 算法的作用是找出项集数据中的频繁项集,并生成关联规则。所谓项集就是同时出现的一组项目的集合,在通信网告警关联分析中,一个告警事务就可以看作是一个项集。频繁项集就是在项集数据中出现频率超过了一定阈值的项集,项集的频率就是支持度。频繁项集按照项集中项目的个数 N 可以分为 N-频繁项集。在频繁项集 A 中可以进一步找出置信度超过一定阈值的关联规则 $B \rightarrow (A-B)$,其中 B 为频繁项集 A 的任一子集。置信度是结果集 A 的支持度与根因集 B 的支持度的比值,它定义了关联规则的可靠程度。Apriori 算法思想是依次寻找 1-频繁项集,2-频繁项集,直到项集的元素个

数不能再增加为止。在频繁项集的递归查找过程中利用了自连接和剪枝的方法,并从候选频繁项集中剔除低于支持度的项集,从而获得所有的频繁项集。在生成关联规则时,则利用置信度阈值在频繁项集中得到强关联规则。Apriori 算法的缺点是在计算过程中需要多次扫描事务数据库,当事务数量大的时候,算法效率低。同时当项目数量较多的时候,可能生成庞大的候选频繁项集,占用很大的内存空间。对于通信网告警关联规则分析的应用场景来说,通信网告警数量巨大,告警标题的数量也繁多,因此 Apriori 算法并不适用于复杂通信网的告警关联分析。

为解决 Apriori 算法效率低的问题,Han 等人在 2000 年提出了频繁模式增长即 FP-Growth 算法。该算法一定程度上解决了 Apriori 算法效率低的问题,它只需要进行两次扫描事务数据库就能够得到频繁项集。该算法的基本思想是:第一次扫描事务数据库得到 1-频繁项集,并将频繁项集按照支持度由高到底排序。第二次扫描事务数据库构建频繁模式树(FP-Tree)。接下来利用 FP-Tree 来进行频繁项集挖掘,通过递归地从 1-频繁项集中搜索条件模式库,并生成对应的条件 FP-Tree,从而得到所有的频繁项集。文献[22]针对 FP-Growth 算法在告警项目密集时性能较好,告警项目稀疏时性能不好的特点,对算法进行了改进,构建了二维表,当遇到稀疏项时则通过查询二维表来挖掘频繁项集,将该方法应用于告警关联分析,算法效率得到提升。FP-Growth 算法将所有的项目都同等地对待,但是在通信网中的告警,不同设备上报的不同级别的告警的重要程度大不相同,重要的告警往往出现的次数相对较少,如果将告警等同看待,重要的告警可能由于支持度没有达到阈值而被忽略。文献[4]借鉴 FP-Growth 算法中 FP-Tree 的思想,提出了一种新的生成加权潜在频繁模式树(WFPF-Tree),并考虑了告警的权重因素,提出了加权频繁模式挖掘算法 WFPF-WARM,采用逐层搜索的迭代方法产生加权频繁模式,无需递归地生成大量的条件模式树,算法效率较 FP-Growth 算法提升,内存占用也更小。

3.2 序列告警关联分析

虽然通信网告警具有时间不同步的特点,但实

际上通信网告警的发生是有其时间先后顺序的,因此也有很多学者研究将序列关联规则挖掘算法应用到通信网告警关联分析当中。主流的序列关联分析算法包括 GSP^[23]、SPADE^[24]、PrefixSpan^[25]等。GSP 算法是基于 Apriori 算法衍生出来挖掘有序序列关联规则的典型算法。它运用连接和剪枝策略来构建候选序列,并使用了哈希树结构实现了对候选模式的快速访问。文献[16]基于 GSP 算法并应用了通信网络设备之间的拓扑约束挖掘出了告警关联规则,该方法不仅可以挖掘专业内告警关联规则还可以挖掘跨专业的告警关联规则。

