

ISSN 1001-9006  
CN 51-1333/TM



2022

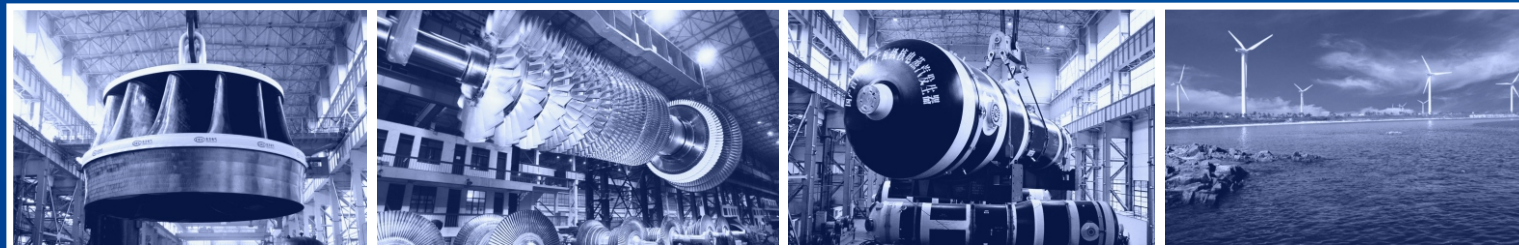
第36卷 总第144期

# 東方電氣評論

## DONG FANG DIAN QI PING LUN

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

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



东方电气评论

第三十六卷第四期

二〇二二年十二月

公开 ISSN 1001-9006  
发行 CN 51-1333/TM

第36卷第4期(总第144期) 国内邮发代号:62-187  
出版日期:2022年12月25日 国内定价:8.00元



中国东方电气集团有限公司 主办  
四川省动力工程学会



第36卷第4期(卷终) 总第144期  
(季刊, 1987年创刊)

# 東方電氣評論

## 目次

### 编辑委员会

主任委员: 王为民

副主任委员: 董娜 杨永

委员: 马擎天 王晓亮 王愚 王建录 王拯元

方宇 邓仲勇 乐劲松 石清华 光海杰

刘世洪 刘泰生 张启德 张国荣 邹杰

何维 陈文学 陈杰富 杨武勇 杨要武

杨华春 闵泽生 吴建东 赵永智 赵世全

侯小全 贺建华 钟杰 郭延 唐洪驹

谢光有 曾明富 赖成毅 潘乾刚 霍锁善

秘书长: 杨永

主管: 中国东方电气集团有限公司

主办: 中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会

主编: 王为民

副主编: 董娜 杨永

本期责任编辑: 王为民

英文编辑: 王为民

编辑出版: 《东方电气评论》编辑部

地址: 成都市高新西区西芯大道18号

邮编: 611731

电话: 028-87898262/63

传真: 028-87898267

电子信箱: dfdqpl@dongfang.com

印刷单位: 成都金恒信印务有限公司

国内发行: 四川省报刊发行局

国外发行: 中国出版对外贸易总公司北京782信箱

### 基础研究

湿法球磨制备光伏太阳能电池片用片状银粉的工艺研究.....朱健 罗恒 刘萍等(1)  
方家山核电厂发电机氢气泄漏率计算方法改进.....王公展 尚宪和 费志松等(5)  
浅析退役风电叶片处理回收与再利用.....郭盼 齐晓蕾 谢斐等(10)

### 汽轮机

基于光纤振动传感器的定子绕组端部振动监测技术与应用.....宋清松 马雪松(15)  
1000 MW汽轮发电机定子弹簧板应力测试、调试技术.....蒋海涌(19)  
补汽流量和结构对机组影响的数值研究.....白昆仑 平艳 钟主海等(22)  
盐穴空气储能透平机组轴系动力学分析.....曹寒 祁乃斌 杨培平等(26)

### 燃煤发电

面向发电设备制造企业的车间数据采集与应用.....谢红梅 杨涛 刘伯兴(30)  
50 MVar调相机润滑油系统合理选型与油温校验.....贾小平 夏瑜婷 席波等(35)  
80 kW永磁同步牵引电动机设计.....伍海军(38)  
碳酸氢钠干法脱硫工程应用及脱硫性能研究.....杜文韬 王伟明 银登国等(44)  
大件设备倾斜式运输装载方案的分析和应用.....许铁军(49)  
一种O形橡胶圈的密封强度计算方法.....张波 严欢 季敏东等(54)  
优乐高电站全流道CFD分析及转轮刚强度计算.....张文斌 朱焕林(58)

### 核能发电

核电稳压器翻转工具设计.....李亭 王刚 李东铭等(62)  
双钨极氩弧焊技术的发展及其在核承压设备耐腐蚀层堆焊中的应用.....俞雄军 苏斌(64)  
压水堆核电机组供热蒸汽转换系统技术浅析.....钦书丽 邓科 王强(69)

### 风能发电

一种风电机组单叶片吊装电动盘车装置试验研究.....郭旺 强喜臣 王琦等(74)  
风力机塔筒涡流激振分析软件系统开发及应用.....胡宗邱 龚学进 杨张斌等(77)

### 水力发电

拉美水电设备出口从产品设计到工程安装全流程质量管控创新实践.....奚红 刘孝皎(83)  
简讯.....(76)(88)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM\*1987\*q\*A4\*88\*zh\*p¥8.00\*750\*20\*2022-04

# DONGFANG ELECTRIC REVIEW



2022-12-25 Vol.36 No.4  
(Quarterly, since 1987)

## CONTENTS

### BASIC RESEARCH

Preparation of Flake Silver Powder for Photovoltaic Solar Cells by Wet Ball Milling.....ZHU Jian, LUO Heng, LIU Ping, et al (1)  
Improvement to the Generator Hydrogen Leak Rate Calculation Method of Fangjiashan Nuclear Power Plant.....WANG Gongzhan, SHANG Xianhe, FEI Zhisong, et al (5)  
Analysis on Recovery and Reuse of Retirement Wind Turbine Blades.....GUO Pan, QI Xiaolei, XIE Fei, et al (10)

### TURBINE

Stator End Winding Vibration Monitoring System and Application Based on Optical Fiber Sensor.....SONG Qingsong, MA Xueson (15)  
The Stress Testing and Debugging Technologies of Stator Spring Plate on 1000 MW Turbine Generator.....JIANG Haiyong (19)  
Numerical Investigation for Effect of Supplementary Steam Quantity and Structure on Steam Turbine.....BAI Kunlun, PING Yan, ZHONG Zhuhai, et al (22)  
Dynamic Analysis of Shafting System of Salt Cavern Air Energy Storage Turbine.....CAO Han, QI Naibin, YANG Peiping, et al (26)

### THERMAL POWER/COAL-FIRED POWER

Data Acquisition and Application for Power Generation Equipment Manufacturing.....XIE Hongmei, YANG Tao, LIU Boxing (30)  
Selection and Oil Temperature Calibration for Lubricating Oil System of 50 MVar Synchronous Compensator.....JIA Xiaoping, XIA Yuting, XI Bo, et al (35)  
Design of 80 kW Permanent-magnet Synchronous Traction Motor.....WU Haijun (38)  
Engineering Application and Performance Study on Dry Desulfurization of Sodium Bicarbonate.....DU Wentao, WANG Weimin, YIN Dengguo, et al (44)  
Analysis and Application of Inclined Transportation Loading Scheme for Large Equipment.....XU Tiejun (49)  
A Calculation Method for Sealing Strength of O-ring.....ZHANG Bo, YAN Huan, JI Mindong, et al (54)  
CFD Analysis of Full Flow Channel and Strength Calculation of Fluid Solid Coupling of Runner in ULOG Power Station.....ZHANG Wenbin, ZHU Huanlin (58)

### NUCLEAR POWER

Design of the Overtum Device for Nuclear Pressurizer.....LI Ting, WANG Gang, LI Dongming, et al (62)  
The Development of T-TIG and the Application on Corrosion Resistance Layer for Nuclear Pressure Equipment.....YU Xiongjun, SU Bin (64)  
Technical Analysis of PWR Nuclear Power Plant Steam Transfer System.....QIN Shuli, DENG Ke, WANG Qiang (69)

### WIND POWER

Experimental Research of A Electric Turning Gear for Wind Turbines Single-blade Hoisting.....GUO Wang, QIANG Xichen, WANG Qi, et al (74)  
Development and Application of Software System for Vortex-induced Vibration Analysis of Wind Turbine Tower.....HU Zongqiu, GONG Xuejin, YANG Zhangbin, et al (77)

### HYDRO POWER

Full Process Innovation Practice From Design to Engineering Installation for Hydro-electric Equipment Exported to Latin-America.....XI Hong, LIU Xiaojia (83)  
NEWS IN BRIEF.....(76)(88)

### EDITORIAL BOARD

Chairman: WANG Weimin

Vice Chairmen: DONG Na, YANG Yong

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

Chief Secretary: YANG Yong

Sponsor: Dongfang Electric Corporation

Chief Editor: WANG Weimin

Vice Chief Editors: DONG Na, YANG Yong

Executive Editor: WANG Weimin

English Editor: WANG Weimin

Edited and Published by:

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

Postal Code: 611731

Tel: 028-87898262 87898263 Fax: 028-87898267

E-mail: dfdqpl@dongfang.com

Overseas Distribution by:

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

# 湿法球磨制备光伏太阳能电池片用片状银粉的工艺研究

朱健 罗恒 刘萍 廖亚琴\*

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

**摘要:** 虽然湿法球磨制备片状银粉的工艺在行业内已有应用, 但相对于干法球磨, 湿法的工艺条件, 如球磨介质, 球料比, 研磨频率等影响因素与成型后银粉成片效果并没有成熟的系统性研究, 本文采用湿法球磨将微纳米级球形银粉制备成片状银粉, 探究了无水乙醇用量、球料比、球磨频率对片状银粉形貌和粒径分布的影响。实验发现: 无水乙醇用量 40 wt.%Ag 时, 可吸收球磨过程中产生的热量, 同时减少冷焊和叠片现象, 粒径分布较窄且可控; 球料比和球磨频率的增大可增强球形银粉的片化效率; 无水乙醇用量 40 wt.%Ag、球料比 9 比 1、球磨频率 25 Hz/30 Hz 时, 可保证较高的片化率, 粒径可控且分布较窄, 集中分布在 1 至 4  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 片状银粉; 湿法球磨; 无水乙醇用量; 球料比; 球磨频率

中图分类号: TB383.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0001-04

## Preparation of Flake Silver Powder for Photovoltaic Solar Cells by Wet Ball Milling

ZHU Jian, LUO Heng, LIU Ping, LIAO Yaqing\*

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

**Abstract:** Micro nano spherical silver powder was prepared into flake silver powder by wet ball milling. The effects of anhydrous ethanol dosage, ball material ratio and ball milling frequency on the morphology and diameter distribution of flake silver powder were investigated. It is found that when 40 wt.% Ag is used without water, it can absorb the heat generated in the process of ball milling, reduce cold welding and lamination, and the particle size distribution is narrow and controllable; The flake efficiency of spherical silver powder can be enhanced with the increase of ball material ratio and ball milling frequency; When the amount of anhydrous ethanol is 40 wt.% Ag, the ball material ratio is 9:1, and the ball milling frequency is 25 hz/30 hz, the higher fragmentation rate can be guaranteed. The particle size is controllable and the distribution is narrow; which is concentrated in 1 to 4  $\mu\text{m}$

**Key words:** flake silver powder; wet ball milling; alcohol consumption; ball material ratio; ball milling frequency

在太阳能电池片中, 银电极作为主要的导电功能相, 对电池片的光电转换效率起到重要作用。银粉是制作银电极的导电银浆的关键原材料之一, 其性能与银粉形貌、粒径等参数息息相关。导电银浆的电阻主要由填料内电阻、接触电阻和隧穿电阻组成<sup>[1]</sup>, 相较于球形银粉的点对点接触, 片状银粉之

间以线对面或面对面接触, 接触面积较大<sup>[2]</sup>, 从而在太阳能电池电极, 尤其是低温电池电极上提供更好的导电性能。

目前, 常见的制备片状银粉的方法主要有化学还原法和机械球磨法。其中, 化学还原法包括直接还原法、晶种法、模板法、光诱导法、微波辐射法

收稿日期: 2022-07-12

作者简介: 朱健(1983—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事导电粉体及电子浆料应用研究。

廖亚琴(1982—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事导电粉体开发。通讯邮箱: lianyq@dongfang.com。

等<sup>[3]</sup>，化学还原法获得的片状银粉粒度均匀，且不会因为机械加工被进一步污染，但这种方法控制难度高、稳定性差、片状银粉厚度较薄，不能很好的满足产品需求等，目前还局限于实验室阶段<sup>[4-5]</sup>。机械球磨法获得的片状银粉分散性好，扁平度高，产率高，容易实现工业化；但机械球磨法控制因素多，不同批次的片状银粉片径大小、表面状态等参数很难一致，导致导电银浆印刷平整性差、印刷电路不均匀，从而增大银电极电阻；此外，研磨过程中容易出现磨球材质被微量磨出而引入杂质，影响银粉纯度，产生硬化现象<sup>[6]</sup>。目前，机械球磨法仍是主流的片状银粉制备方法。

在机械球磨法中，球磨转速、球磨时间、球磨物料比和球磨介质种类及用量直接影响到片状银粉的形貌和粒径<sup>[7]</sup>。目前，关于球磨介质对于片状银粉形貌、成片效果、片径分布的影响的研究较少。本工作以硝酸银为前驱体，与还原剂反应后经有机化合物包覆改性并烘干得到的不规则银粉为原材料，讨论了球磨介质用量、球料比和球磨转速与球磨时间对制备片状银粉的影响。为避免引入过多有机介质引起导电银浆电性能下降，所有球磨实验不再额外加入球磨助剂。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 原材料及仪器

原材料：球形银粉（自制，硝酸银在分散剂的作用下发生还原反应并经有机化合物包覆，平均粒径 D50 为 0.88  $\mu\text{m}$ ，比表面积为 1.42  $\text{m}^2/\text{g}$ ）；无水乙醇（分析纯，科隆化工）。

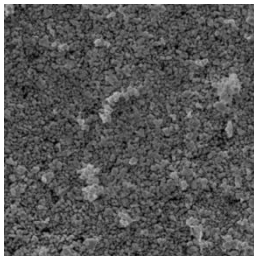


图 1 自制银粉 SEM 图

设备仪器：全方位行星式球磨机（QM-QX 型，南京南大仪器厂）；扫描电子显微镜（Vega3 Tescan，

捷克 Tescan）；激光粒度仪（Malvern-Mastersizer 2000E，马尔文帕纳科）；粒度分析软件：Nano Measurer。

### 1.2 试验

选取 D2 mm 氧化锆球为研磨球，无水乙醇为球磨溶剂，研磨球：球形银粉：球磨溶剂按下表加入至 PTF 球磨罐后，在 QM-QX 型全方位行星式球磨机中按一定转速球磨特定时长后，加入酒精洗涤后过滤使球粉分离，50  $^{\circ}\text{C}$  烘干 12 h 得到片状银粉。

表 1 湿法球磨工艺表

组别	编号	氧化锆球： 球形银粉	乙醇 (wt.%Ag)	球磨转速 (Hz)	球磨时 间(h)
无水 乙醇 用量	1#		10		
	2#		20		
	3#	9:1	30	25	1,2,4
	4#		40		
	5#		80		
	6#		150		
球料 比	7#	5:1			
	8#	9:1	40	25	1,2,4
	9#	14:1			
球磨 转速	10#			15	
	11#			20	
	12#	9:1	40	30	1,2,4
	13#			35	

## 2 结果与讨论

### 2.1 乙醇用量对片状银粉的影响

湿法球磨制备片状银粉的常用球磨介质为水和乙醇，文献<sup>[8]</sup>表明：由于银粉表面包覆亲油化合物，在乙醇中有良好的润湿性，借助磨球的运动，银粉颗粒可均匀地分散在乙醇中，吸收热量的同时防止冷焊，提高球磨效率；而在水中分散性差，容易造成成片不均匀且片化率低<sup>[9]</sup>。

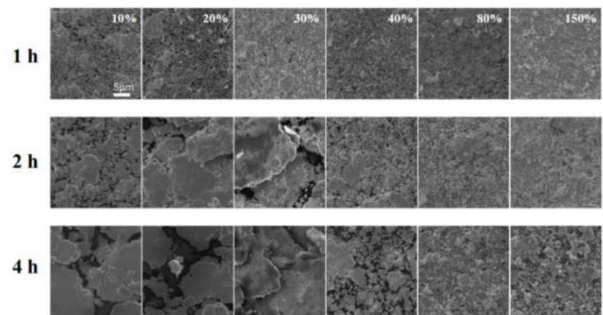
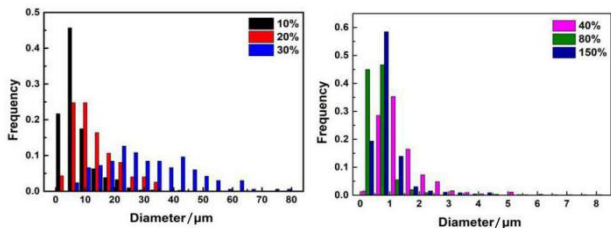


图 2 不同乙醇用量球磨粉体在 1 h、2 h、4 h 时 10kx 下 SEM 图



(a) 10%至30% (b) 40%至150%粒度分布图

图3 乙醇用量

由图2、图3，乙醇用量为10%、20%、30%时具有较好的成片效率和成片率，在球磨2h时已完全片化，且随乙醇用量增加片化效果提升。球磨4h时主要粒径分布依次为2~10 μm、6~18 μm、10~46 μm。而乙醇用量在40%、80%、150%时，在球磨4h时片径较小，随乙醇用量增加片化率降低，球磨4h时主要粒径分布分别为0.75~2.25 μm、0.25~1.25 μm、0.25~1.25 μm。

这是因为在乙醇用量较少时，乙醇起到浸润和分散粉体的效果，使银粉吸附在磨球上，增强球磨效果，从而提升球磨效率<sup>[10]</sup>；同时，银粉在受磨球碰撞过程中产生大量的热量，乙醇用量较少导致热量难以消散，导致大量的冷焊和叠片现象，造成较大的片径和较宽的粒度分布<sup>[11]</sup>；在乙醇用量过多时，银粉可能分散在乙醇中而难以附着在磨球表面，在球磨过程中被甩到罐壁，造成球与粉碰撞概率降低<sup>[12]</sup>；此外，过多的乙醇将作为物理阻隔，降低球与粉之间碰撞能量，造成成片效率低，片化效果不佳<sup>[13]</sup>。

在乙醇用量40%时，该条件下具有一定的片化效果，最大片径约6 μm；同时，适宜的乙醇用量可吸收球磨过程中产生的热量，减少聚集和冷焊现象，使得片径分布相对集中。

### 2.2 球料比对制备片状银粉的影响

球料比是影响球磨效率的重要因素。球料比大，单位时间内磨球与粉体碰撞次数更多，具有更高的成片效率；而球料比较低时，磨球与粉体的碰撞频率低，甚至部分粉体无法与磨球发生碰撞，造成成片效率低、片化率较低。

由图4、图5，球料比为5比1时，其成片效率和成片率均较低，在球磨4h时仅有少量片化；而在球料比为14比1时，在球磨1h时基本片化，球磨至2h时完全片化，这是因为在球料比较高时，

粉体与磨球碰撞频率较高，因而球料比高时具有较高的成片效率和成片率；此外，球料比较高时，粉体与磨球碰撞产生的热量较高，乙醇不足以吸收全部能量，导致大量的冷焊和叠片现象，造成很宽的片径分布<sup>[15]</sup>；此外，较高的球料比会导致单次球磨粉体质量减小，造成片状银粉制备效率降低<sup>[12]</sup>。

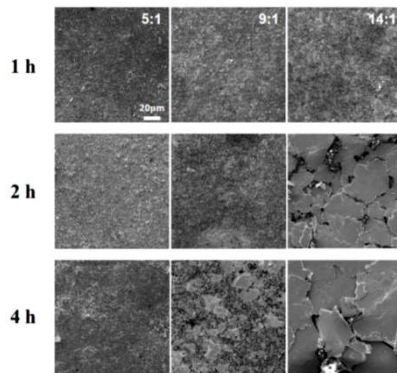


图4 不同球料比球磨粉体在1h、2h、4h时2kx下SEM图

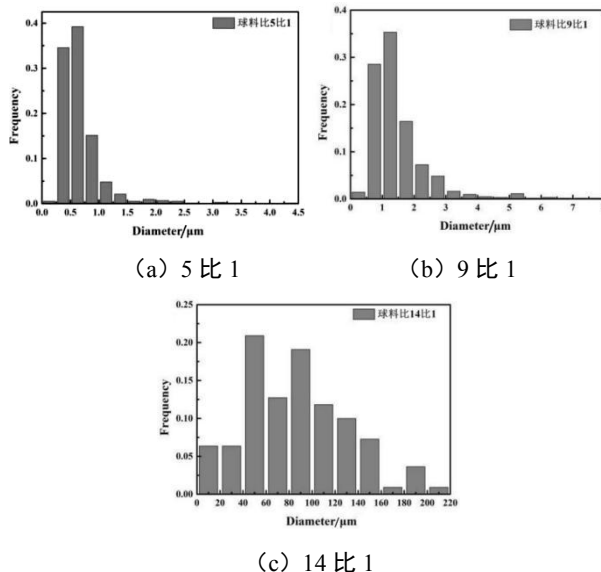


图5 不同球料比下球磨粉体在4h时粒径分布图

### 2.3 球磨频率对制备片状银粉的影响

球磨频率是决定磨球动能的主要因素之一。球磨频率的增加有利于提高磨球动能，提高粉体颗粒的片化效率，但过高的球磨频率会导致磨球与粉体颗粒碰撞时产生大量的热量，造成冷焊和叠片现象，形成宽的片径分布；而过低的球磨频率则导致磨球与粉体碰撞能量较低，使得粉体颗粒变形程度较小，降低片化效率<sup>[16]</sup>。

由图6、图7，低频下球磨粉体的成片效果较差，在球磨4h时仅部分成片，在25 Hz、30 Hz下

能保持一定的成片效率，且具有相对较窄的粒径分布；而高频下球磨4 h可使球形银粉完全成片，但其片径分布很宽，最大片径达到60 μm，无实际应用价值。这是因为，随着球磨频率的增大，磨球和银粉颗粒的运动更加剧烈，因此磨球与银粉颗粒间的碰撞能量增大，造成银粉单次碰撞变形程度增大；同时球磨频率的增大，单位时间内硬质磨球与银粉颗粒间的碰撞次数增加，两者叠加下导致片径急剧增大。

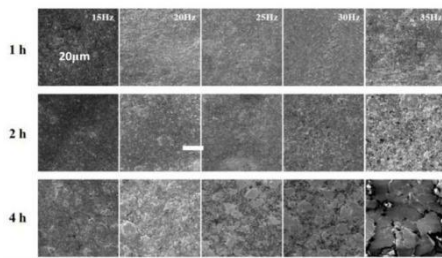


图6 不同频率下球磨粉体在1 h、2 h、4 h时2kx的SEM图

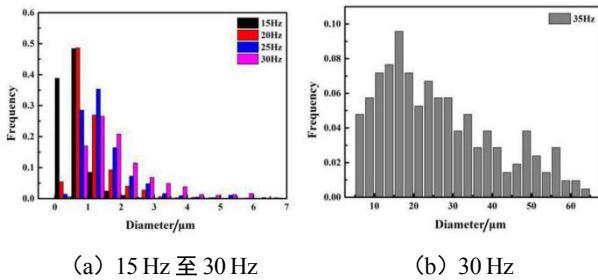


图7 不同球磨频率下球磨粉体在4 h时粒径分布图

### 3 结语

本文研究了湿法球磨制备片状银粉的几个重要影响因素，包括无水乙醇用量、球料比和球磨频率，结果如下：

(1) 无水乙醇用量：在无水乙醇用量较少时，起分散和润滑效果，使球形银粉吸附在磨球表面，增强球磨效果，同时热量难以消散，造成冷焊现象，容易得到粒径较大的片状银粉；而无水乙醇用量过多时，银粉分散在无水乙醇中，起物理阻隔作用使银粉与磨球碰撞概率降低，从而大大降低球磨效果；无水乙醇用量40 wt.%Ag时，无水乙醇可吸收球磨过程中产生的热量，减少冷焊和叠片现象，使球形银粉片化程度容易控制，且粒度分布范围较窄；

(2) 球料比：球料比的大小影响单位时间内磨球与球形银粉的碰撞次数，球料比高可提升片化

效率；球料比低则片化效率低，达到相同的片化程度则需要更高的时间成本；

(3) 球磨频率：球磨频率的增大，球形银粉与磨球的碰撞能量增大，使单次碰撞变形程度增大，同时单位时间内的碰撞次数增多，导致片化效果提升；但球磨频率提高，其片化程度控制难度增大，同时不利于球磨机寿命；

(4) 无水乙醇用量40 wt.%Ag、球料比9比1、球磨频率25 Hz/30 Hz时，可保证较高的片化率，粒径可控且分布较窄。

### 参考文献：

- [1] 闫方存, 滕媛, 严继康等. 片状银粉对太阳能电池银浆料电性能影响研究[J]. 功能材料与器件学报, 2015, 21(4):31-35
- [2] 唐卫岗, 胡岭, 黄世盛等. 高能球磨法制备微米银片的工艺研究[J]. 材料导报, 2021, 35(S02):428-432
- [3] 张明, 吴元庆, 李春梅等. 晶硅太阳能电池背面银浆所用片状银粉的研究[J]. 人工晶体学报, 2017, 46(5):850-854
- [4] 周云, 张彦伟, 王晶晶等. 一种太阳能电池背面银浆用不规则片状银粉的制备方法: CN 104475754 A[P]
- [5] 李芝华, 王炎伟, 卢健体. 片状纳米银粉的化学制备技术研究进展[J]. 化工学报, 2009, 60(6):1351-1356
- [6] 王自伟, 赵世晓, 周全法等. 一种用于太阳能背银的片状银粉的制备方法: CN105817647A[P]
- [7] 孟晗琪, 陈昆昆, 党蕊等. 片状银粉的制备技术研究进展[J]. 广州化工, 2018, 46(21):12-13+28
- [8] 琚伟, 马望京, 彭丹等. 导电银胶用片状银粉的制备[J]. 贵金属, 2015,36(2):29-32
- [9] 冯清福, 孟宪伟, 梁云等. 超细片状银粉的制备技术研究进展[J]. 贵金属, 2018, 39(1):86-93
- [10] 琚伟, 伊希斌, 张晶等. 片状银粉行星球磨过程中的影响因素[J]. 中国粉体技术, 2016, 22(6):46-49
- [11] 车龙, 堵永国, 杨初. 热处理对片状银粉微观结构的影响[J]. 贵金属, 2015, 36(2):33-37+43
- [12] 黄富春, 李文琳, 熊庆丰等. 高径厚比片状银粉的制备[J]. 贵金属, 2012,33(2):30-35
- [13] 商海, 孙晓光, 郎嘉良等. 一种片状银粉的制备方法及其应用: CN109822106A[P]. 2019
- [14] 张磊, 甘国友, 严继康等. 高能球磨法制备片状银粉的研究[C]. 中国材料研讨会论文集. 中国材料研究学会, 2010:1-6
- [15] 王崇国, 陈卫东. 球料比对高密度片状银粉的影响[J]. 中国冶金, 2015, 25(8):15-17
- [16] 李文焕, 王亚平, 潘炼等. 一种高振实密度片状银粉的制备方法: CN110586959A[P]. 2019

# 方家山核电厂发电机氢气泄漏率计算方法改进

王公展<sup>1\*</sup> 尚宪和<sup>1</sup> 费志松<sup>2</sup> 郑宗宇<sup>1</sup> 司先国<sup>1</sup> 夏德莉<sup>1</sup> 应黎明<sup>1</sup> 陈博<sup>1</sup>

1.中核核电运行管理有限公司,浙江 海盐 314300; 2.中原运维海外工程有限公司,上海 201103

**摘要:** 氢冷发电机大都运行在手动补氢的方式,发电机氢气泄漏率的计算也采用人工提取数据,手动输入软件计算的方式。该方法在方家山核电厂的实际应用中存在计算结果波动幅度较大,难以及时发现泄漏率上升的问题。另外,由于氢冷系统采用手动方式补氢,氢气的压力呈现出锯齿型,无法用通用的算法计算出连续的泄漏率。本研究定量分析了泄漏率计算波动大的原因,给出了提高精度降低波动幅度的建议,并首次在业界提出了一种克服锯齿型压力波动,计算实时泄漏率的算法。对比结果和实际应用表明,实时泄漏率的计算结果准确度更高,采用连续的趋势跟踪更容易发现泄漏率的上升。新的计算方法在业界具有推广的价值。

**关键字:** 发电机; 氢气泄漏率; 波动; 实时; 算法

中图分类号: TM31

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0005-05

## Improvement to the Generator Hydrogen Leak Rate Calculation Method of Fangjiashan Nuclear Power Plant

WANG Gongzhan<sup>1</sup>, SHANG Xianhe<sup>1</sup>, FEI Zhisong<sup>2</sup>, ZHENG Zongyu<sup>1</sup>, SI Xianguo<sup>1</sup>, XIA Deli<sup>1</sup>,  
YING Liming<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>

(1. CNNP Operations Management Company, Ltd., 314300, Haiyan County, Zhejiang, China;

2. CZEC Oversea Operation and Maintenance Engineering Company, Ltd., 201103, Shanghai, China)

**Abstract:** Most of the hydrogen-cooled generators operate in the way of manual hydrogen supplementation, and the calculation of the hydrogen leakage rate of the generator also adopts the method of manually extracting data and manually inputting software calculations. In the actual application of Fang Jiashan Nuclear Power Plant, this method has the problem of large fluctuations in calculation results, and it is difficult to detect rising leakage rate in time. In addition, because the hydrogen cooling system uses manual hydrogen replenishment, the pressure of hydrogen shows a saw-tooth pattern, and it is impossible to calculate the continuous leakage rate with the general algorithm. This research quantitatively analyzes the reasons for the large fluctuations in the leakage rate calculation, and gives suggestions to improve the accuracy and reduce the fluctuation range. For the first time in the industry, an algorithm to overcome the saw-tooth pressure fluctuations and calculate the real-time leakage rate is proposed. The comparison result and actual application show that the calculation result of real-time leakage rate is more accurate, and it is easier to detect the increase of leakage rate by using continuous trend tracking. The new calculation method has the value of promotion in the industry.

**Key words:** generator; hydrogen leak rate; oscillation; real-time; algorithm

对于氢冷发电机,由于纯度分析取样、小的内部和外部渗漏等原因,氢气一直在不断地消耗。但

是异常的氢气泄漏是时常发生的问题,当氢气泄漏量过大时,积聚在系统或环境中的氢气与空气混

收稿日期: 2022-05-12

作者简介: 王公展 (1973—),男,工程硕士,研究员高级工程师。研究方向为自动化控制。通讯邮箱: wanggz@cnnp.com.cn。

合，容易发生着火和氢爆等严重事故。因此，监测氢气的泄漏量，及时发现异常上升是电厂运行期间的一项重要工作。

另一方面，为了防止持续的泄漏造成的爆炸风险，业界大部分电厂运行在手动补氢的方式下，即运行期间没有持续的自动氢气补充，只有当系统内的氢气压力下降到一定程度时，才手动补氢恢复其压力。

方家山核电厂的发电机为东方电气制造，型号为TA 1100-78的氢冷发电机。电厂采取手动补氢的运行方式，在正常情况下的消耗量约为13 m<sup>3</sup>/24 h，当氢气压力降到约290 kPa(G)时补氢，补到约300 kPa(G)时停止。正常情况下每天补氢一次，并在补氢之后计算一次氢气的泄漏量，人工选取两个时点的参数，手动输入到专门的计算程序中进行计算。

但是实际的应用结果表明，目前泄漏率的计算方法存在如下问题：

(1) 计算结果的波动幅度较大，可比性不强，难以及时发现氢气泄漏量的异常上升。图1是8月1日到10月24日期间，两台机组生产早会通报中的泄漏率结果曲线。可以看出，在没有发生泄漏率上升时，泄漏率的波动幅度低时小5 m<sup>3</sup>/24 h，高至13 m<sup>3</sup>/24 h。

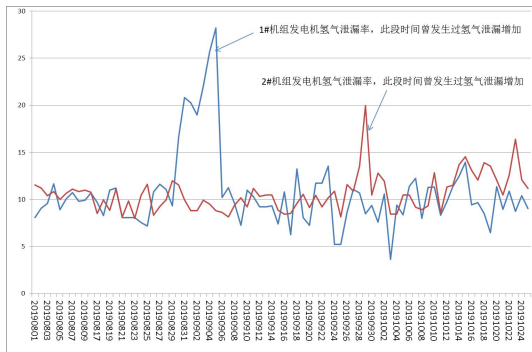


图1 两台机组生产早会通报中的泄漏率结果

(2) 每次计算时都需要人工选择要计算的时间段，并手动将参数输入到软件中，比较麻烦。

(3) 每次计算的结果为一个点的数值，没有历史数据，难以及时发现上升趋势。

针对计算结果波动大的问题，本文分析了其产生原因，给出了提高结果准确性的建议。并且借助EXCEL软件从PI系统采样数据的功能，设计了一个计算工具。应用结果和实际应用表明，该工具计

算结果更加准确稳定，可以及时准确地发现发电机氢气泄漏量的上升，为及时发现和处理问题提供了更大的保证。

## 1 计算结果波动大的原因分析

### 1.1 影响计算结果的可能因素

当发电机内氢气压力在0.3 MPa以下时，计算一个给定时间段内氢气泄漏率（换算到给定状态 $P_0=101.3 \text{ kPa(A)}$ ， $T_0=20^\circ\text{C}$ ）的通用公式如下式(1)<sup>[1]</sup>：

$$\Delta V' = V \left( \frac{T_0}{P_0} \right) \cdot \frac{24}{\Delta t} \cdot \left( \frac{P_1 + B_1}{T_1} - \frac{P_2 + B_2}{T_2} \right) \quad (1)$$

其中： $\Delta V'$ —发电机24小时气体的泄漏量，m<sup>3</sup>/24h

$V$ —发电机充氢容积，m<sup>3</sup>

$T_0$ —给定状态下大气绝对温度，

$T_0=273+20=293 \text{ K}$

$P_0$ —给定状态下大气绝对压力，101.3 kPa(A)

$\Delta t$ —给定时间段的时间长度，h

$P_1$ —给定时间段起始点时的发电机内的氢气压力，kPa(G)

$B_1$ —给定时间段起始点时的当地的大气压力，kPa(A)

$T_1$ —给定时间段起始点时的氢气绝对温度，K

$P_2$ —给定时间段结束点时的发电机内的氢气压力，kPa(G)

$B_2$ —给定时间段结束点时的当地的大气压力，kPa(A)

$T_2$ —给定时间段结束点时的氢气绝对温度，K

公式中的固定参数有 $V$ ， $T_0$ ， $P_0$ ， $\Delta T$ ，可变参数有 $P_1$ ， $B_1$ ， $T_1$ 和 $P_2$ ， $B_2$ ， $T_2$ 。在计算泄漏率时，由人工选择起始点和结束点，把两个时间点及相应的可变参数的值输入到软件中进行计算。由于固定参数不变，不会导致计算结果的波动，因此导致计算结果波动的原因因为可变参数的准确性，或者计算公式本身的适用性，下面对它们逐一进行讨论。

### 1.2 计算公式的适用性

通用氢气泄漏率计算公式的基础是理解气体状态方程：

$$PV=nRT \quad (2)$$

即 $n$ 摩尔理想气体在绝对温度 $T$ ，压强 $P$ 下，占有体积 $V$ 。 $R$ 为通用气体常数。由于理想气体模



型中分子只有质量，没有体积，是一种无限稀薄的气体，所以只有在温度较高，压力较低时， $R$ 才近于常数。而发电机内的氢气压力在 290 kPa(G)~300 kPa(G)之间，因此必然与理想气体存在的一定差异，使用理想气体公式进行计算有可能对结果造成偏差。

而范德华状态方程是对理想气体状态方程的一种改进，将理想气体模型所忽略的气体分子自身大小和分子之间的相互作用力考虑进来，所以又被称为实际气体状态方程。下面分析使用两个不同的公式计算对结果造成的影响。

范德华状态方程<sup>[2]</sup>：

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right) \left(\frac{V}{n} - b\right) = RT \quad (3)$$

其中： $P$ —气体的压强，kPa(A)

$V$ —气体总体积， $m^3$

$n$ —摩尔量

$a$ —度量分子间引力的参数

$b$ —1 摩尔分子本身包含的体积之和， $m^3$

$R$ —普适气体常数

$T$ —气体绝对温度，K

假设在  $t_1$  和  $t_2$  两个时间点之间，氢气没有泄漏，它们所在容器的体积不变，温度分别为  $T_1$  和  $T_2$ ，可以分别写出对应的范德华状态方程：

$$\left(P_1 + \frac{n^2 a}{v^2}\right) \left(\frac{v}{n} - b\right) = RT_1, \quad P_1 = \frac{nRT_1}{v-nb} - \frac{n^2 a}{v^2} \quad (4)$$

$$\left(P_2 + \frac{n^2 a}{v^2}\right) \left(\frac{v}{n} - b\right) = RT_2, \quad P_2 = \frac{nRT_2}{v-nb} - \frac{n^2 a}{v^2} \quad (5)$$

根据(4)和(5)可以得出  $P_2$  和  $P_1$  之间的关系：

$$P_2 = \frac{T_2}{T_1} P_1 + \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) \frac{n^2 a}{v^2} \quad (6)$$

在氢气发生泄漏的情况下，实际  $P_{2a}$  应该小于  $P_2$ ，这两者之间的差即为泄漏的氢气的分压：

$$\Delta P = P_2 - P_{2a} = \frac{T_2}{T_1} P_1 + \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) \frac{n^2 a}{v^2} - P_{2a} \quad (7)$$

与根据理想气体状态方程推导出的泄漏率相比，多了第二项  $\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) \frac{n^2 a}{v^2}$ 。下面计算第二项在计算泄漏率时可能带来的最大影响。

根据发电机内氢气的实际运行工况， $T_2$  取最大的温度值：273+48.5=321.5 K， $T_1$  取最小的温度值：

$$273+46.5=319.5 \text{ K}; \quad \frac{n^2}{v^2} \text{ 即 } \frac{1}{v_{2n}^2}, \quad V_m \text{ 对应不同压强和温}$$