由于 GSP 算法是基于 Apriori 的衍生算法,因此 GSP 算法也有 Apriori 算法的缺点,需要多次扫描事务数据库,产生大量候选频繁项集,算法的效率较低。PrefixSpan 算法借鉴了 FP-Growth 算法分治的思想,通过两次扫描事务数据库。第一次扫描事务数据库得到 1-频繁项集,然后第二次扫描得到每个 1-频繁项集的前缀投影从而生成投影数据库。基于投影数据库循环递归地得到所有频繁项集。该算法不需要生成候选频繁项集。因此在算法效率上较 GSP 算法有较大优势。文献[26]基于 PrefixSpan 算法并结合通信网络设备的拓扑结构对告警进行了关联规则挖掘,增加了拓扑约束的 PrefixSpan 算法相对于传统的 PrefixSpan 算法挖掘出的关联规则数量略有减少,但挖掘的关联规则更具合理性。文献[10]基于 PrefixSpan 算法投影技术的基础上,提出了加权告警序列模式挖掘算法(WASP),将告警权重应用于有序告警关联规则挖掘,并利用剪枝策略提升了算法效率。其与 PrefixSpan 算法相比性能和效率都有优势。

3.3 增量告警关联分析

传统的关联规则分析往往是针对静态的事务数据库进行关联规则挖掘,然而通信网络发展非常快,网络设备之间的连接变化也十分频繁。告警事务数据库中的告警事务也呈现动态变化的趋势,随着新的告警事务的加入,原有的告警关联规则可能失效,同时也可能产生新的告警关联规则。网络的变化也可能导致原有的支持度阈值不再适合新的网络情况,最小支持度阈值需要不断调整来获得最合适的告警关联规则。在以上场景下,如果抛弃已

经挖掘出的告警关联规则,重新进行新的规则挖掘会给系统增加极大开销,关联规则的挖掘效率也很低。因此如何在既有告警关联规则的基础上进行增量挖掘以适应告警事务数据或者最小支持度的变化成为一个重要的告警关联分析的研究方向。

FUP^[27]、FUP2^[28]是基于 Apriori 的增量式关联规则挖掘算法,由于它们是基于 Apriori 算法,因此也存在类似 Apriori 算法效率较低的不足。FIUA1 和 FIUA2^[29]算法是基于 FP-Tree 的结构提出的,分别用来处理最小支持度变化和事务数据库变化时关联规则的更新挖掘问题。CanTree^[30]算法中告警项是根据用户指定的某种序列顺序进行排序的,因此构建 CanTree 只需一次数据库扫描,也避免在进行增量挖掘时为了构建新的树形结构而重新扫描整个更新后的数据库,算法效率相对较高。文献[8]中基于 CanTree 算法进行改进,通过修改树节点的连接方式,并针对通信网的特点指定了告警项的排序规则等方法,提升了增量挖掘算法的效率。文献[4]基于 WFPW-WARM 关联规则挖掘算法进行改进,提出了加权支持度变化时的增量式挖掘算法 WFPPT-WARM(S)和告警数据变化时的增量式挖掘算法 WFPPT-WARM(D),能够有效针对增量告警进行关联分析,运行时间相较于 CanTree 和 FUP 算法能够明显缩短。

4 告警关联规则生成

第 3.1 节中描述的通过传统的设置置信度阈值的方法得到的告警强关联规则存在两大问题,一是通信网中告警数据存在较大的倾斜性,部分告警发生频率远高于其他告警,这样导致通过置信度阈值筛选出来的强关联规则不一定确保告警强相关;二是通过遍历频繁项集的子集得到的强关联规则存在较大的冗余性,并且实现效率较低。针对第一个问题文献[31]中在置信度阈值的基础上还增加了提升度阈值条件对告警关联规则进行筛选,提升度能够反映关联规则的相关性程度,提升度大于 1 表示正相关,越大表示正相关性程度越高,提升度小于 1 表示负相关,越小负相关程度越高,提升度等于 1 表示不相关。通过提升度约束可以确保产生的告警关联规则具有强关联性,并且为正相关。针对

第二个问题文献[4]提出了DFS-RG'算法生成告警强关联规则,该算法从最大频繁项集进行强关联规则搜索,同时在搜索过程中根据推理去掉了不可能生成强关联规则的项集及其子集,因此规则生成算法的效率得到提升,也减少了冗余告警关联规则的生成。

5 告警关联并行实现

通信网每天会产生大量的告警,因此在进行通信网告警关联分析实现时需要利用分布式的大数据并行处理框架。目前主流的告警关联分析框架是Hadoop^[32]和Spark^[33]。Hadoop是基于分布式文件系统HDFS的分布式大数据处理框架,它的核心计算框架是MapReduce,其采用分而治之的思想,分为Map和Reduce两个步骤来进行分布式计算。文献[34]基于Hadoop实现了改进的Apriori并行算法,即可变多阶段并行算法VMSPA,并应用于通信网的告警关联分析中,与SAAP^[35]算法和MSPA^[36]算法运算效率进行了比较,其算法执行时间显著减少。文献[37]基于并行FP-Growth算法实现PPF^[38],在Hadoop平台实现了增量关联分析算法CanTree,提升了算法执行效率。基于Hadoop的告警关联实现由于在计算时需要读写文件,因此算法实现效率不高。而Spark框架则弥补了Hadoop的缺陷,其基本计算引擎是弹性分布式数据集(RDD),并将计算放入内存中,计算速度可以达到Hadoop的100倍。Mlib是基于Spark的机器学习库,它实现了主流的机器学习算法,其中包括关联规则算法FP-Growth和PrefixSpan。文献[31]基于Spark并针对通信网特点实现了对FP-Growth算法的改进,对告警数据进行了压缩和分段,并进行了告警权重的自适应计算,与Hadoop平台的告警关联实现进行了对比,其实现运行效率得到了显著提升。

6 结语

通信网网络十分复杂,每天都可能产生大量的告警,其中有根因告警也有冗余告警。通过告警关联分析对告警进行压缩,从大量告警中找到根因告警对通信网的故障管理有很重要的意义。基于机

器学习的告警关联分析主要包括告警预处理、告警关联算法调优、关联规则生成等几个步骤。本文对基于机器学习的通信网告警关联分析中热点研究问题进行了阐述,对相关的研究成果进行了总结和比较。

通过总结已有的研究经验,未来通信网的告警关联分析还存在以下问题可以进行进一步地深入研究:

(1)主流的告警事务生成方法是滑动时间窗的方法,但目前的研究未能给出滑动时间窗宽度和滑动步长参数的准确设置方法,只是通过测试比较的方法选取合适的滑动窗口宽度和滑动步长。可以进一步研究能够定量设置滑动窗口宽度和滑动步长的方法。

(2)通信网告警有较大的数据不平衡性,需要对不同的告警设置不同的权重。目前的方法需要专家标记数据,可能存在不准确性,或者需要事先确定告警聚类的个数,这也带有较强的主观性。可以结合通信网业务特性,制定告警重要性的评判标准,再利用机器学习的方法对告警重要性进行量化评估。

(3)由于通信网络复杂,在进行告警关联分析时需要考虑网络拓扑的因素,但目前的算法仅考虑了网络设备之间拓扑是否相连的条件,而实际通信网连接复杂,核心网可能存在主备设备,传输链路可能存在环路或双路由等连接情况,因此在进行数据预处理时需要进一步结合通信网络特点进行分析。

(4)通信网由于告警的种类众多,通过告警关联分析算法生成的告警规则数量也非常多,需要研究一种有效的方法对生成的冗余和相似的规则进行合并,从而提升告警推理时关联规则匹配的准确率和效率。

参考文献:

- [1] De Castro T A M, Nogueira J M S. An Alarm Correlation System for SDH networks [C]//Proceedings of ITS ' 98 International Telecommunications Symposium. Sao Paulo: IEEE Press, 1998: 492-497
- [2] 楼丽琪. 基于机器学习的光网络告警智能分析技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019