度的 1 摩尔气体体积，在此取压强 401.5 kPa(A)，温度在 319.5 K 的氢气体积，可估算出  $V_m$  结果如下：

$$V_m \approx \frac{22.428}{401.5} \times 101.5 \times \frac{319.5}{273} = 6.636 \text{ dm}^3/\text{mol}$$

另查表得： $a=0.2432*101.325 \text{ kPa(A)}*\text{dm}^6/\text{mol}^2$ ，计算第二项：

$$\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) \frac{n^2 a}{v^2} \approx \left(\frac{321.5}{319.5} - 1\right) \times \frac{0.2432}{6.636^2} \times 101.325 \text{ kPa(A)} \approx 0.0035 \text{ kPa(A)}$$

因此，第二项所带来的影响可以忽略不计。

可以从另一个角度验证以上结论。可以选取两个特殊的  $t_1$  和  $t_2$  时间点，使它们对应的温度  $T_1$  和  $T_2$  相等。则计算这两个时间点之间的泄漏率时，(7) 式中第二项的影响可以忽略。如果  $t_1$  对应的压力为  $P_{t1}$ ， $t_2$  对应的压力为  $P_{t2}$ ，则压降速率为

$$L_{rate} = \frac{P_{t2} - P_{t1}}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

在压力变化范围很小的情况下，泄漏率应该基本保持不变。所以根据该泄漏率，可以计算出任何一个时间点  $t$  对应的压力：

$$P_t = \frac{P_{t2} - P_{t1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) + P_{t1} \quad (9)$$

该压力是对应于  $T_1$  温度时的压力。而时间点  $t$  的实际温度为  $T_t$ ，根据理想气体状态方程，可以得出实际压力  $P_{ta}$  和  $P_t$  之间应存在如下关系式 (10)：

$$P_{ta} = \frac{T_t}{T_1} P_t \quad (10)$$

图 2 是选取 2#机组满足首、尾温度相等条件的一段数据，根据上式计算出的理想压力与实际压力的对照曲线，两者趋势符合的很好；同时也可以看出，实际的压力变化不够灵敏，在温度变化时有停滞现象。

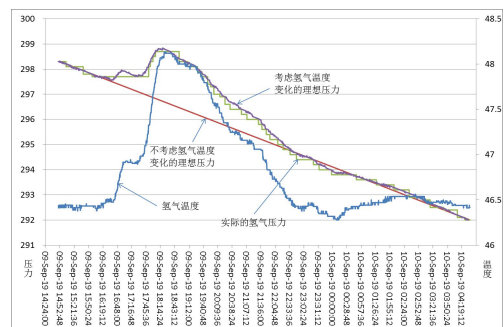


图 2 理想压力与实际压力的对照曲线

因此,在现场实际工况下,使用标准气体方程计算氢气的泄漏率准确度可以达到要求,公式是适用的。

### 1.3 温度的影响

将方家山电厂的实际参数代入公式(1)<sup>[3]</sup>, $V=135\text{ m}^3$ , $t_1$ 和 $t_2$ 是时间,单位是小时。结果为:

$$\begin{aligned} \Delta V' &= 135 \cdot \frac{293}{101.3} \cdot \frac{24}{t_2-t_1} \cdot \left( \frac{P_1+B_1}{T_1} - \frac{P_2+B_2}{T_2} \right) \\ &= 9369.06 \frac{1}{t_2-t_1} \left( \frac{P_1+B_1}{T_1} - \frac{P_2+B_2}{T_2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

计算温度偏差对泄漏率的影响:

$$\frac{\partial L}{\partial T_1} = \frac{9369.06}{T_1^2} \cdot \frac{P_1+B_1}{t_2-t_1} dT_1 \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial T_2} = -\frac{9369.06}{T_2^2} \cdot \frac{P_2+B_2}{t_2-t_1} dT_2 \quad (13)$$

以(13)为例,压力 $P_2+B_2$ 的取值范围为400~390 kPa(A),为方便计算,取400 kPa(A), $T_2$ 仍然取320 K,该温度测量的精度为0.35 K,若 $dT_2$ 取温度变化的精度0.1 K,则温度变化可能造成的偏差为:

$$\frac{\partial L}{\partial T_2} = -\frac{9369.06}{320^2} \frac{400}{t_2-t_1} 0.1 = -\frac{3.660}{t_2-t_1} \quad (14)$$

### 1.4 压力的影响

计算压力偏差对泄漏率造成的影响:

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = \frac{9369.06}{T_1} \frac{1}{t_2-t_1} dP \quad (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_2} = -\frac{9369.06}{T_2} \frac{1}{t_2-t_1} dP \quad (16)$$

温度 $T_1$ 和 $T_2$ 的范围为319 K~321 K,为方便计算,取320 K,该压力测量的精度为1 kPa(A), $dP$ 取压力变化的精度,在实际的抽取数据中可以看出变化最小幅度为0.1 kPa(A),则仪表精度内压力的变化可能造成的偏差为:

$$\frac{\partial L}{\partial P_2} = -\frac{9369.06}{320} \frac{1}{t_2-t_1} 0.1 = -\frac{2.928}{t_2-t_1} \quad (17)$$

由于泄漏率是计算的相对变化率,只取一个时间点的温度和压力偏差,它们所造成的综合偏差为:

$$\sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial P_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial T_2}\right)^2} = \frac{4.687}{t_2-t_1} \quad (18)$$

由于系统的温度和压力时刻都在变动中,而温度对压力造成的影响需要一定的时间才能完全体现,因此,即使是同时采样的压力和温度也无法完全体现整个系统的状态。而微小的偏差和滞后,就

会为泄漏率计算结果带来很大的偏差。即使两者都达到0.1的精度,为了使结果能够保持在 $\pm 1$ 之间,时间跨度至少要5个小时之上。

### 1.5 提高计算准确性的建议

从上述计算可以看出,不管是压力还是温度,波动所造成的偏差都和 $t_2-t_1$ 的时间长短成反比。计算时所取的两个时间点跨度越大,计算结果的精度就越高。

图3是取2#机组的几天的数据,以每次补氢之后作为起点,逐点计算其后每个时间点的泄漏率。从图中可以看出,在短时间内泄漏率的振动范围非常大,随后逐渐稳定。在经过较长一段时间后,即使温度产生了明显的变化,计算结果的波动幅度也没有增加。并且,在12小时后,计算结果就基本稳定到两次加氢之间的平均泄漏率值上了。

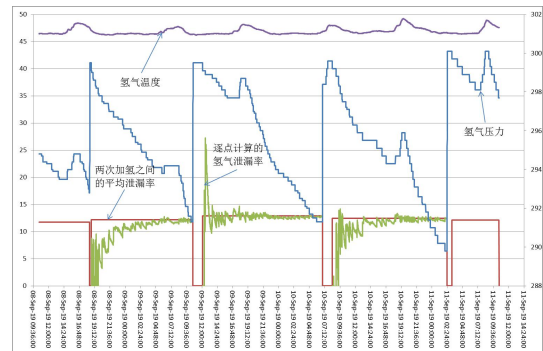


图3 氢气泄漏率计算结果与时长之间的关系

## 2 实时泄漏率的计算

根据上文分析,为了准确地计算出氢气泄漏率,采样时间需要跨越比较长的时间段。同时为了解决计算结果的可比性不强,需要手动选择和输入参数以及缺少历史趋势的问题,选择EXCEL软件,在其从PI系统自动抽取数据功能的基础上,设计并实现了氢气泄漏率的算法。

### 2.1 算法的设计

对于采取手动补氢方式运行的机组,氢气的压力呈现出锯齿型的上、下变化。如果直接计算泄漏率,所选取的时间段显然不能跨越加氢操作的时间点。因此,在每次加氢之后需要等待较长一段时间,才能计算出比较准确的数据。为了能够比较准确地计算出具有可比性的实时泄漏率,时间跨度要比较长,至少超过5小时,同时跨度也要必须固定。所

以，在计算刚加氢之后的实时泄漏率时，不可避免地要用到加氢之前的数据，需要解决计算时间跨度内有加氢操作的问题。另外，温度变化也会造成氢气压力波动，需要区分补氢和温度变化带来的压力波动。因此，设计了如下的实时泄漏率计算方法：

(1) 假设泄漏率采取固定的时间跨度  $\Delta t$ ，在计算任一时间点  $t$  的泄漏率时，将  $t$  及  $t - \Delta t$  两个时间点作为计算泄漏率的起始点和结束点。

(2) 在计算加氢操作之后的实时泄漏率时，需要将加氢操作之前的  $\Delta t$  时间内的压力值作为起始点，这时必须把加氢操作所带来的压力上升叠加到作为起始点的压力值上。考虑到加氢操作过程中氢气温度可能发生较大的变化，因此所需叠加的压力变化计算如下：

$$\Delta P = \frac{P_2 + B_2}{T_2 + 273} \times (T_1 + 273) - P_1 - B_1 \quad (19)$$

其中： $\Delta P$ —加氢操作前  $\Delta t$  时间内各采样点的氢气压力增加值，kPa(A)；

$P_2$ —加氢操作后第一个采样点的氢气压力，kPa(G)；

$T_2$ —加氢操作后第一个采样点的氢气温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$B_2$ —加氢操作后第一个采样点的环境大气压力，kPa(A)；

$P_1$ —加氢操作前最后一个采样点的氢气压力，kPa(G)；

$T_1$ —加氢操作前最后一个采样点的氢气温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$B_1$ —加氢操作前最后一个采样点的环境大气压力，kPa(A)；

(3) 对于处于加氢操作过程中的采样点，上式计算  $\Delta P$  公式中的  $P_1$  为该采样点当时的实际压力值， $T_1$  为该采样点当时的实际温度。这样处理会导致在加氢过程中的时间点，补偿后的压力值保持不变。由于加氢操作的时间很短，只有几分钟，不考虑这几分钟的泄漏对计算结果的影响很小。也可以使用上一个周期的平均泄漏率补偿加氢操作时间内的压降。

(4) 加氢起始点的自动判断：引起氢气压力上升的可能性一是温度上升，二是手动补氢。温度引起的压力上升可以根据氢气温度的变化计算出来。在去掉温度引起的上升值之后，如果某个采样

点之后压力持续上升或保持不变，直至第一个开始下降的采样点的压力升高超过预定阈值，则认为进行了手动加氢。通过大数据统计，在方家山电厂该阈值设为 1.5 kPa(G)。

(5) 加氢结束点的判断：在加氢起始点之后第一个压力开始下降的采样点。

(6) 在加氢操作之后的  $\Delta t$  时间内，实时泄漏率计算起始点的压力值使用叠加后的压力值，结束点的压力值使用未叠加的压力值；在加氢操作之后的  $\Delta t$  时间外，实时泄漏率计算起始点和结束点的压力值均使用未叠加的压力值。

使用上述算法计算得到的实时泄漏率结果见图 4。

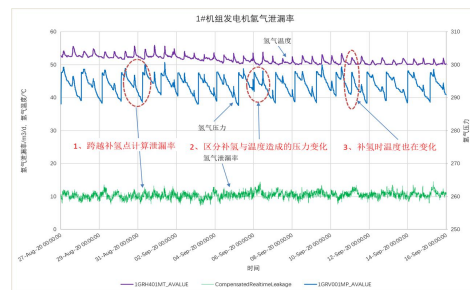


图 4 实时泄漏率计算结果

## 2.2 算法的实现及效果验证

图 5 是 1# 机组应用上述算法实时泄漏率的计算结果与手动计算结果的比对。计算实时泄漏率采用固定的时间跨度 8 小时。相对手动计算的泄漏率，实时泄漏率体现出明显的优势：

(1) 对于已经发生的 9 月 2 日发现的异常泄漏上升，可以看出实时泄漏率在手动计算结果升高之前 3 天就有了明显上升，因此可以提前 3 天发现泄漏率上升。

(2) 采用实时泄漏率的工具之后，在 10 月 14 日晚上 20:00 左右，发现了泄漏率有明显的上升，并在屋顶排风处手动测量氢气浓度得到验证。在 10 月 15 日中午，电厂及时采取了注胶操作，随后泄漏率马上下降到了正常值。而在此阶段，使用手动方法计算并通报的结果由于上升幅度不明显，未能发现泄漏率上升。

(3) 连续的泄漏率可以进行趋势分析，例如可以发现在泄漏率异常上升期间，泄漏率呈现周期性的波动，气温上升时增加，气温降低时降低，而

(下转第 14 页)

# 浅析退役风电叶片处理回收与再利用

郭盼 齐晓蕾 谢斐 胡春云

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

**摘要:** 随着风电机组服役寿命周期的来临, 废弃的风电叶片将越来越多, 节约资源和保护环境的压力也越趋严重, 热固性复合材料风电叶片的回收与再利用已成为风电发展的重大关键技术难题。本文概述了目前主要的回收技术和回收产物的再利用情况。回收材料应用市场的扩大, 需要成本更低、污染更少、效率更高的回收技术。此外, 应从源头设计新型环保的叶片材料, 如使用天然纤维、改性热固性树脂和可回收的热塑性树脂, 使风能成为真正的清洁能源。

**关键词:** 风电叶片; 再利用; 热固性复合材料

中图分类号: TM315; X705

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0010-05

## Analysis on Recovery and Reuse of Retirement Wind Turbine Blades

GUO Pan, QI Xiaolei, XIE Fei, HU Chunyun

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

**Abstract:** With the coming of the service life cycle of wind turbines, more and more wind turbine blades will be abandoned, and the pressure to save resources and protect the environment will become more and more serious, the recovery and reuse of thermosetting composite wind turbine blades has become a key technical problem in the development of wind power. In this paper, the main recovery technologies and the reuse of the recovered products are summarized. The expansion of the market for recycled materials requires more cost-effective, less polluting and more efficient recycling technologies. In addition, new environmentally friendly blade materials should be designed at source, such as the use of natural fibers, modified thermosetting resins and recyclable thermoplastic resins, so that wind energy becomes a true clean energy source.

**Key words:** wind turbine blade; reuse; thermosetting composite

风力发电虽然为一种清洁可再生能源, 但整个机组设备在生产过程和退役后会产生大量需要处理的风电叶片、塔筒等废弃物。风电叶片制造要求较高, 不仅要考虑轻量化, 还需要较高的抗腐蚀、强度要求、抗疲劳性能。目前大多数叶片是由热固性复合材料制作而成, 基本上是环氧树脂、不饱和树脂等高分子聚合物与长度不同的玻璃纤维或碳纤维等材料, 通过用真空吸注等特定成型工艺加工而成<sup>[1]</sup>。这使得风电叶片废弃物难以自然降解, 同时具有极强的污染性, 直接掩埋或堆放将对环境造

成长期有害影响, 长此以往会对土壤、地下水系统等带来风险<sup>[2]</sup>。如果直接焚烧处理, 则会放出大量热、有毒气体和烟尘。因此, 如用随意堆砌、直接填埋、简单焚烧等常规方式处理, 并不是有效的解决方案, 会占用大量土地资源, 产生二次污染, 与我国固废资源化利用和绿色可持续发展战略相悖。未来, 风电叶片复合材料的回收处置不仅能在一定程度上影响风电行业的绿色可持续发展, 也能为整个产业链上下游产品在全生命周期推进双碳工作带来机遇。

收稿日期: 2022-07-20

**作者简介:** 郭盼 (1985—), 男, 2011年毕业于华中科技大学热能工程专业, 研究生, 高级工程师, 现在东方电气科学技术研究院有限公司, 主要从事固废处理技术研发工作。

随着碳中和目标的提出以及配套规划与政策的相继落地，风电产业升级换代步伐将逐步加快，在内陆现有风场资源受限的情况下，存量的老旧风场机组安全隐患多，可靠性和发电效率下降明显，运维难、成本高，收益率低，成为早期投运风机的“通病”。随着平价时代运营压力凸显，出于效益等考量，业主开始关注着眼于存量资产提质增效。随着国家和各地方政策的出台，风电场“以大代小”项目进入实操和示范阶段。如此一来，小容量机组将会提前退役，存量资产提质增效的同时，机组退役是必然，废旧物资回收和再利用需求也将变得迫切。图1为截止2021年底风电机组每年新增装机容量情况，以15年寿命预估，原预计在2025年才会出现退役叶片高峰期也会提前到来。



图1 风电机组每年新增装机总量

## 1 叶片组成

目前，随着海上风电的蓬勃发展，国内外风电叶片大型化趋势愈发明显，这就要求叶片制造材料向具有轻质化、高强高模的方向发展。风电机组大型化是降低度电成本有效路径之一，叶片的大型化是提升发电效率的关键因素，可以助力风电行业更多参与到平价时代。这意味着大型化叶片为风电资源相对较弱的区域提供了风电经济可行性<sup>[3]</sup>。复合材料风电叶片发展之初采用的是玻璃纤维增强不饱和树脂体系，直到今天该加工工艺仍是大部分风电叶片采用的材料。随着叶片大型化其长度的不断增大，业界普遍认为，这种体系已不能满足力学性能、工艺性能等使用要求。从目前的情况来看，性能更为优异的碳纤维等新兴材料已经获得了高度

关注。具备高强高模、轻量化的碳纤维复合材料开始被广泛应用。相比玻璃纤维，碳纤维可以保证风电叶片在增加长度的同时，重量大大降低。在当前风机持续大型化的趋势下，碳纤维渗透率将持续提升。但是，不管是玻璃纤维还是碳纤维叶片材料，均存在风电机组退役后回收困难或回收成本高的问题。热固性复合材料在形成过程中发生固化反应，无法通过加热再次成型，强度高不易分解，回收处理较为困难。

尽管各个叶片制造商选用的叶片类型及其外形各有不同，材料成分及含量也存在一定的差异，但风电叶片通常是由增强纤维、聚合物基质、夹芯、粘合剂、涂层及金属等材料组成。其中，增强纤维（目前主要为玻璃纤维）和聚合物基质（目前主要为环氧树脂等）的组合构成了复合材料，它们占据了风电叶片材料成分的绝大部分质量，增强纤维的含量约为60~70%，聚合物基质的含量约为30~40%。图2为某叶片材料重量分布示意图。

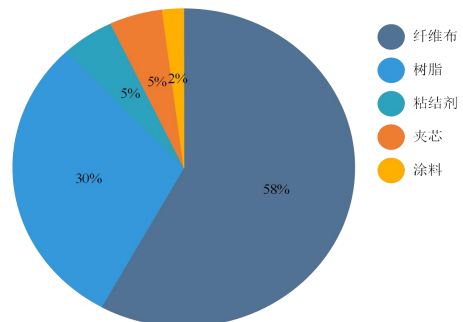


图2 某叶片材料重量分布示意图

(1) 增强纤维，增强纤维主要有碳纤维增强复合材料和玻璃纤维增强复合材料。碳纤维复合材料密度小于玻璃纤维复合材料，刚度、极限和疲劳强度均优于玻璃纤维复合材料，但价格却远高于玻纤。在风电叶片大型化趋势下，碳纤维物理性能优势凸显，但是短期来看，碳纤维仍难以替代玻璃纤维。

(2) 聚合物基质，例如热固性树脂，如环氧树脂、聚酯、乙烯基酯、聚氨酯或热塑性塑料。

(3) 夹芯，例如巴沙木或泡沫等。

(4) 粘合剂，如环氧树脂、聚氨酯。

(5) 涂层，如聚酯、聚氨酯。

(6) 金属，如铜或铝布线（防雷系统）、钢螺栓。

## 2 风电叶片退役面临的主要问题

(1) 风电机组即将逐步进入退役期，但配套制度与技术储备缺失。未来几年，大批量风电机组的退役期即将到来，预计到2025年，国内将有4400万千瓦叶片寿终正寝。但这一问题尚未成为各方关注的焦点，与之相配套的制度安排、技术储备基本处于缺位状态。

(2) 风电叶片主要由增强纤维和聚合物基质组成，主要成分是玻璃纤维和有机树脂，还包含有夹芯、结构粘合剂及涂层等材料。风电叶片制造过程采用整体灌注成型工艺，玻璃纤维被树脂浸润经加热固化后随即融合成为一个整体结构，无法再通过常规方式分离，各种回收技术都对玻璃纤维的强度造成了一定程度的破坏，影响了其再利用价值。

(3) 废弃风电叶片采用耐腐蚀性热固性复合材料，难以降解，直接掩埋或堆放将对环境造成长期有害影响。目前尚无高效回收处理办法，缺乏成熟、低成本的工艺处置技术。此外叶片厂家迫于成本压力，重视降本增效，轻视循环设计。

(4) 废旧叶片回收缺少高价值应用场景，行业相关法律法规和标准缺失。同时商业模式不清晰，导致回收处置项目收益来源不稳定、不明确，社会效益大于经济效益。在目前的环保高压下回收项目产业化落地难，要实现规模化处置尚有一段时间。

## 3 风电叶片现有处理技术

目前用于热固性复合材料的处理技术主要包括三类：掩埋、焚烧、回收利用<sup>[4]</sup>。国内目前按有很多通过掩埋方式（甚至空地堆放）进行处置，这种处理方式不仅会浪费大量的土地，同时对生态环境影响很大，与风电行业在绿色可持续发展理念相悖。小部分采用焚烧发电处理，但效率低，且产生大量有毒气体，污染环境。从目前看，回收再利用是风电叶片最好的处理方式，主要有物理回收法、化学回收法和热回收法。

### 3.1 物理回收法

物理回收法主要有：①拆解重复利用。回收利

用废弃风电叶片的金属部件，其余部分制成成为具有相同或不同功能用途的新产品或新材料。例如重复使用叶片用于游乐场或街道长椅、自行车停放处、包装箱、花坛围栏、建筑再利用等。该方式只是延缓了废弃叶片对环境的危害，它们不太可能成为未来主流的大规模解决方案；②机械粉碎综合利用。将废弃风电叶片切碎或研磨成不同尺寸的块状颗粒、短纤维和其他材料，可用作新复合材料中的填料或增强材料。该方法工艺简单，但在回收过程中纤维结构受到很大损害，限制了再次获得长纤维的可能性，使用范围有限，且回收物的填充对建筑产品质量，如强度等会产生一定影响。Garcia等将经过破碎和筛选的玻璃钢纤维与标准硅砂和天然石灰石混合制备混凝土，发现随着玻璃短纤维掺入量的增加，28天后强度分别降低了22%和16%<sup>[5]</sup>。

### 3.2 化学回收法

化学回收中研究较多的主要为溶剂回收法。该方法采用溶剂（水、醇和/或酸）在特定温度和压力下破坏树脂大分子键，从而达到分离和回收树脂及玻璃纤维的目的。回收的纤维性能较好，表面比较干净。国内孟令辉等学者利用以超临界水为反应溶剂，NaOH水溶液为催化剂，在400℃温度条件下反应约30min，有效回收了复合材料中的环氧树脂。降解率可以达到75%，降解率随着反应时间和温度的提高而增大<sup>[6]</sup>；郭俊强等利用NaOH、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>作为催化剂，选用乙二醇作为溶剂回收玻璃钢中的环氧树脂。实验结果表明在温度240℃，时间4h最佳反应条件下，废旧玻璃钢经催化剂（NaOH）作用下，树脂的回收率可达93.1%，具有一定的应用意义<sup>[7]</sup>。溶剂分解法易于放大，但投资和运行成本很高，并且仍然处于相对较低的技术成熟度。

### 3.3 热回收法

热法分离的方式对风电叶片废弃物中的热量和玻璃纤维进行回收，比如热解、等离子体炉熔融气化、水泥窑协同处置等。

(1) 热解是指废旧叶片在缺氧环境中加热进行反应，它通过热解以碳氢化合物的形式回收树脂基体，以灰分的形式回收玻璃纤维。树脂基体被制成气或油，用作燃料或化学品<sup>[8]</sup>。玻璃纤维表面因

高温而受损，导致力学性能下降。热解需要很高的投资和运行成本，经济可行性取决于从基体获得的化学品的规模和再利用价值。到目前为止，这种回收技术只对碳纤维经济可行。然而，由于叶片中碳纤维增强复合材料的用量还很少，目前尚未大规模实施。随着下一代巨型叶片的发展，轻量化和机械性能的要求将提高碳纤维复合材料的使用量，市场容量可能会相应增长。

(2) 等离子体炉熔融气化是一种可实现彻底无害化处置的技术，现阶段在危废处置领域已经有商业化的应用实例。它的工作原理是：采用等离子发生装置作为气化炉的热源，中心温度高达1450~1600℃，在炉内缺氧环境下，风电叶片废弃物中的树脂等有机物气化为合成气(CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等)后送入二燃室进行二次燃烧处理，玻璃纤维等无机物在炉内被高温熔融为液态经排渣口流出激冷后，变成无危害的玻璃体物质，可当做一般固废进行处理货综合利用。合成气在二燃室内充分燃烧，有害成分得到充分的分解和消除，高温烟气可以进行余热利用，烟气再经过净化达标后从烟囱排出。等离子体炉气化的优点是在厌氧和高温条件下，能够抑制二噁英的产生并进一步处理飞灰，再加上后端严苛的烟气净化系统，能够彻底解决废弃叶片的处置问题。其缺点是等离子炬需要提供电力作为热源，热效率不高大约只有70%；另外等离子炬的阴极寿命较短，只能维持400小时左右，在运行过程中需定期更换，从而导致运行成本较高。

(3) 在水泥窑协同处置中，玻璃纤维作为水泥熟料的一部分被回收，聚合物基质作为该过程的燃料(也称为废弃物衍生燃料)燃烧，从而减少了水泥产品的碳足迹。水泥窑协同处置为复合材料废弃物提供了可靠且可放大的途径。风电叶片可以在拆卸地点附近分解，从而便于运输至加工设施。虽然它在成本效益和环境效率方面非常有前途，但在这一过程中，玻璃的纤维形状消失，因此不能再应用于其他复合材料的制备。同时，为了保证水泥品质，风电叶片废弃物的掺烧比例也受到了限制，一般在10%以下。

对比可知，各种风电叶片废弃物处理技术主要是针对玻璃纤维和有机树脂等材料进行回收和处置，但它们的技术成熟度存在差异，其中，溶剂分解提取等处理技术的成熟度较低，目前处于实验室研究阶段；机械粉碎、水泥窑协同处置、热解炉热解及等离子炉体炉气化等五种技术的成熟度较高，具有实现大规模工业化应用的潜力。综合考虑各种技术的优缺点，为实现风电叶片废弃物“资源化、减量化、无害化”处理目标，开发风电叶片废弃物综合解决方案是大势所趋，这也是未来彻底解决风电叶片废弃物难题的一条优选路径。

表1 回收利用方法比较

处理方法	优点	缺点
物理回收	工艺简单，成本低，污染小	不能大规模应用处理，高值化利用差
化学回收	回收的树脂可用作化学品材料；回收的纤维机械性能较好	能耗高、溶剂使用量大，难以工业化
热解法	容易放大，已工业化用于碳纤维复合材料回收	纤维产品可能含氧化残留物或炭；无法彻底无害化
等离子气化	可回收热量或合成气；无害化彻底、减量化明显	电能消耗较大，材料及运行成本较高
水泥窑协同	快速高效、可放大；无灰烬残留	影响水泥产品品质，掺烧比例受到限制

总体来说，我国风电叶片处理由于处于市场初期，法律法规和标准缺失，商业模式不清晰，导致回收处置项目收益来源不稳定不明确。对于某个项目，其收入来源(产废单位付费、政府补贴、废弃物的资源化能源化利用收益等)能否覆盖回收处理成本，受到多方面因素(技术路线、固废数量、处理费用等)的影响，需要具体分析。

#### 4 结语

风电叶片废弃物处理处置的终极目标是实现资源化利用、高度减量化和无害化处置，在实现循环经济的同时彻底满足环保的要求。要彻底解决风机叶片的回收问题，必须建立跨行的合作交流机制，促

进风电行业与材料、建筑等多领域协同攻关叶片回收技术，制定相关固废处理和再利用产品标准，对回收产品进行应用示范，这将有助于各行业发展低碳绿色循环经济，实现各风电行业的可持续发展<sup>[9]</sup>。

首先从源头上优先考虑前期预防，加强上游产品的绿色循环设计水平，开发以循环回收利用为目的的绿色叶片生产工艺，从设计之初就应考虑退役后的回收利用需求，从而为后期处理提供便捷、经济的可行性方案，或者根据叶片的材料组分以及设计加工工艺来对现有技术进行优化改进，以及开发出新的回收利用技术及综合解决方案。研发新材料进行替代，探索叶片新材料的更新换代，研发新的可降解材料以及智能化的工艺装备，开发出更容易回收的新型高性能材料。

其次要普货化处理，避免回收时大型超标件运输的高昂成本。通过切割加工等方式将其制成其他功能用途的新产品增益降本，或通过物理分选方法将叶片废弃物转化为生产其他产品的原材料，尽可能回收再利用。

另外也可将分离提取的环氧树脂与玻纤可进行专项应用技术研究，拓展在其他领域的应用场

景，提升回收料价值，对于回收的产品二次利用适当放宽标准要求。最后将无法循环利用的部分进行无害化、减量化处置，使叶片回收应用具备产业化价值。

参考文献：

[1] 刘麟. 风力发电机的叶片材料与制造工艺[J]. 科技资讯, 2010 (21): 150  
 [2] 贾利, 冯利坤. 玻璃钢废弃物的处理与再利用[J]. 河南化工, 2003(6):35-36  
 [3] 傅赐福. 关于发展我国风力发电问题的思考[J]. 能源与环境, 2004(1):18-20  
 [4] 张建川, 张前峰等. 风力发电复合材料叶片废弃物的几种处理方法分析[J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(3):473-482  
 [5] 魏锋. 中国风电行业现状及前景展望[J]. 今日工程机械, 2020(4):24-25  
 [6] 孟令辉, 黄玉东等. 超临界水对碳纤维/酚醛复合材料的分解作用[J]. 复合材料学报, 2002 (3): 37-41  
 [7] 郭俊强. 废旧玻璃钢的资源化利用研究[D].北京化工大学, 2010  
 [8] 王勇, 万涛等. 玻璃钢废弃物的处理与再利用[J]. 国外建材科技, 2002(1):19-21  
 [9] 安宝山, 王慧军等. 未来退役风电叶片的回收和利用[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(6):98-101

(上接第 9 页)

泄漏率正常时无此波动。在泄漏率异常上升期间，手动计算的结果在时间和幅度上都是无规律的波动。

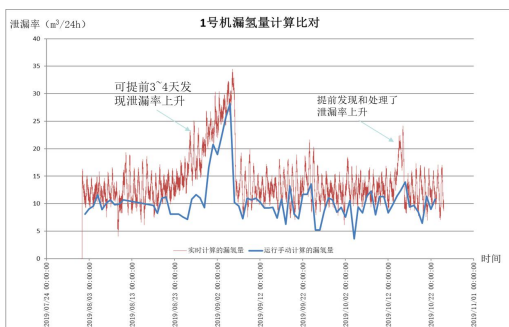


图 5 1#机组漏氢量计算比对

3 结语

对于氢气泄漏率计算结果波动大的问题，本文通过计算和验证，排除了计算公式本身精度不够的原因，并分析出主要原因为计算时前后取样点的时间跨度不

足。在此基础上，设计了在手动加氢复杂工况下的实时氢气泄漏率的算法，并在 EXCEL 中得以验证。应用结果表明，实时泄漏率的计算结果精度更高，通过连续的趋势跟踪更容易发现泄漏率的上升。在此算法基础上，方家山核电厂已经开发了基于网页的实时泄漏率计算工具。只要简单的修改 PI 服务器和参数的配置，以及计算公式中的发电机氢容积参数，该工具就可以应用于其它采用手动方式补氢的电厂。

参考文献：

[1] 颜中科, 向朝晟. 氢冷发电机漏氢分析与处理[J]. 东方电气评论, 2015, 29(4):37-40+47  
 [2] 李伊. 析解范德华方程式[J]. 达县师范高等专科学校学报(自然科学版), 2004(5):35-37  
 [3] 秦山核电厂扩建项目发电机氢气供应系统 (GRV), 中国电力工程顾问集团华东电力设计院, 2012 年 5 月



# 基于光纤振动传感器的定子绕组端部振动监测技术与应用

宋清松 马雪松

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 本文主要介绍了基于光纤振动传感器的大型汽轮发电机定子绕组端部振动监测技术, 简述了监测系统的主要构成和数据分析过程。以某电厂 600 MW 汽轮发电机端部振动监测系统的安装为例, 详细讲解了端部振动监测系统的原理和组成, 分析了已投产机组加装该系统的难点。对提高汽轮发电机组运行可靠性有重要的参考意义。

**关键词:** 光纤传感器; 端部; 振动

中图分类号: TM306

文献标志码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0015-04

## Stator End Winding Vibration Monitoring System and Application Based on Optical Fiber Sensor

SONG Qingsong, MA Xuesong

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

**Abstract:** This paper mainly introduces the vibration monitoring system of large turbo-generator stator end winding based on optical fiber vibration sensor, and briefly describes the main composition and data analysis process. Takes a 600 MW generator installation of the end vibration monitoring system as an example, explains the principle and composition of the end vibration monitoring system in detail, and points out the difficulties of applying the system on the generator that have been put into operation. which has important reference significance for improving the operation reliability of steam turbine generator units.