- [3] 吴简. 面向业务的基于模糊关联规则挖掘的网络故障诊断[D]. 成都:电子科技大学,2012
- [4] 李彤岩. 基于数据挖掘的通信网告警相关性分析研究[D]. 成都:电子科技大学,2010
- [5] 张雄. 基于关联规则的电信网告警相关性分析[D]. 南京:东南大学,2016
- [6] Chehreghani M H, Abolhassani H, Chehreghani M. H. Improving density-based methods for hierarchical clustering of web pages[J]. Data & Knowledge Engineering,2008,67(1):30-50
- [7] Lozonavu M, Vlachou-Konchylaki M, Huang V, Relation discovery of mobile network alarms with sequential pattern mining [C]// International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Santa Clara, CA, 2017: 363-367
- [8] 王帅, 杨秋辉, 曾嘉彦等. 加权增量关联规则挖掘在通信告警预测中的应用[J]. 计算机应用, 2018, 38(10): 2875-2880
- [9] Li Chuan and Huang XiaoJun, Research on FP-Growth algorithm for massive telecommunication network alarm data based on Spark[C]// IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), Beijing, 2016, 875-879
- [10] 胡秋秋. 移动通信网络运行数据处理与分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2019
- [11] 汪星, 黄小瑜, 刘瑄璞等. 面向工业大数据的多层增量特征提取方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2018, 45(4): 106-111
- [12] Li Tongyan, Li Xingming, Xiao Hailin. An Effective Algorithm for Mining Weighted Association Rules in Telecommunication Networks [C]//Computational Intelligence and Security Workshops, 2007
- [13] Wang Danshi, Lou Liqi, Zhang Min, et al. Dealing with Alarms in Optical Networks Using an Intelligent System [J]. IEEE Access, 2019, 7:97760-97770
- [14] 罗明, 孟传伟, 黄海量. 基于加权频繁模式树的通信网络告警规则挖掘方法[J]. 计算机工程, 2016, 42(4): 190-196
- [15] G. Zargarian, L. Vassio, M. M. Munafò, et al. Mining Patterns in Mobile Network Logs [C]// 2019 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM), Arlington, 2019:1-6
- [16] 万莹, 洪玫, 陈宇星等. 基于时间、空间和规则的无线网络告警关联方法[J]. 计算机科学, 2018, 45(S2): 287-291
- [17] 陈墨, 金磊, 龚向阳等. 面向5G海量网管数据的故障溯源技术[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 131-136+142
- [18] 刘洪波, 陈刚, 宫钦. 基于神经网络的通信网络告警关联分析及应用[J]. 电信技术, 2018(05): 32-35
- [19] Agrawal R, Srikant R. Fast Algorithm for Mining Association Rules [C]//Proceedings of the 20th VLDB Conference, Santiago, 1994: 487-499
- [20] Han Jianwei, Pei Jian, Yin Yiwen, et al. Mining Frequent Patterns without Candidate Generation: A Frequent-Pattern Tree Approach [J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2004, 8(1): 53-87
- [21] M. Zaki, K. Gouda. Fast vertical mining using difsets [C]// Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2003, 326-335
- [22] 鲁显光, 杜学绘, 王文娟. 基于改进 FP Growth 的告警关联算法[J]. 计算机科学, 2019, 46(8): 64-70
- [23] R. Agrawal and R. Srikant, Mining sequential patterns [C]// Proceedings of the Eleventh International Conference on Data Engineering, Taipei, Taiwan, 1995, pp. 3-14
- [24] ZAKI M. J. SPADE: An Efficient Algorithm for Mining Frequent Sequences[J]. Machine Learning, 2001, 42(1-2): 31-60
- [25] Pei Jian, Han Jiawei, B. Mortazavi-Asl et al. Mining sequential patterns by pattern-growth: the PrefixSpan approach [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(11): 1424-1440
- [26] Wang Zhaogang, Zhang Bin, Li Guohui. A Topological Constraints Based Sequential Data Mining Approach on Telecom Networks Alarm Data [C]//2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, Sanya, Hainan, 2009: 750-754
- [27] Cheung D W, Han Jiawei, Ng V T, et al. Maintenance of discovered association rules in large databases: an incremental updating technique [C]//Proceedings of the Twelfth International Conference on Data Engineering, New Orleans, LA, 1996: 106-114
- [28] Cheung D W, Lee S D, Kao B. A general incremental technique for maintaining discovered association rules [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Database Systems for Advanced Applications, Melbourne, 1997: 185-194
- [29] 朱玉全, 孙志挥, 季小俊. 基于频繁模式树的关联规则增量式更新算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(1): 91-96
- [30] Leung C K, Khan Q I, Hoque T, CanTree: a tree structure for efficient incremental mining of frequent patterns [C]// Fifth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM'05), Houston, 2005: 274-281
- [31] 李川. 基于 SPARK 的电信网络告警大数据关联规则算法研究与实现[D]. 北京:北京邮电大学. 2017
- [32] WHITE T. Hadoop: The Definitive Guide[M]. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc. 2012
- [33] Zaharia M, Chowdhury M, Franklin M J, et al. Spark: cluster computing with working sets [C]// Proceedings of the 2nd USENIX Conference on Hot Topics in Cloud Computing. Berkeley: USENIX Association, 2010: 10-10
- [34] 韩宏莹. 并行数据挖掘技术在电信网管告警中的应用研究[D]. 长春:长春工业大学. 2016
- [35] Han Jianwei, Fu Yongjian. Discovery of Multiple-Level Association Rules from large databases [C]//Proceedings of the International Conference on Very Large Databases, 1995, 1(21): 420-431