**Key words:** fiber sensor; stator end; vibration

大型汽轮发电机正常运行时, 定子绕组端部受交变电磁力作用而持续振动, 振动频率主要为二倍频。长期的振动幅值过大可能造成发电机定子绕组端部紧固结构逐渐松动、线棒绝缘磨损, 还可能导导致机械疲劳引起股线断裂, 严重的故障将引发端部相间短路事故。因而, 应用定子绕组端部振动监测技术, 对于诊断定子绕组端部紧固状态, 及时发现定子绕组端部松动、磨损等隐患, 具有重要的意义。

### 1 定子端部振动监测技术现状

目前 300 MW 及以上容量的发电机定子电压达 20 千伏以上, 电流达 10 000 安培以上, 是一个高电压、强电磁场的环境, 压电式或压阻式带金属结构的传感器可能产生放电, 引起磁场分布的变化, 干扰自身的工作, 同时含铁磁性材料的传感器本身还存在剧烈的电磁振动和涡流发热, 会对线棒绝缘形成严重威胁, 降低发电机安全运行的可靠性。因此, 传统的压电式振动传感器一般选择安装在与端部线棒有一定安全距离的绝缘支架上, 如图 1 所示,

收稿日期: 2021-12-03

**作者简介:** 宋清松 (1980—), 男, 2014 年毕业于华中科技大学电机与电器专业, 硕士, 高级工程师。现在东方电机有限公司从事热能发电机安装、调试技术服务工作。

马雪松 (1989—), 男, 2011 年毕业于四川大学热能与动力工程专业, 工学学士, 工程师。现在东方电机有限公司部从事热能发电机安装、调试技术服务工作。

通过测量绝缘支架的振动幅值来间接反映端部绕组的振动，存在一定的局限性。

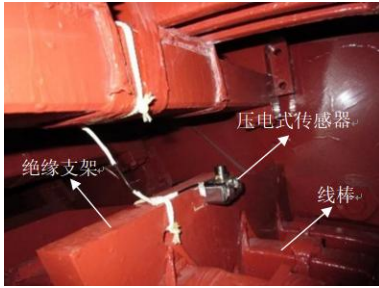


图1 压电式振动传感器安装在绝缘支架上

近些年来，国内外已经开发出了采用光学原理和光纤材料的振动传感器，测量信号利用光纤输出，不受强电磁场、射频干扰，真实还原被测物体的振动数据，可以很好的应用于大型电机定子绕组端部振动监测。这种光纤测振系统得到广泛应用，一般在发电机汽励两端共安装6个测点，也有部分安装12个测点，根据机型及工程造价合理选择光纤振动传感器数量，沿周向分布。

## 2 光纤式定子端部振动监测系统的组成

光纤传感器由光源、入射光纤、出射光纤、光调制器、光探测器以及解调制器组成。其基本原理是将光源的光经入射光纤送入调制区，光在调制区内与外界被测参数相互作用，使光的光学性质(如强度、波长、频率、相位、偏正态等)发生变化而成为被调制的信号光，再经出射光纤送入光探测器、解调制器而获得被测参数。光纤振动传感器原理如图2所示，其主体由陶瓷和聚合树脂等非金属材料构成，具有优越的电气绝缘性能、抗电磁干扰和热稳定性，并能在充满氢气的环境中可靠工作。常见的光纤振动传感器有SIGMA TECH的EWM-DP传感器，MC-monitoring的FAS传感器，VibroSystM的FOA传感器，IRIS的EVAII传感器等等。图3是EWM-DP光纤振动传感器。

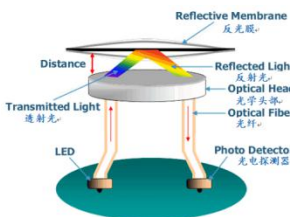


图2 光纤振动传感器原理



图3 光纤振动传感器

基于光纤振动传感器的定子绕组端部振动监

测系统主要由传感器部分、数据采集主机及监测后台组成。传感器部分包括光纤振动传感器以及光电转换模块，固定于发电机端部绕组的光纤振动传感器获得定子绕组端部的振动信号，经光纤送入到光电转换模块转换成电信号，输送到数据采集主机上，在采集板上进行滤波、A/D转换，再通过网络上传到监测计算机，系统组成见图4。

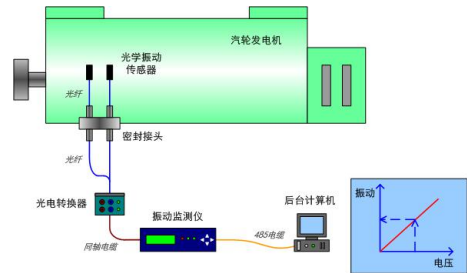


图4 定子绕组端部振动监测系统组成

## 3 定子端部振动监测系统的主要功能

以某电厂EWM定子端部振动监测为例，系统的主要功能有：①振动状态实时监测，图5；②振动状态历史曲线查看，图6；③振动位移峰值计算；④振动信号傅里叶变换；⑤状态输入量实时显示；⑥报警继电器输出等。



图5 某电厂端部振动实时显示画面

电站运行常用功能主要是实时振动监测、振动趋势曲线查看，峰值报警。启动EWM，传感器振动位移峰峰值将会实时显示在主界面。当出现振动位移峰峰值(@100 Hz)过高时(振动报警值可根据实际需求来设定)，软件画面将会显示报警状态。12个振动传感器图谱框显示振动位移峰峰值实时测量值，一般使用其中6个通道。每一个通道的振

动数据图谱框，显示不同频率下（通频、50 Hz、100 Hz）振动传感器的振动位移峰峰值，单位为 $\mu\text{m}$ 。双击任何一个振动数据图谱框，可详细查看各通道、各测点的振动数据，且有更直观的表盘（显示100 Hz的振动有效值）及波形图谱、频谱图谱显示。功能按钮包括：历史、设置、退出。

选择某一通道，单击“读取”键，就能读取振动位移峰峰值(50 Hz、100 Hz、通频)以及四路模拟量输入的历史数据，并生成历史数据趋势曲线，帮助用户掌握发电机端部振动的变化趋势。图10调取了50 Hz和100 Hz的历史数据趋势曲线，白色曲线为50 Hz，红色曲线为100 Hz。



图6 历史趋势曲线

#### 4 光纤式定子端部振动监测系统的安装

由于光纤振动传感器安装在发电机内定子绕组端部，要安全可靠的实现在线监测，关键是光纤振动传感器绑扎固定牢靠，光纤布置合理。对于氢冷发电机，还应设计密封法兰引出光纤。固定传感器和绑扎光纤的主要材料有粘接胶、热收缩带、环氧胶和涤纶毛毡等。

##### 4.1 光纤振动传感器的安装

(1) 传感器的检查与保护：安装前检查传感器、光纤及接头应无损坏，接头端面在出厂时套有保护套加以保护的，接头端面不能损坏或被胶类等物质污染。安装时注意保护好传感器不被磕碰挤压，光纤不能过度弯折。

(2) 传感器安装与绑扎：传感器一般安装在线棒鼻端，由制造厂专业操作人员进行，保证传感器固定可靠。安装时注意传感器的安装方向正确，传感器上标有箭头，箭头方向就是所测的振动方向，一般测径向振动，箭头指向径向。

先用粘接胶将传感器粘在要监测的线棒上，粘好后用热收缩带将传感器绑紧绑牢，绑扎完成后刷环氧胶固化。如图7所示：



图7 光纤传感器的绑扎固定

##### 4.2 光纤布置

光纤布置的总体原则是路径合理，固定可靠，操作方便，光纤弯曲处要自然，不能过度弯曲以免造成光纤损坏。光纤布置根据走向，选取合适的点绑扎固定，所有拐弯处应加以绑扎。可先用毛毡将光纤包裹一层，再用热收缩带或专用扎带进行绑扎，热收缩带及毛毡应刷环氧胶固化，两个绑扎点之间应拉紧。不同机型其端部结构形式不同，应根据其结构特点，选取距离较短、绑扎方便的路径来布置光纤。某电厂600 MW级机组光纤布置如下：

(1) 汽端端部：光纤沿线棒鼻端经绝缘引水管引至背部的支撑环上，如图8所示。各传感器光纤在支撑环上汇聚到一起后从支撑环引到汇流管上，再引至密封法兰。这样可以减少光纤与绝缘引水管和汇流管的接触，减少碰磨风险，操作也十分方便。

(2) 励端端部：根据励端结构特点，光纤只能沿绝缘引水管引至汇流管上绑扎布置，如图9所示，再从汇流管引至密封法兰。光纤拐弯处应进行绑扎固定，有可能发生碰磨的地方用毛毡包裹引线并用热收缩带进行包扎保护。



图8 汽端光纤布置图



9 励端光纤布置

光纤在绝缘引水管上绑扎拉紧，防止光纤与绝

缘引水管相互碰磨，国内已有电厂发现光纤与绝缘引水管相互碰磨的情况，一旦绝缘引水管被磨穿，可能会引起严重事故。

#### 4.3 密封法兰的安装

密封法兰组件包括法兰底座、O型密封圈、盖板。法兰底座焊接在端罩上，盖板上装有接线柱，开凹槽镶O型密封圈密封。注意在焊接法兰底座时应将O型密封圈拆出以免过热受损，法兰安装如图10所示。

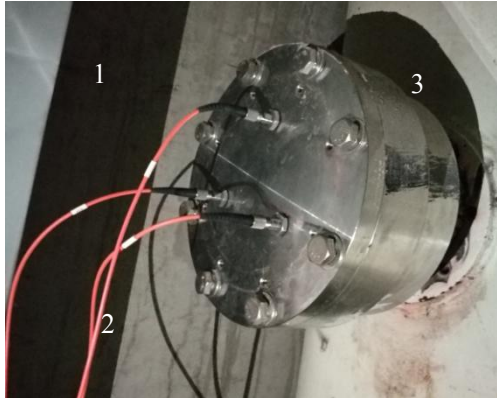


图10 密封法兰安装

#### 4.4 已投产机组加装端部振动系统的可行性分析

对于已经投入运行的机组，加装端部振动监测系统难点在于如何将光纤从机内引出到机外，需在定子机座合适位置开设法兰底座孔。对于氢冷机组，可在机组大修时抽出转子，在端罩上开孔、焊接密封法兰。可采用气割的方法在端罩上切割一个法兰孔，切割部位打磨出金属光泽。切割作业要特别注意保护好定子端部绕组，切割应在端罩内进行，由里向外切割，以防切割火焰烧伤定子端部。法兰孔开设好后，按上述项3的方法将密封法兰进行气密焊接，对焊缝进行着色探伤检查和定子气密试验，保证气密性。

### 5 端部振动监测数据的评定分析

一般在新机投运时，由于端部绑扎牢固，振动值较低，图5是某电厂1#机组168H试运行期间端部振动监测值，最大仅约30 $\mu\text{m}$ 。随着机组运行时间加长，端部结构将逐渐出现松动磨损，振动值将可能逐步变大。

GB/T20140-2016对隐极同步发电机定子绕组端部引线固有频率和端部整体模态评定准则以及定子绕组端部振动评定准则有明确的说明和要求：发电机正常运行时，定子绕组端部通频（频率范围为大于或等于转频）和倍频振动位移峰峰值小于250 $\mu\text{m}$ ，一般认为，适合无限制地长期运行；大于250 $\mu\text{m}$ 小于400 $\mu\text{m}$ ，应发报警信号，机组还可以继续运行一段时间，在此期间找出振动原因，看振动是否能够稳定在某个范围；大于400 $\mu\text{m}$ ，应发停机信号，机组不宜继续运行，应停机检查，或采取降负荷运行等措施，使振动降低到限值以下。

正常运行时，端部振动位移峰峰值的变化大于100 $\mu\text{m}$ ，应发报警信号，并加强监视。一般来说，振动幅值变化某个明显的数量，不管振动幅值是增大或者减小，都应查明变化原因。这种变化可以是瞬时的或者随着时间发展的，它可能表明已产生损坏，或者故障即将来临，或者某些其他异常。

### 6 结语

我国目前处在能源转型的关键时期，火电行业产能过剩和电网对新能源大量吸纳的双重压力下，火电机组运行工况越来越复杂多变，发电机深度调峰、快速爬坡、快速启停、进相运行等工况渐成常态。为了保证发电机长期安全运行，及时发现故障隐患，避免破坏性事故的发生，直接监测定子绕组端部的振动是非常有效和必要的。定子端部振动监测系统能测量、显示、评估并存储定子端部绕组的振动数据，可协助用户预防定子端部故障、预测性维修，从而提高机组运行可靠性，改善电厂运行经济效益。

#### 参考文献：

- [1] GB/T 29626-2019, 汽轮发电机状态在线监测系统应用导则[S]
- [2] GB/T 20140-2016, 隐极同步发电机定子绕组端部动态特性和振动测量方法及评定[S]
- [3] 白亚民, 孙树敏, 畅雅平等. 光学振动监测系统在发电机在线监测方面的应用与实践[J]. 电力设备, 2003(6):9-13

# 1 000 MW 汽轮发电机定子弹簧板应力测试、调试技术

蒋海涌

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 针对 1 000 MW 汽发的特殊定子装配结构, 以及公司的工艺要求, 采用应变测试技术通过在汽发外定子的 14 块弹簧板上布控应变计, 用以监控在内定子的作用力下, 弹簧板的受力状况, 并作为指导应力调节的依据, 最终达到所有弹簧板受力均匀的结果。

**关键词:** 1 000 MW 汽发; 弹簧板; 应力测试; 调试

中图分类号: TM311

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0019-03

## The Stress Testing and Debugging Technologies of Stator Spring Plate on 1 000 MW Turbine Generator

JIANG Haiyong

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

**Abstract:** In view of the special assembly structure of 1 000 MW steam generator stator and the company's technological requirements, the strain test technology is adopted to monitor the force of the spring plate under the force of the inner stator by laying the strain gauge on the 14 spring plates of the steam generator's outer stator. And as the basis for guiding stress regulation, finally the result of uniform force of all spring plates is achieved.

**Key words:** 1 000 MW turbine generator; spring plate; stress testing; debugging

根据发电机装配的工艺要求, 对 1 000 MW 汽发在机座装配过程中和运行工况下的弹簧板的应力情况进行监测, 并据此对弹簧板所承受的载荷进行调整, 以保证各个垂直弹簧板所承受的载荷分布均匀, 防止发电机运行时产生异常振动, 引起弹簧板的损坏。我们先后参加了河南新密、广西贺州、新疆农六师、陕西清水川、宁夏鸳鸯湖、榆林横山等 1 000 MW 汽轮发电机弹簧板的调试工作, 从调试原理, 到应变计的定位划线、引出线及数据线的连接方式等, 到最终的数据处理软件的设计, 总结整理出了一整套应力测试、调试技术的解决方案。

### 1 弹簧板应力调试过程简介

弹簧板工作状态如图 1, 当弹簧板支撑内定子

时, 载荷使紧贴于弹簧板上的应变计产生与弹簧板相同的变形。运用应变电测技术半桥测试原理, 见图 2, 便可用应变仪测得弹簧板的应变值, 再用单向应力状态的胡克定律计算得到应力值, 如下式 (1):

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

$\sigma$ : 弹簧板的应力值 (MPa)

$E$ : 弹簧板的弹性模量, 由物理性能试验计算得出 (GPa)

$\varepsilon$ : 弹簧板在受力状态下产生的应变值 ( $\mu\varepsilon$ )

由此, 根据每个弹簧板上的应力分布情况, 采用在弹簧板内侧和顶部加减垫片的方式调整单个弹簧板承受的载荷, 最终使所有弹簧板均衡承受载荷, 达到将影响发电机正常运行的因素 (振动) 降到最低的目的。

收稿日期: 2022-07-07

作者简介: 蒋海涌 (1971—), 男, 2002 年毕业于重庆大学管理工程专业, 本科。现在东方电机有限公司质检部从事计量检测工作。

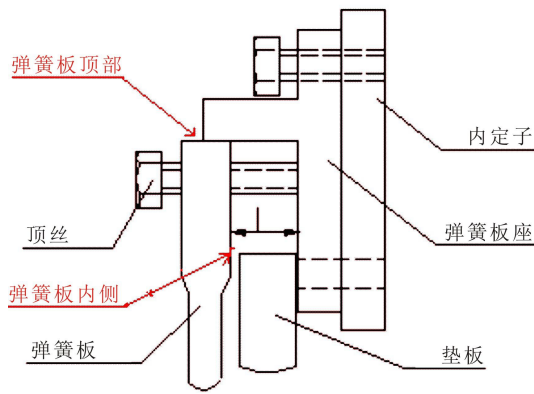


图1 弹簧板工作状态示意图

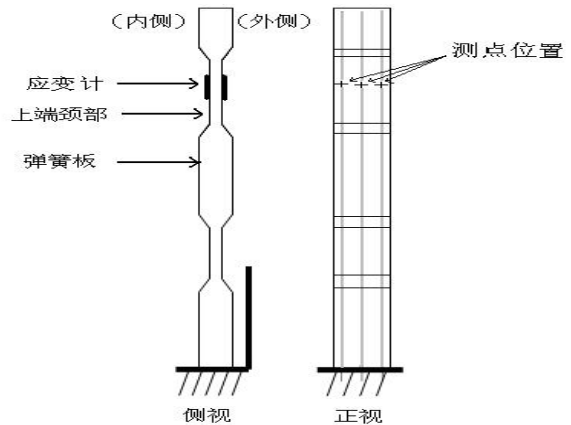


图3 应变片粘贴位置示意图

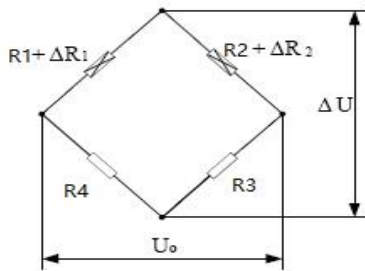


图2 半桥工作电路

图2中:

$$\Delta U = \frac{U_0}{4} \left[ \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \quad (2)$$

$U_0$ : 由应变仪提供的标准桥路工作电压 (V)

$\Delta U$ : 桥路输出电压, 由应变计阻值变化引起的电位差 (V)

$R_1$ : 工作应变计的阻值 ( $\Omega$ )

$\Delta R_1$ : 工作应变计受力和环境变化引起的阻值变化量 ( $\Omega$ )

$R_2$ : 温度补偿应变计的阻值 ( $\Omega$ )

$\Delta R_2$ : 由环境温度变化引起的补偿电阻的变化量 ( $\Omega$ )

$R_3, R_4$ : 由应变仪内部提供的匹配电阻 ( $\Omega$ )。

$\Delta R_3, \Delta R_4$ : 上式中由于  $R_3, R_4$  上不存在阻值变化, 故  $\Delta R_3, \Delta R_4$  均为 0 ( $\Omega$ )

## 2 应变计的布控

### 2.1 电阻应变计在弹簧板上的分布

如图3:

### 2.2 应变计及其位置要求

(1) 应变计选择 $90^\circ$ 应变花, 纵向应变计作为工作应变计, 横向应变计作为温度补偿应变计。

(2) 所有横向应变计均分布在上端颈部的二分之一位置。

(3) 所有纵向应变计的边距相等。

(4) 所有应变计的间距相等。

(5) 内外侧应变计分布完全对称。

### 2.3 布控目的

使得每一块弹簧板的受力状态、位置、方向, 以及对外部环境的响应都能充分保持一致性。

## 3 组接方式的设计与制作

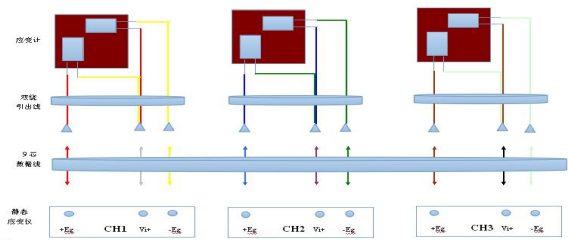


图4 应变计、引出线、数据线、仪器的连接示意图

### 3.1 组接方式的设计

如图4, 应变计引出线采用双色双绕线, 用以区分工作应变计和补偿应变计, 数据线采用9芯屏蔽线, 这样每根数据线可同时接入3组应变计。采用低接触电阻航空插头、插座作为连接器, 在场外先将引出线和数据线分别按半桥方式焊接于插头和插座上, 这样在工地现场只需将引出线与数据线通过连接器对接即可, 只要无损坏, 引出线和数据线均可重复使用的。

### 3.2 组接方式的原理

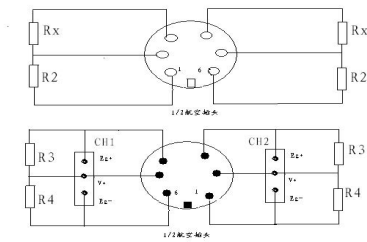


图5 组接方式原理图

如图5, 图中Rx为工作应变计, R2为补偿应变计, R3、R4为桥路匹配电阻。CH1、CH2为应变仪测试通道。当两组航空插头对接时, 即可组成完整的半桥测量电路。

## 4 分析应用软件的制作

### 4.1 软件模型

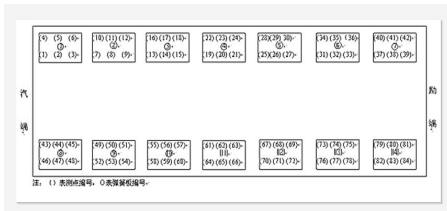


图6 弹簧板在外机座的实际分布图及测点分布图

弹簧板应力测试数据对比表

测点	标准压力 (kN)	标准应力 (MPa)	标准应变 (με)	实测应力 (MPa)	实测应变 (με)
[1]	27.06	30.12	185	191.3	191.3
[2]	29.38	32.7	201	210.1	210.1
[3]	34.23	38.1	234	242.5	242.5

图7 软件模型

由图6、图7可以看出, 软件模型是与弹簧板的实际安装位置一一对应的, 精确到每一块弹簧板, 每一个测点。这样通过软件我们可以一目了然的看到每一块弹簧板的工作情况, 了解每一个测点应力大小, 从而确定调整的方向。

### 4.2 软件设计平台

软件的平台是基于Microsoft office Excel 设计的。通过这个软件自带的功能可以对每一个要素进行独立的公式编辑。其中84个测点数据可从应变仪直接导入, 通过公式编辑得出所需数据。另外该软件还对最后结果进行了合格区域设置, 使最终调试结果的判定更加直观。

## 5 实施效果的验证

### 5.1 组接方式的实施效果

在时间上组接方式的效果是非常显著的, 原来需要2到3天完成的工作, 现在由于采用了航空插头、插座的连接方式, 基本上不耗时间, 完成整个引出线与数据线的连接仅要10分钟就能解决。

### 5.2 测试方式的实施效果

根据弹簧板的加工图纸按1:1的比例自制了弹簧板的模型, 严格按照现场的操作过程对弹簧板进行了打磨、清洗、划线、贴片、连接引出线、连接数据测试线、连接仪器。将准备好的弹簧板模型安装在拉力机上, 如图8。



图8 应力测试验证

通过拉力机施加标准压力, 通过应变仪采集数据进行对比, 表1为组接方式的应力采集数据对比。由数据对比可以看出, 所有的实验数据均不超过标准值的±5%, 完全满足测试需要。

表1 组接方式的应力采集数据对比

标准压力 (kN)	标准应力 (MPa)	标准应变 (με)	实测应力 (MPa)	实测应变 (με)
27.06	30.12	185	191.3	191.3
29.38	32.7	201	210.1	210.1
34.23	38.1	234	242.5	242.5

注: 弹性模量 E=0.163 GPa, 由物理性能试验计算得出。

### 5.3 测试分析软件的实施效果

分析软件的界面布置如图7, 是参照弹簧板在外机座的实际分布来设计的, 因此各要素一目了然, 外观设计上完全满足应力调试的需要, 关键就在于数据的准确性上。我们对各要素的编辑公式进行了反复确认, 手工输入数据对每一要素进行了验证, 做到了数据100%的准确, 并且在陕西清水川电站弹簧板应力调试过程中进行了试用(测试数据如图9), 完全满足了软件易操作、更快捷、直观、可靠的要求。

(下转第34页)

# 补汽流量和结构对机组影响的数值研究

白昆仑 平艳 钟主海 江生科 陶志坚

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 本文利用数值计算的方法, 以某百万等级机组为研究对象, 分析对比了 A、B 两种不同的补汽结构下, 补汽流量大小对前后级性能和转子运行稳定性的影响。分析结果表明: 随着补汽流量的增大, 补汽前一级的效率变化不大, 补汽后一级的效率明显下降, 补汽对转子运行稳定性的影响也越来越大。从级效率和转子运行稳定性的角度来看, 补汽结构 A 优于补汽结构 B。

**关键词:** 补汽流量; 补汽结构; 效率; 数值计算

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0022-04

## Numerical Investigation for Effect of Supplementary Steam Quantity and Structure on Steam Turbine

BAI Kunlun, PING Yan, ZHONG Zhuhai, JIANG Shengke, TAO Zhijian

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

**Abstract:** Based on a 1 000 MW steam turbine, the effect of supplementary steam quantity on stage efficiency and rotor operational stability is investigated by using numerical simulation. Two different kinds of supplementary steam structures are compared. The results show that, with the increase of supplementary steam quantity, the upstream stage efficiency almost unchanged, while the downstream stage efficiency reduces significantly, the effect of supplementary steam on the rotor operational stability becomes more serious. From the stage efficiency and rotor operational stability view, the structure A is better than the structure B.

**Key words:** supplementary steam quantity; supplementary steam structure; efficiency; numerical simulation

汽轮机作为现代化国家的重要动力设备, 必须具备较高的经济性和一定的变工况运行能力。VWO 工况为汽轮机调门全开工况, 能够满足电网对电力需求突然增大的情况, 具有一定的社会价值。

汽轮机通常具有喷嘴调节和节流调节两种运行方式<sup>[1]</sup>。喷嘴调节灵活、方便, 但对调节级强度要求很高。百万等级机组主汽参数高, 调节级强度很难满足机组安全运行要求, 因此大多采用节流调节方式<sup>[2]</sup>。

节流调节机组在运行时, 主汽压力与进汽量近似成正比, 仅 VWO 工况时, 主汽压力才能达到额定值, THA 工况主汽压力一般为额定值的 88%~

95%<sup>[2]</sup>。主汽压力未达到额定值以及调节阀的节流效应均会造成额外的损失, 影响 THA 工况的效率<sup>[3]</sup>。

为了提高节流调节机组 THA 及以下工况的效率, 引入补汽调节方式, 利用补汽阀增加进汽量, 满足超负荷运行 (THA 以上工况) 需求, 保证机组在 THA 工况时, 主汽压力达到额定值, 且调节阀处于全开状态, 从而减少节流损失。带补汽调节的机组, 汽流经过主汽阀后分为主汽和补汽两路, 主汽汽流经调节阀进入下游透平级, 补汽汽流经补汽阀进入补汽结构, 最后与主汽汽流在补汽口后透平级内汇合<sup>[4]</sup>, 如图 1 所示。补汽阀开启点为主汽压力达到额定值且调节阀全开时。

收稿日期: 2021-09-03

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



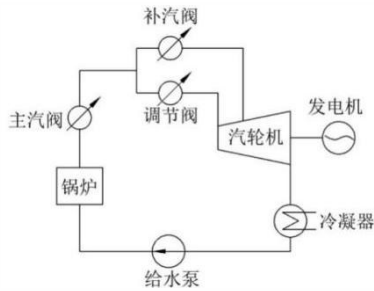


图1 补汽调节机组示意图

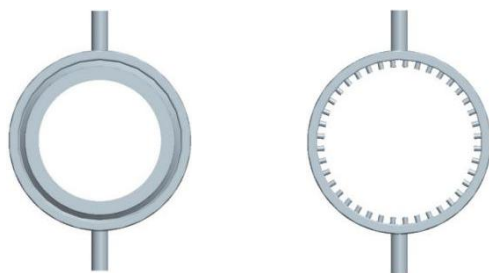
带补汽调节的机组，VWO 工况时，补汽阀会造成节流损失，补汽汽流会对前后级流场产生影响，所以效率较不带补汽调节的机组低。此外，补汽还会对主流产生干扰，甚至影响转子运行的稳定性<sup>[5]</sup>。因此，汽轮机设计时，必须统筹考虑各工况下机组的经济性和安全性，设计合理的补汽结构，同时控制补汽流量。

本文利用数值计算的方法，以某百万等级机组为研究对象，分析对比了两种不同的补汽结构下，补汽流量大小对前后级性能和转子运行稳定性的影响。

## 1 计算方法

### 1.1 计算模型

本次计算以某百万等级机组为研究对象，该机组补汽口位于高压第5级和第6级之间，补汽管道有两根，上下对称布置。图2为A、B两种补汽结构立体模型图，A结构中，补汽通道为整圈环形通道，B结构中，补汽通道为周向均布的20个通孔。



(a) A 补汽结构

(b) B 补汽结构

图2 补汽结构示意图

图3为计算域示意图，包括补汽管道、补汽结构和前后透平级。为保证计算的准确性和方便性，计算域中，补汽结构上游包含一级静叶（S5）和一级动叶（R5），其中动叶（R5）带汽封结构，补汽结构下游包含一级静叶（S6）和一级动叶（R6），

均带汽封结构。仅补汽结构、下游静叶（S6）及其根部汽封为整圈，其余均为单通道。叶片相关参数见表1所示。

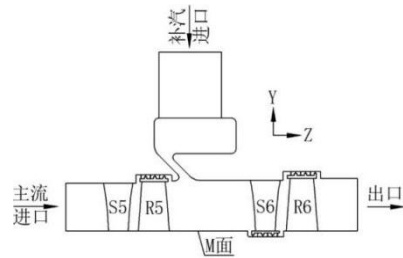


图3 计算域示意图

表1 叶片几何参数

叶片	S5	R5	S6	R6
支数	58	57	58	57
叶高 (mm)	96.9	100.5	102.8	106.6
根径 (mm)	934			

### 1.2 网格划分

网格绘制时，将计算域分为补汽结构、叶片流道和汽封三部分。其中，补汽结构和汽封的网格绘制采用 ANSYS Workbench 中的 Mesh 模块，补汽结构网格数约 300 万，汽封网格数约 12 万。叶片流道网格绘制采用 NUMECA 中的 AutoGrid 模块，单个叶片网格数约 20 万。整个计算域总网格数约 1 450 万，全部为非结构化网格，满足分析软件网格要求。

### 1.3 数值方法

本次分析使用 ANSYS CFX18.0 进行定常计算，湍流模型为 SST 剪切输运模型，该模型考虑了湍流剪切应力，不会对涡流黏度造成过度预测，特别适用于高精度边界层的模拟<sup>[6]</sup>。离散格式为高精度格式，壁面为绝热无滑移光滑壁面。计算工质使用 CFX 内嵌的高精度水蒸汽数据库——IAPWS97。主流进口和补汽进口均给定流量和总温，出口给定平均静压。计算过程中，关注残差和流量的收敛曲线，并监控 M 面（补汽口正对转子面）在 X 向和 Y 向的受力波动情况。

表2 计算工况边界条件

补汽占主流比例	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%
补汽进口流量 (kg/s)	110.3	147.0	183.8	220.5	257.3	294.0	330.8
补汽进口温度 (°C)	572.6						
主流进口流量 (kg/s)	735.0						
主流进口总温 (°C)	548.3						
出口静压 (MPa)	15.47						

为分析补汽流量对机组性能的影响，本次计算

中,通过改变补汽流量占主流的比例,得到7个补汽工况。变工况计算时,主流进口和出口边界条件不变,见表2所示。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 效率分析

图4为A、B两种补汽结构下,前后级效率随补汽流量占比的变化曲线。由于计算域中不包括补汽前一级静叶(S5)根部汽封,所以效率偏高。对于A、B两种补汽结构,补汽口前一级(第5级)的效率随补汽流量的变化很小,补汽口后一级(第6级)的效率随补汽流量的增大而降低,接近线性关系。

对比A、B两种补汽结构,在所有计算工况下,补汽前一级的效率均非常接近,而补汽后一级的效率差异较大,A结构中,补汽后一级的效率明显高于B结构中。可见,补汽主要影响补汽后一级的效率,从气动性能的角度来看,A补汽结构较B补汽结构具有明显的优势。

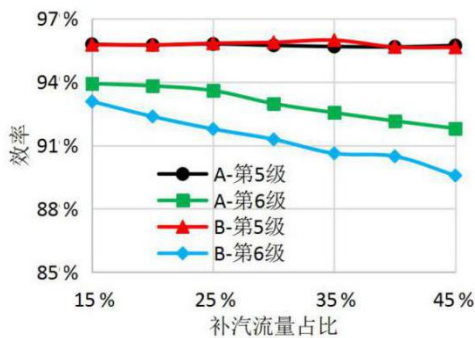
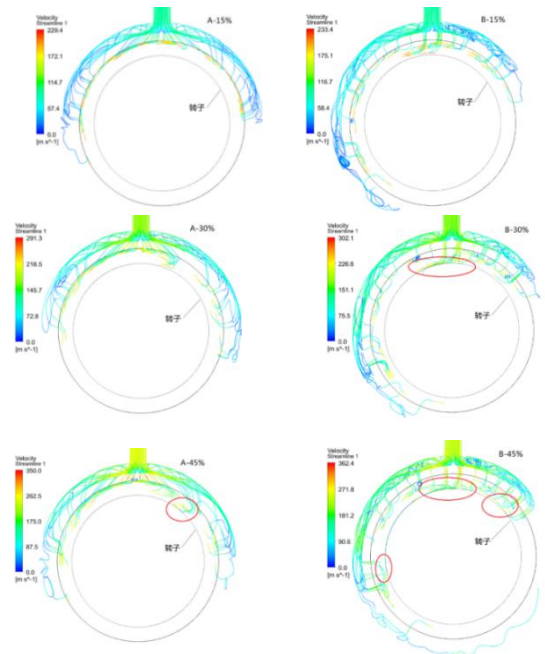


图4 级效率随补汽流量的变化曲线

### 2.2 流场分析

图5为15%、30%和45%工况下,以顶部补汽管道入口为初始绘制的补汽流线图,其中内圈为转子面。由于转子旋转效应的影响,两种结构下,补汽流线均具有不对称性,尤其是在B结构中,补汽流线明显的偏向补汽管道的一侧。15%工况时,A、B两种补汽结构中,补汽气流均未直接冲击到转子,但是B结构中,在补汽管道正下方,补汽流线非常接近转子。30%工况下,A结构中,补汽气流仍未冲击到转子,B结构中,在补汽管道正下方,大量补汽气流已经冲击到转子。45%工况下,A、

B两种结构中,均有部分补汽气流冲击到转子,B结构中更为严重。此外,在相同工况下,A结构中补汽气流的最高速度均略低于B结构中。可见,从流场角度来看,B结构中更容易出现补汽气流直接冲击到转子的情况,对转子运行稳定性的影响更大。



(a) A 补汽结构

(b) B 补汽结构

图5 补汽流线图（出汽侧视图）

### 2.3 压力场分析

图6为15%、30%和45%工况下,M面(补汽口正对转子面)上的压力云图,可见A、B两种补汽结构中,M面上的压力分布差异较大。A结构中,在计算工况下,M面压力分布总体比较均匀,两侧部分区域压力略高。而B结构中,M面顶部和底部出现明显的局部高压区和低压区,随着补汽流量的增加,这一现象更加明显。

为了进一步分析M面上压力分布情况,统计了两种结构中,各工况下M面压力最大值与最小值的差值,如图7所示。可见A、B两种结构中,M面压力差值均随补汽流量的增大而增大,且A结构中M面压力差值明显小于B结构中。尤其是在补汽流量占比大于25%后,B结构中M面压力差值急剧增大,而A结构中M面的压力差值缓慢增大,所以二者的差异较大。可见,从压力场分布来看,B结构中M面压力分布比A结构中更不均匀,尤其是在补汽流量占比大于25%后。

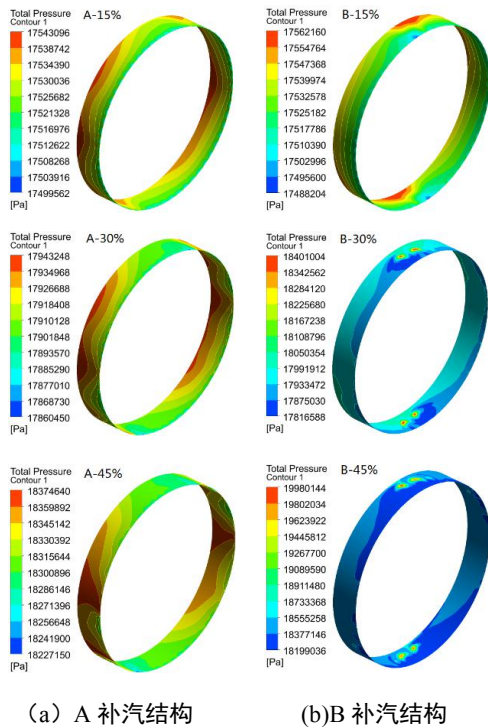


图6 M面压力云图

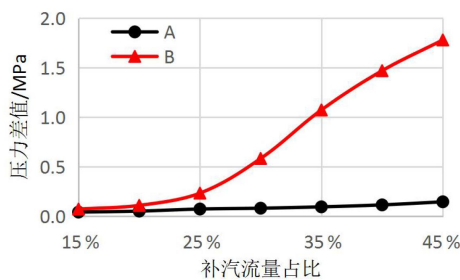


图7 M面压力差值随补汽流量的变化曲线

### 2.4 受力波动分析

为进一步分析补汽流量对转子运行稳定性的影响,在计算中,监控了M面(补汽口正对转子面)上X和Y两个方向的受力情况,并统计了流量和残差收敛后,M面上受力波动峰、谷值,二者之差即为受力波动极值,如图8所示。A结构中,M面X向和Y向受力波动极值随补汽流量的增大而增大,接近线性关系,X向和Y向受力波动极值差异较小。B结构中,M面X向和Y向受力波动极值也随补汽流量的增大而增大,接近抛物线关系,X向和Y向受力波动极值差异也较小。对比A、B两种补汽结构,A结构中,M面X向和Y向的受力波动极值均小于B结构中,且随着补汽流量的增大,二者的差异有变大的趋势,尤其是在补汽流量占比大于30%后,B结构中M面受力波动极值急剧增大,明

显大于A结构中。可见,从M面受力波动情况来看,补汽结构A较补汽结构B对转子运行稳定性更友好,尤其是在补汽流量占比较大时。

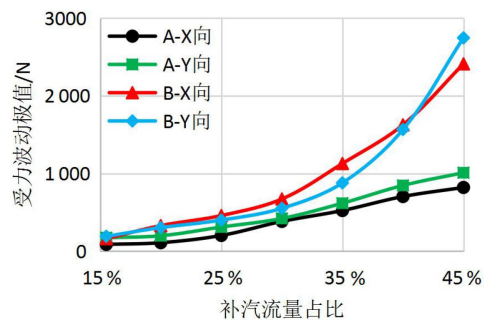


图8 M面受力波动极值随补汽流量的变化曲线

### 3 结语

通过以上计算分析,可以得到以下结论:

(1) 随着补汽流量的增加,补汽前一级效率变化很小,补汽后一级效率明显下降。在计算工况下,A结构中补汽后一级效率均明显高于B结构中。

(2) 随着补汽流量的增加,A、B两种结构中,均会出现补汽流线直接冲击到转子的情况,B结构中更为严重,主要集中在补汽管道正下方区域;

(3) 随着补汽流量的增加,A、B两种结构中,M面的压力差值均逐渐增大,A结构中M面压力差值明显小于B结构中,尤其是在补汽流量占比大于25%后。

(4) 随着补汽流量的增加,A、B两种结构中,M面上的受力波动极值均逐渐增大,A结构中X向和Y向受力波动极值均低于B结构中,且二者的差异有逐渐增大的趋势,尤其是在补汽流量占比大于30%后。

(5) A补汽结构较B补汽结构对补汽口后一级通流效率的影响更小,气动性能更优。

(6) 从补汽流线、M面压力分布和受力波动情况来看,A补汽结构较B补汽结构对转子运行稳定性的影响更小。

### 参考文献:

[1] 黄树红. 汽轮机原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008  
 [2] 包伟伟, 高敏, 庞浩城等. 1 000 MW超超临界机组补汽调节技术经济性分析[J]. 发电设备, 2016,30(1):11-15

(下转第29页)

# 盐穴空气储能透平机组轴系动力学分析

曹寒 祁乃斌 杨培平 蒋福东 杨灵

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 本文介绍了储能技术的应用以及空气储能技术的原理, 并以盐穴空气储能透平机组轴系为研究对象, 首先对轴系转子进行了模化, 然后采用有限元方法计算了轴系的横向弯曲无阻尼临界转速、不平衡响应和轴系的稳定性情况; 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, 计算结果表面透平机组能满足安全运行要求。

**关键字:** 空气储能; 轴系; 动力学分析

中图分类号: TM61

文献标识码: A

文章编码: 1001-9006 (2022) 04-0026-04

## Dynamic Analysis of Shafting System of Salt Cavern Air Energy Storage Turbine

CAO Han, QI Naibin, YANG Peiping, JIANG Fudong, YANG Ling

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

**Abstract:** This paper introduces the application of energy storage technology and the principle of air energy storage technology, and takes the shafting of salt cavern air energy storage turbine unit as the research object. Firstly, the shafting rotor is modeled, and then the finite element method is used to calculate the undamped critical speed, unbalance response and stability of the shafting in transverse bending. The natural frequencies of torsional vibration of the shafting system are calculated by using the transfer matrix method of continuous mass. The calculated results show that the surface turbine unit can meet the requirements of safe operation.

**Key words:** air energy storage; shafting; dynamic analysis

随着我国电网容量的不断扩张, 峰谷差日益增大, 可再生能源、分布式供能和智能电网的蓬勃发展, 对大规模储能的需求也越来越大。大规模储能技术可以有效地解决风能、太阳能等间歇式可再生能源发电不稳定的问题, 实现“削峰填谷”、平滑波动性电能输入, 提高可再生能源发电的利用率, 增强电网运行的安全性。目前已有的储能技术主要包括抽水蓄能、压缩空气储能(Compressed Air Energy Storage, CAES)、电池储能、飞轮储能和超导储能等。压缩空气储能由于储能容量大、转换效率高, 因而属于适合商业化应用的大规模储能技术, 也是解决可再生能源波动性问题的关键技术之一<sup>[1]</sup>。

### 1 压缩空气储能技术介绍

压缩空气储能技术(Compressed Air Energy Storage, CAES)是基于燃气轮机技术发展而来的能量存储技术, 是除抽水蓄能之外另一种能够进行大规模储能的技术, 具有储存容量大、运行效率高、使用寿命长、技术成熟和运行成本低等优点。CAES系统一般包括空气压缩机、储气装置、燃烧室(加热装置)、膨胀机(又称透平机或涡轮机)和发电机。系统运行可简述为系统利用弃风电、弃光电或用电低谷期富余的低价电能驱动压缩机, 将空气压缩到储气装置中储存起来, 在用电高峰期, 将压缩

收稿日期: 2021-12-07

**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。

空气从储气装置中释放，通入燃烧室与燃料一起燃烧，形成高温高压气体，高温高压气体通入膨胀机膨胀做功，带动发电机发电，其系统工作原理图如图 1 所示。

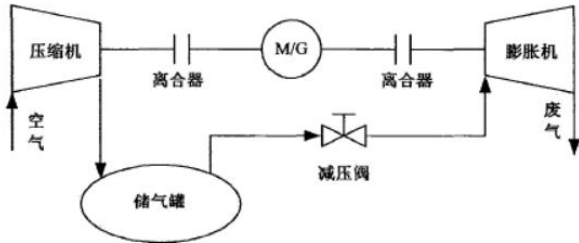


图 1 压缩空气储能系统原理图

压缩空气储能作为存储容量大、效率高的储能技术，德国、美国、中国、日本等国家都对其进行了大量的研究。目前能够进行商业化运行的 CAES 电站有德国 Nordwest Deutsche Kraftwerke 公司建造并于 1978 年开始运行的 Huntorf 电站和 1991 年由美国 Alabama Electric Cooperative 公司在 Alabama 建立的 McIntosh 电站。这两个商业化的压缩空气储能电站都将地下盐穴作为储气装置，且都是以天然气为燃料的传统补燃式电站。中国对压缩空气储能技术的研究起步较晚，但发展速度十分迅猛。2013 年，中国科学院热物理研究所设计并建立了 1.5

MW 级的超临界压缩空气储能系统的示范平台；10 MW 级的先进绝热压缩空气示范项目于 2016 年 9 月建成，并于 2017 年开始测试工作<sup>[2]</sup>。

位于江苏省某 60 MW 级盐穴空气储能发电项目是目前国内最大的空气储能项目，该项目于 2019 年开工建设，并计划于 2021 年底投产发电。为实现盐穴空气储能发电项目的最优效益，由东汽研制的透平机采用了低根径、多级次的设计理念，该透平机具有国内最先进的通流技术。本文针对该 60 MW 级盐穴空气储能发电项目透平机的轴系动力学特性进行了分析，计算结果表明，在保证最优效益的前提下，机组具有较高的安全性和可靠性裕度。

## 2 横向弯曲振动无阻尼临界转速

轴系动力学特性分析中的弯曲振动无阻尼临界转速计算的目的是确定轴系临界转速的大致范围以及确定轴系的弯曲振型，是不平衡响应分析的前提。该型空气储能透平机轴系布置如图 1 所示，轴系的计算模型采用沿轴向的一维有限元模型<sup>[3]</sup>，分为 135 段、136 个节点，各轴承型式和基本参数见表 1。

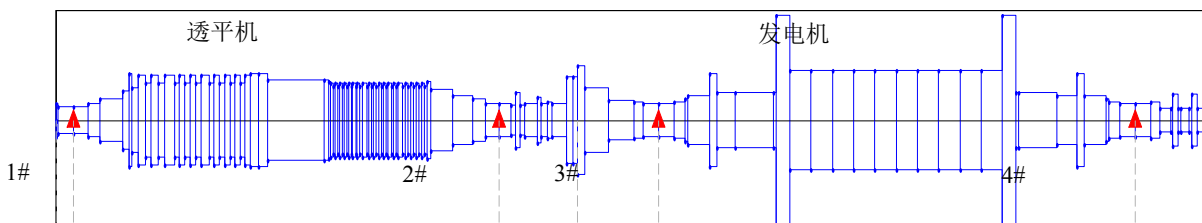


图 1 透平机轴系布置

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 (mm)	轴承宽度 (mm)
1	五瓦可倾瓦轴承	300	180
2	五瓦可倾瓦轴承	325	190
3	椭圆轴承	360	200
4	椭圆轴承	360	200

各转子在轴系中的无阻尼临界转速计算结果如表 2 所示，各阶振型见图 2~图 5。

表 2 轴系无阻尼临界转速

序号	1	2	3	4
频率 Hz	26.5	27.7	79.9	80.7
对应转速 r/min	1 587	1 661	4 794	4 842
模态和阶次	透平一阶	电机一阶	电机二阶	透平二阶



图 2 透平一阶振型



图3 电机一阶振型



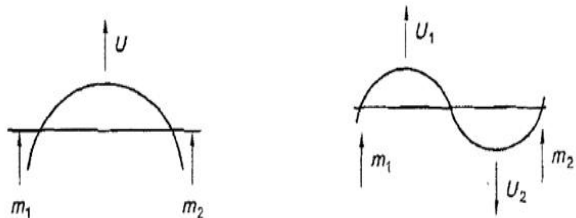
图4 电机二阶振型



图5 透平二阶振型

### 3 轴系弯曲振动不平衡响应分析

对本文盐穴空气储能透平转子进行不平衡响应分析，一类不平衡量按图6(a)进行施加，二类不平衡量按图6(b)进行施加<sup>[4]</sup>，施加不平衡量后轴颈的振动响应如图7和图8所示（注：图中幅值均为峰峰值）。



(a) 一类不平衡量施加位置 (b) 二类不平衡施加位置

图6 不平衡量施加位置示意图

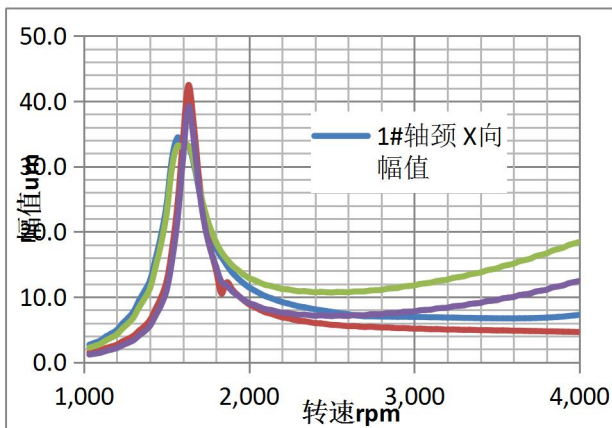


图7 一类不平衡响应曲线

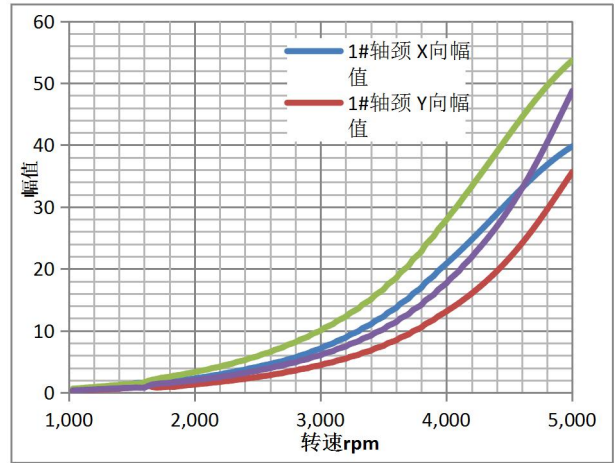


图8 二类不平衡响应曲线图

#### (1) 不平衡响应峰峰值校核

该项目透平转子轴颈处的响应峰峰值均小于标准要求的限制值，校核结果如表3所示。

表3 0~3 000 r/min 范围内响应峰峰值校核结果

位置	1#轴颈		2#轴颈	
	X	Y	X	Y
最大响应峰峰值(μm)	34.8	42.2	33.7	38.9
3 000 rpm 一阶不平衡量响应峰峰值(μm)	6.9	5.2	11.9	7.9
3 000 rpm 二阶不平衡量响应峰峰值(μm)	7.2	4.5	10.1	6.1
限制值(μm)	50.8		50.8	
校核结果	合格		合格	

#### (2) 临界转速及其避开率校核

阻尼临界转速校核情况如表4所示，其避开率满足标准的要求。

表4 临界转速校核结果

位置	1#轴颈		2#轴颈	
	X	Y	X	Y
振动峰值转速(rpm)	1 573	1 633	1 587	1 633
放大系数	7.38	14.85	7	15.4
API 标准要求避开裕量(%)	16	16	16	16
计算避开裕量(%)	47.6	45.6	47.1	45.6
校核结果	合格	合格	合格	合格

### 4 轴系稳定性计算

稳定性分析对于透平机而言具有非常重要的意义，直接关系到机组能否安全可靠的运行，针对

盐穴空气储能项目的透平机，除分析了仅有轴承作用时的对数衰减率外，还分析了考虑叶片的 Alford 力作用后的对数衰减率。工作转速下仅有轴承作用时的涡动转速及对数衰减率见表 5 所示。

表 5 3 000 r/min 时的涡动转速及对数衰减率

	涡动转速 (r/min)	对数衰减率
电机转子 X 一阶	1 167	0.19
透平转子 X 一阶	1 524	0.24
透平转子 Y 一阶	1 594	0.18
电机转子 Y 一阶	1 734	0.21

在工作转速下，对透平转子加载不同的交叉耦合刚度进行转子 1 阶模态稳定性计算，对数衰减率随交叉刚度变化情况如表 6 所示。

从表 6 可以看出，转子加载叶片交叉刚度后， $\delta_A=0.15>0.1$ ，同时  $Q_0/Q_A=3.7>2$ ，满足 API 标准中的相关要求，稳定性满足标准要求。

表 6 加载叶片交叉耦合刚度后转子对数衰减率

	对数衰减率			
	0	1 倍 ( $\delta_A$ )	2 倍	3.7 倍
交叉刚度	0	0.24	0.27	0.31
透平转子 X 一阶	0.24	0.27	0.31	0.42
透平转子 Y 一阶	0.18	0.15	0.106	0

## 5 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 7，振型如图 9~图 11 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 7 轴系扭振固有频率表

阶次	扭振频率(Hz)
1 阶	31.1
2 阶	158.3
3 阶	182.9

(上接第 25 页)

[3] 彭泽瑛, 顾德明. 补汽调节阀技术在百万千瓦全周进汽汽轮机中的应用[J]. 热力透平, 2004(4):223-227

[4] 钱海川, 韩岗, 陈梁. 过载补汽阀在 1 000 MW 汽轮发电机组上的综合应用[J]. 上海节能, 2019(8):652-655

[5] 刘晓宏, 韩传高, 曹剑锋等. 过载补汽技术在 600~1 000 MW 机组中的应用研究[C]. 2013 年火电机组建设质量控制技术研讨会,

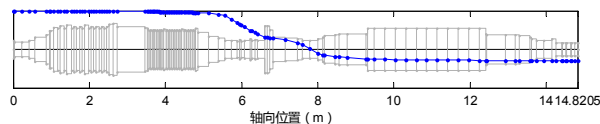


图 9 频率为 31.1 Hz 的扭振振型

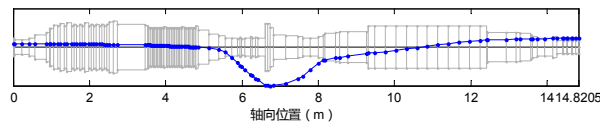


图 10 频率为 158.3 Hz 的扭振振型

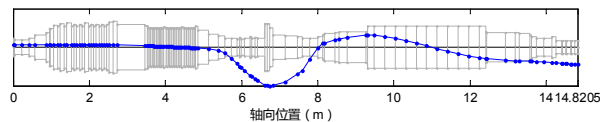


图 11 频率为 182.9 Hz 的扭振振型

## 6 结语

(1) 本文采用有限元法计算了金坛盐穴空气储能项目的透平机轴系横向弯曲振动无阻尼临界转速，计算得到的轴系各阶临界转速均避开了工作转速的  $\pm 15\%$ ，机组安全性满足要求；

(2) 在转子上施加一阶不平衡量和二阶不平衡量进行不平衡响应分析，不平衡响应计算结果在 3 000 r/min 下，转子各轴承振动以及临界转速的避开率满足要求。

## 参考文献:

[1] 薛小代, 陈晓弢, 梅生伟等. 采用熔融盐蓄热的非补燃压缩空气储能发电系统性能[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14):11-20

[2] 王鹏. 基于压缩空气储能的余热回收发电系统研究[D]. 山东科技大学, 2019

[3] 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

[4] API-684:2005[S]

2014, 117-120

[6] 王世柱, 李志刚, 李军等. 补汽对透平级气动性能和静叶汽封转子动力特性影响的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5):56-61

[7] 平艳, 张晓东, 钟主海. 汽轮机高压抽口气动分析及结构改进设计[J]. 东方汽轮机, 2021(2):1-7

# 面向发电设备制造企业的车间数据采集与应用

谢红梅 杨涛 刘伯兴

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 为降低发电设备制造企业的运营成本, 提高制造效率, 优化能源利用, 实现生产精细化和透明化管理, 开展核心车间的数据采集与互联互通关键技术研究, 构建统一的数据采集与管理平台, 并成功应用于实时数据驱动的智能监控系统。本文建立的数据采集标准与规范, 为制造企业进行设备数据采集、生产过程管控和大数据平台提供一定参考价值。

**关键词:** 数据采集; 数据集成; 监控系统

中图分类号: TP2

文献标志码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0030-05

## Data Acquisition and Application for Power Generation Equipment Manufacturing

XIE Hongmei, YANG Tao, LIU Boxing

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

**Abstract:** In order to reduce the operation cost of power generation equipment manufacturing enterprises, improve manufacturing efficiency, optimize energy utilization, realize production refinement and transparent management, carry out the research on the key technologies of data acquisition and interconnection in the core workshop, build a unified data acquisition and management platform, and successfully apply it to the real-time data-driven intelligent monitoring system. The data acquisition standards and specifications established in this paper provide a certain reference value for manufacturing enterprises to carry out equipment data acquisition, production process control and big data platform.

**Key words:** data acquisition; data Integration; monitoring system

电力装备是“中国制造 2025”的十大重点支持行业之一。要实现从传统制造模式向智能制造模式的转变, 发电设备制造企业首先需要建立智能制造标准数据化体系, 给各种执行层提供高效, 准确, 统一的数据来源, 为生产效率提高、运营成本降低、不良品率降低和能源利用率提高提供高效、准确的数据支撑。

大型发电设备制造企业设备多、杂, 新旧不一, 既有一般设备, 又有特殊设备和三哑设备, 导致数据来源多, 甚至设备内无数据、无接口或被占用。而且现场数据量大, 结构复杂, 生产响应实时要求

高; 数据需求频率跨度大, 从毫秒到季度; 数据需建立对应关系才能输出为报表, 这些都是数据采集和互联互通需要解决的难题。

本文数据采集系统研究了能够适用于多种通讯协议整合, 多种采集方式并存的解决方案。基于确定多源异构设备互联互通的网络规划, 完成多类型设备的通讯协议解析与多场景设备的不同类型数据采集的接入, 建立统一的数据管理平台, 提供多并发、统一且易扩展维护的数据接口, 为车间智能监控系统提供及时有效的数据驱动。

收稿日期: 2022-04-02

**作者简介:** 谢红梅 (1989—), 女, 工学硕士, 工程师, 就职于东方电气集团东方电机有限公司, 主要研究数据采集、机器人系统集成。

杨涛 (1996—), 男, 助理工程师, 就职于东方电气集团东方电机有限公司, 主要研究方向数据采集、机器人集成应用。

刘伯兴 (1976—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 就职于东方电气集团科技信息部, 主要研究智能制造技术、机器人集成应用、CAM 技术。



## 1 总体架构

如图1所示,大型发电设备企业核心车间总体上分为3层:车间设备层、车间执行层、企业管理层。主要业务模块包括车间基础设施、设备数据采集与互联互通系统、制造运营管理系统 MOM、仓储物流系统、车间虚拟仿真系统等执行层应用。

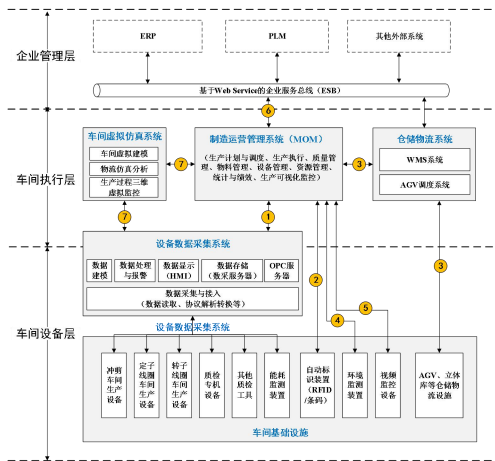


图1 车间数据采集与互联互通框架

从设备层 OT 层到应用层 IT 层,数据采集与互联互通系统按照4个层级构建:

(1) 多场景设备数据采集: 包含设备边缘端升级改造,设备数据采集 OT 层解耦技术,通讯协议解析及扩展集成技术。

(2) 互联互通网络建设: 数字化车间网络规划与建设。

(3) 设备层数据互联互通与管理: 搭建统一的设备通讯协议库与管理平台。

(4) 数采平台与应用层互通: 制定数采平台与应用层接口规范。

## 2 数据采集与互联互通

构建大型发电设备企业统一的数据采集与管理平台,对复杂和特种设备的近2000项多源异构数据,采用分类打通、分类采集、数据互联、统一汇聚、统一管理、统一出口的方式,将数据从设备、操作过程、仪器/仪表、传感器等物理实体或过程中提取出来,并进行联通、清洗和管理,为智能工厂的执行层提供高效、准确、统一的数据来源<sup>[1]</sup>,从而为 MOM 系统、监控大屏上的可视化展、车间数

据三维虚拟制造车间以及透明化生产管控,提供高效准确且便捷的数据驱动。

### 2.1 数据采集与集成

#### 2.1.1 多场景设备数据采集 OT 层解耦

针对不同工业设备,数据采集有不同的方式:有数据接口的设备,如机器人,机床,PLC 控制器,智能化仪器仪表等,可以直接将设备数据传输到网关,进行协议解析采集。

设备无接口、没有现成数据或不具备通过通讯协议获取数据的设备,则通过外挂安装传感器或加边缘网关方式,进行设备升级改造,增加通讯能力,基于有线或无线方式,将数据传输到网关。本技术实现包含设备边缘的数采箱数据采集器和数采终端两部分。系统对难以通过协议解析的数据,通过定制化设计数据采集方案,从协议/传感/PLC 等各种方式,进行更加全面的数据采集。

#### 2.1.2 通讯协议解析及扩展集成

为了适应不同的协议接入,系统通过对多种协议通讯模型的抽象,在数据采集平台增加协议调度与适配层管理协议的扩展集成,如下图所示,同时向上接收来自界面的地址配置信息,采集进程管理,数据外发管理等任务<sup>[2]</sup>,实现了多种通讯模型协议的扩展集成(如图2)。

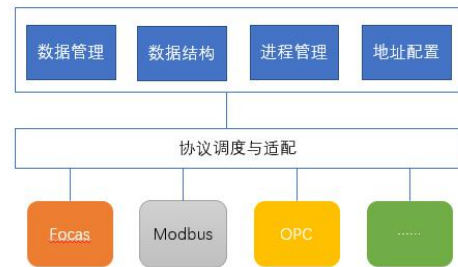


图2 协议适配

通过对典型通讯协议通讯模型的分析,结合现实场景的需求建立一套适用于本项目的能够覆盖多种协议的数据采集模型,解决现场数据形式多样化,数据量大,数据信息量低,数据读取专业化强的问题。

### 2.2 数据存储与处理

由于传统制造装备信息化程度不高,不同厂商设备使用的通信接口各不相同,导致了车间内可能存在大量的“信息孤岛”。通过对上百台设备进行统一的数据接口转化,建立统一的数据采集格式与模

式，确保所有设备的信息，从不同的设备采集出来以后，能够以统一标准的格式和方式被存储，将多元异构的数据，转化为直观的树状图数据，方便查找和调用。

### 2.2.1 基于关系模型与时间序列并存的数据存储

考虑到大型发电设备数据的特殊性，本系统采用了基于时间序列存储的时序数据存储技术，在通过封装 SQL 语句形成标准的关系型数据，这样同时具备时序数据和关系型数据库的优势，既能解决原始数据存储量大保真性好，又能解决其他执行层系统主要需要调用关系型数据的问题。

本系统的数据采集站以及数据分析服务器上嵌入了根据业务需要的数据处理逻辑，在原始数据采集上来以后直接转化为其他系统需要的业务数据，此项功能将多源异构的设备的零散数据，集成成为 MOM 系统和可视化仿真需要的结构化、可以随时调取的数据。另一方面，本系统提供开放性的数据接口，能够对接其他业务系统实现对数据的自定义处理。

针对时序数据具有海量、高维、多源异构、多尺度、高噪声等特性，这些数据难以直接用于运行过程的分析决策。本系统通过数据预处理方法、实现这一关联的过程。数据预处理主要数据对齐、数据清洗、数据关联、建模集成与多尺度分类等方法<sup>[3]</sup>。

#### (1) 数据对齐

时序数据每个数据点均有两个基本属性一个采集时间戳，另一个是采集到的具体值。由于每台设备采集项有很多，并且有可能数据项采集频率不一致，为了保证数据分析准确性及便捷性，需要将所有数据在时间轴上进行对齐，即当数据采集后，进行存储，然后到分析使用取出数据时，设备的各项数据依然保持对齐，对齐的精度保持在 1 s 左右。

#### (2) 数据清洗

由于高频数据的存在，会使用大量存储空间，特别是一些完全没有必要的时段的数据是可以清除掉的，比如某台设备每天开机 16 小时，其中真正切削加工的累积时间可能也就 5 个小时，大部分时间为待机、准备时间，真正有效的数据其实是这 5 个小时的切削过程数据。因此数据平台宜具备定期数据清洗功能，除去部分无用高频数据，减少硬盘存储压力。

### (3) 数据关联

对于数据分析（这里通常指高频数据分析，低频数据分析应用主要为简单的统计过程）而言，最重要的是要形成多个数据样本，比如按照加工过程组织样本，比如一个孔系加工零件，那么按照每个孔加工过程将数据进行关联，即每个孔加工过程需要关联到从加工开始到加工结束的数据段，在有条件的情况下，可进一步将单个孔加工分解为若干工步，以每个工步的开始和结束时间关联所有数据项（图 3）。

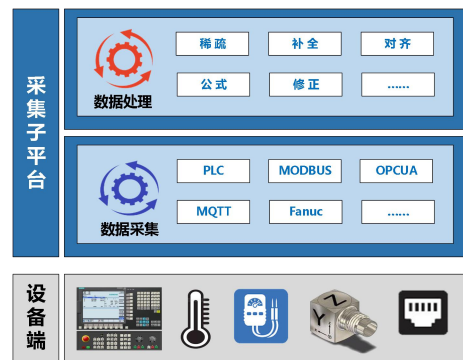


图 3 各类时序数据进行关联处理

### 2.2.2 四级存储特性的冷热数据分区

根据业务特点，本系统需要尽可能地使系统以最快的速度捕捉到设备的状态变化以及各类传感数据，达到秒级响应的情况，也有需要完整统计分析历史数据的波动情况。在平衡系统功能与性能的取舍，按数据利用频率需求，采用了四级逐步降温的冷热分区处理技术（如图 4），将数据分为实时数据、近期常用数据、业务周期内数据以及历史归档数据。

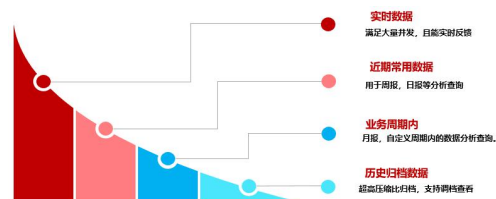


图 4 冷热数据存储技术

第一级，以传输速度为目的，该级数据的传输路径最短全程不落任何持久化介质，只在内存区域保留，并应用 redis 分布式存储技术进行分发管理，既保证了响应速度，又保证了可靠性。

第二级，以持久化的原始数据为目的，该级数据将不做任何人为的干扰，完整的保留设备产生的

原始数据，以便日后满足针对性的细节追溯。

第三级，将原始数据中按照业务特点，将有用的数据做提取清洗，滤掉大量的噪音与干扰数据，大大提高服务器分析业务数据的处理能力。

第四级，将较久远的数据进行转库归档，保证运行库在运行期间的整体性能。

### 2.3 数据统一管理输出

#### 2.3.1 搭建数据互联互通统一管理平台

单独的数据采集并不能直接产生价值，数据采集的用途是数据经过处理与优化以后形成的信息。数据传输到网关后，网关基于边缘计算进行数据就地分析和存储，或将数据、分析结果汇总，通过有线或无线的方式，进行互联互通。

数据的互联互通是建立统一的数据管理平台（如图5），确保数十种不同种类的新老设备的数据流动，从不同的维度获得的数据可以互相对比对照分析，从根本上提高企业数据与信息的流转效率和决策需要的数据效率<sup>[4]</sup>。

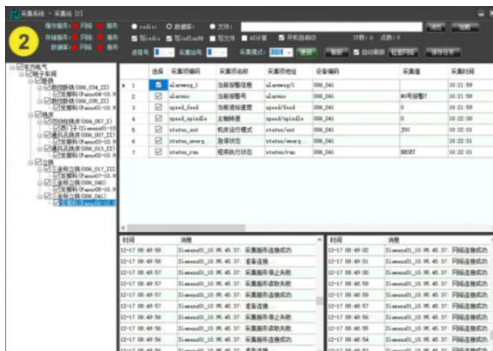


图5 车间数据互联互通管理平台

系统具备数据采集与数据存储分离的特征，采集服务器部署在车间的汇聚机房，数据采集后带着数据属性信息汇聚到数据采集中心服务器中，由数据采集中心服务器统一进行存储，从而保证数据采集与数据存储的独立。系统的数据接口服务与存储分离，对车间执行层 MOM 系统、三维仿真系统而言，仅需关注数据接口的形式及参数，而不需关注数据具体怎么存储，具体在数据库的哪个位置，即可进行数据的调用。

#### 2.3.2 制定数采平台与应用层的接口规范

为保证数据采集系统，数据互联互通管理平台，冲剪示范线管控系统，车间环境监测与看板系统，车间视频监控系统，车间 MOM 系统之间的数据能够顺利的传递，本系统开发统一数采平台与应用层

的接口，统一集成数据格式（如图6），实现集成式的数据接口管理，确保数据采用统一的接口。

主流接口可以兼容并引导新加入的装备制造商，提供支持标准化的集成接口，在后续数字化车间新设备持续加入时，可以持续确保数据采集系统的统一性，数据的一致性，可扩展性和可兼容性。数据管理平台对外的接口支持分布式接口的横向扩展方案，可以满足未来的业务增长，适应大规模的设备接入。



图6 统一数据输出接口

## 3 典型数据应用

本文以数据采集典型应用之一的车间智能监控系统为例。采用轻量化、LOD 等技术构建一比一比例的虚拟数字化车间模型，基于数据采集及互联互通系统的实时数据库、动作库、模型库以及 MOM 系统，建立车间三维可视化监控系统。

### (1) 数据展示与虚实交互

虚拟工厂与实际工厂数据实时交互，实现信息同步，同时基于虚拟车间环境实现数据查询。用户可针对车间现场虚拟环境场景的可视化交互操作，查询工厂内部生产环节的关键状态数据，包含透明报表展示订单数据、产能数据、机台状态数据等，并结合平面元素展示线体数据，包含设备开机率、加工合格率、产能等数据（如图7），实现虚拟工厂对物理工厂生产过程的实时展示和监控，及时、动态、发现生产过程出现的各种异常。

设备名称	设备编号	设备状态	设备利用率	平均无故障时间
点焊机1	753_028	开机	89.03%	6862501.00
点焊机A	753_029	开机	89.03%	6862501.00
激光点焊机1	753_039	关机	—	—
焊机	162_029	开机	89.03%	6844381.00
自动点焊机	753_031	关机	—	—
手动焊机	162_058	开机	89.03%	2436421.00
冲压机	123_072	开机	89.03%	533561.00
400T单点冲	123_068	关机	0.00%	6862561.00
焊机副焊机	471_041	开机	—	—
新1600T冲	123_065	关机	36.46%	6862561.00
手动焊机	162_032	开机	89.03%	2436421.00
焊机	849_098	关机	0.00%	5543821.00

图7 车间大屏展示

### (2) 能耗分析及故障预警

通过能耗数据分析可以精确了解到每台设备在单位时间(或累计时间段)内的能耗花费,实现车间能耗智能监控。分析设备能耗阈值,及时发现异常能耗,优化能源利用。



图8 故障报警展示

虚拟工厂与加工现场故障信息采集系统集成,实现故障系统支持故障维护在线指导。通过设备总进线电压或者电流采集,炉内温度及气压控制点测量值、给定值采集,当设备出现故障报警后,系统会显示故障报警信息(如图8),并在监控画中快速定位至报警机台,显示报警信息,并根据故障现象,列举故障排查过程,指导维修人员对故障进行排查。

## 4 结语

本文研究的数据采集与互联互通系统,实现多场景多协议数据采集、存储及互联互通,通过建立数据统一管理平台和输出接口规范,保证数据从底层到执行层高效准确的流动。结合车间三维虚拟仿真,应用于以数据驱动生产可视化的监控系统,实现设备状态感知、生产信息交互及过程监控等智能功能,帮助发电设备企业提高生产效率,降低运维成本,优化能源利用。

### 参考文献:

- [1] 卢伟,孟焯,孙以泽,朱荷蕾等. 基于 Modbus/TCP 及 FINS/TCP 协议的数据采集与通讯系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(1):88-91
- [2] 刘苏,王学华,李安翼等. 汽车零部件装配车间 MES 数据采集功能的开发[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(2):219-223
- [3] 杨浩. 水电站水轮机组远程监控系统研究与开发[D]. 兰州理工大学, 2020
- [4] 杨浩,崔彦锋,范伟等. 基于 Modbus TCP 对电厂 DCS 输出数据接口软件系统的设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(8):16-17+22

(上接第 21 页)

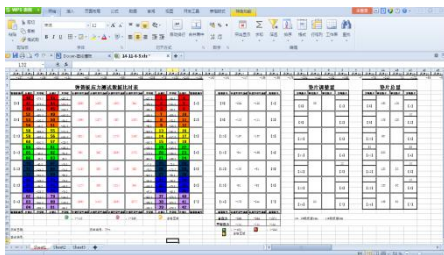


图9 陕西清水川弹簧板应力测试数据

## 7 结语

实践证明,1 000 MW 汽发定子弹簧板应力测试、调试技术的实施是成功的,该技术脱胎于大量的实验室及现场试验的经验累积,从传感器与仪器之间的组接方式和设计数据处理软件着手,对整个测试、调试过程进行技术创新,极大缩短弹簧板调试周期,从而缩短产品交货周期,并能保证测试结果的准确、可靠,最终以标准的方式形成操作规范,满足生产现场和工地现场的使用要求,可以投入生产应用。

## 6 形成公司标准规范

只有形成标准规范,才能使得我们所有的工作有章可循,有理有据。如图 10:



图10 《操作规范》部分截图

# 50 MVar 调相机润滑油系统合理选型与油温校验

贾小平 夏瑜婷 席波 陈金鹏

东方电气自动控制工程有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 针对 50MVar 调相机的技术要求, 对主要设备进行初步选型, 并对油温进行校验计算, 在保证机组安全运行的同时, 使设备具有较好的经济性和环境适应性。

**关键词:** 调相机; 润滑油系统; 风冷却器; 损耗

中图分类号: TK11.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0035-03

## Selection and Oil Temperature Calibration for Lubricating Oil System of 50 MVar Synchronous Compensator

JIA Xiaoping, XIA Yuting, XI Bo, CHENG Jingpeng

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

**Abstract:** According to the technical requirements of 50 MVar synchronous compensator, the main equipment is selected and the oil temperature is checked, which ensures the safe operation of the unit and makes the equipment have better economy and environmental adaptability.

**Key words:** synchronous compensator; lubricating oil system; air cooler; loss

调相机是特高压电网的重要配套设备, 被誉为电网的“稳压器”, 通过提供或吸收无功功率来实现电网的有功和无功的平衡<sup>[1-3]</sup>。针对新能源间歇性、随机性和波动性的特点, 采取在电源侧安装小型分布式调相机的方法, 有助于直流输电安全稳定运行, 将为稳步提高新能源在能源结构中占比, 助推电力领域“碳达峰、碳中和”带来示范效应。50MVar 调相机是主要应用于新能源电源侧的分布式调相机, 具有集成度高、系统简单、建设周期短、调节性能好等优点。

调相机润滑油系统的主要功能是在各种工况下为轴承提供稳定的润滑油, 起到润滑、冷却的作用, 冷却的具体实现是通过冷却油在轴承座内进行热交换, 冷却油将热量带出, 热油再在风冷却器内进行热交换, 由空气将热量带走, 油冷却后循环使用, 以保证进入机组轴承的油温处于适宜润滑范围内<sup>[4]</sup>。

### 1 系统原理与转入条件

#### 1.1 系统原理

50MVar 调相机润滑油系统配置有一主一备两台交流润滑油泵, 并配有一台直流润滑油泵, 配置有一主一备两台风冷却器。正常工作时, 主用润滑油泵从油箱吸油经冷却, 热油变为冷油, 然后送入调温阀, 将热油与冷油进行高调合, 控制输入进调相机轴承的油温, 为调相机运行提供稳定流量、适宜温度的润滑油。当两路交流断电或其它意外情况下, 直流泵启动, 保证机组在惰转过程中的安全。

同时系统配置有一主一备两台顶轴油泵, 用于开机或停机过程中, 顶起调相机转轴, 防止低转速时油膜不能正常建立情况下的磨瓦等风险。系统中还设置有防止润滑油泵切换过程压力波动的蓄能器组, 除油雾装置、油净化系统等辅助设备。具体的

收稿日期: 2022-01-14

作者简介: 贾小平 (1972—), 男, 本科, 水电机组控制系统专业, 正高级工程师, 现任职于东方电气自动控制工程有限公司。

系统图见图 1。

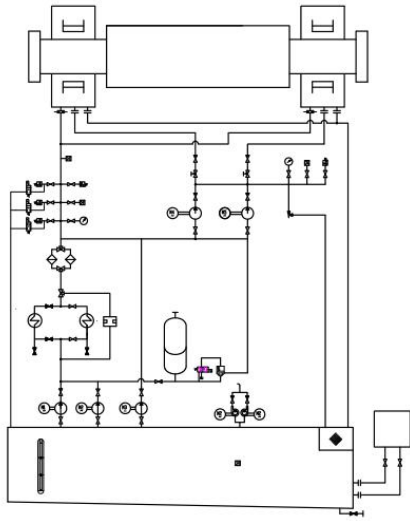


图 1 调相机润滑油系统原理图

### 1.2 油温要求

调相机转子由励端轴承和非励端轴承两个轴承支撑，转子旋转时，转轴与轴承因摩擦会产生损耗，损耗会转化为热量，需由润滑油将此热量带出并在冷却器中进行冷却。为使轴承和调相机油系统需满足机组在各个工况下的安全运行，需要重点考虑的是两种工况，一种工况是考虑轴承发热量较大、运行时间长的机组额定转速工况，冷却器需将轴承损耗产生的热量全部与现场的空气环境进行热交换，维持轴承瓦温在工作范围内；另一种工况的断电惰转停机工况，在此极端情况下，主备用交流电均断电，热量无法通过冷却器正常交换，虽然机组保护动作控制机组停机，但由于停机的时间长，累积的轴承损耗大，由此产生的热量将使油温不断升高，为保证机组安全，要求最高油温需控制在安全范围内。这两种工况对油温有不同的要求，具体要求值见表 1。

表 1 油温要求  $^{\circ}\text{C}$

项目	数值
风冷却器出口最高油温 $T_1$	50
正常工作时油温	< 70
断电惰转停机过程中的最高油温	< 80

### 1.3 惰转损耗曲线

调相机转子的惯性较大，而阻尼较小，所以机组的惰转停机过程的时间较长，特别是在低转速区，由于风阻此时基本接近于零，惰转停机降速缓慢，

停机时间大大增加。正常的惰转停机和断电惰转停机的过程基本相同，只是冷却器的工作状态不同。轴承损耗的大小与转速相关，由调相机主机厂提供，作为调相机润滑油系统设计的输入条件之一。

调相机单个轴承的惰转损耗曲线见图 2。

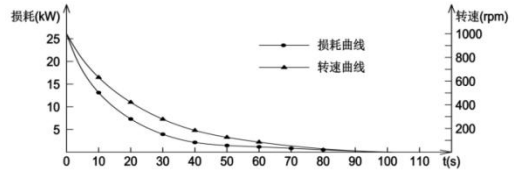


图 2 轴承惰转停机损耗曲线

从惰转曲线图中，可以得知，调相机额定转速运行时的轴承损耗  $P_0=52.2 \text{ kW}$ （两个轴承的损耗之和）。

### 1.4 初步选型

针对调相机正常运行的条件与技术要求，并考虑在两路交流断电的情况下，有足够容量的油液能保证机组的安全惰转停机过程，同时，由于调相机现场安装条件有限，考虑到经济性、安全性及环境适应要求，油箱的容量需尽量小。为此，对主要的部件进行初步选型，然后根据输入条件对选型参数进行计算校验，最终要求计算结果需满足正常运行和断电惰转停机。

具体初步选型参数见表 2。

表 2 初步选型参数

项目	代号	数值
润滑油泵额定输油量( $\text{m}^3/\text{h}$ )	$Q$	7.5
润滑油系统中油的容量( $\text{m}^3$ )	$V_0$	2.31
最高环境空气温度( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_0$	40
润滑油箱容积( $\text{m}^3$ )	$V$	3
工作温度时润滑油密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\rho$	878
润滑油比热容( $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )	$C_p$	1.96

## 2 油温计算

### 2.1 正常运行时油温

机组运行时，轴与轴瓦间的摩擦会产生大量的热量，需要润滑油将热量带出，而大量的热量进入油箱，必须经风冷却器冷却后再次进入轴承，形成循环的润滑和冷却，保证机组的稳定运行。由于油箱内油温接近从轴承回流出的热油温度，高于环境温度，因此油箱也会散出一部分热量。轴承产生

的热量与风冷却器、油箱散热相等时，即达到一个稳定运行状态，油温也达到一稳定值，公式表示为<sup>[5]</sup>：

$$P_0 = P_1 + P_2 \quad (1)$$

式中： $P_1$ —风冷却器的散热功率，kW；

$P_2$ —油箱的散热功率，kW。

### 2.1.1 风冷却器散热

风冷却器虽有备用，但正常工作时，是以一台风冷却器为工作状态。风冷却器主要由电机、风叶、散热芯体、壳体及支架等组成；通过油/风热交换将调相机润滑油中的热量散发到空气中，降低调相机润滑油的温度，同时经电动调温阀将进入调相机润滑油的温度保持在一定范围内。在这里计算时，不考虑调温阀的作用，同时考虑环境温度最高时的工作状态，即  $T_0 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ 。

这里只是计算油温，对于风冷却器的空气侧的热交换面积不做计算。

润滑油的热交换计算公式：

$$P_1 = \rho \times Q \times C_p \times (T_2 - T_0) \quad (2)$$

式中： $T_2$ —风冷却器进油口的温度，也是油箱内润滑油的温度， $^\circ\text{C}$ ；

### 2.2.2 油箱散热

根据油箱散热的温升计算公式：

$$(T_2 - T_0) = \frac{P_2}{(k \times A)} \quad (3)$$

式中： $k$ —油箱散热系数， $k=14$ 。

$A$ —润滑油箱散热面积， $A=13.52\text{ m}^2$ 。

### 2.2.3 计算结果

计算结果见表3。

表3 正常运行时的油温计算结果

风冷却器的散热功率/ $P_1$	油箱的散热功率/ $P_2$	风冷却器进口油温/ $T_2$
47.78 kW	4.42 kW	63.33 $^\circ\text{C}$

调相机正常运行时，忽略管道的摩擦、散热等影响，正常工作的油温就是油箱内的油温，也是风冷却器进口的油温， $T_2 = 63.33\text{ }^\circ\text{C} < 70\text{ }^\circ\text{C}$ ，满足调相机正常运行的要求。

### 2.2 惰转时的油温

根据图1惰转损耗曲线图，调相机整个惰转过程中，从1000 r/min到0 r/min，轴承在一定时间  $t$  内的累积损耗可按曲线积分求得，记为  $H_t$ 。

同时在此一定时间  $t$  内，油箱的散热量：

$$H_1 = (T_3 - T_0) \times k \times A \times t \quad (4)$$

由于  $H_t > H_1$ ，若是因为交流断电停机的极端工况，主备用风冷却器均不能启动的情况下，多余的热量无法散去，将使系统中的油温升高至  $T_3$ ，用比热容计算热能的公式为：

$$(H_t - H_1) = \rho \times V_0 \times C_p \times (T_3 - T_2) \quad (5)$$

计算结果见表4。

表4 交流断电的极端停机惰转过程中的油温

转速 (rpm)	1 000~900	900~800	800~700	700~600	600~500	500~400	400~300	300~200	200~100	100~0
时间 (min)	2.1	4.6	7.6	11.2	15.6	21.3	29.0	40.0	58.1	103.4
油温 ( $^\circ\text{C}$ )	64.4	65.5	66.6	67.6	68.5	69.3	69.9	70.1	69.8	67.8

由表4可看出，在交流断电的极端停机惰转过程中，油温是先升后降，油液最高温度  $T_3 = 70.1\text{ }^\circ\text{C} < 80\text{ }^\circ\text{C}$ ，能保证调相机惰转过程的安全。

## 3 结语

分布式调相机润滑油系统的设计引入模块化和集成化设计理念，在考虑经济性与现场的安装条件下，对调相机的主要设备进行初步选型，考虑正常运行和两路交流断电的极端惰转停机两种工况在环境温度最高的情况下进行油温校验计算，即可以保证调相机的安全运行，又能使系统具有较高的

经济性和环境适应性。

### 参考文献：

- [1] 潘宏娟. 新型大容量同步调相机[N]. 亮报, 2018-7-31
- [2] 崔一铂, 胡鹏, 凌在汛等. 新型大容量同步调相机技术特点分析[J]. 大电机技术, 2019(2):36-38+62
- [3] 于磊, 陈元, 盖东飞. 300MVar空冷调相机热机专业设计要点[J]. 能源研究与利用, 2020(5):47-49
- [4] 黄国徽, 薛长奎, 李勇. 50 MVar分布式调相机润滑油系统的设计研究[J]. 东方电气评论, 2021, 35(1):13-16
- [5] 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

# 80 kW 永磁同步牵引电动机设计

伍海军

东方电气集团东风电机有限公司, 四川 乐山 614800

**摘要:** 永磁同步牵引电机由于具有功率密度高、功率因数高、过载能力强等优点, 在铁路传输系统领域得到广泛应用。本文对 80kW 永磁同步牵引电机的主要技术进行了分析研究, 介绍了电机的主要参数和结构, 同时进行了试验验证。试验结果证明该永磁牵引电机性能优良, 能满足用户技术规范的要求。

**关键词:** 永磁同步牵引电动机; 轨道交通; 冷却结构; 绝缘轴承; 试验

中图分类号: TM922.72

文献标志码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0038-06

## Design of 80 kW Permanent-magnet Synchronous Traction Motor

WU Haijun

(DEC Dongfeng Electric Machinery Co.,Ltd, 614800, Leshan, Sichuan, China)

**Summary:** Permanent magnet synchronous traction motor is widely used in the field of railway transmission system because of its advantages such as high power density, high power factor and strong overload capacity. In this paper, the main technology of 80 kW permanent magnet synchronous traction motor is analyzed and studied, the main parameters and structure of the motor are introduced, and the experimental verification is carried out at the same time. The test results show that the permanent magnet traction motor has excellent performance and can meet the requirements of user's technical specifications.