(下转第 88 页)

廉洁风险防控在岗位与制度流程中的应用研究

姜丽娜 陈健 赵晓波 龙宇婷

东方电气股份有限公司燃机事业部,成都 611731

摘要:纪律检查工作已不再处于“民不起、官不究”或是“秋后算帐”、“马后炮”的被动局面,而是不断探索更加注重治本、更加注重预防、更加注重长效机制的廉洁风险防控。立足岗位与制度流程、进行360度无死角地梳理、排查、定级、防控,把权力关到制度的笼子里、锁在流程的链条中,把各个岗位、各个流程中的廉洁风险控制到较低水平,文章结合工作实际将这一创新的工作方式进行了详细阐述,并分析、总结、分享了工作经验。

关键词:廉洁风险; 岗位流程; 制度流程; 防控措施

中图分类号:C931.2

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2021)01-0085-04

Application Research of Honest Risk Prevention and Control In Post Work Flow

JIANG Lina, CHEN Jian, ZHAO Xiaobo, LONG Yuting

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

Abstract: The discipline inspection has not been in a passive situation any more, when honest problems piled up and negative impact revealed. Nowadays, the honest risk prevention and control is more developed, getting on the root and concerning more on the prevention and long-acting. Sorting out the post work flow and rules and regulations process overall, investigating the potential honest risk, grading the honest risk and making prevention and control measures. Then the honest risk for each post and each work flow could be reduced to the low level with power exercised in the institutional cage and locked in the work process chain. The article describe this innovative working methods in detail, analyze, summarize and share the working experience.

Key words: honest risk; post work flow; rules and regulations process; prevention and control measure

2013年1月,习近平总书记在十八届中央纪委第二次例会上提出“把权力关进制度的笼子里,用制度改革的刀子,挖出腐败之根,通过制度制约权力合法合规运行,实现干部清正、政府清廉、政治清明”。党的十九届四中全会《决定》提出“着眼重点领域和关键环节,要求强化权力运行制约监督,完善权力配置和运行制约机制,体现了对权力运行规律认识的深化,是对权力制约监督的创新探索”。中央纪委四次全会指出“加强廉洁风险防控,探索标本兼治有效办法”。

纪检工作早已不再处于“民不起、官不究”或是

“秋后算帐”、“马后炮”的被动局面,而是不断探索更加注重治本、更加注重预防、更加注重长效机制的廉洁风险防控。立足岗位与制度流程、进行360度无死角地梳理、排查、定级、防控,把权力关进制度的笼子里、锁在流程的链条中,把各个岗位、各个流程中的廉洁风险控制到较低水平,文章结合工作实际将这一创新的工作方式进行了详细阐述,并分析、总结、分享了工作经验。