**Key words:** permanent magnet synchronous traction motor; rail transit; cooling structure; insulated bearing; test

永磁同步牵引电机与传统的异步牵引电机相比, 在效率、过载能力、体积和重量等性能指标上都有很大的提高, 是一种很有发展前景的高效节能电机, 已成为下一代轨道推进系统的发展趋势。较早进入永磁同步推进系统工程化和营销阶段的是美国、日本及欧洲等发达国家和地区。以中国中车株洲电气有限公司为代表的我国企业, 也在该领域进行相关推广应用: 2014 年, 额定功率达 230 kW 的永磁牵引电机首次成套安装在长沙地铁 1 号线车辆上; 2016 年以来, 中国中车研发的 TQ-600 永磁同步牵引电机已大量装备在运营中的 350 公里/小时高铁, 进一步提升了节能减排、铁路安全性和舒适性。我国高铁逐步打破国际技术垄断并进入永磁电机时代。东风电机此次研制的 80 kW 永磁同步牵

引电机主要配套中车某项目城市空轨车永磁同步牵引系统。

### 1 80 kW 永磁同步牵引电动机主要技术研究

永磁同步牵引电机设计的目的是在给定尺寸、重量和安装空间的边界条件下, 设计出能够满足车辆的电力牵引/制动特性, 并在全网电压范围内匹配逆变器的电机。以下几个方面在设计中必须重点考虑并兼顾:

(1) 电动机在最高、额定及最低中间直流环节电压下的输出转矩必须满足车辆的牵引和电制动特性; 起动时的最大电流不能大于逆变器的允许电流; 同时反电动势及短路电流等均不得超过逆变器及控制系统的允许值;

收稿日期: 2021-11-26

**作者简介:** 伍海军 (1982—), 男, 2005 年毕业于湖南工程学院电气系电机专业, 本科, 高级工程师。现在东方电气集团东风电机有限公司技术开发部主要从事永磁高效电机、牵引电机及双馈风力发电机设计工作。



(2) 永磁体、定子绕组绝缘系统及轴承的温升在电动机所有工况运行范围内不得超过要求；

(3) 电动机的长宽高尺寸及重量不能超过机车转向架的要求；

(4) 电动机的效率须满足设计要求：包括额定效率、最高效率及效率MAP区间分布均满足要求；

(5) 电动机主轴、机座、端盖等结构部件的强度须满足所有运行工况要求，不得产生有害变形；

综合以上几个方面分析，80 kW 永磁同步牵引电动机主要技术研究为电磁参数设计、永磁材料选型与应用、轴承结构、机座及冷却结构等方面。

### 1.1 电磁参数设计

空载反电势是牵引电动机与逆变器匹配的关键参数，直接影响牵引电动机的性能发挥及系统参数的选择。电动机的空载反电势的峰值不能超过逆变器的最大耐受直流电压。用户要求在最高转速 3 403 r/min 时，温度为室温(20 °C)时电动机空载线反电势的基波分量均方根值不大于 750 V。该项目系统供电电压为 DC750V，永磁同步牵引电动机反电势限值须满足中间直流环节电压要求，所以选择合理的电磁方案设计，难度较大。

永磁牵引电动机空载反电势  $E_0$  由转子永磁体产生的空载气隙基波磁通在电枢绕组中感应产生，其值为  $E_0=4.44 fKN\phi$ ，因此每极气隙磁通、每相绕组串联匝数及电机转速与其均有密切联系。而车辆的速度和传动比决定了电机的转速，所以 80 kW 永磁同步牵引电动机在电机传动比已定的条件下，只能通过合理选择电机每相绕组的串联匝数，优化每极气隙磁通来达到调节电机反电势的目的。合理设计永磁牵引电动机空载反电势  $E_0$ ，还可以提高电动机效率，降低电动机温升。空载损耗和空载电流也与空载反电势紧密相关。

表 1 80 kW 永磁同步牵引电动机主要参数

额定功率	80 kW	额定电压	530V AC
额定电流	98 A	工作制	S1
额定效率	≥96.5 %	基频	133.44 Hz
绕组接法	Y	极数	8
防护等级	电机防护等级 IP55，接线盒防护等级 IP65		
进水温度	≤65 °C	冷却方式	水冷
相数	3	定子电阻 (115 °C)	0.018 44 Ω
额定转速	2 000 r/min	最高转速	3 403 r/min
绝缘等级	C 级	重量	349 kg

### 1.2 永磁材料的选型与应用

永磁同步牵引电机转子上装有永磁磁钢，不需要电流励磁。为了避免水汽、灰尘、腐蚀性气液体等异物进入电机内部，导致永磁体损坏，特别是为了防止车辆运行时车轮与钢轨摩擦产生的金属粉末进入电机内部，引起电气故障或扫膛，所以 80 kW 永磁同步牵引电动机采用了全封闭结构：电机防护等级 IP55，接线盒防护等级 IP65。这也是当前永磁牵引电机常用的结构。

由于安装空间小，电机结构紧凑，采用全封闭结构后电机运行时内部温度会很高，用户要求 80 kW 永磁同步牵引电动机定子绕组耐热温度大于 240 °C，对绝缘材料提出了很高要求。定子温度高，在热平衡状态下势必会影响转子温升，所以转子永磁体的耐高温性能也要相应提高。根据电机永磁体材料选型参数及耐高温稳定性，我们选取了耐热温度大于 250 °C 的钕钴永磁体 Sm2Co17，其主要性能参数为剩磁密  $Br=1.12\sim 1.16$  T；矫顽力  $bHc=845\sim 890$  kA/m；退磁曲线见图 1。这种永磁材料温度系数低，即使在温度较高的时候也能保证电机的输出特性。

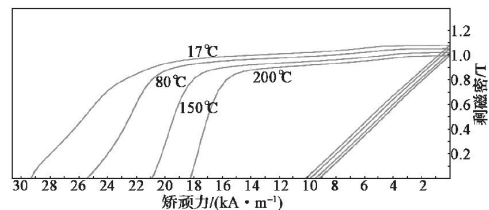


图 1 钕钴永磁体退磁曲线

### 1.3 冷却结构设计

目前，风冷和水冷是轨道牵引电机常用的冷却方式，像永磁牵引电机这种功率密度大电机，自然冷却一般很难满足要求。一般来说，整车系统设计时已决定了冷却方案。相比于异步牵引电机，永磁牵引电机受全封闭结构要求及永磁材料的工作温度限制，需要设计更好的散热结构，并尽可能的提高电机的散热能力。

#### 1.3.1 水冷方式的结构设计

永磁牵引电机损耗主要来源于定子铜耗和铁耗，转子上装有永磁体不需要电流励磁。损耗以热量形式由定子传导到机壳，水冷的方法可以通过机壳内水道中的冷却水迅速带走热量，冷却效果大大优于风冷效果。水冷结构设计需要着重考虑的是机

座内水道的设计。

### 1.3.2 水道设计

用户提供给 80 kW 永磁同步牵引电动机的冷却水进水温度达 65 °C，是因为冷却水先冷却逆变器再接入电动机水道，导致进水温度较高，允许出水温升较小。

根据传热传递原理可知，当热负荷、进出口流体温差及冷却介质一定时，流体的质量流量决定了电机的冷却效果。牵引电机冷却水道的结构要最大限度减小流阻、增大流速、增大流量，并让水道在热源表面均匀分布。常用的水道形式有徘徊式和螺旋式，如图 2 和图 3 所示。

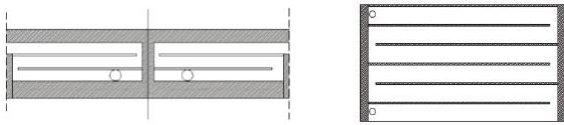


图 2 徘徊式水道

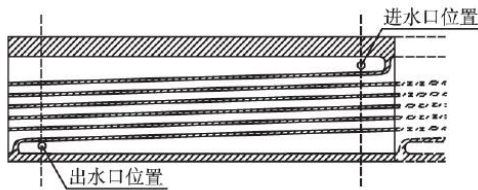


图 3 螺旋式水道

徘徊式水管比螺旋式水道流速慢、流阻大，但螺旋式水道进出水口温度不均匀，压降大。如果电机轴向较长，采用螺旋式水道会导致电机轴向散热效果不均匀，且进出水口需要布置在电机铁心两端，水管布置也不方便。总之，不管哪种水道布置方式，紊流雷诺数的要求必须达到，水道截面设计也必须达到一定的水头直径标准。

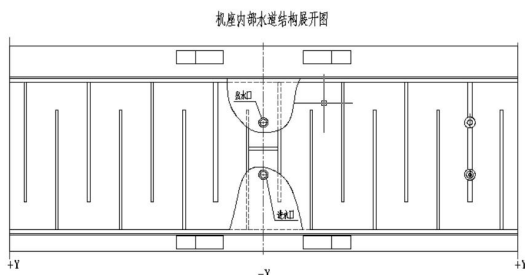


图 4 机座内部水道结构展开示意图

80 kW 永磁同步牵引电动机机座内部水道结构

展开示意图见图 4。该机座主要由内壁、水道隔板、外壁及相关支撑筋板等组焊而成。为消除应力，机座焊完后整体退火处理，并做水压试验，保证无渗漏。同时，为避免水道腔壁长年接触冷却液及冷却水而被侵蚀，导致机座生锈甚至冷却系统损坏，水道在封焊前必须做好防腐处理。

## 2 电机结构简介

图 5 为 80 kW 永磁同步牵引电动机电气关联关系图。

在牵引工况下，逆变器将直流电转换成三相交流电，给永磁同步牵引电动机供电，将电能转换成机械能，驱动车辆。

在制动工况，永磁同步牵引电动机将车辆的机械能转换成电能，通过逆变器回馈到牵引蓄电池，或者消耗在制动电阻上。

电动机通过机座上的 4 个 D25 的孔吊装在转向架上，电动机采用水平安装。电机两个传动端通过联轴节与齿轮箱相连。

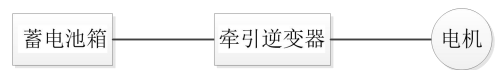


图 5 电气关联关系图

80 kW 永磁同步牵引电动机主要由定子、转子、前端盖、后端盖、接线盒、旋转变压器等组成。

### 2.1 定子

定子由机座、铁芯及绕组等组成。

定子机座由钢板焊接并加工而成，通过前后支撑板的孔与转向架相连。定子机座为水套式结构，中间环与外壳之间组成水道，用水道隔板隔开并留有进出水口，使冷却水在固定的通道流过，充分冷却电机。

定子铁芯由导磁性能好，损耗较小的 0.35 mm 厚硅钢片叠压而成，两端采用端板压紧后，通过圆周上均布的若干条焊缝将铁芯焊成一个整体。

定子绕组为 QBP 耐电晕漆包线多股并绕而成，采用 C 级绝缘。定子绕组嵌入铁芯后采用整体真空压力浸漆 VPI 处理，以保证电机绝缘性能。

定子机座正下方布置有进出水口。吊装、转运电机时需注意做好防护。

## 2.2 转子

转子由主轴、转子铁芯、压板、磁钢等组成。

转子主轴由优质合金钢加工而成，具有较高的机械强度和耐冲击性能。转子铁芯由导磁性能好，损耗较小的0.35 mm厚硅钢片叠压后并用铆钉固定。转子冲片均布有矩形槽，用于内置磁钢。冲片上靠近内圆部位还均布有数个通风孔，以改善散热条件。磁钢采用耐温达250℃的钕钴永磁体。铁芯与主轴采用键联接并传递扭矩。

## 2.3 端盖及轴承

前端盖和后端盖均由Q235钢板加工而成。本电机前端盖内装有一个圆柱滚子轴承，后端盖内装有一个深沟球轴承，两端轴承均为专业知名品牌的高品质绝缘轴承，能有效地防止轴电压和轴电流引起的电腐蚀，保证电机可靠运行。轴承采用润滑脂润滑，在前后端盖上均设置有注脂口。轴承为非密封轴承，需定期对轴承进行补充油脂，润滑脂采用紫皇冠UPG2#，润滑周期为每间隔2 000 h，加注油脂70 g。

## 2.4 附属部件

在定子铁芯中部安装有 Pt100 温度传感器，用于监控定子绕组温度，以保证电机的安全运行。为了全面监控样机定子绕组温度，在绕组端部也安装了 Pt100 温度传感器。

在电机非传动端安装有一个旋转变压器，主要测量牵引电机的转子位置、转速和转向，信号由专用接线盒引出。旋转变压器利用转子磁极的凸极效应，在转子位置发生变化时，其输出绕组和励磁绕组间的互感也跟着发生变化，具有转子位置信息的正余弦电动势在输出绕组中感应出来，解码后就可以得到电机转子位置、转速和转向，控制器对牵引电机的控制由此实现。

电动机的三相引出线通过电缆接头固定于接线盒内。从传动端看，电机按U、V、W相序接线时，电动机按顺时针方向旋转。

## 3 电机 CAE 仿真分析

用 CATIA 软件绘制 80 kW 永磁同步牵引电动机三维模型，见图 6。

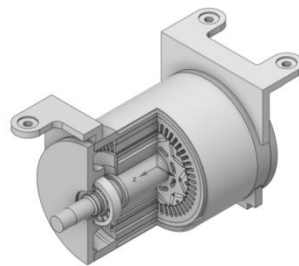


图 6 电机仿真模型（内部视图）

表 2 电机各零部件材料属性

零部件及材料	密度 kg/m <sup>3</sup>	弹性模量 MPa	泊松比	屈服强度 MPa	极限强度 MPa	热导率 W/m·℃
主轴 42CrMoA	7 850	212	0.28	930	1 080	43.2
转子铁芯 35W300	7 397	207	0.31	380	490	16.74
定子铁芯 35W300	6 391	207	0.31	380	490	16.74
端板 06Cr19Ni10	7 850	210	0.3	225	430	60.5
端盖 Q235A	7 850	210	0.3	206	490	16.3
轴承 GCr15	7 830	209	0.29	1 617	2 280	41.6
机座 Q235A	7 850	210	0.3	225	430	60.5

说明：定子铜线圈只以质点形式添加在对应位置；定转子铁芯密度是以实际质量换算得来。

## 3.1 转子 CAE 仿真分析

### 3.1.1 主轴



图 7 主轴仿真模型

从电机主要技术参数分析可知，电机转子主轴仿真分析转子最恶劣状态，即转子在最大扭矩工况下主轴受到的各项载荷最主轴的影响，具体分析结果见图 8~图 13。



图 8 主轴等效应力



图 9 主轴综合变形



图 10 主轴等效应变

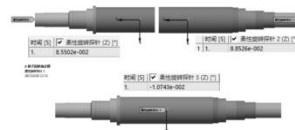


图 11 主轴最大扭转角

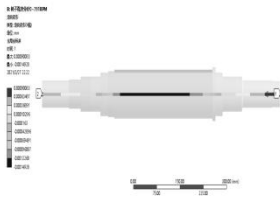


图 12 主轴挠度

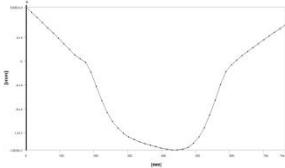


图 13 主轴挠度曲线

主轴仿真分析结论：从上述对转子主轴刚强度分析结果可看出，主轴在最大扭矩工况下，等效最大应力 93.04 MPa，最大等效变形 0.04 mm，最大等效应变 0.000 52 mm/mm，最大挠度 0.000 9 mm；

利用探针探测主轴两端面及坐标点处相对于 Z 轴转角分别为 0.0855°、0.088 5°、-0.0107°，即最大扭转角为 0.0992°，主轴的扭转刚度为  $1.4 \times 10^7$  N·mm/度。

### 3.1.2 转子铁芯强度分析

从电机主要技术参数分析可知，转子铁芯仿真分析转子最恶劣状态，即转子在最大扭矩工况下和转子最高转速状态下铁芯的影响，具体分析结果如图 14~图 17。

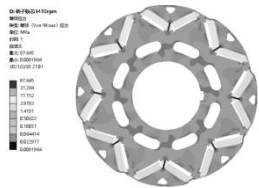


图 14 最大转速 3 410 rpm 铁芯等效应力

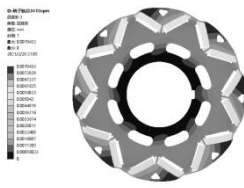


图 15 最大转速 3 410 rpm 铁芯总变形

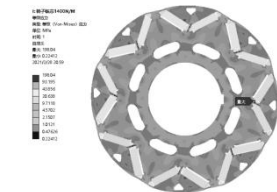


图 16 最大扭矩 1 400 N·m 铁芯等效应力

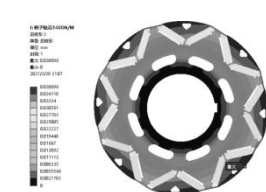


图 17 最大扭矩 1 400 N·m 铁芯总变形

转子铁芯仿真分析结论：从上述对转子铁芯刚强度分析结果可看出，铁芯在最大转速 3 410 rpm，最大等效应力 87.65 MPa，最大等效变形 0.007 8 mm；最大扭矩 1 400 N·m，转速 791 rpm 时等效最大应力 198.03 MPa，最大等效变形 0.039 mm。

### 3.1.3 转子临界转速计算

转子临界转速主要考虑支撑刚度对其影响，此转子两端支撑分别是 6313 深沟球轴承、NU313 圆柱滚子轴承和两端端盖的组合。

转子支撑刚度以弹簧形式添加在轴承对应位置，同时考虑转子正常运转时温度对转子临界转速影响，此处假定转子铁芯部位 90 °C 恒热状态，其分析结果如图 18~图 20。



图 18 转子临界转速反向振型图

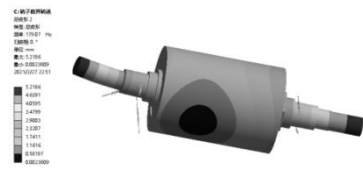


图 19 转子临界转速正向振型图

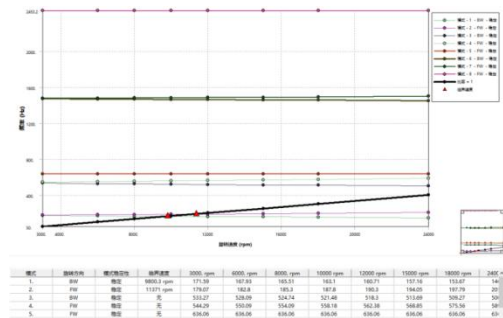


图 20 转子临界转速卡贝尔图

从以上分析可以看出：转子临界转速一阶 9 800 rpm，二阶临界转速 11 371 rpm，用户要求的运行最高转速为 3 403 r/min，已完全满足使用要求。

### 3.1.4 机座仿真分析

从电机设计结构机主要技术参数分析可知，定子铁芯与机座是以过盈配合形式装配。需计算分析定子铁芯受最大扭矩时机座内圈受力情况，按要求对机座进行仿真分析。具体分析结果如图 21~图 22。

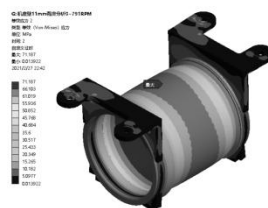


图 21 机座内圈等效应力

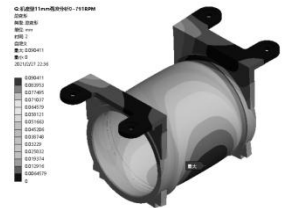


图 22 机座内圈综合变形

机座仿真分析结论：从上述对机座强度分析结

果可看出，机座内圈最大等效力 71.2 MPa，最大综合变形 0.09 mm。机座内圈有裕量，后续批量生产时壁厚可适当减薄，在保证电机性能情况下可降低电机整体重量。

### 3.1.5 电机整机模态分析

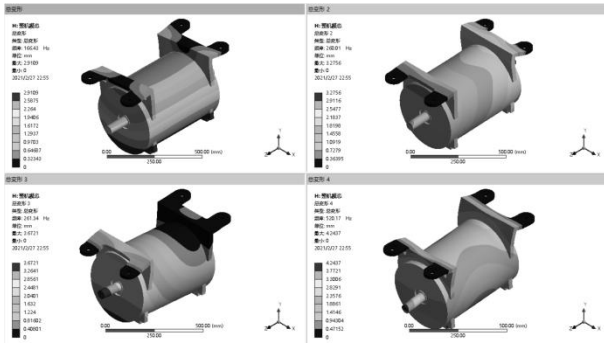


图 23 整机前 4 阶振型图

表 3 四阶模态扭振频率 Hz

阶数	频率	振型描述
一阶	166.43	电机底部沿 X 轴左右摆动
二阶	260.01	电机后端沿 Y 轴上下摆动
三阶	261.34	电机前端沿 Y 轴上下摆动
四阶	520.17	电机沿 X 轴两端摆动

通过对整机前 4 阶振型分析，结果表明：以上四阶模态扭振频率都避开了电机运行激励频率，所以电机在正常运行时不会产生共振（表 3）。

## 4 试验验证

样机制成后，按照 GB/T25123.4-2015《电力牵引 轨道机车车辆和公路车辆用旋转电机 第 4 部分：与电子变流器相连的永磁同步电机》制定的试验大纲对电机进行型式试验（表 4）。

表 4 静态测试数据

测试项目	测试结果	要求	结果
定子绕组三相直流电阻值 (mΩ)	29.06 29.06 29.08	不平衡小于 2%	合格
绕组对机壳冷态绝缘电阻 (MΩ)	500	100	合格
绕组对机壳热态绝缘电阻 (MΩ)	500	0.9	合格
绕组对机壳工频耐压测试	2 800 V, 历时 1 min, 无击穿和闪络现象	2 800 V, 历时 1 min, 无击穿和闪络现象	合格

试验结果显示：电机转速 3 403 r/min 时，反电动势为 721.4 V；轴承最高温度为 68℃；电机牵引特性和电制动特性、温升等性能均满足技术规格书

要求。由于试验系统电源受限，所供电压最高为 650 V。此时温升特性曲线、制动特性曲线、机械特性曲线分别见附图 24~附图 26。

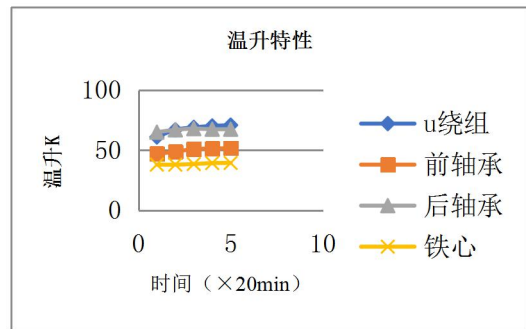


图 24 温升特性曲线

(功率 116 kW, 转速 1 670 rpm; 直流电压 650 V)

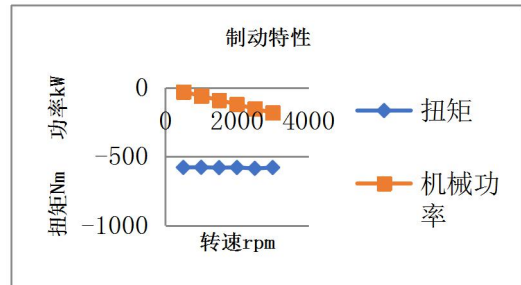


图 25 制动特性曲线 (直流电压 650 V)

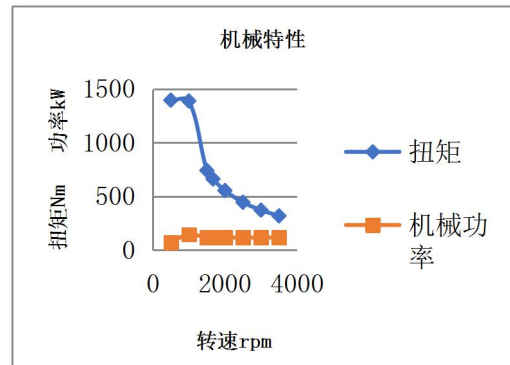


图 26 机械特性曲线 (直流电压 650 V)

## 5 结语

本文主要从电磁参数设计、永磁材料选型、轴承结构、机座及冷却结构等方面对 80 kW 永磁同步牵引电动机进行了设计分析，确定了电机的主要参数及结构，并对样机进行了试验验证。虽然试验系统电源受限，试验电压最高为 650 V，通过对电机温升特性曲线、制动特性曲线、机械特性曲线进行插值推算，结合 CAE 分析结果，证明该电机能够满足技术规格书要求。下一步将与用户进行协商，

(下转第 57 页)

# 碳酸氢钠干法脱硫工程应用及脱硫性能研究

杜文韬<sup>1</sup> 王伟明<sup>3</sup> 银登国<sup>1</sup> 庄原发<sup>1,2</sup> 金黄<sup>1,2</sup> 李灵均<sup>1,2</sup> 陈倬<sup>1</sup>

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

3.安阳钢铁集团有限公司, 河南 安阳 455000

**摘要:** 为了降低工业企业中 SO<sub>2</sub> 的排放量, 通常在尾部设置脱硫系统, 碳酸氢钠干法脱硫是一种低成本、高效率的脱硫系统, 适用于烟气量不大、烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度不高的项目。以某钢铁厂 220 t/h 燃气锅炉为例, 介绍了碳酸氢钠干法脱硫的工程应用, 并在该项目中进行了试验, 通过试验研究了温度、钠硫摩尔比和布袋除尘器对脱硫效率的影响。试验结果表明, 在 120~165 °C 范围内, 碳酸氢钠干法脱硫可实现超过 98 % 的脱硫效率和长期不超过 10 mg/Nm<sup>3</sup> 的 SO<sub>2</sub> 排放指标; 在测试期间, 呈现钠硫比越高、脱硫效率越高的趋势; 在脱硫效率超过 95 % 时, 钠硫摩尔比平均值为 2.41; 且在长期运行中, 脱硫剂 (碳酸氢钠) 的实际用量比理论用量多 11.5 %; 烟气中 SO<sub>2</sub> 在布袋除尘器中的脱除效率与脱硫塔中效果相当, 甚至略高, 布袋除尘器有利于深度脱除烟气中的 SO<sub>2</sub>。

**关键词:** 碳酸氢钠; 干法脱硫; 工程应用; 脱硫性能

中图分类号: X773

文献标志码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0044-05

## Engineering Application and Performance Study on Dry Desulfurization of Sodium Bicarbonate

DU Wentao<sup>1</sup>, WANG Weimin<sup>3</sup>, YIN Dengguo<sup>1</sup>, ZHUANG Yuanfa<sup>1,2</sup>, JIN Huang<sup>1,2</sup>, LI Lingjun<sup>1,2</sup>, CHEN Zhuo<sup>1</sup>

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

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

3. Anyang Iron and Steel Group Corporation, 455000, Anyang, Henan, China)

**Abstract:** Flue gas desulfurization is usually used to reduce SO<sub>2</sub> emission in industrial enterprises. Dry desulfurization of sodium bicarbonate is a low-cost and high-efficiency system, which is more suitable for projects with small amount of flue gas and low SO<sub>2</sub> concentration in flue gas. In this paper, the engineering application for a 220 t/h Gas-fired Boiler in an Iron & Steel Group using dry desulfurization of sodium bicarbonate is introduced, and the test was carried out in the project. The test shows that how the factors of the system, such as temperature, the stoichiometric ratio of sodium bicarbonate to sulfur (NSR) and bag filter affect the desulfurization efficiency. According to the results, in the range of 120~165 °C, the removal efficiency approached more than 98 % and the SO<sub>2</sub> emission concentration maintained less than 10 mg/Nm<sup>3</sup>. During the test, the desulfurization efficiency became higher when the NSR got higher and when the desulfurization efficiency exceeded 95 %, the average NSR was 2.41. In long-term operation, the actual amount of desulfurizer (sodium bicarbonate) was 11.5 % more than the theoretical amount. The test also shows that the SO<sub>2</sub> removal efficiency of bag filter was equivalent or even higher than the desulfurization tower, which means bag filter is a promoter for deep removal of SO<sub>2</sub> in flue gas.

**Key words:** sodium bicarbonate; dry desulfurization; engineering application; desulfurization performance

收稿日期: 2022-05-31

**作者简介:** 杜文韬 (1988—), 男, 2014年毕业于华北电力大学热能工程专业, 硕士研究生学历, 中级工程师。现在在东方电气集团东方锅炉股份有限公司技术创新中心, 从事大气污染物治理技术研发工作。

随着经济的发展,我国已成为SO<sub>2</sub>排放大国<sup>[1]</sup>。SO<sub>2</sub>是一种酸性气体,容易引起酸雨等灾害性气象现象,危害生态环境、农业生产和人体健康<sup>[2]</sup>,因此往往需要控制SO<sub>2</sub>的排放量。在我国,大气污染物排放量第一大行业(燃煤发电行业)、第二大行业(钢铁冶炼企业)分别在2014年和2019年开启了超低排放改造工作<sup>[3]</sup>,目前,我国的煤电和钢铁企业执行着号称全球最严格的环保标准,即在基准含氧量下,SO<sub>2</sub>的排放浓度不超过35 mg/Nm<sup>3</sup>,有的区域甚至执行着更严格的地方标准。

在工业企业中,通常采用源头控制和尾部处理两种方式来降低SO<sub>2</sub>的排放量。所谓的源头控制,即在工业原料(如煤炭等)选择中,选用含硫量低的原料,从而减少SO<sub>2</sub>生成;而尾部烟气处理是对已经产生的SO<sub>2</sub>进行脱除和控制。由于受到工业原料生产、运输、价格等方面的限制,工业企业在选择工业原料时往往会选用本地生产或易于购买且经济性好的原料,因此往往难以兼顾到原料中的硫含量<sup>[4]</sup>。在这种情况下,就需要采用尾部烟气处理的方式来控制SO<sub>2</sub>的排放量,尾部处理即采用烟气脱硫系统。

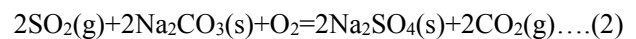
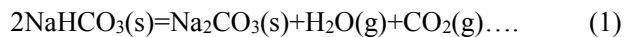
## 1 碳酸氢钠干法脱硫原理及技术特点

根据脱硫剂和脱硫副产物的状态,烟气脱硫系统分为干法脱硫、半干法脱硫和湿法脱硫,脱硫剂和脱硫副产物均为干态的脱硫系统称为干法脱硫系统,脱硫剂为湿态、脱硫副产物为干态的脱硫系统称为半干法脱硫系统,脱硫剂和脱硫副产物均为湿态的脱硫系统称为湿法脱硫系统<sup>[5]</sup>。工业企业中常用的干法脱硫系统有活性炭法脱硫、碳酸氢钠(SDS)等干法脱硫;常用的半干法脱硫系统有循环流化床(CFB)半干法脱硫、旋转喷雾(SDA)等半干法脱硫;常用的湿法脱硫系统有石灰石膏湿法脱硫、氨法脱硫、海水脱硫、碱金属(镁或钠)法脱硫等。通常,湿法脱硫系统具有系统复杂、脱硫效率高(可超过99.5%)、投资和运行成本高等特点<sup>[6]</sup>,干法脱硫系统具有系统简单、脱硫效率较高(一般为90%~95%)、投资和运行成本低等特点,半干法系统的特点介于干法和湿法之间。

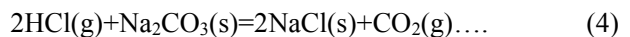
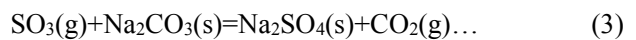
碳酸氢钠(SDS)干法脱硫是采用碳酸氢钠(即小苏打)作为脱硫剂,利用碳酸氢钠在高温下的热解产生多孔结构的碳酸钠<sup>[7]</sup>,碳酸钠具有高比表面积和高活性,利用碳酸钠与烟气中的SO<sub>2</sub>及酸性气体充分接触发生化学反应,从而脱除烟气中的SO<sub>2</sub>等酸性气体。

反应原理如下所示<sup>[8]</sup>:

主要反应:

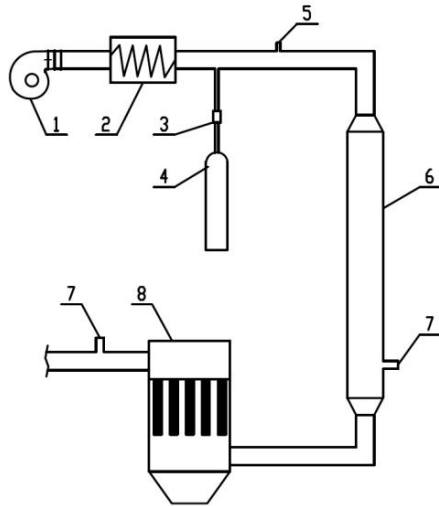


副反应:



通常,碳酸氢钠(SDS)干法脱硫系统脱硫效率可达95%左右;无脱硫废水排放,不会造成二次污染;不会降低烟气温度,不会造成烟囱烟羽现象;系统简单,投资成本低、运行成本低;适合烟气量不大、烟气中SO<sub>2</sub>浓度不高的项目<sup>[9]</sup>;为了同时满足SO<sub>2</sub>和粉尘的排放指标,通常在碳酸氢钠(SDS)干法脱硫系统下游设置布袋除尘系统<sup>[10]</sup>。

目前对碳酸氢钠干法脱硫的性能研究大多集中在实验室中,实验通过小型实验装置模拟烟气脱硫过程,研究干法脱硫的性能,但实验条件和实际工程相比还是有较大区别,因此实验室中得到的数据仅可作为设计参考。如图1所示,通常在实验室中1-小型风机来提供实验气体,通过2-电加热器来控制实验气体的温度,瓶装SO<sub>2</sub>通过3-流量控制器计量后加入到实验气体中,通过将研磨后的碳酸氢钠粉末喷入实验装置中脱除气体中的SO<sub>2</sub>。参数检测在测试口进行,检测参数包括烟气温度、SO<sub>2</sub>浓度。李坚等通过多次实验可以得到<sup>[11]</sup>:碳酸氢钠脱硫的温度范围较宽,在130℃~200℃均有较高的脱硫效率,在温度130℃时,脱硫效率最高,温度继续升高时,脱硫效率先下降后逐渐稳定;碳酸氢钠粉末需要研磨,研磨过后的碳酸氢钠具有更大的比表面积和更小的特征长度,可以增加脱硫剂和SO<sub>2</sub>等酸性气体的接触面积,加快脱硫反应速率;碳酸氢钠干法脱硫最高能实现95%以上效率,脱硫效率90%以上时NaHCO<sub>3</sub>:SO<sub>2</sub>(摩尔比)基本均大于3.2。



1-风机；2-电加热器；3-SO<sub>2</sub>流量控制器；4-SO<sub>2</sub>气瓶；  
5-脱硫剂喷入口；6-SO<sub>2</sub>反应器；7-测试口；8-布袋除尘器

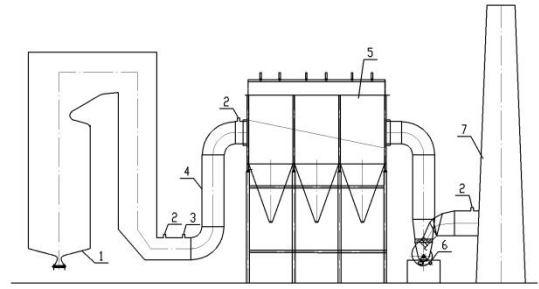
图1 碳酸氢钠干法脱硫实验装置

## 2 碳酸氢钠干法脱硫系统在工程中的应用

碳酸氢钠干法脱硫系统由于其系统简单、投资运行成本低等特点，在焦炉烟气脱硫、燃气锅炉烟气脱硫中有不少应用，下面以某钢铁厂 220 t/h 燃气锅炉为例说明碳酸氢钠干法脱硫系统在实际工程中的应用。

为了满足当地工业企业超低排放深度治理实施方案的要求，某钢铁厂 220 t/h 燃气锅炉在 2020 年进行了超低排放改造，在炉后增设了碳酸氢钠 (SDS) 干法脱硫系统和布袋除尘系统。

该项目中，碳酸氢钠干法脱硫系统设置在锅炉空气预热器与锅炉引风机之间，空预器出口的原烟气经过碳酸氢钠干法脱硫后进入布袋除尘器，经布袋除尘器除尘后净烟气经引风机加压后送入烟囱进行排放。系统配置一台进口磨机，在脱硫剂 D90 粒径小于 20 μm 时，可保证脱硫剂最大供应量不小于 400 kg/h。本项目采用进口工业级碳酸氢钠作为脱硫剂。脱硫剂喷射口设置在脱硫反应区前，经磨机研磨后的碳酸氢钠粉末经喷射装置喷入烟道中，碳酸氢钠在反应器内高温脱氢生成碳酸钠，碳酸钠细粉颗粒与烟气中的二氧化硫反应生成硫酸钠。脱硫后粉状颗粒产物随气流进入布袋除尘器收尘，利用仓泵、压缩空气输送到灰库，灰库底部设有自动打包机。该项目烟气流程见图 2。



1-燃气锅炉；2-烟气测试孔；3-脱硫剂喷射口；4-脱硫反应区；  
5-布袋除尘器；6-引风机；7-排放烟囱

图2 220 t/h 燃气锅炉碳酸氢钠干法脱硫系统图

根据锅炉设计资料，设计工况为 70 % 高炉煤气 + 30 % 转炉煤气，设计工况烟气体积量为 355 000 Nm<sup>3</sup>/h (湿标态)；校核工况 1 为 100 % 燃烧高炉煤气，校核工况 1 烟气体积量为 392 000 Nm<sup>3</sup>/h；校核工况 2 为燃烧 50 % 高炉煤气 + 50 % 转炉煤气，校核工况 2 烟气体积量为 325 000 Nm<sup>3</sup>/h；校核工况 3 为燃烧 60 % 高炉煤气 + 30 % 转炉煤气 + 10 % 焦炉煤气，校核工况 3 烟气体积量为 340 000 Nm<sup>3</sup>/h。根据机组实际运行情况，碳酸氢钠干法脱硫系统入口 SO<sub>2</sub> 浓度按 200 mg/Nm<sup>3</sup> (标干态、基准氧，下同) 设计，脱硫效率按 95 % 设计，保证脱硫系统出口 SO<sub>2</sub> 浓度不超过 10 mg/Nm<sup>3</sup>。脱硫系统设计温度 130~180 °C。布袋除尘器滤袋采用超细纤维 PPS 热熔覆膜，满足长期在 160 °C 运行，瞬时最高耐温在 180 °C 以上。

该项目投运后，在线监测数据显示，烟囱处净烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度可以长期稳定在 10 mg/Nm<sup>3</sup> 及以下，满足当地环保要求。

## 3 碳酸氢钠干法脱硫性能研究

在项目正常投运后，多次利用预留的烟气测试孔对该项目运行数据进行测试，得到了碳酸氢钠干法脱硫系统在工程应用中的多组数据。工程应用中，为了保证所有工况都能达标排放，磨机的选型按照最恶劣工况进行的设计选型，因此磨机在测试期间出力均低于最大出力，因此可保证磨机出口脱硫剂 D90 粒径小于 20 μm。有研究表明，小粒径的碳酸氢钠起始分解温度更低，完全分解所需的时间更短<sup>[12]</sup>。同时，粒径更小总表面积更大，向内扩散阻力更小<sup>[13]</sup>。以下数据，均在脱硫剂 D90 粒径小于 20 μm 条件下测得。



### 3.1 温度对脱硫效率的影响

在燃气锅炉烟气碳酸氢钠干法脱硫工程项目中,脱硫入口烟温会随着锅炉负荷和燃料条件进行波动,正常波动幅度在 40~50 °C 左右,因此在现场的测试中仅收集到了脱硫烟温 120 °C 至 165 °C 的状况,在此区间内,在入口 SO<sub>2</sub> 浓度 50~170 mg/Nm<sup>3</sup>,脱硫系统脱硫效率和脱硫系统出口 SO<sub>2</sub> 浓度见图 3。

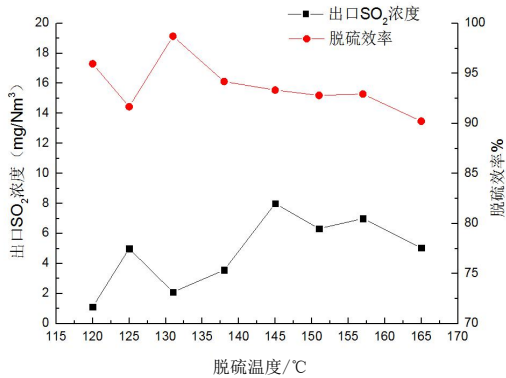


图3 脱硫温度对脱硫效率的影响

测试结果表明,在测试条件下,即脱硫温度 120~165 °C 时,碳酸氢钠干法脱硫可以实现 90 % 以上的效率,同时可以稳定将 SO<sub>2</sub> 排放浓度控制在 10 mg/Nm<sup>3</sup> 以下。其中,脱硫效率在 131 °C 时出现了最高值 98.71 %,原因主要是由于该温度下,碳酸氢钠依然能保持较快的分解速度,且此段时间锅炉烟气量低于设计值,再加上烟温低于设计值,脱硫剂与烟气在脱硫塔内接触时间约 3~4 s,远大于设计值,这让脱硫剂和烟气有足够的接触反应时间。本次测试结果与王德义对碳酸氢钠热分解的理论分析吻合<sup>[14]</sup>,与李坚等在试验室中试验的结果一致<sup>[11]</sup>,也表明在 120 °C 温度下,碳酸氢钠干法脱硫系统同样可以实现较高的脱硫效率和较低的 SO<sub>2</sub> 排放浓度。

### 3.2 钠硫摩尔比对脱硫效率的影响

钠硫比有多种定义,通常钠硫比定义为喷入脱硫装置的碳酸氢钠中钠 (Na) 的当量摩尔数与去除的二氧化硫中硫 (S)、三氧化硫中硫 (S)、氯化氢中氯 (Cl)、氟化氢中氟 (F) 的当量摩尔总数之比。在本项目中,由于锅炉燃料为燃气 (氯和氟较少),且烟气中 SO<sub>3</sub> 浓度较低,因此本文中的钠硫比简化为喷入脱硫装置的碳酸氢钠中钠 (Na) 的当量摩尔数与去除的二氧化硫中硫 (S) 的当量摩尔总数之比。增加钠硫比可以增加脱硫剂反应表面

积,SO<sub>2</sub> 分子有更大的几率和脱硫剂接触,加快脱硫反应的进行<sup>[15]</sup>。但是在工程应用中,增加钠硫比会增加运行成本,不利于项目成本管控。

测试期间,连续 14 小时进行了测试,每 5 分钟测定一次数据,两小时内测定的所有数据的平均值记录为一组,总共记录 7 组数据。测试期间,脱硫系统入口 SO<sub>2</sub> 浓度在 50~200 mg/Nm<sup>3</sup> 之间波动,脱硫温度最低 127 °C,最高 155 °C,测试结果见图 4。

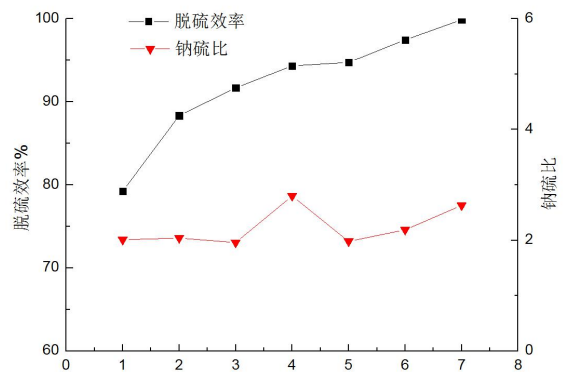


图4 钠硫比和脱硫效率测试结果

通过前两组数据可以看出,在脱硫效率处于 75 %~90 % 时,脱硫系统中钠硫比约为 2.03,这说明喷入脱硫系统中的脱硫剂基本都参与了反应。通过第 3、第 5、第 6 组数据可以得到,随着脱硫效率增加到 90 % 以上,钠硫比增加到 2.25。第 4、第 7 组的脱硫效率超过了 95 %,钠硫比平均值为 2.41。呈现了脱硫效率随钠硫比增加而增加的规律。

在第 3 和第 6 组数据中,实测钠硫比比预期钠硫比略低,低于反应方程式对应的理论值 2.0。这种现象可能是前面钠硫比偏高时,未反应的脱硫剂附着在布袋除尘器滤袋表面和后续烟气中的 SO<sub>2</sub> 进行了反应,这样造成后续运行的钠硫比偏低。将测试期间的数据进行整体分析,测试期间平均钠硫比为 2.23。这说明,在实际运行中,脱硫剂 (碳酸氢钠) 的实际用量比理论用量多 11.5 %。

### 3.3 布袋除尘器对脱硫效率的影响

为了进一步研究布袋除尘器对脱硫效率的影响,对脱硫塔出口 (即除尘器入口) SO<sub>2</sub> 浓度进行了测试,测试结果见图 5。测试期间,锅炉出口原始 SO<sub>2</sub> 浓度一直维持在 90~100 mg/Nm<sup>3</sup>,烟囱处 SO<sub>2</sub> 浓度控制在 5~10 mg/Nm<sup>3</sup>,脱硫入口烟气温度一直

维持在 135~140℃之间，钠硫比维持在 2.4~2.6。

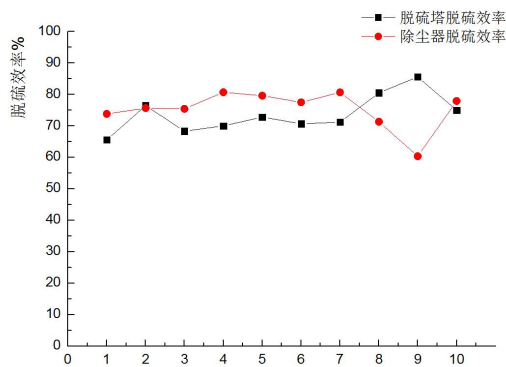


图 5 除尘器对脱硫效率的影响

由图 5 可知，在入口 SO<sub>2</sub> 浓度约 100 mg/Nm<sup>3</sup>、钠硫比 2.4~2.6 时，脱硫塔中 SO<sub>2</sub> 的脱除率约 70%~80%，测试期间平均脱硫效率为 73.6%。在除尘器中 SO<sub>2</sub> 的脱除率同样能达到 70%~80%，测试期间平均脱硫效率为 75.3%。试验表明，烟气中 SO<sub>2</sub> 在布袋除尘器中的脱除效率与脱硫塔中效果相当，甚至略高于脱硫塔中的脱硫效率。这是因为烟气到了布袋除尘器中仍有两个阶段可以对 SO<sub>2</sub> 起到脱除作用，第一阶段是从除尘器入口到滤袋表面，这段时间内烟气在除尘器中被均匀分配到各仓室，烟气与脱硫剂在这段时间仍能充分混合、反应，脱除烟气中的 SO<sub>2</sub>，第二阶段是部分未完全反应的脱硫剂附着在滤袋表面，当烟气以低于 0.7 m/min 的速度缓慢穿过滤袋及滤袋表面挂灰时与脱硫剂再次接触发生反应。而且，当烟气以低速缓慢穿过滤袋时，烟气与脱硫剂的接触较为均匀，有利于深度脱除烟气中的 SO<sub>2</sub>。

#### 4 结语

碳酸氢钠 (SDS) 干法脱硫和半干法、湿法脱硫相比具有系统简单、投资成本低、运行成本低、无脱硫废水排放、烟囱无烟羽等特点，尤其适用于焦化炉、燃气锅炉等烟气量较小、烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度低的脱硫系统。某钢铁厂 220 t/h 燃气锅炉应用了碳酸氢钠 (SDS) 干法脱硫系统，并且烟囱处净烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度可以长期稳定在 10 mg/Nm<sup>3</sup> 及以下，满足当地环保要求。

通过该项目研究脱硫温度、钠硫比和布袋除尘器对脱硫效率的影响，验证了在 120℃ 至 165℃ 区

间内，碳酸氢钠 (SDS) 干法脱硫可实现超过 98% 的脱硫效率和长期不超过 10 mg/Nm<sup>3</sup> 的 SO<sub>2</sub> 排放指标；在测试期间，呈现出钠硫比越高、脱硫效率越高的趋势；在脱硫效率超过 95% 时，钠硫比平均值为 2.41；且在长期运行中，脱硫剂 (碳酸氢钠) 的实际用量比理论用量多 11.5%；通过测试得知烟气中 SO<sub>2</sub> 在布袋除尘器中的脱除效率与脱硫塔中效果相当，甚至略高于脱硫塔中的脱硫效率，在布袋除尘器中 SO<sub>2</sub> 的脱除率能达到 70%~80%，布袋除尘器有利于深度脱除烟气中的 SO<sub>2</sub>。

#### 参考文献:

- [1] 姚仕萍, 薛智韵. 中国制造业 SO<sub>2</sub> 排放估计及其指数分解分析 [J]. 中国社会科学院研究生院学报, 2012(3):57-61
- [2] 王磊. 燃煤电厂烟气治理策略及脱硫脱硝技术 [J]. 科技与创新, 2014(10):151+154
- [3] 张翀. 钢铁工业实施超低排放改造技术要点分析 [J]. 山西化工, 2021, 41(4):222-224
- [4] 李壮, 胡姐, 王建峰等. 燃煤机组脱硫超低排放改造中燃煤硫分的选择 [J]. 华电技术, 2018, 40(2):68-70+80
- [5] 崔名双, 周建明, 张鑫等. 燃煤工业锅炉烟气脱硫技术及经济性分析 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(5):131-137
- [6] 朱法华. 燃煤电厂烟气污染物超低排放技术路线的选择 [J]. 中国电力, 2017, 50(3):11-16
- [7] 黄意淇. 碳酸氢钠干法处理酸性气体工业进展 [J]. 四川化工, 2017, 20(6):26-29
- [8] Keener Tim C, Wayne T. Davis. Study of the reaction of SO<sub>2</sub> with NaHCO<sub>3</sub> and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> [J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1984, 34:651-654
- [9] 张永, 李文勇, 黄志祥等. 碳酸氢钠干法脱硫技术的应用研究 [J]. 中国环保产业, 2020(4):43-45
- [10] 展茂源. 小苏打脱硫技术在高硫高湿烟气中的工程应用 [J]. 山东化工, 2021, 50(4):274-276+278
- [11] 李坚, 吕瑞彤, 王川. 碳酸氢钠干法脱硫的实验研究 [J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(4):353-359
- [12] Ahlbeck Jarl, Stefan Rönnblad. Removal of sulfur dioxide in a fabric filter [J]. Journal of The Air & Waste Management Association, 1994, 44: 413-417
- [13] 葛庆仁. 气固反应动力学 [M]. 北京: 原子能出版社, 1991: 47-100
- [14] 王德义. 碳酸氢钠热分解的动力学模型与研究 [J]. 天津化工, 1990 (4): 32-35
- [15] Keener, Tim C., Soon J. Khang. Kinetics of the sodium bicarbonate- sulfur dioxide reaction [J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48: 2859-2865

# 大件设备倾斜式运输装载方案的分析应用

许铁军

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 近年来超宽大件采用倾斜装载方式进行运输的出现和应用, 解决了非常多项目中大型关键设备的运输难题, 对于工程项目的建设规划有着重要的积极意义。但从实际情况来看较多都是凭经验或简单估算进行设计, 虽基本满足了使用需求, 但也出现了一些问题, 本文从理论角度对该类装载方式进行了归纳, 同时对于方案应用时需要注意的问题也进行了分析, 对后续需要采用倾斜装载方案的设备运输提供思路。

**关键词:** 大件运输; 倾斜装载; 安全稳定性; 关键环节

中图分类号: U492.3

文献标识码: A

文章编码: 1001-9006 (2022) 04-0049-05

## Analysis and Application of Inclined Transportation Loading Scheme for Large Equipment

XU Tiejun

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

**Abstract:** In recent years, the emergence and application of inclined loading method for transportation of ultra wide and large parts has solved the transportation problems of large-scale key equipment in many projects, which is of great positive significance for the construction planning of engineering projects. However, from the actual situation, most of them are designed based on experience or simple estimation. Although they basically meet the use needs, there are also some problems. This paper summarizes this kind of loading mode from a theoretical point of view, analyzes the problems needing attention in the application of the scheme, and provides ideas for the equipment transportation that needs to adopt the inclined loading scheme in the future.

**Key words:** large cargo transportation; inclined loading; safety and stability; key links

近年来, 随着国内油气、化工、冶金、电力等行业大型项目的不断建设, 项目建设涉及到的设备越来越多, 且越来越大, 设备运输也越来越难, 以水电工程项目为例, 一方面, 水电工程项目地理位置基本位于较为偏远的山区地区, 交通运输条件复杂多变; 另一方面, 随着电站容量和规模不断扩大以及新型设备的不断更新换代, 设备部件的尺寸重量也越来越大, 受道路运输条件影响, 部分大型设备无法运抵项目现场, 需要将设备进行解体运输, 或者在设计制造时进行分瓣分节等, 运抵项目现场后再进行组装和加工, 进而在项目策划时就需要考

虑修建组装加工厂房、添置配套设备、配置人员、增加工期等一系列方案, 势必将改变项目规划和投资成本, 因此, 部分关键大型设备的运输可行性对于项目规划有着重要的影响, 部分关键设备整体和分体结构可能还会影响设备的运行性能。

还有另一部分老旧电站设备进行改造更新, 由于修建年代较早, 道路运输条件相对较差, 或者受厂区设计规划影响, 有无法拆除或较难拆除改造的障碍, 对通行货物和车辆有尺寸限制, 因此就对项目规划和设备设计制造增加了限制条件。

而近几年超宽大件采用倾斜装载方式进行运

收稿日期: 2022-01-18

**作者简介:** 许铁军 (1985—), 男, 2008年毕业于哈尔滨工业大学交通运输专业, 学士, 工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司成品发运部工作, 主要从事包装运输技术工作。

输的出现和应用,解决了非常多项目中大型关键设备的运输难题,对于工程项目的建设规划有着重要的积极意义。这种倾斜式运输装载方式改变了货物运输宽度和高度,从而在不改变障碍物或减小改造难度的情况下使货物能够顺利通过障碍,这样即可使部分关键设备采用整体结构进行设计制造和运输安装,不仅减少了整个工程项目在厂房建设、道路改建等方面的投资,而且整体结构制造的部件使设备性能更有保证。



图1 国内某电站水轮机转轮上冠下环运输

这类装载方式基本都需要制作货物装载工装,从目前国内几个大型水电站设备运输的实例来看,采用该方案较多都是凭经验或简单估算进行设计,在实际应用时虽基本满足了使用需求,但也出现了一些问题,本文从理论角度对该类装载方式进行了归类,同时对于采用倾斜式装载方案时需要注意的问题也进行了归纳和分析。

## 1 倾斜装载方案分类

倾斜式装运方式总体上可分为两类,一类是货物倾斜角度固定不变,即货物装车后,至运输至目的地全过程倾斜角度将保持不变,这种方案主要适用于自身高度以及重心高度均较小的扁平形状设备,且在倾斜角度一定的情况下能够顺利通过运输路线上所有障碍。这类情况在货物装载方案设计、工装支架设计和制作难度均相对较小,更加容易操作实施。

另一类是货物可进行旋转,运输过程倾斜角度可变,运输通行较为灵活,适用于运输路线中障碍物较多且复杂,固定倾斜角度无法通过所有障碍,而需要根据障碍实际情况而调节倾斜角度才能通过的情况。这种方案在货物装载方案设计、工装支架设计和制作,以及货物和车辆的受力情况都要更加复杂,需要考虑的因素非常多,操作实施也相对更难。

## 2 倾斜装载方式分析(固定角度)

### 2.1 稳定性分析

**例:**有一圆形对称结构( $D6\ 000\times 200\text{ mm}$ )的货物,重心位于其几何中心,重心高度为 $100\text{ mm}$ ,采用倾斜装载方式,倾斜角度为 $30^\circ$ ,倾覆点据重心所在平面垂直距离为 $1\ 790\text{ mm}$ ,如图2(左)所示。若重量不变,仅将该货物重心高度增加 $x$ ,如图2(右)所示。

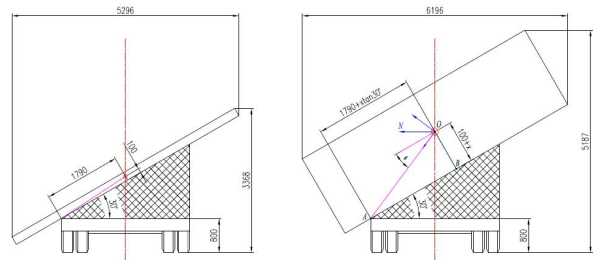


图2 倾斜装载方式(固定角度)

货物重心增加后,受到横向惯性力 $N$ (货物重量和结构相同,仅重心高度不同,采用同一车型以相同速度经过相同路线,受到惯性力也相同)产生的倾覆力矩 $T$ 将变为:

$$T=OA \cdot N \cdot \sin(30^\circ + \theta) = OA \cdot N \cdot (\sin 30^\circ \cos \theta + \cos 30^\circ \sin \theta) \quad (1)$$

其中,  $\sin \theta = \frac{100+x}{OA}$ ,  $\cos \theta = \frac{1790+x \tan 30^\circ}{OA}$ ;代入式(1),得:

$$T=N(1.15x+981)$$

由结果可见,货物随着自身重心高度的增加,在受到的相同横向惯性力时,倾覆力矩呈线性增大趋势,即重心越高,倾覆力矩越大,运输过程中货物的倾覆风险就越大。

其次,重心越高的货物装车后重心离地面高度也会越高,致使车辆和货物的合成重心就越高,车辆的倾覆风险也会越大(假设不考虑绑扎加固强度,货物与支架以及支架与车板间完全固定为一个整体),不利于运输安全。

第三,自身高度越高的货物,倾斜后宽度减小的收益越小,从本例可以看出,货物在高度增加后,倾斜 $30^\circ$ 时宽度甚至不减反增,同时装车高度大幅增加,完全失去了倾斜装载意义,因此该类方案仅适用于自身重心高度较小的扁平形状设备(如图3所示)。

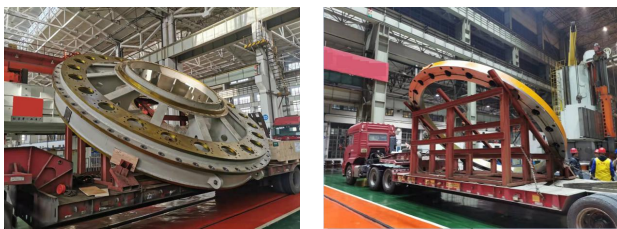


图3 国内某电站水轮机顶盖底环装运

## 2.2 固定角度倾斜装载方案应用需要注意的问题

这类装载方式在方案设计以及运输实施等方面难度均相对较小，更加容易操作实施，在做装运方案和支架设计方案时应重点从以下几个方面进行考虑：

(1) 在能够通过障碍的前提下应尽可能减小货物倾斜角度，从而减小侧倾风险，提高车辆行驶安全性和稳定性。

(2) 支架重量较轻时，货物重心在车板上的投影应与车板纵向中心线重合；支架重量较重时，还需要考虑支架自身重量，确保支架与货物的合成重心在车板上的投影与车板纵向中心线重合。

(3) 根据货物自身特点（结构、外形尺寸、重量、重心高度等），结合运输路线中最大横坡和车辆惯性力综合考虑，评估货物和车辆在行驶过程中的倾覆风险。

(4) 除了货物与支架间，支架与车板间需要连接加固以外，更重要的还必须对货物与车板间进行连接加固（即加固索具一端连接货物，另一端连接至载货车板），并且加固措施所提供的合力矩都必须大于货物的倾覆力矩。

## 3 倾斜装载方式分析（可变角度）

固定式倾斜装载方式主要适用于扁平类设备部件，但在实际应用时，由于货物参数和结构各不相同，更多数情况下需要采用可变角度的倾斜装载方式，这种装载方式一般又可分为以下三种结构：

### 3.1 结构一

转轴中心与货物重心重合，且支架和货物的连接点与货物重心在同一水平面（见图4）。这种结构，理论上只要对钢丝绳施加拉力货物都会轻易的转动（实际情况还需要克服转轴的摩擦力以及手拉葫芦的操作力，这两个力一般都比较小），且拉力几乎不受旋转角度的影响。

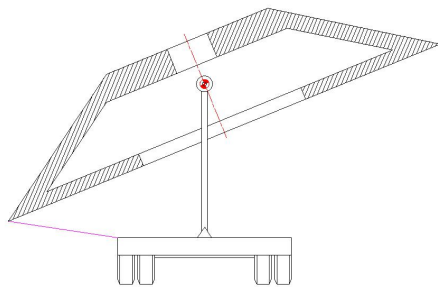


图4 转轴中心与货物重心重合  
(连接点与货物重心在同一水平面)

### 3.2 结构二

转轴中心与货物重心虽重合，但支架和货物的连接位置与货物重心不在同一水平面，如图5所示，支架转轴中心虽与货物重心重合，但支架与货物的连接位置与货物重心不在同一水平面（货物处于水平状态时），货物是通过三角形架悬吊于旋转支架上，货物转动时将带动三角形架围绕转轴中心旋转，类似吊篮结构。

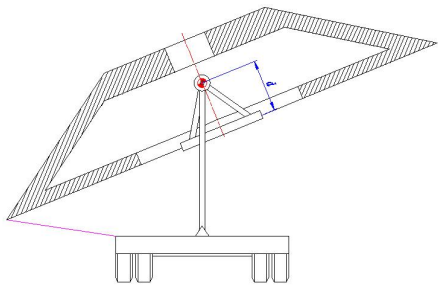


图5 转轴中心与货物重心重合  
(连接点与货物重心不在同一水平面)

### 3.3 结构三

转轴中心与货物重心不重合（见图6），重心距离转轴中心所在的平面垂直距离为 $d$ 。

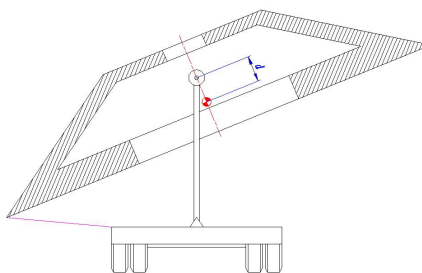


图6 转轴中心与货物重心不重合

从图5、图6可以看出，结构二和结构三类似，在左侧钢丝绳拉动货物旋转时，货物都会由于自身重力和力臂 $d$ 而产生旋转抵抗力矩，并且该抵抗力矩会随旋转角度增大而增大（详见3.4），从而增加钢丝绳负荷和操作难度。

这两种结构也从实际操作得到了验证，两件完全相同的货物（结构与本文例中货物结构类似），采用了不同结构的旋转支架，图7采用结构一，转轴中心与货物重心所在平面几乎重合，因此在实际操作时，3 t手拉葫芦只需施加较小的力就能使货物转动，并且在转动过程中钢丝绳拉力值一直处于较小的水平。图8采用结构二，转轴中心虽与货物重心所在平面重合，但支架和货物的连接位置与货物重心不在同一水平面，形成了吊篮结构，在实际操作时，手拉葫芦要施加较大的力才能使货物转动，必须选用10 t以上的手拉葫芦，并且随着旋转角度的增大，钢丝绳的拉力也越来越大，到一定程度时，手拉葫芦已经无法操作，同时钢丝绳受到的拉力非常大，不利于运输过程的安全性。



图7 (3.1 结构一)



图8(3.2 结构二)

可变倾斜角度的装载方式中结构一相对比较简单，就不再赘述，在实际应用时，常常会遇到由于货物自身结构原因，而难以做到使转轴中心与重心重合，必须采用结构二或结构三的情况，本文就重点就最为复杂的结构二的情况进行举例分析。

### 3.4 稳定性分析

例：已知有一件圆台型货物，最大外径  $D=8.05$  m，货物重量  $G=100$  t，需要采用可旋转的装载方式使货物倾斜才能通过障碍，旋转角度为  $x$ ，支架转轴中心距钢丝绳在货物和车板上的挂点距离分别为  $a=4.2$  m， $b=3.3$  m，转轴中心相对于货物重心偏移量  $d=0.85$  m，车板宽度  $W=3$  m，其余已知条件如图所示。

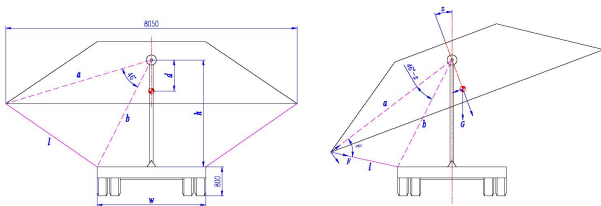


图9 倾斜式装载方式（可变角度）

(1) 钢丝绳拉力与货物旋转角度间的关系

假设支架转轴中心高度确定，则钢丝绳拉力  $F$  与货物旋转角度  $x$  之间的关系分析由力矩平衡方程  $G \sin x \cdot d = F \sin \theta \cdot a$ ，可得：

$$F = \frac{G \sin x \cdot d}{a \sin \theta} \quad (2)$$

由已知条件可计算得：

钢丝绳长度：

$$l = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(46^\circ - x)}$$

$$\sin \theta = \frac{b \sin(46^\circ - x)}{l} = \frac{b \sin(46^\circ - x)}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(46^\circ - x)}}$$

代入式(2)，得：

$$F = \frac{G \sin x \cdot d \cdot \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(46^\circ - x)}}{ab \sin(46^\circ - x)} \quad (3)$$

假如支架转轴重心高度  $h$  确定，即  $b$  确定（本例中  $b=3.3$  m），则有钢丝绳拉力  $F$  与货物转角  $x$  间的关系函数为：

$$F(x) = \frac{85 \sin x \cdot \sqrt{28.53 - 27.72 \cos(46^\circ - x)}}{13.86 \sin(46^\circ - x)}, \quad (0 \leq x \leq 41^\circ)$$

本例中货物最大转角为  $41^\circ$  时将与车板干涉，因此，取  $0 \leq x \leq 41^\circ$ 。利用函数软件绘制出钢丝绳拉力随旋转角度变化趋势如下图所示：

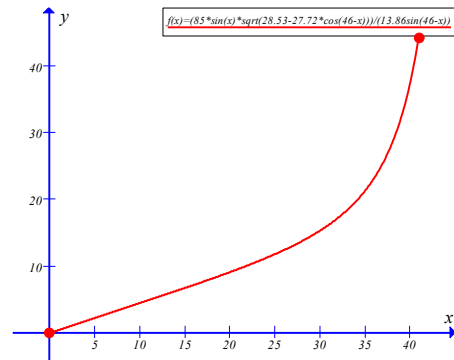


图10 钢丝绳拉力随旋转角度变化趋势图  
(转轴高度确定时)

$$F(x)=10.11 \text{ t}, \quad (x=22^\circ)$$

$$F(x)=19.63 \text{ t}, \quad (x=34^\circ)$$

$$F(x)=44.17 \text{ t}, \quad (x=40^\circ)$$

从函数曲线可以看出，这种装载方式，货物随着旋转角度的增大，钢丝绳的拉力也越大，在本例中转角仅为  $22^\circ$  时钢丝绳拉力就已超过  $10$  t，实际可操作性较差，且钢丝绳拉力过大不利于运输安全。

(2) 钢丝绳拉力与支架转轴中心高度间的关系

假设支架转轴高度未定，在货物转动至某一固定角度时，钢丝绳拉力随转轴重心高度的变化趋势，为便于分析，本例中货物转角取货物所需的最大旋转角度  $41^\circ$  时，即  $\alpha=41^\circ$ ，代入式 (3)，则有

$$F = \frac{85 \sin 41^\circ \cdot \sqrt{4.2^2 + b^2} - 2 \times 4.2 \times b \cos 5^\circ}{4.2b \sin 5^\circ} \quad (4)$$

$$= \frac{55.76 \sqrt{17.64 + b^2} - 8.366b}{0.366b}$$

转轴中心距车板水平面的高度为  $h$ ，车板宽度  $W=3$  m，可得

$$b = \sqrt{h^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2} = \sqrt{h^2 + 1.5^2} = \sqrt{h^2 + 2.25}$$

代入式 (4)，得

$$F = 152.35 \sqrt{\frac{19.89 + h^2 - 8.366 \sqrt{h^2 + 2.25}}{h^2 + 2.25}}$$

则本例中钢丝绳拉力  $F$  与转轴中心高度  $h$  的关系函数为：

$$F(h) = 152.35 \sqrt{\frac{19.89 + h^2 - 8.366 \sqrt{h^2 + 2.25}}{h^2 + 2.25}}, \quad (1 \leq h \leq 9)$$

注：理论上  $h$  的取值范围为 ( $h > 0$ )，但在实际应用中，一方面，旋转支架高度小于 1 m 时没有太大意义，另一方面，支架高度也不会超过道路的建筑限高 5 m，因此，本例中将  $h$  的最小值设为 1，同时为表示图形趋势，将最大值取至 9。

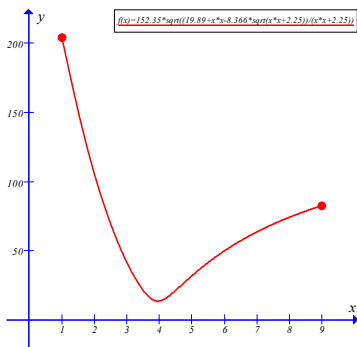


图 11 钢丝绳拉力随转轴中心高度变化趋势图  
(最大旋转角度时)

从函数曲线可以看出，货物在最大倾斜角度时，钢丝绳拉力随支架转轴高度的增加先降后增，其中在约 4 m 高度时钢丝绳拉力最小（此时钢丝绳所呈直线与货物相切），因此，在做支架设计时，除了需要考虑货物的通过性，还要考虑可操作性，即减小钢丝绳拉力和操作难度，本例中支架转轴高

度应尽量靠近 4 m。

### 3.5 可变角度倾斜装载方案应用需要注意的问题

这类可变角度的倾斜装载方式在方案设计以及运输实施等方面均更加复杂，难度也相对较大，在做装运方案和支架设计方案时应重点从以下几个方面进行考虑：

3.5.1 应根据运输路线中宽度最小的障碍物尺寸确定货物所需旋转的角度。

3.5.2 根据货物结构和重心位置确定旋转支架的转轴中心位置和支架高度。

(1) 采用结构一时，理论上只要对钢丝绳施加拉力货物都会轻易的转动（实际情况还需要克服转轴的摩擦力以及手拉葫芦的操作力，这两个力一般都比较小），且拉力几乎不会受旋转角度的影响，因此做支架设计和货物装载方案时，只需考虑 2 个因素：①确保货物在最大转角时不与车板或路面发生干涉，且能够顺利通过运输路线上的最小障碍；②货物在最大转角时，保证手拉葫芦（或其他紧固器）有能够进行操作的最小空间，从而尽量降低旋转支架高度，以保证运输过程中货物和车辆的稳定性和安全性。

(2) 在遇到由于货物结构限制而必须采用结构二或结构三时，在设计支架和货物装载方案时则必须考虑以下因素：①确定货物能够顺利通过运输路线上的最小障碍所需的旋转角度；②支架转轴中心应尽量靠近货物重心，并尽量减小力臂  $d$ ；③货物处于最大转角状态时，根据手拉葫芦（或其他紧固器）所需的最小操作空间，同时确保货物不与车板和地面发生干涉，再确定支架转轴高度；④计算货物在旋转过程中所需的最大拉力，并根据拉力值（还需考虑车辆行驶过程中的惯性力影响）确定所需钢丝绳和手拉葫芦（或其他紧固器）的型号，判断是否具备可操作性。如本例中货物在最大转角  $41^\circ$  时钢丝绳拉力达到约 44 t，显然不具备可操作性。

#### 3.5.3 其他需要注意的问题

(1) 钢丝绳拉力过大对旋转工装支架稳定性的影响。

本例中在货物转角达到最大约  $41^\circ$  时，钢丝绳拉力最大，此时亦即旋转支架受到水平方向外力最大，代入数值计算可得支架转轴中心受到的水平向

(下转第 68 页)

# 一种 O 形橡胶圈的密封强度计算方法

张波 严欢 季敏东 潘绍成

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 611731

**摘要:** 为避免内部锈蚀, 锅炉辅机、化工容器、气化炉、太阳能、氢能等槽罐类容器在运输和贮存过程中均要求进行充氮保护, 需要对设备现场焊接的管口进行密封。核电等设备一般均要求须采用机械密封方式。本文将立足于容器设备运输和贮存过程中的充氮防护, 介绍一种 O 形橡胶圈在轴向受压工况下机械密封强度的理论计算和校核方法。

**关键词:** O 形橡胶圈; 充氮防护; 运输和贮存; 低压和静压; 密封强度计算

中图分类号: TH136

文献标志码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0054-04

## A Calculation Method for Sealing Strength of O-ring

ZHANG Bo, YAN Huan, JI Mindong, PAN Shaocheng

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

**Abstract:** In order to avoid internal corrosion, tanks such as boiler auxiliaries, chemical vessels, gasifiers, solar energy, hydrogen energy, etc. are required to be protected by nitrogen charging during transportation and storage, and the pipe orifices welded on site need to be sealed. Mechanical seal is generally required for nuclear power equipment. In this paper, a theoretical calculation and check method of mechanical seal strength of O-ring under axial compression condition is introduced based on nitrogen filling protection during transportation and storage of container equipment.