1 找准对象、开展试点

营销服务、项目管理、物资采购、招标投标、工

收稿日期:2020-10-14

作者简介:姜丽娜(1983-),女,2005年毕业于西安交通大学能动学院热能工程专业,本科,高级工程师。现在东方电气股份有限公司燃机事业部主要从事综合管理工作。

程建设等领域是腐败易发多发的重点领域,覆盖上述职能、岗位丰富多样的组织机构是开展廉洁风险防控工作的理想目标单位。对于东方电气集团这样一个“六电并举”(火电、水电、风电、核电、气电、太阳能发电)的能源结构多元化企业,寻找上面的理想目标单位并不难,不过考虑到推广应用的效果,最好选取少量目标单位开展廉洁风险防控试点工作,总结经验并改进提升后,再全面推广廉洁风险防控应用。

2 动员部署、提高站位

立足部门的岗位和制度流程来开展廉洁风险防控试点工作是深入推进全面从严治党向基层延伸的客观需要和有效措施,是对权力运行实施有效监管的重要手段,是纪律检查工作的模式创新和有益尝试,更是对全体干部员工的无限关怀与正向保护。

首先建立廉洁风险防控试点工作领导小组和工作小组,充分发挥领导小组的引领作用与工作小组的履责职能,策划制定试点工作实施方案,明确指导思想、目标要求、工作原则、责任分工,提出工作要求与进度要求,制定详细的行动计划,以进一步细化分解试点工作任务要点,落实责任单位、责任人。同时通过微信群发、网络新闻、学习宣贯、启动会议等多种形式大力营造反腐倡廉教育与廉洁风险防控的工作氛围,号召全体在岗干部员工站在政治和全局的高度,深刻认识廉洁风险防控试点工作的重要作用与重大意义。

人心齐,泰山移,思想和行动统一了,试点工作的圆满完成就有了良好的群众基础和不竭的内生动力。

3 排查风险、定级防控

梳理排查廉洁风险切忌凭空臆想或网大漏鱼,首先需要立足部门职责、岗位具体工作事项进行全面梳理,细致程度基本达到平均每个岗位近20条具体工作事项,保证工作事项面面俱到,没有疏漏。

接下来缩小“包围圈”,在梳理出来的具体工作事项中地毯式排查可能涉及到廉洁风险的工作事项,对于营销服务、物资采购、项目现场服务基地费

用管理、项目收付款管理、技术质量问题处理等易滋生不廉洁行为的重点领域贴标签,直接锁定“晋级”下一轮:廉洁风险点确定。

确定廉洁风险点之后,如何来描述风险点及风险事件,并且以较为合理且可量化的评估准则来定级廉洁风险,这是试点工作难度值较高的部分,长期从事具体业务工作的人员在这一块可能会力不从心,需要从事纪检工作的人员给予一定的专业指导。从以往公司发生的违纪违法案例来看,其行为主要集中在八个方面:一是泄露市场信息谋利;二是采购过程谋利;三是违规接待谋利;四是套取公款谋利;五是供方管理谋利;六是合同变更谋利;七是项目收付款谋利;八是员工管理谋利。这八个方面,或为自己谋利,或为他人谋利,或为钱财,或为人情。做好上述分类,为廉洁风险点合并同类项提供便利,同时也为风险定级评估准则塑造评价维度。

具体描述廉洁风险点及风险事件的时候,既要指出具体的工作流程,又要指出在具体工作流程中谋利的方式以及可能获得的好处,比如“在审批工程项目物资采购计划中,指示(暗示)员工违规虚增采购计划,提高合同价格,为供方谋取利益,收受相关供应商的咨询费、好处费、返点提成、礼品、礼金、提货卡等”。

在评定廉洁风险等级时,评定准则需要将风险领域的重要程度和影响程度、干部和员工对应的不同的职位影响力、风险发生几率,以及当事人发生不廉洁行为是直接还是间接操作等几个维度来考虑设置分数、系数、计算方法,并根据计算结果来划分低、中、高三个风险等级,有了定级,才能有的放矢,为日后分级防控提供基础和依据。

廉洁风险防控措施是重中之重,必须行之有效、落地有声,切忌泛泛而谈、空洞无物。一是针对廉洁思想意识上的淡漠,要加强廉洁自律、廉洁从业教育工作,可以专题宣传党的理想信念、优良传统,讲解廉洁自律、廉洁从业有关规定,学习警示案例,参观廉洁展馆,还可以邀请公司领导给全体干部员工讲一堂生动的廉洁实践课;二是针对岗位与制度流程上的漠视,要加强规章制度流程培训工作,尤其确保所在岗位涉及廉洁风险的相关流程制度的培训全覆盖;三是针对岗位与制度流程中的权

力运行监督与制约缺失、缺陷要下大力气进行流程再造、制度改进；四是加强廉洁契约管理，单位与员工签订廉洁承诺书，在绩效考核中探索廉洁从业考核机制；五是创新廉洁管控体制机制，建立内部监督机制，对市场营销、物资采购、合同变更、现场基地费用使用、供应商产品质量问题处置等容易滋生不廉洁行为的重点领域进行定期监督检查并根据检查提出的整改建议进行立行立改；六是设立公开栏，加强民主公开与群众监督工作，在阳光下行使权力，在透明中推进工作，让各种不廉洁的、见不得光的行为无处遁形。

4 动态管理、长效管控

笃初诚美、慎终宜令，开头好固然好，结果好才是真的好。建立廉洁风险长效动态管理机制，对已排查、已界定的廉洁风险进行定期“回头看”，结合职责定位、员工岗位职责、制度流程等实际情况的变化动态管理廉洁风险，形成计划、实施、检查、改进的PDCA闭环循环管理，并长期坚持廉洁风险防控工作常态化、不松劲儿。

5 总结经验、推广应用

总结试点经验，以试助推，以推固试。发挥试点效应，星星之火，可以燎原。

燃机事业部的廉洁风险防控试点过程历时大半年，经过动员部署、风险排查、定级、制定防控措施、开展防控、总结提高各个阶段，最后形成《廉洁风险防控工作手册》及《廉洁风险防控试点专项工作报告》，以方便今后在集团内更大范围推广应用，吸取经验与教训、少走弯路也是试点工作的意义所在。

5.1 推广经验

5.1.1 书记上阵、亲自部署

开展廉洁风险防控工作落实全面从严治党主体责任的一项重要任务，党支部书记作为第一责任人亲自上阵，建立领导小组、工作小组，亲自部署、亲自督办、亲自检查，试点工作在各个层级推进顺利、势如破竹。

5.1.2 取信员工、赢得支持

通过学习宣贯、宣传动员，员工理解了开展廉

洁风险防控试点工作的目的与意义，增强了主动防范廉洁风险的意识，内化于心，外化于行，廉洁风险防控试点工作的内涵与实质不断地被理解、被相信、被践行、被传播。

5.1.3 扎实推进、步步为营

通过明确三层级组织机构及建立沟通协调联动机制，扎实有效推进廉洁风险防控试点工作。

(1) 三层级组织机构

总部直属纪委办公室（以下简称“纪委办”）代表集团负责对试点单位开展廉洁风险防控试点工作进行总体策划和指导协调，试点单位设立试点领导小组与工作小组，工作小组成员分布在试点单位下属各个室办。三层级组织机构依据廉洁风险防控试点工作方案及具体行动计划，协同推进试点工作。

(2) 沟通协调联动机制

纪委办与试点单位建立沟通机制，试点单位领导小组与工作小组间建立把关机制，工作小组成员间建立例会机制，上述机制有机联动，各项工作要求、注意事项在基层得到有效推进与落实，确保了廉洁风险防控试点工作的质量与效率。