**Key words:** O-ring; Nitrogen filling protection; transportation and storage; low pressure and static pressure; calculation of sealing strength

为避免内部锈蚀, 锅炉辅机、化工容器、气化炉、太阳能、氢能等槽罐类容器在运输和贮存过程中均要求进行充氮防护, 需要对设备现场焊接的管口进行密封。密封主要有机械和焊接密封两种方式。由于焊接密封在现场需要对设备进行二次加工和消缺, 易对设备的工期和性能等造成影响, 核电等设备一般均要求须采用机械密封方式。O 形橡胶圈有结构简单、成本低廉、拆装方便、单件使用双向密封、摩擦系数小等特点, 具有良好的密封性和自封性能, 密封压力可从  $1.33 \times 10^{-5}$  Pa 到 400 MPa, 是一种典型的内塞膨胀式摩擦机械密封材料。按工程经验, 设备在运输和贮存工况下的充氮压力一般均小于 0.1 MPa, 是一种较典型的低压和静压密封。本文将立足于容器设备运输和贮存过程中的充氮防护, 介绍一种 O 形橡胶圈在轴向受压工况下机械

密封强度的理论计算和校核方法。

### 1 设计原理

设备在运输和贮存过程中, 内部进行充氮防护, 充氮压力为  $P_c$ 。在  $P_c$  作用下, 沿管口轴向会产生向外的轴力  $F_p$  (如下图 1 所示)

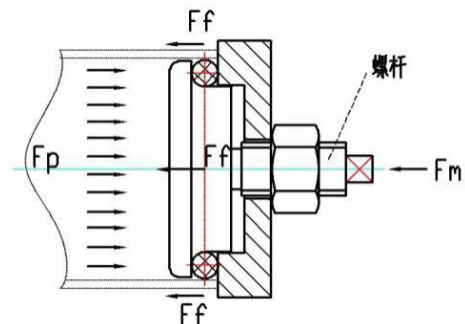


图 1 典型充氮防护机械密封结构

收稿日期: 2022-07-21

作者简介: 张波 (1988—), 男, 2012 年毕业于武汉理工大学包装工程与工商管理专业, 本科, 工程师。



O形圈套在螺杆固定轴上。在螺母拧紧的过程中,会产生沿管接口轴向向内的预紧力。在轴向预紧力反作用力和固定件的双向作用力下,O形圈轴向受到双向挤压,截面发生变形。随着预紧力的增大,O形圈径向与管壁逐步发生接触,直至不能再预紧时,产生沿管口轴向向内的静摩擦力 $F_f$ 。摩擦力通过计算最大接触压力和接触面积获得。当摩擦力 $F_f$ 满足下式(1)时,密封结构可靠。

$$F_f > \frac{F_p \times S_0}{n_0} \quad (1)$$

式中, $S_0$ 为结构安全系数; $n_0$ 为O形圈数量。

螺纹预紧过程中产生的最大预紧力 $F_M$ 由螺杆材质、螺纹规格等因素确定。O形圈轴向受到双向挤压时会产生反作用的压应力。当O形圈因螺纹最大预紧力承受的当量压应力 $\sigma_R$ 小于O形圈橡胶材料拉伸强度 $[\sigma_0]$ ,即满足下式(2)时,连接结构可靠。

$$\sigma_R < [\sigma_0] \quad (2)$$

## 2 设计原则

由于容器设备类充氮防护压力一般小于0.1 MPa,而密封用橡胶O形圈的抗拉强度一般均大于等于5 MPa,材料抗拉强度值远大于设计要求值;橡胶具有高度非线性特点(材料非线性、几何非线性、接触非线性),综合以往工程经验数据,本文设计按O形圈橡胶材料遵循以下假设进行:

- (1) 材料是连续均匀的;
- (2) O形圈在各向的蠕变性质相同,且蠕变不引起体积的变化;
- (3) 忽略材料溶胀对密封性能的影响;
- (4) 忽略温度变化对密封性能的影响。

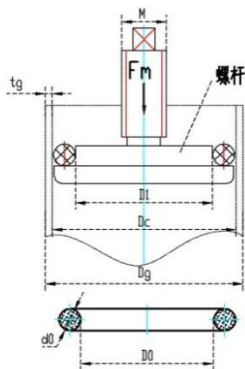


图2 密封结构尺寸示意

### 2.1 O形圈压缩率的选取

O形圈压缩率可用下式(3)表示(见下图4):

$$\varepsilon = \frac{d_0 - 2b}{d_0} \quad (3)$$

式中, $\varepsilon$ 为压缩率, $d_0$ 为O形圈初截面直径, $b$ 为压缩后径向无约束状态下的椭圆截面短半轴长。

在选取O形圈的压缩率时一般要考虑以下两个方面:密封接触面积和材料永久变形的可能性。密封接触面积的大小直接影响摩擦力的大小。压缩率越大,摩擦力会越大。但过大的压缩率易造成材料永久性变形,或因应力松弛而失效。对静压密封而言,压缩率 $\varepsilon$ 一般取15%~25%为宜。O形圈材料选取时,其最大允许压缩值应大于设计压缩率。

### 2.2 螺杆轴径D1的选取

一般地,O形圈在套入螺杆以后应有一定的拉伸量。O形圈拉伸量可用下式(4)表示:

$$a = \frac{d_0 + D_1}{d_0 + D_0} \quad (4)$$

式中, $D_0$ 为O形圈内径, $D_1$ 为螺杆轴径。

同压缩率一样,拉伸量的大小对O形圈的密封性能和使用寿命也有很大的影响。如果拉伸量太小,装配时会容易脱出,如拉伸过大,会导致O形圈安装不方便,也会致使截面积减少太多而出现泄漏。对静压密封而言,拉伸量 $a$ 一般取1.03%~1.04%为宜(参见参考文献2)。且螺杆 $D_1$ 轴径表面的粗糙度不低于Ra3.2。

### 2.3 最大接触压力值 $P_m$ 计算

O形圈挤压过程中对管壁会产生压应力。按文献1的应力分析结果,O形圈与管壁的最大接触压力均随着压缩率的增大而线性,区别为不同硬度曲线的一次函数曲线斜率和截距不同,其值均随着硬度的增大而变大。最大接触压力值可按下式(5):

$$P_m = \eta \varepsilon + c \quad (5)$$

式中: $\eta$ 为硬压比系数, $c$ 为计算常数。不同硬度值下O形圈硬压比系数 $\eta$ 和常数 $C$ 值参见下图3(参见参考文献1):

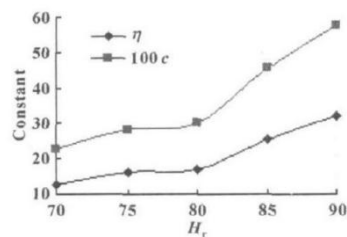


图3 O形圈硬度和常数关系图

### 2.4 接触面积 $A_s$ 计算

按设计压缩率，轴向受压径向无约束状态下的 O 形圈状态示意图如下图 4。O 形圈截面按椭圆进行计算，并假定 O 形圈沿径向均匀拉伸。压缩前后体积相等，计算可得压缩后截面长半轴  $a$  和短半轴  $b$  的值：

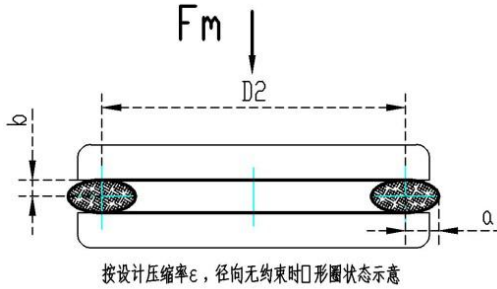


图 4 O 形圈轴向受压径向无约束状态示意

按设计压缩率，轴向受压径向有管壁状态下的 O 形圈状态示意图如下图 5。假定忽略 O 形圈受挤压时的溢出，O 形圈受挤压后成鼓形，且 O 形圈与管壁和螺杆槽面接触的压力相等，则可计算获得 O 形圈与管接口内壁的接触长度  $S_b$  如下式 (6)：

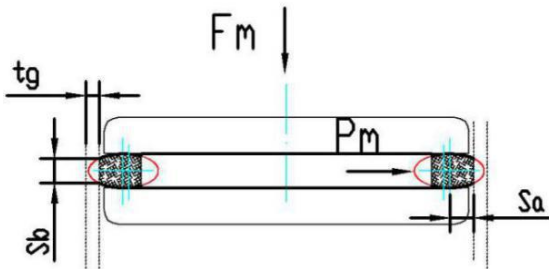


图 5 O 形圈轴向受压径向有约束状态示意

$$A_s = \pi \times D_c \times S_0 \quad (6)$$

式中， $D_c$  为管接口内径。

### 2.5 最大静摩擦力 $F_f$ 和最大当量压应力 $\sigma_R$ 计算

按上述涉及原则和计算流程，O 形圈与管壁接触产生的最大静摩擦力  $F_f$  和能承受的最大当量压应力  $\sigma_R$  可按式 (7) 和式 (8) 计算获得：

$$F_f = A_s \times P_m \times f_0 \quad (7)$$

$$\sigma_R = \frac{F_M}{2\pi \times S_a \times (D_c - 2S_a) \times n_0} \quad (8)$$

式中： $A_s$  为理论接触面积； $f_0$  为 O 形圈材料与管子材料间的静摩擦系数； $F_M$  为螺纹最大预紧力。

## 3 工程验证

### 3.1 工程计算

以某核电废液收集处理设备为例，设备设计有进水口、溢流口、排空口、呼排口、循环口、排水口等现场焊接接口，接口管径涵盖  $D14$ 、 $D21.3$ 、 $D33.4$ 、 $D60.3$ 、 $D73$ 、 $D89$ 、 $D114.3$  等多种规格。接管材料为 022Cr19Ni10 不锈钢，O 形橡胶圈材料选用丁腈橡胶，硬度  $H_r$  取为 70 (IRHB 硬度)，最大抗拉强度  $\sigma_0$  取为 10 MPa (按机械设计手册)；接管材料与橡胶材料按干摩擦系数，取  $f_0$  为 0.65；安全系数考虑实际工况下螺杆及固定件自重及管口方位等的影响，取  $S_0$  为 4；螺杆材料为 06Cr19Ni10，常温下材料屈服极限  $R_M$  为 137 MPa；设备充氮设计压力  $P_c$  取为 0.1MPa，以工艺试验选定的  $D14 \times 2$ 、 $D89 \times 3.05$ 、 $D114.3 \times 6.02$  三种接管规格为代表的计算数据和校核结果见下表 1：

表 1 某核电项目 O 形圈密封强度工程计算数据

管子规格	数据	螺纹规格	$D_1$ (mm)	$D_0 \times d_0$ (mm)	$n_0$	$\epsilon$	$[\sigma_0]$ (MPa)	$S_0$	$D_c$ (mm)	$f_0$	$b$	$a$ (mm)
$D14 \times 2$		M6×1	6.4	6.3×1.8	4				10		0.675	1.2
$D89 \times 3.05$		M20×2.5	64	62×10	1	25%	10	4	82.9	0.65	3.75	6.667
$D114.3 \times 6.02$		M24×3	84	82×10	1				102.26		3.75	6.667

管子规格	数据	$S_a$ (mm)	$S_b$ (mm)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$P_M$ (MPa)	$F_p$ (N)	$F_f$ (N)	$F_f > \frac{F_p \times S_0}{n_0}$	$F_M$ (N)	$\sigma_R$	$\sigma_R < [\sigma_0]$
$D14 \times 2$		0.9	0.893	28		7.85	58.6	合格	1438	7.76	合格
$D89 \times 3.05$		4.725	4.694	1222	3.22	540	2882	合格	18212	8.36	合格
$D114.3 \times 6.02$		4.565	4.91	1577		821	3673	合格	26225	9.82	合格

### 3.2 试验验证

为验证上述计算结果，项目开展了专项试验论证。根据项目结构特点，选取三种规格，分别对D50以下、D50以上和带有弯头的管接头的密封强度进行验证。密封强度验证试验简图见图6：

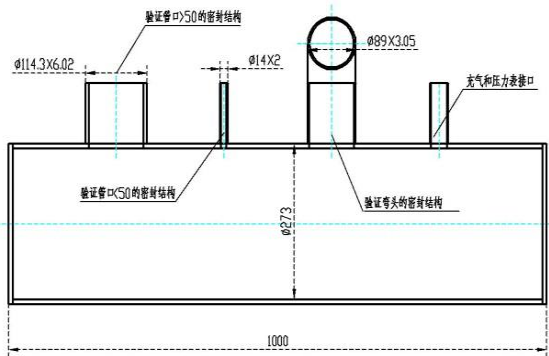


图6 密封强度验证试验简图

当密封结构组装好后，密封强度验证按以下步骤进行：

(1) 进行短期验证。排完内部空气后，向工装设备中充入氮气和氦气，进行氦检漏，并观察压力表情况。如果出现异常，则进行长期验证；

(2) 长期验证时保压至少24小时，每隔2小时观测并记录压力表值变化情况；

(3) 数据异常时立即分别对各管口进行氦检漏，寻找泄漏源，可先对密封装置重新进行加固，再按照步骤(1)和(2)重复进行验证；

(4) 长期验证记录数据平稳，无大幅波动，则密封强度合格；按照步骤(3)反复5次以上，仍发生泄漏时，则密封强度不合格。

按项目要求保压值(0.02~0.05 MPa)，试验压力表量程选用0.06 MPa，初始充氮压力值约为0.054 MPa。试验长期验证数据记录值见下图7所示。24小时内氮压值变化率约为1%，综合温差、气候对O形圈性能的影响，可论证密封强度计算结果可靠。

(上接第43页)

装在列车上进行试运行考核。该产品的成功研制，为公司同类型永磁牵引电机设计提供了宝贵经验。

#### 参考文献：

[1] 沈本荫. 牵引电机[M]. 北京：中国铁道出版社，2010.8

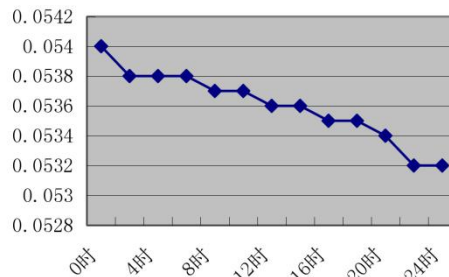


图7 试验记录数据示意

## 4 结语

作为工程中常用的气体、液体机械密封材料，O形橡胶圈具有高度非线性特点。一般在工程应用时，均根据工程经验、试验或应力分析进行强度验算。本文通过对O形圈在设备充氮运输和贮存工况下，对其与管壁接触的最大静摩擦力和轴向受压承受的当量压应力的受力理论分析和计算，介绍了一种对O形圈密封强度和有效性的理论计算和校核方法，对同类型低压和静压密封工况下的O形圈选型和设计，具有一定的指导意义。同时，本文方法仅限于对O形圈本身的密封性能和有效性而言。在实际低压和静压工况，如设备充氮运输和贮存工况下的密封整体结构设计时，还应考虑管口方位、密封结构自重及运输外力等的影响，本文所涉及的设计原理也可对相应结构的设计提供一定计算的依据。

#### 参考文献：

[1] 刘健, 仇性启, 薄万顺等. 橡胶O形密封圈最大接触应力数值分析[J]. 润滑与密封, 2010, 35(1):41-44  
 [2] 刘兴玉, 张新奇, 余巍等. O形圈密封设计[J]. 液压气动与密封, 2013, 33(6):73-75  
 [3] 邓向彬, 黄乐, 向宇等. 橡胶O形圈最大接触压力、IRHD硬度和压缩率之间的函数关系研究[J]. 橡胶科技, 2019, 17(3): 132-135  
 [4] 魏列江, 韩小霞, 熊庆辉等. O形圈密封沟槽倒角半径对密封性能的影响[J]. 液压气动与密封, 2016, 36(3):72-75

[2] 陈致初, 李益丰, 符敏利. 永磁同步牵引电动机的特殊性[J]. 大功率变流技术, 2012(3):25-30  
 [3] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997  
 [4] 何思源. 全封闭永磁同步牵引电动机冷却系统设计[J]. 大功率变流技术, 2012 (3):48-53

# 优乐高电站全流道 CFD 分析及转轮刚强度计算

张文斌 朱焕林

东方电气集团东风电机有限公司, 成都 611731

**摘要:** 本文使用 CFD 分析软件 FLUENT, 对波黑优乐高电站在最高水头、额定水头及最小水头三种运行工况下进行了全流道数值模拟。通过分析, 获得了三种工况下全流道的压力分布、速度分布、叶片力矩值以及叶片表面应力分布。然后进行流固耦合计算, 将叶片表面应力分布加载至转轮叶片表面, 实现了转轮的刚强度分析。通过全流道 CFD 分析及转轮刚强度计算结果表明, 三种工况下流道压力及速度分布合理、水轮机出力满足额定功率的设计值, 转轮强度足够, 能够满足优乐高电站安全稳定运行。

**关键词:** 水轮机; CFD 分析; 输出功率; 转轮强度

中图分类号: TK730

文献标志码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0058-04

## CFD Analysis of Full Flow Channel and Strength Calculation of Fluid Solid Coupling of Runner in ULOG Power Station

ZHANG Wenbin, ZHU Huanlin

(DEC Dongfeng Electric Machinery Co.,Ltd, 614800, Leshan, Sichuan, China)

**Abstract:** In this paper, CFD analysis software is used to simulate the full channel of ULOG Hydropower Station under three operating conditions: maximum head, rated head and minimum head. Through the analysis, the pressure distribution, velocity distribution, blade torque and blade surface stress distribution of the full channel under three working conditions are obtained. Then, the fluid solid coupling calculation is carried out, and the stress distribution on the blade surface is loaded onto the blade surface of the runner to realize the stiffness and strength analysis of the runner. The results of full channel CFD analysis and runner stiffness and strength calculation show that under the three working conditions, the pressure and speed distribution of the channel are reasonable, the turbine output meets the design value of rated power, and the runner strength is sufficient to meet the safe and stable operation of ULOG Hydropower Station.

**Key words:** turbine; CFD analysis; output power; strength of the runner

波黑优乐高电站是我公司设计的高水头混流式水轮发电机组, 电站基本参数: 转轮型号 HLD316a-LJ-142, 最高水头: 119.67 米, 额定水头: 109 米, 最小水头: 96.97 米, 额定转速: 500rpm, 转轮直径 1.42 米。本文通过 CFD 对水轮机全流道进行最高水头、额定水头及最低水头工况额定出力时的流场进行仿真分析, 将三种工况 CFD 分析获得的叶片表面压力加载到转轮叶片表面, 而后对转

轮进行刚强度分析计算, 获得了转轮在最高、额定及最低水头下的转轮应力情况。

### 1 水轮机全流道 CFD 分析

在 CFD 分析软件 FLUENT 中流动控制方程为基于雷诺平均的 N-S 方程, 定常计算采用标准  $k-\epsilon$  湍流模型, 非定常计算应用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型。湍流模型的选择在水轮机内部流场计算中十分重要。

收稿日期: 2021-11-29

**作者简介:** 张文斌 (1984—), 男, 2010 年毕业于兰州理工大学热能与动力工程专业, 本科, 高级工程师。现在东方电气集团东风电机有限公司技术开发部主要从事水轮机设计及有限元分析工作。

标准  $k-\varepsilon$  模型已大量应用于许多复杂流场的计算。进行流动计算的区域为水轮机蜗壳进口到尾水管出口的整个流道，如图 1 所示。

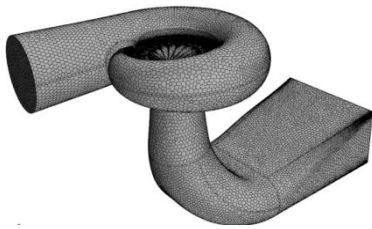


图 1 水轮机全流道 CFD 分析网格模型

本文采用标准  $k-\varepsilon$  模型，通过 GMBIT 和 TGRID 对计算区域进行离散。方程采用二阶迎风差分格式。采用 SIMPLE 算法进行压力和速度耦合计算。根据水轮机模型综合特性曲线及设计水头给定分析模型边界条件：蜗壳进口处速度，方向垂直正交于蜗壳进口；计算前出口速度和压力未知，出口采用自由出口边界条件；在固壁处采用无滑移边界条件，并在近壁区采用标准壁面函数。分别对水轮机额定水头、最小水头及最大水头进行了 CFD 全流道分析，获取了全流道流线、蜗壳横截面压力及速度分布、流道竖截面压力及速度分布、叶片正背面压力及速度分布、叶片正背面流线分布。本文仅展示额定水头工况分析结果各图形。

### 1.1 额定水头工况

水头 109 米，转速 500 rpm，额定出力 17 570 kW，导叶开度 27.3 度，流量 17.52 m<sup>3</sup>/s，计算结果见图 2~图 12。

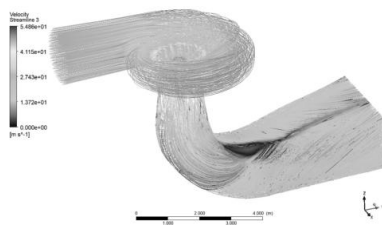


图 2 额定水头速度流线图

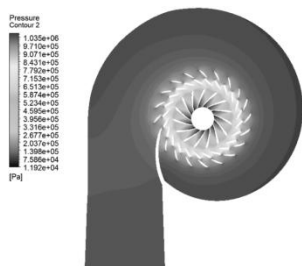


图 3 额定水头蜗壳横截面压力分布图

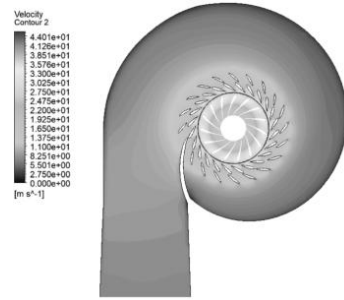


图 4 额定水头蜗壳横截面速度分布图

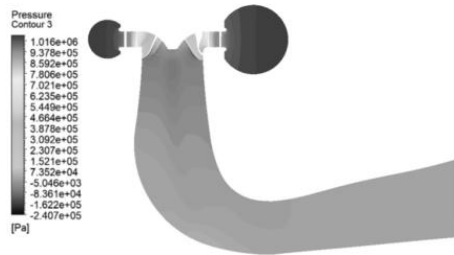


图 5 额定水头流道竖截面压力分布图

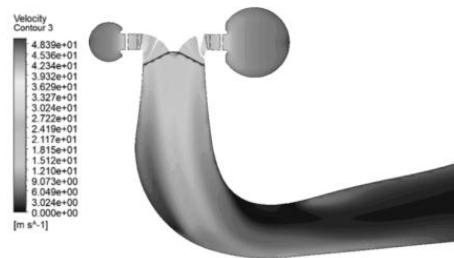


图 6 额定水头流道竖截面速度分布图

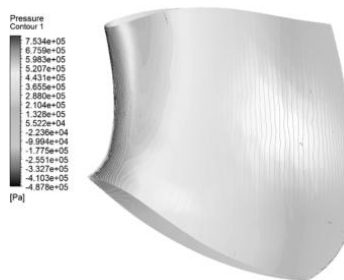


图 7 额定水头叶片正面压力分布图

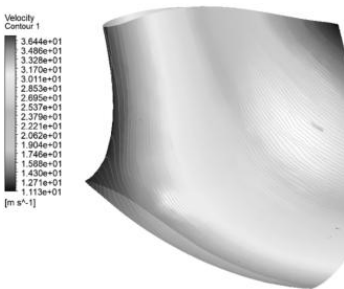


图 8 额定水头叶片正面速度分布图

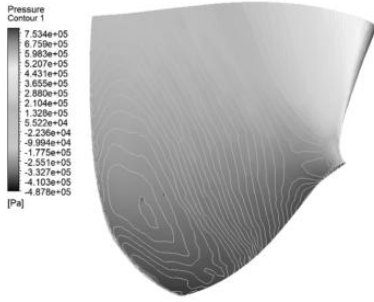


图9 额定水头叶片背面压力分布图

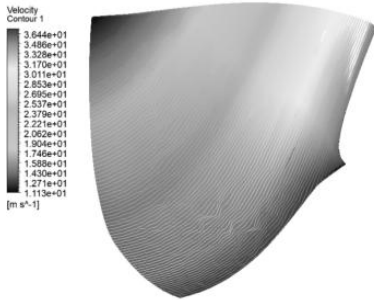


图10 额定水头叶片背面速度分布图

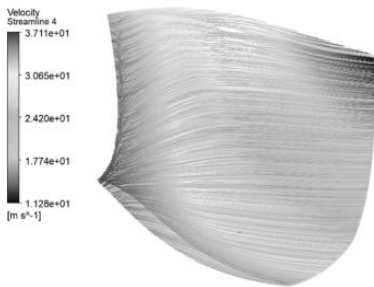


图11 额定水头叶片正面流线分布图

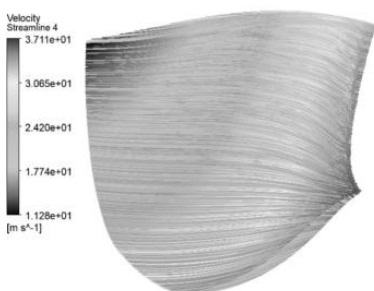


图12 额定水头叶片背面流线分布图

从图2~图12可知：水轮机在额定水头工况下运行时，流道内最大水流速度为54.86 m/s，最大压力为1.035 MPa，叶片表面最大压力为0.753 MPa，叶片表面最大过流速度为36.44 m/s。

## 1.2 最小水头、最大水头工况分析结果

最小水头工况：水头96.97米，转速500 rpm，额定出力16 400 kW，导叶开度32.5度，流量18.78 m<sup>3</sup>/s。计算结果：流道最大水流速度53.1 m/s、流道最大压力0.936 MPa、叶片表面最大压力0.813 MPa、叶片表面最大流速37.23 m/s。

最大水头工况：水头119.67米，转速500 rpm，额定出力17 570 kW，导叶开度22.1度，流量15.77 m<sup>3</sup>/s。计算结果：流道最大水流速度62.77 m/s、流道最大压力1.156 MPa、叶片表面最大压力0.678 MPa、叶片表面最大流速36.46 m/s。

## 2 水轮机转轮输出功率计算

通过以上三种工况CFD流场分析，可获得转轮叶片表面上旋转力矩值，进而计算出水轮机转轮输出功率，详见下表1。

表1 转轮叶片表面力矩及功率计算表

工况	叶片旋转力矩(N/m)	转速(rpm)	计算功率(MW)	设计功率(MW)	计算功率(%)
最小水头	320 553.82	500	16.785	16.4	102.4
额定工况	343 524.94	500	17.987	17.57	102.4
最大水头	342 245.83	500	17.92	17.57	102

从表1可以看出，通过CFD分析软件对水轮机全流道仿真分析计算出的水轮机在最小、额定及最大水头下输出功率分别为16.785 MW、17.987 MW、17.92 MW，由于水轮机最小水头工况时运行时处于水轮机模型5%功率的限定线内，所以输出功率未达到额定功率值，但以上三种工况时水轮机出力都满足设计值要求。

## 3 CFD结果分析

(1) 通过k-ε和N-S方程为模型模拟分析了不同工况下HLD316a-LJ-142混流型水轮机流道内各部件压力、速度的规律变化。从图2~图12结果可以看出：叶片压力分布均匀，速度矢量没有撞击，流线分布均匀、流畅；蜗壳压力分布均匀，流线分布均匀、流畅；尾水存在涡旋，流线分布略有混乱，不过这都是高水头尾水变化情况下水动力学的正常表现。研究表明，该机组转轮叶片表面压强及流

速在额定工况下表现理想。同时，其他工况道内各部件表面压强及流速表现与额定工况存在一定的差异，说明 CFD 能较好地反映出流道的特征。

(2) 通过 CFD 对水轮机全流道仿真分析计算出的水轮机在三种工况下输出功率都满足设计要求。由于水轮机最小水头工况时运行时处于水轮机模型 5%功率的限定线内，所以输出功率未达到额定功率值，但满足设计功率值要求。

#### 4 水轮机转轮刚强度计算

由于转轮几何形状比较复杂，转轮叶片表面为三维扭曲曲面，为获得精确的解，本转轮有限元模型采用高阶三维 10 节点的四面体结构单元进行分析。转轮材料为 ZG06Cr13Ni5Mo 合金钢，其材料属性特征见表 3 所示。

表 2 转轮材料特性

材料	弹性模量 (GPa)	泊松比	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	屈服强度 (MPa)	强度极限 (MPa)
ZG06Cr13Ni5Mo	210	0.3	7 830	550	750

通过 CFD 分析对水轮机全流道分析获得的最小水头、额定水头、最高水头工况下转轮叶片表面应力分布情况；利用 ANSYS 分析软件将以上三种应力分布加载至转轮叶片表面，再对转轮施加额定转速 500rpm 边界条件，实现转轮的刚强度分析。本文仅展示额定水头工况分析结果图形，见图 13~图 14。

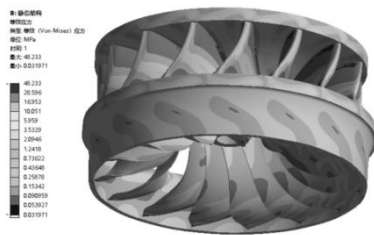


图 13 转轮等效应力分布图

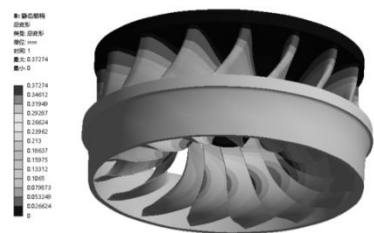


图 14 转轮综合变形分布图

从图 13~图 14 可知：转轮在额定水头工况下运行时，转轮最大等效应力为 48.233 MPa、位于工作面靠近下环位置；最大综合变形为 0.373 mm，位于叶片出水边中间位置。

最小水头和最大水头工况下运行时转轮强度分析结果见表 3。

表 3 转轮刚强度分析结果

运行工况	等效应力 /MPa	综合变形 /mm	判定依据	判定结果
最小水头	53.465	0.461		
额定水头	48.233	0.373	550/5=110 (MPa)	应力<110 (MPa) 合格
最大水头	43.059	0.291		

备注：1、判定依据 GB/T15468 中相关条款；

2、转轮材料屈服强度： $\delta=550$  MPa。

#### 5 结语

通过以上水轮机全流道 CFD 及转轮刚强度有限元分析可知：该电站水轮机在各工况下转轮及过流通道内部流态都顺畅合理，符合高水头机组水头变化情况下水动力学的正常表现，表明该水力设计方案具有良好的水力性能，水轮机输出功率满足设计要求，水轮机转轮强度最大等效应力满足设计要求，且机组能高效稳定运行。

#### 参考文献：

- [1] 赖喜德, 徐永. 叶片式流体机械动力学分析及应用[M]. 科学出版社, 2017 年 3 月
- [2] 王利英, 石祥钟, 赵卫国. 混流式水轮机特性的数值模拟分析 [M]. 科学出版社, 2019 年 3 月
- [3] 廖伟丽, 李建中. 水轮机蜗壳内流动的数值研究[J]. 西安理工大学学报, 2002(1):5-9
- [4] Saeed Moaveni. 有限元分析-ANSYS 理论与应用[M]. 欧阳宇, 王拯译. 北京: 电子工业出版社, 2004 年 1 月
- [5] 徐纪方, 王会璇, 齐学义. 水力机械强度计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989

# 核电稳压器翻转工具设计

李亭 王刚 李东铭 麻琼伟 冯浩

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455

**摘要:** 核电稳压器是大型立式设备, 运达现场后需从水平状态翻转到竖直状态进行安装。本文设计了用于核电稳压器现场翻转的专用工具, 对翻转过程的危险工况进行了安全性分析和评估, 并开展了 1.1 倍翻转载荷下全过程模拟翻转试验。试验结果表明, 该翻转工具能够承受翻转过程载荷并实现稳压器辅助翻身功能, 可用于现场设备翻身。

**关键词:** 稳压器; 翻转工具; 载荷试验

中图分类号: TM31

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0062-02

## Design of the Overturn Device for Nuclear Pressurizer

LI Ting, WANG Gang, LI Dongming, MA Qiongwei, FENG Hao

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

**Abstract:** Pressurizer is a large vertical equipment, which shall be erected when transported to nuclear plant site. This paper designs an overturn device to assist erecting the pressurizer on site. A safety analysis and evaluation are performed for the most dangerous conditions, and an erect experiment is performed which simulates the whole process of the erecting operation under 1.1 times loads. The result shows that the overturn device designed is capable of bearing the erecting loads and assisting the erecting operation.

**Key words:** pressurizer; overturn device; loading test

核电稳压器是大型立式设备, 运达现场后需从水平状态翻转到竖直状态进行安装。海阳 AP1000 核电项目现场利用 3 台起重机翻转稳压器, 首先由 3 台起重机将稳压器吊离地面, 再由其中 2 台起重机吊住设备底部作为支点, 另一台起重机提供动力在空中进行翻转。此种利用多台起重机进行抬吊空翻的方式翻转, 由于设备在翻转过程中做三维的空间运动, 涉及到多台起重机之间的载荷匹配问题及收、放绳引起的动载荷冲击问题等<sup>[1]</sup>, 对起重机操作人员要求比较高, 翻转操作的安全风险也比较大。因此为稳压器设计专用翻转工具, 可提高现场翻转操作的安全性和效率。

### 1 翻转工具设计

本项目稳压器总重 127 吨, 包装后外形尺寸约

为 15 700 mm×3 900 mm×4 100 mm。稳压器采用双鞍座支撑, 卧式发运, 到达现场后需利用专用翻转工具进行辅助翻身。如稳压器采用同类大型核电产品如 AP1000 反应堆压力容器所用的 J 型架进行辅助翻身<sup>[2-3]</sup>, 一方面也需要多台起重机辅助, 另一方面稳压器底部的电加热器及波动管等结构易受磕碰。故本项目参考 AP1000 蒸汽发生器翻转方案<sup>[4]</sup>, 翻转工具拟在稳压器底部设置旋转支点, 通过起重机起吊稳压器上部实现翻转。为便于现场操作, 翻转工具与设备包装及存放支座一起设计, 翻转工具兼具运输及存放过程部分支撑功能; 设备发运时翻转工具随设备一起发运, 减少了现场装拆环节。设计的翻转工具如图 1 所示。

稳压器上部设置鞍座进行支撑, 底部采用框架对电加热器及脉动管进行防护; 底部支撑鞍座与翻

收稿日期: 2021-05-31

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



转架设计为一体式结构, 翻转时一体式翻转支架提供支点, 起重机连接稳压器上部耳轴起吊, 设备沿底部翻转支架进行旋转直至到达竖直位置, 最终实现从水平到竖直的翻转。

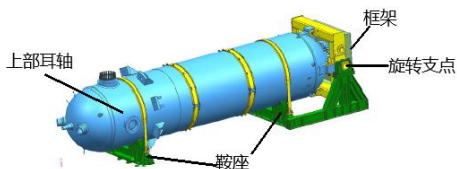


图1 翻转工具示意图

## 2 翻转过程安全性分析

稳压器翻转过程可能存在的风险, 一是在上部起吊时, 作为基础支撑的翻转支架在起吊力的水平分量作用下发生滑移; 二是在上部起吊时翻转支架在起吊力的水平分量作用下发生倾覆。对此分析如下。

稳压器在整个翻转过程中要求起吊操作平稳、缓慢, 因此可视为准静态过程; 翻转过程中吊绳处于竖直状态, 允许的最大偏差 $\theta$ 不大于 $5^\circ$ (以下按 $5^\circ$ 为进行分析)。在整个翻转过程中, 稳压器的重量载荷 $G$ 由吊绳和翻转工具共同承担。将稳压器所有载荷分解为水平方向和竖直方向, 如图2所示, 考虑力矩平衡<sup>[5]</sup>, 则

$$G \times (L_2 \times \cos \alpha + R \times \sin \alpha) = F_V \times (L_1 \times \cos \alpha + R \times \sin \alpha) \quad (1)$$

其中:  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $R$ 为结构尺寸,  $\alpha$ 为稳压器翻转时与水平地面形成的夹角。

起吊载荷竖直分量 $F_V$ 及翻转工具支撑载荷 $N$ 为:

$$F_V = G \times \frac{L_2 \times \cos \alpha + R \times \sin \alpha}{L_1 \times \cos \alpha + R \times \sin \alpha} = G \times \frac{L_2 + R \times \tan \alpha}{L_1 + R \times \tan \alpha} \quad (2)$$

$$N = G - F_V = G \times \frac{L_1 - L_2}{L_1 + R \times \tan \alpha} \quad (3)$$

起吊载荷水平分量 $F_H$ 为

$$F_H = F_V \times \cot 5^\circ \quad (4)$$

在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 翻转角度 $\alpha$ 越大,  $\tan \alpha$ 越大, 翻转工具支撑载荷 $N$ 越小, 起吊载荷竖直分量 $F_V$ 越大, 起吊可能造成的水平力 $F_H$ 越大; 同时因翻转工具支撑载荷 $N$ 逐渐变小, 即对地面的压力减小, 摩擦力相应变小。因此翻转角度越大, 翻转工具越容易滑动或倾覆。

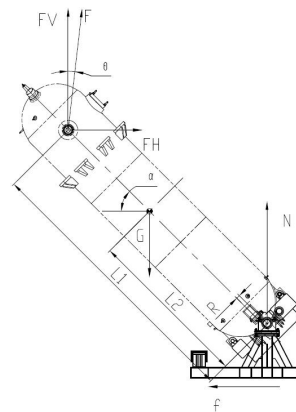


图2 翻转过程受力分析

假设翻转工具仅放置于地面, 不采取任何加固措施, 则在翻转过程中当吊绳力的水平分量 $F_H$ 大于翻转工具与地面间的摩擦力 $f$ 时, 翻转工具即可能出现滑动。翻转工具不发生滑动校核条件为:  $f > F_H$ 。

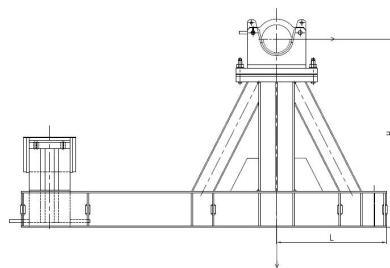


图3 翻转倾覆力矩及抗倾覆力矩力臂

当翻转工具与地面间的摩擦力足够大或翻转工具滑动被阻挡时, 在水平载荷很大的情况下, 翻转工具可能倾覆(图3)。

水平力最大倾覆力矩为

$$M_H = F_H \times H; \quad (5)$$

抗倾覆力矩为

$$M_N = N \times L; \quad (6)$$

翻转工具不发生倾覆校核条件为:  $M_N > M_H$ 。

采用式(5)及式(6)进行设计, 确定翻转工具关键尺寸 $L$ 及 $H$ , 当翻转工具不发生滑动条件及不发生倾覆条件均满足时, 用于翻转即可避免发生风险。

## 3 载荷试验验证

为验证翻转工具的功能及承载能力, 对翻转工具开展了1.1倍翻转载荷下全过程模拟翻转试验。试验时在设备内部加水作为配重, 实现1.1倍翻转载荷; 采用行车起吊稳压器上部耳轴, 把稳压器从水平状态翻转到竖直状态, 检查后再按原路径回落

(下转第82页)

# 双钨极氩弧焊技术的发展及其在核承压设备耐腐蚀层堆焊中的应用

俞雄军 苏斌

东方法马通核泵有限责任公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 双钨极氩弧焊技术 (T-TIG) 是近年在常规钨极氩弧焊基础上发展起来的一种高质量、高效率的新兴焊接技术, 具有电弧电压低、焊接熔深浅、母材稀释率低、焊接效率高等特点。这种新型焊接技术在保留传统氩弧焊的良好焊接质量和坡口适应性的同时, 显著提高生产效率、降低制造成本, 进一步拓展了钨极氩弧焊技术的应用空间。本文论述了双钨极氩弧焊技术的产生和发展历程, 并结合最新的应用案例进一步阐述这种新工艺在核承压设备耐腐蚀层堆焊过程中的明显优势。

**关键词:** 双钨极; 承压设备; 耐腐蚀层

中图分类号: TG444

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0064-05

## The Development of T-TIG and the Application on Corrosion Resistance Layer for Nuclear Pressure Equipment

YU Xiongjun, SU Bin

(Framatome-Dongfang Nuclear Pumps Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** Twin-tungsten inert gas welding (T-TIG) is a novel high-quality and high-efficiency welding procedure based on the traditional TIG. This technology is characterized by a lower arc pressure, shallower melting depth, lower dilution ratio and higher efficiency. Besides the same weld quality and welding groove compatibility as the traditional TIG, this technology may increase the efficiency and decrease the cost in production, which may enlarge its further application. This paper describes the origin and development of T-TIG, and then further analyzes its obvious advantage to realize corrosion resistance layers for nuclear pressure equipment with several engineering cases in recent years.