5.1.4 打造样板、高效推广

从梳理具体工作事项到排查、描述、定级廉洁风险点及风险事件，选取某一岗位打造样板，对样板进行培训，以其为标准在各个岗位进行推广，显著提高试点工作的规范性，减少返工、提高效率。

5.2 存在问题及建议

5.2.1 案例培训、有待加强

试点单位对违纪违法案例学习和了解不够，对廉洁风险点及风险事件描述经验不足，需要加强相关培训工作。

5.2.2 长期坚持、面临挑战

廉洁风险的长效管控任重道远，尚处于试点完成尚待推广时期，还不具备列入单位年度生产经营指标体系的广泛性，试点单位在完成试点工作正式进入常态化、长效性管控阶段后，积极性有所降低、动力有所减弱，需要从个性化的经营指标角度予以考核激励。

5.2.3 推广应用、因地制宜

职责不同、岗位不同，存在的廉洁风险点与事

件也不尽相同,单位不同、情况不同,开展工作的模式和效果也不尽相同,试点单位的经验与教训切忌拿来主义,推广应用单位更应注重单位自身实际、因地制宜走出一条属于自己的特色之路。

6 结语

本文结合燃机事业部廉洁风险防控试点工作

实际,阐述了基于岗位与制度流程梳理排查廉洁风险、评估确定廉洁风险等级、制定风险防控措施并动态、长效管理的全过程,逐步降低每一个岗位、每一个流程中的廉洁风险水平,对其它企业进行廉洁风险防控具有一定的借鉴意义。

(上接第 84 页)

- [36] 林长方,吴扬扬,黄仲开等. 基于 MapReduce 的 Apriori 算法并行化[J]. 江南大学学报(自然科学版),2014,13(4): 411-415
- [37] 肖文,胡娟,周晓峰. PFonCanTree:一种基于 MapReduce 的并行频繁模式增量挖掘算法[J]. 计算机工程与科学,2018,40(1):

15-23

- [38] Mao Weijun, Guo Weibin. An improved association rules mining algorithm based on power set and Hadoop [C]//Proc of International Conference on Information Science and Cloud Computing Companion,2013: 236-241

集团要闻

东方汽轮机定点帮扶的中江县辑庆镇尖寨村获评“四川省乡村振兴示范村”

2021年2月19日,四川省委农村工作会议宣读了四川省委、四川省政府关于2020年度四川省乡村振兴先进县(市、区)、先进乡镇、示范村的决定,并予以表彰。东方电气集团东方汽轮机有限公司定点帮扶的中江县辑庆镇(原合兴乡)尖寨村名列其中,被命名为“2020年度四川省乡村振兴示范村”。

2018年,东方汽轮机开始定点帮扶中江县合兴乡(现并入辑庆镇),并具体联系帮扶尖寨村、孟家营村和松柏村,共同以实施乡村振兴战略为总抓手,围绕产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕总要求,大力推进乡村产业振兴。2018~2020年,东方汽轮机帮助尖寨村建成了包含杂柑、中江柚和中江芍药的扶贫产业园区,产业园建立可精准调节土壤微量元素的水肥一体滴灌系统,并完成了中江芍药和中江柚的有机认证,产品具备了进入高端消费市场的条件。目前,尖寨村扶贫产业园已经成为中江县的科技农业示范园区。东方汽轮机在辑庆镇开展基础设施建设等民生工程18项,主要包含道路、桥梁、文化广场等工程的建设,扩宽尖寨村社道2.68公里,安装和更换路灯50盏,修缮扩宽桥梁1座,目前,尖寨村全村户户通水泥路,户户通自来水,天然气用户达60%以上,网络覆盖率100%。

在东方汽轮机和尖寨村干部群众的共同努力下,尖寨村的人居环境、村级治理得到了全面提升,特色产业竞争力不断增强,村民幸福指数不断提高,2019年被评为德阳市乡村振兴示范村,2020年成功申报“美丽中江·宜居乡村”精品村,2020年荣获“四川省乡村振兴示范村”称号。

来源:东方电气网

欢迎投稿,欢迎订阅!