**Key words:** twin-tungsten; pressure equipment; corrosion resistance

以核电厂压力容器为代表的各种承压设备, 出于对流体介质的防腐和防辐射脆化要求, 需要对设备内表面堆焊一层奥氏体不锈钢耐腐层。这些设备包括一回路中的反应堆压力容器、稳压器和蒸汽发生器, 二回路中的低压加热器、高压加热器、汽水分离再热器等<sup>[1]</sup>。对于大面积堆焊而言, 焊条电弧焊和丝极自动堆焊不但效率低, 堆焊层内部和表面质量差, 而且在堆焊层与基层母材结合处往往容易产生缺陷; 带极堆焊虽然具有效率高、堆焊层内部质量均匀、堆焊表面平整光滑等特点, 但是由于带极堆焊工艺本身的局限性, 接头组织粗大和坡口适

应性问题一直是焊接科技人员努力探索解决的问题。双钨极耦合电弧工艺为解决这些问题提供了一种新的工艺方法, 本论文简要对双钨极耦合弧焊这种新型焊接工艺方法的发展进行回顾梳理, 同时介绍其在核电工程耐腐蚀层堆焊的实际应用。

### 1 双钨极氩弧焊的产生及基础研究

双钨极耦合电弧焊起源于日本, 兼具单钨极氩弧焊良好的成型质量和高速效率的特点。1998年, 日本IHI株式会社的研究人员 Yamada 和 Kobayashi 等<sup>[2-3]</sup>,

收稿日期: 2022-04-18

**作者简介:** 俞雄军 (1982-), 男, 2006年毕业于西南交通大学材料科学与工程专业。现在东方法马通核泵有限责任公司从事核电项目的冷却剂主泵焊接工艺工作及核级焊接人员资质管理工作。

为了提高含 Ni 9%的液化天然气储藏罐体的厚壁钢结构焊接效率,首次应用双钨极耦合氩弧焊在满足电弧压力的条件下,通过提高焊接电流,最终达到提高焊丝熔敷率的目的,并将这一方法成功地应用于大型压力容器罐的全位置焊接,克服了传统埋弧焊的缺点,提高了焊接生产效率。

从 2006 年开始,哈尔滨工业大学吴林教授团队在国内率先展开双钨极氩弧焊的基础研究和工艺特性研究,并形成了系列研究成果。王树保等<sup>[4-5]</sup>对这种新焊接方法的电弧电流、电压压力分布、温度场和接头成型特性展开了系统研究。特别地,作者用双钨极氩弧焊枪及焊接电源在 Q235 低碳钢板和 304 奥氏体不锈钢板上展开试验。冷雪松等<sup>[6-9]</sup>在团队焊接工艺特性研究基础上,进一步对近距离双钨极之间的电弧相互作用的物理特性进行细致的分析,并研究了耦合电弧对熔池的作用、焊缝成型质量和焊接效率的影响。研究发现双钨极氩弧焊在保持传统氩弧焊原有优点的基础上,可以承载更高的电流,适合于全位置焊接的需要,明确了这种焊接方法相对于传统方法的主要优点,例如①高熔敷速度,平焊和立焊时的熔敷速度可分别达到 50 g/min 和 34.8 g/min,比传统氩弧焊提高 20 %;②坡口的适应性强,X 型坡口仅需 40°左右,相对于埋弧焊坡口横截面积减小了 15 %,从而减少了所需的熔敷金属量;③相对于传统的埋弧焊或熔化极电弧焊,双钨极氩弧焊具有更加稳定的焊接过程,表面成形良好,省去了背面清根及焊后打磨等工序,提高了生产率,改善了噪音和重尘的生产环境。此外,金周鑫等<sup>[10]</sup>和张丹丹<sup>[11]</sup>对双钨极氩弧焊的电弧行为和电弧压力做了进一步的研究。

随着计算机技术的不断发展和数值计算理论的逐步完善,数值模拟逐渐成为科学研究和工程领域先进的分析工具。张广军等<sup>[12-13]</sup>和顾学亮<sup>[14]</sup>对双钨极氩弧焊的热循环过程进行了数字化模拟研究,建立了适用于双钨极氩弧焊的热源模型,从而用数字模拟技术研究了双钨极氩弧焊钨极间距、焊接电流等参数对焊缝成形的影响规律。但是由于 Marc 软件的局限性,未能充分考虑熔池中液态金属的对流运动,只对获得的焊接温度场进行分析,只能间接判断出焊缝的熔深、熔宽。张翔等<sup>[15]</sup>基于前人对双钨极氩弧焊焊接过程的研究,使用有限体积法流

体计算软件 Fluent 建立了更加符合双钨极氩弧焊的焊接热源模型,充分考虑了熔池中液态金属的流动,对焊接熔池热场、流场进行了模拟。王新鑫等<sup>[16-17]</sup>针对双钨极耦合电弧,采用 CFD 软件 FLUENT 建立了双钨极耦合电弧满足的稳态三维模型,实现了对所建立模型的数值求解。该研究成果相比于此前,模拟计算得到了不同钨极间距和弧长下耦合电弧的温度场、流场、电弧压力和电流密度等的分布情况。李桓等<sup>[18]</sup>通过建立三维统一模型,利用磁流体动力学理论,基于 FLUENT 软件对双钨极的、电弧、阳极三个区域进行了统一求解,最终获得双钨极电弧压强的分布状况和压强场。

胡玉堂<sup>[19]</sup>以双钨极耦合电弧为研究对象,用光谱诊断的方法分析了耦合非对称电弧等离子体发射系数与光谱强度之间数学转换方法及计算机软件的开发,进行了耦合电弧等离子体谱强度空间分布的多角度扫描测量,完成了双钨极耦合电弧温度场的光谱诊断。

近五年来,吴统立等<sup>[20-23]</sup>聚焦双钨极氩弧焊接头接头质量,持续在高频双钨极氩弧焊的工艺、电源和电弧机理等方面进行了系统研究。研究发现,高频脉冲电流可以引起明显的电弧收缩效应,提高电弧的稳定性,并对电弧力、电弧挺度等产生影响,有利于改善和提高焊接质量;同时脉冲电流焊接时,周期性变化的电弧压力对熔池的搅拌作用能够破碎枝晶,增加熔池的结晶中心,促进焊缝晶粒细化,从而提高焊缝力学性能。

## 2 双钨极氩弧焊在国内核电承压设备上的实际应用

陈志林等<sup>[24]</sup>在 Cr-Mo 耐热钢小接管内壁进行双钨极氩弧焊堆焊过渡层 ER309L 和耐腐蚀层 ER347L,通过控制适当的焊接热输入,堆焊层获得了良好的焊缝成形及稳定的合金过渡,焊缝组织性能优良。该研究是双钨极耦合电弧在核电工程上潜在应用的首次报道。

马驰原等<sup>[25]</sup>在总结双钨极氩弧焊的熔覆效率、坡口适应和焊缝成型等优点后,分别在 Q235、2.25Cr1Mo0.25V 材料上进行了 ER309I+ER347I 耐腐蚀层堆焊试验及焊接工艺评定,并按照加氢设备的生产工程技术条件检验堆焊层各项理化性能,分

析了双钨极氩弧焊堆焊技术在压力容器制造中的可行性。研究不仅验证了双钨极氩弧焊的熔覆效率数倍于单钨极,而且也按照压力容器的制造标准要求完成了各项破坏性试验和无损检验。因此,作者认为双钨极氩弧焊技术不仅熔敷效率高、焊接质量好,同时设备使用更加便捷、操作更加灵活,可以用于全位置焊接,并典型的应用场合。例如,以卸料管、冷氢管、热偶管、弯管等工件较小尺寸管状工件,由于旋转方便,双钨极氩弧焊对比于药芯焊丝气体保护焊、单钨极氩弧焊和手工电弧焊这些焊接方法,其焊接效率能提高四倍;其次,可以旋转的较大尺寸管板类工件,应用双钨极氩弧焊接的焊接质量比带极堆焊要好许多;第三,尺寸较大、形状复杂工件的堆焊,如核反应堆压力容器的进、出口接管等,此类工件堆焊部位多,焊接线路包括不规则的椭圆形和马鞍形,现有焊接施工多采用带极堆焊、普通氩弧焊和手工电弧焊。而用双钨极氩弧焊替代时可令焊枪沿着设定好的轨迹运动施焊,能够有效减少工件装配和翻转次数,提高生产效率。总之,除特殊结构外,双钨极氩弧焊能够代替绝大多数平焊位、横焊位的单钨极氩弧焊、气体保护焊或手工电弧焊,能够兼顾焊接质量和焊接效率。周彦林等<sup>[26]</sup>采用双钨极高效焊接技术,通过摆动焊枪的方式在加氢反应器低合金高强度 SA516-70N 基材表面堆焊不锈钢过渡层和耐腐蚀层,通过系列试验分析,各项试验均符合相关标准。本研究特别值得注意的是,焊枪的摆动对熔池起搅拌熔池的作用,可以促使形成树枝晶并且晶粒较小,这是解决堆焊层显微晶粒粗大问题的有效手段。因此,研究认为这种高效焊接方法适用于在低合金钢表面堆焊奥氏体不锈钢。李亚亚等<sup>[27]</sup>在石油炼制反应器的内壁奥氏体不锈钢耐腐蚀层堆焊各类方法中,肯定了带极堆焊的效率最高,钨极氩弧焊的质量最好。在近年出现的各类新型钨极氩弧焊方法中,作者分别在 Q345R 和 12Cr2Mo1V 试件上堆焊过渡层 ER309L 和耐腐蚀层 ER347L,通过系列试验探索了双钨极氩弧焊在压力容器制造中的可能性。研究表明,双钨极氩弧焊不仅效率高,焊接质量高,而且设备使用更加便捷,操作更加灵活,可以用于全位置的焊接。其典型应用场合包括较小尺寸管件的堆焊、较大尺寸的管板堆焊和尺寸较大且形状复杂的堆焊,

这些应用均能发挥双钨极氩弧焊的高质量和高效率综合优势,特别是可以极大减少异形大型工件的装配和翻转次数,弥补了带极堆焊的不足之处。

可以看到,双钨极氩弧焊在耐腐蚀层堆焊中的应用探索逐渐从传统的石油化工行业延伸到核电工程行业,然而只有以下少数公开报道,而且集中在核电站承压设备耐腐蚀层堆焊应用上。

方迪生等<sup>[28-29]</sup>在镍基合金堆焊、不锈钢与低合金钢异种金属焊接组织和铁素体含量等方面进行了深入研究。该研究先后以核电站压力容器代表性材料 RCC-M 16MND5 和 ASME SA508 Gr3 为母材,首次将双钨极氩弧焊引入到核电工程,代替了传统的带极堆焊、电弧焊和常规氩弧焊,开启了双钨极氩弧焊在国内核电工程耐腐蚀层堆焊中的应用。同类的研究成果也出现在袁亮文等<sup>[30]</sup>研究成果中。

邹国伟等<sup>[31]</sup>以核电站反应堆压力容器的实际工程案例为载体对双钨极氩弧焊在核电工程上的工艺特性做了探索性研究。通过在核反应堆压力容器材质 SA508 Gr3 上堆焊过渡层 ER309L 和耐蚀层 ER308L,作者验证了双钨极氩弧焊在接头质量、显微组织(特别是稀释率)和熔覆效率展现出传统方法无法比拟的优势,例如基于该研究成果已经完成“华龙一号”压力容器接管大端马鞍面堆焊,成型美观,质量优秀,相同部件的堆焊工期由 10 天缩短为 5 天,效率优势显著。第一次在核电工程中验证了双钨极氩弧焊的坡口适应性,减少了焊接质量对工件焊接位置的依赖性,解决了带极堆焊在发展过程中一直面临的问题<sup>[32-36]</sup>,对于推动进一步在核电工程复杂曲面的耐腐蚀层堆焊应用具有非常重要的指导意义。因此,研究者认为双钨极点氩弧焊应用前景广阔,正是因为双钨极堆焊技术刚刚应用于核电设备的制造,在保证质量的前提下可以大幅降低制造成本、缩短制造工期,随着焊接技术、工艺、设备的逐步成熟,可推广应用于各种核电堆型、多种核电设备的堆焊工作。

郑建能等<sup>[37]</sup>以中国第三代核电技术“华龙一号”核电站冷却剂泵壳实际工程为例,首次系统研究了双钨极氩弧焊在复杂不规则表面上的耐腐蚀层堆焊应用。核电站主冷却剂泵是核岛设备制造技术最难的设备之一,因此成为最后实现国产化的核电站主设备。其泵壳是主冷却剂泵中最重大的承压边界,

因此部分技术流派的主泵泵壳通常要求其内壁堆焊一层耐中子辐照催化和硼酸腐蚀的奥氏体不锈钢耐腐蚀层。泵壳本体的母材材质牌号为SA508.Gr3, 由于该材料为合金钢, 不耐腐蚀和中子辐照催化, 因此泵壳本体内腔通常需要堆焊堆焊不锈钢 309L+308L 以防止在泵壳运行过程中母材发生腐蚀和脆化。各制造厂家在制造此类泵壳时, 考虑到内腔面积较小, 规则的区域多, 底座密封面、进水口、出水口没有变径区域, 内腔为圆柱体和平面组成通常采用的堆焊技术方案为规则区域采用带极堆焊, 非规则区域使用手工电弧堆焊。但是却存在诸多需要进一步改进之处, 例如堆焊需预热, 带极堆焊、手工电弧堆焊均需要操作人员进入泵壳内壁操作, 操作环境恶劣焊接操作人员劳动强度高, 焊接质量控制难度大; 堆焊层的表面容易在水压试验后的 PT 检测时出现点状显示缺陷等等。即使使用堆焊效率最高的带极堆焊, 如廖国平<sup>[38]</sup>所述, 内壁曲面堆焊必须采用变位器+堆焊机配合的方法才能完成, 封头装配要求高, 每道焊接后必须调整变位器, 使堆焊点处于水平位置。研究人员根据这些传统方法的局限性及“华龙一号”泵壳内壁极不规则的特点, 最终采用双钨极氩弧焊施焊。操作时, 通过数控系统设置合理的焊接轨迹, 辅之以无限回转技术和弧压跟踪技术, 实现了泵壳复杂内腔全自动堆焊, 取得了与以上研究相近的接头质量和熔覆效率, 成为双钨极氩弧焊首次用于大面积复杂曲面堆焊的工程实例, 研究人员据此认为全自动双钨极氩弧焊能够运用于其它复杂回转曲面工件的堆焊, 其原因在于通过工程案例再次验证了双钨极氩弧焊在坡口适应性方面的明显优势, 减少了传统带极堆焊不断调整焊接位置的周次和重新装配时间, 也减少了传统手工堆焊的堆焊层质量缺陷及其劳动强度, 对于推动核电工程耐腐蚀层堆焊具有借鉴意义。

东方法马通近期以 RCC-M 规范锰-镍-钼类合金锻钢为材料开发某华龙一号核电项目主泵泵壳。该泵壳与上述工程案例相比具有相近形状、尺寸和同类材质, 同属低合金组别, 因此在焊接材料、堆焊过程参数和耐腐蚀层性能方面与之具有较大的相似性。堆焊设备采用数控双钨极热丝 TIG 无限回转式内壁堆焊系统, 提升泵壳的焊层厚度精度。堆

焊过程采用机器人完成, 操作人员调整焊接机头回转中心与泵壳球面内壁中心重合后, 在高纯氩气的保护氛围中对球面内壁实施全方位自动堆焊, 大幅度提高了焊接效率并降低操作人员的劳动强度, 熔覆效率约为传统焊接 2~3 倍。焊后获得较人工施焊更精确的焊层几何形状, 其中厚度公差由人工焊接的 2~3mm 提高到 0.5~1 毫米, 母材和堆焊层之间的稀释率优化到 3%~10%, 从生产效率和焊接质量两个方面验证了双钨极氩弧焊技术在核承压设备制造中的优越性。

### 3 结语

双钨极氩弧焊技术虽然产生于国外, 但是我国对这种新型焊接方法的物理规律和工艺特性进行了系统的再创新研究, 为该技术的产业化应用尤其是核电行业应用打下了理论基础。在工程应用上, 目前以带极堆焊尤其是带极电渣堆焊和高速埋弧堆焊最普遍, 但是这种工艺方法在工件施工位置、接头微观组织和稀释率等方面仍然存在提升的空间。双钨极氩弧焊作为一种新型的焊接方法, 保留了钨极氩弧焊特有的高质量焊缝优点, 同时提高焊接效率, 是一种具有综合优势的焊接方法, 弥补了带极堆焊技术的局限性, 尤其在核电承压设备的复杂表面堆焊方面发挥出带极堆焊无法比拟的优势, 值得进一步推广。

### 参考文献:

- [1] 臧希年, 申世飞. 核电厂系统及设备[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [2] Yamada. Development of high efficiency TIG welding method[J]. JWS, 1998, 63:24-27
- [3] K. Kobayashi, M. Yamada, Fujishima. Welding of 9% Ni steel LNG storage tank TIG welding method[J]. JWS, 1999, 65:302-303
- [4] 王树保. 双钨极氩弧焊物理特性及工艺研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2006
- [5] 王树保, 张海宽, 冷雪松等. 双钨极氩弧焊工艺及焊缝成形机理分析[J]. 焊接学报, 2007(2):21-24+114
- [6] 冷雪松, 吴林, 张广军. 双钨极氩弧高速焊接[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(增 1):34-36
- [7] Leng Xuesong, Zhang Guangjun, Gao Hongming, et al. A study on twin tungsten TIG welding method 2006[J]. China Welding,

- 2006, 15(1):49-52
- [8] 冷雪松. 双钨极氩弧焊耦合电弧物理特性及焊接工艺研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2008
- [9] 冷雪松, 张广军, 吴林. 双钨极氩弧焊耦合电弧压力分析[J]. 焊接学报, 2006(9):13-16+113
- [10] 金周鑫, 茆庭瑞, 林长斌. 双钨极氩弧焊的电弧行为研究[J]. 设备管理与维修, 2019(6):120-121
- [11] 张丹丹. 关于双钨极氩弧焊耦合电弧压力分析[J]. 现代制造技术与装备, 2019(3):140-141
- [12] ZHANG Guangjun, LENG Xuesong, WU Lin. Physics characteristic of coupling arc of twin tungsten TIG welding[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2006, 16(4): 813-817
- [13] 张广军, 赵琳琳, 冷雪松. 双钨极氩弧焊焊缝成形的数值模拟[J]. 焊接学报, 2008(8): 29-31+114
- [14] 顾学亮. 双钨极氩弧焊电弧物理及工艺特性研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007
- [15] 张翔, 王宏, 李日升等. 双钨极氩弧焊焊接熔池流场及热场模拟[J]. 电焊机, 2013, 43(12):89-93
- [16] 王新鑫, 樊丁, 黄健康等. 双钨极耦合电弧数值模拟[J]. 物理学报, 2013, 62(22):228101
- [17] 王新鑫, 樊丁, 黄健康等. 双钨极 TIG 电弧-熔池传热与流动数值模拟[J]. 金属学报, 2015, 51(2):178-190
- [18] 李桓, 王飞, Y Cressault 等. 双钨极 TIG 电弧压强分布及其与等离子体喷射的关系[J]. 电焊机, 2017, 47(7):1-5
- [19] 胡玉堂. 双钨极耦合电弧温度场的光谱诊断[D]. 哈尔滨工业大学, 2009
- [20] 吴统立, 王克鸿, 杨嘉佳等. 高频复合双钨极氩弧焊方法与数字电源研制[J]. 焊接学报, 2018, 39(9):117-121+128+134
- [21] 吴统立, 杨嘉佳, 王克鸿等. 高频复合双钨极氩弧焊电弧行为规律[J]. 电焊机, 2019, 49(5):87-91
- [22] 吴统立, 王克鸿, 冯曰海. 高频复合双钨极氩弧焊电源研制[J]. 电焊机, 2019, 49(6):83-88
- [23] 吴统立, 王克鸿, 孔见等. 不锈钢高频复合双钨极氩弧焊接工艺方法[J]. 焊接学报, 2018, 39(10):20-24+129-130
- [24] 陈志林, 刘应虎. 自动钨极氩弧焊奥氏体不锈钢双层堆焊的工艺研究[J]. 现代焊接, 2012(5):35-38
- [25] 马驰原, 谷文, 朱兴华. 双钨极 TIG 堆焊技术在压力容器制造中的应用[J]. 一重技术, 2016(1):58-63
- [26] 周彦林, 谷文, 朱兴华等. 双钨极 TIG 奥氏体不锈钢堆焊层组织与性能[J]. 一重技术, 2017(2):51-56
- [27] 李亚亚, 王振坤, 杨斌等. 双钨极 TIG 焊接技术研究与应用[C]. 2018 年甘肃省焊接学术会议论文集: 758-763
- [28] 方迪生. 双钨极堆焊奥氏体不锈钢热输入对焊缝铁素体含量的影响[J]. 经济技术协作信息, 2018(17):83
- [29] 方迪生, 高永光, 刘万存等. 双钨极不锈钢与低合金钢异种金属焊缝组织性能[J]. 电焊机, 2020, 50(3):86-91+144
- [30] 袁亮文, 刘万存, 高永光等. 基于 DeviceNet 总线的双钨极堆焊系统设计及工艺性验证[J]. 电焊机, 2020, 50(4):41-46+137
- [31] 邹国伟, 马培锋, 王伟等. 双钨极堆焊技术在核反应堆压力容器制造中的应用与研究[J]. 电焊机, 2019, 49(4):168-172
- [32] 张璞临, 徐笑梅, 李晓耀. 加氢反应器带极堆焊的质量控制[J]. 压力容器, 1999(4):49-54
- [33] Stijn Lambrechts, Ronny Demuzere, 任伟锋等. 带极堆焊发展历程回顾及为提高生产力的新技术革新[R]. 伯乐蒂森焊接技术集团公司中国石油化工技术研讨会, 北京, 2005
- [34] 谢彦武, 葛忠贞, 李远等. 影响不锈钢电渣带极堆焊质量原因的分析[J]. 锅炉制造, 2008(2):61-63+66
- [35] 尤靖辉, 赵清万, 孙克勤. 埋弧带极堆焊质量分析及影响因素[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(11):93+96
- [36] 吴瑞平, 唐波涛, 王天先等. 工件倾斜角度堆焊对不锈钢带极堆焊工艺的影响[J]. 压力容器, 2020, 37(1):74-78
- [37] 郑建能, 刘玉平, 李厚彬等. 全自动双钨极氩弧焊在反应堆压力容器冷却剂泵壳内壁上堆焊中的应用[J]. 大型铸锻件, 2021(5):1-5+27

(上接第 53 页)

右的外力约 270 kN, 由此可见本例中货物对支架的作用力较大, 需要采取加固措施防止支架在车板上发生水平移位和侧向倾覆, 同时在做支架设计时, 还应根据该作用力和其他外力综合分析支架强度。

## (2) 货物旋转对重车稳定性的影响。

采用结构二或结构三, 货物重心在旋转过程中都会偏离车板中心, 使得车货合成重心在车板横向偏离车辆中心线, 增加运行过程中车辆的侧翻风险, 如果重心偏移量过大, 侧翻风险过高, 将不利于货物运输的安全性和稳定性, 因此, 还需要评估货物在有转角时的重心偏移量对车辆行驶稳定性的影响是否在安全范围内, 以及是否需要采取降低侧翻

风险的其他措施。

3.5.4 根据上述情况综合考虑, 再结合货物结构、车辆结构等因素来制定支架设计方案和货物装载加固方案以及运输通行方案。

## 4 结语

倾斜式装载方案为大件运输开辟了一条蹊径, 对于部分重大工程项目建设有着重要意义, 本文对倾斜式装载进行了分类和归纳, 并分别从受力、运输安全和可操作性进行了分析, 希望能够抛砖引玉, 对后续需要采用倾斜装载方案的设备运输提供一些思路。

# 压水堆核电机组供热蒸汽转换系统技术浅析

钦书丽 邓科 王强

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 611731

**摘要:** 利用压水堆核电站二回路蒸汽热源与工业供水的换热, 获得工业用蒸汽, 实现核电站对外供应工业蒸汽的应用, 蒸汽转换装置是供热系统实现工质热量交换的核心系统, 其运行可靠性和换热性能的优劣对整个系统的安全性和经济性有重要影响。本文系统介绍了蒸汽转换系统的构成、工质流程、整体布置及关键换热设备结构设计特点。

**关键词:** 核电机组; 核能供热; 蒸汽转换系统; 工业用蒸汽

中图分类号: TK11.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0069-05

## Technical Analysis of PWR Nuclear Power Plant Steam Transfer System

*QIN Shuli, DENG Ke, WANG Qiang*

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

**Abstract:** By using the steam heat source of the secondary circuit of PWR nuclear power plant and the heat transfer of industrial water supply, the industrial steam can be obtained, and the application of industrial steam supply to the external of nuclear power plant can be realized. In the nuclear heating system, the steam conversion system is the core system to transfer heat energy from secondary circuit steam to water and steam. Its operation reliability and heat exchange performance have an important impact on the safety and efficiency of the whole system. In this paper, the system structure, working fluid flow design, system layout and the key equipment in detail of the steam conversion system are introduced systematically.

**Key words:** nuclear power plant unit; nuclear heating; steam conversion system; industrial steam

我国能源结构以煤为主, 燃烧化石能源带来的日益严峻的大气环境问题已成为社会关注的重点。目前, 众多生产制造行业对高温高压蒸汽存在稳定的需求, 如炼油厂、制药厂、炼铁厂以及造纸厂等高能耗企业, 这些行业以自备热电厂和锅炉房的形式, 以煤炭为主要燃料生产需要的工业蒸汽。而燃煤排放物粉尘、硫化物、氮氧化物以及二氧化碳是造成大气污染、雾霾和温室效应的主要原因。从当前技术水平看, 核能是一种清洁、无空气污染的能源, 而且其应用技术比较成熟, 同时相较于水电、光电、风电, 具有无间歇性、受自然条件约束少等优点, 是可以大规模替代化石能源的清洁能源。

以压水堆核电为例, 产生的压力 6.02 MPa, 温度 275.8 °C 的高温高压蒸汽, 除了用于发电, 还可

以通过供热系统, 在物理隔离二回路介质并保证安全性的同时产生城市供热所需的蒸汽或热水、化工园区工业蒸汽<sup>[1]</sup>等, 具有巨大潜力。利用核能供热虽已在国际上有成熟应用, 但在我国仍处于起步阶段。随着我国核电机组数量的日益增加以及核能应用技术的不断发展, 核能的多途径应用也已经较为成熟, 目前国内外已有多个由核电机组为区域居民供热的案例, 但是我国尚无核电站对外供应工业蒸汽的应用。

本文通过对蒸汽转换系统<sup>[2]</sup>的设计研究, 以压水堆核电机组为依托, 利用二回路主蒸汽经工业蒸汽生产装置与工业供水的换热, 获得工业蒸汽, 通过蒸汽管网输送至用户, 实现核电站对外供应清洁工业蒸汽的应用, 开拓核能综合利用新途径, 能够

收稿日期: 2022-07-15

作者简介: 钦书丽 (1981—), 女, 本科, 工程师。主要从事电站辅机的设计研发工作。

提高核电厂热能的综合利用，同时对响应国家政策，带动核能产业多元化应用起到很好的示范作用。

## 1 蒸汽转换系统流程

蒸汽转换系统主要流程为来自常规岛主蒸汽系统的主蒸汽与来自除盐水系统的除盐水换热产生高温蒸汽输送至工业蒸汽用户，具体流程如图1所示。

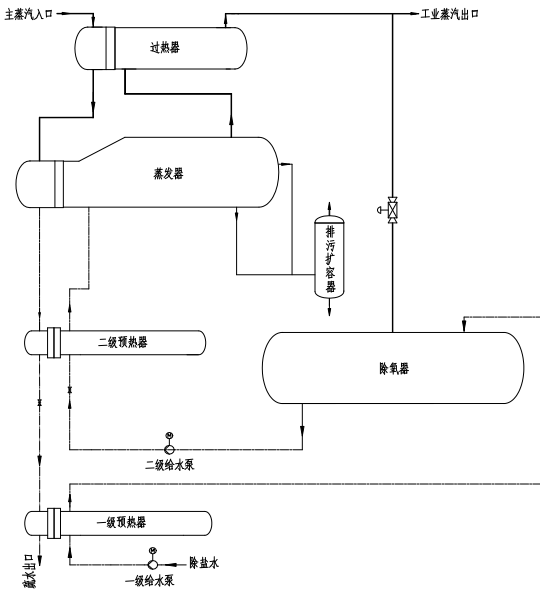


图1 蒸汽转换系统流程示意图

在整个系统流程中，来自常规岛主蒸汽系统的高压主蒸汽走管侧，来自除盐水系统的除盐水走壳侧。

### 1.1 管侧流程

由常规岛主蒸汽系统抽取部分主蒸汽通过主蒸汽管道接至蒸汽转换系统，经过过热器、蒸发器、预热器管侧流程在各设备内释放传递热量后变为凝结水，凝结水最终回收至常规岛凝结水系统。

### 1.2 管侧控制说明

过热器出口，蒸发器入口前设有调节阀，通过调节主蒸汽流量以匹配供汽需求。主蒸汽在蒸发器中释放热量后转变为凝结水，出口为过冷凝结水。蒸发器内部有凝结水缓存空间，蒸发器出口设置调节阀，控制凝结水水位。凝结水再依次经二级预热器、一级预热器预热给水后降至50~60℃返回常规岛凝汽器。

### 1.3 壳侧流程

来自除盐水系统的常温除盐水由一级给水泵升压后经一级预热器加热后送入除氧器中除氧，再

由二级给水泵升压后经二级给水预热器加热至接近饱和水送入蒸汽发生器，在蒸发器中发生相变，变为饱和蒸汽，经过蒸发器出口的汽水分离装置，饱和蒸汽进入过热器吸收主蒸汽释放的热量并转变为工业蒸汽，然后进入管网提供工业用户。

### 1.4 壳侧控制说明

除盐水经一级预热器预热后进入除氧器，除氧器定压运行，除氧器出水温度为运行压力下的饱和温度，加热蒸汽管道上设有调节阀，以产生的工业蒸汽为加热源。除氧水经二级给水泵升压后送入二级预热器预热，然后进入蒸发器。蒸发器入口设置流量调节阀，保证蒸发器水位。

一级预热器和二级预热器为满水位运行，过热器无水运行，蒸发器和除氧器按照设定的水位运行。蒸发器和除氧器上装有水位自动控制装置，蒸发器水位由对应的给水管道上的给水调节阀控制，除氧器水位由除氧器水位调节阀控制。

## 2 蒸汽转换系统设备结构设计特点

蒸汽转换系统可根据供汽规模设置多套蒸汽转换设备并联布置，每套蒸汽转换系统的配置包括：1台一级预热器、1台二级预热器、1台蒸发器、1台过热器以及系统内部所需的阀门和仪表控制装置，并设置1台共用除氧器，对蒸汽转换设备给水进行除氧，设置1台共用排污扩容器，收集各蒸发器的排污水并进行减温减压。

### 2.1 一级预热器

一级预热器布置在管侧热流体换热的末端，利用二级预热器管侧疏水的余热对常温除盐水进行加热，将除盐水加热至预设温度。

一级预热器管侧介质进出口温差为108℃，壳侧进出口温差为120℃，进出口温差比较大，同时，由于冷流体（除盐水）的出口温度高于热流体（主蒸汽凝结水）的出口温度，如果选用普通的U形管换热器，管板热应力大，影响管板和换热管的使用寿命。此外，选用普通的两管程单壳程的U形管换热器还会导致温度交叉，传热效果差。为了解决这一问题，一级预热器设备有两种比较成熟可靠的结构设计方案可供选择：两台重叠串联的两管程两壳程BFU型换热器<sup>[3]</sup>或者发夹式换热器<sup>[4]</sup>。

#### 2.1.1 两台重叠BFU型预热器

BFU型换热器，带有纵向大隔板，避免温度交叉，相当于全逆流换热，采用两台串联布置，分两



步加热除盐水，使两台设备的温度梯度相当，可降低设备的温差应力，最终选型可以使两台换热器布置的长度大致相同。

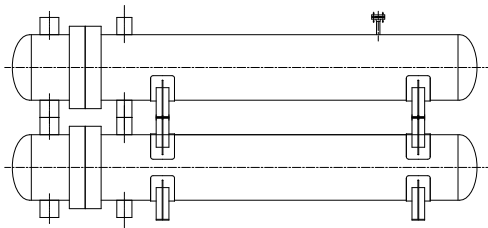


图2 一级预热器外形图

### 2.1.2 发夹式预热器

发夹式换热器换热效率高，设备直径小，结构紧凑，同时纯逆流结构完美解决了温差应力大及传热过程中的因温度交叉逆向传热问题。

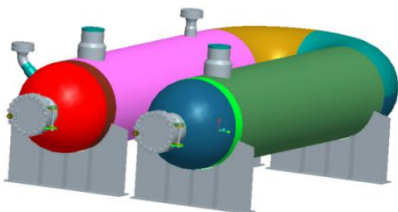


图3 发夹式预热器外形图

### 2.1.3 选型比较

表1 两种型式预热器对比

项目	两台串联BFU式	单台发夹式
热力计算	较复杂	较容易
设备设计	较复杂	较简单
设备规格	壳径直径 D1 000 mm， U形管长 1 000 mm；	壳径直径 D900 mm，U形 管长 6 500 mm
设备重量	两台总重约 21.7 t	约 18.2 t
制造难度	较容易	较复杂(主要体现在管束 装配和U形壳体制造)
安装	两台串联叠放，安装精 度要求高	较容易
可靠性	可靠性高，在设计、制 造及运行等方面技术经 验都比较成熟	可靠性高，在光热系统、化 工领域已积累较多设计、制 造及运行等方面经验
检修维护	较容易，可实现抽壳检 修	难度较大，抽壳检修不易 实现

以单列系统产汽量为 200 t/h 为例，根据一级预热器的分配参数，对两种不同布置型式的预热器进行了设备结构设计计算，并通过两种设备规格及特点的对比，为设备选型提供依据。

通过以上对比可知，与单台发夹式预热器相比，

两台重叠串联 BFU 型预热器同样具有换热系数高，并在设计、制造、运行各方面经验都较丰富且整体成本低，易于抽壳检修等特点，推荐优先采用两台重叠串联 BFU 型预热器。

### 2.2 二级预热器

二级预热器布置在蒸发器管侧下游，利用蒸发器管侧疏水的余热进一步对除盐水进行加热，将除盐水加热至设定温度（低于饱和温度）。

二级预热器管侧介质进出口温差约为 45 °C，壳侧进出口温差约为 50 °C，同样存在冷流体（除盐水）的出口温度高于热流体（主蒸汽凝结水）的出口温度的情况，选型考虑同一级预热器设备。二级预热器结构如图 4 所示。

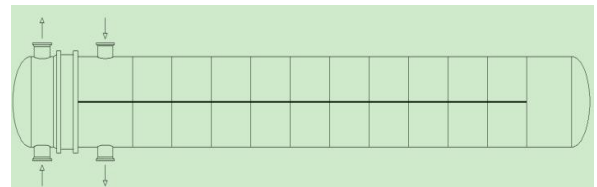


图4 二级预热器结构简图

### 2.3 蒸发器

主蒸汽经过过热器换热后，再进入蒸发器加热给水，使给水相变为饱和蒸汽。蒸发器是整个系统的核心设备，正确的蒸发器选型<sup>[5]</sup>是系统稳定运行的保证。

#### 2.3.1 立式、卧式蒸发器选型比较

(1) 蒸发量比较：卧式结构提供了足够大的蒸发空间，有利于蒸发，适用于蒸发量需求相对较大的场合。立式结构因蒸发表面积狭小，蒸发量较小，运用受到一定限制；

(2) 蒸汽品质比较：立式结构气泡上升行程较长，蒸汽品质较好，适用于蒸发量小，蒸汽品质要求较高的场合；

(3) 振动分析：立式结构上部蒸发空间有限，气泡上升行程较长，且运动速度较高，频繁碰撞，易诱发振动。在管束布置、管板与换热管连接结构设计等方面，需考虑振动引起的不利影响，提高设备可靠性；

(4) 厂房布置要求：换热管内外均有相变的条件下，立式结构只能采用单流程结构，设备通常较高，厂房布置及检修将会十分困难，而卧式结构

场地布置简单，检修方便。

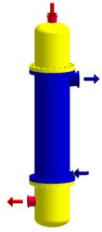


图5 立式蒸发器外形图

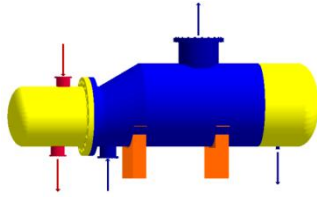


图6 卧式蒸发器外形图

### 2.3.2 U型管、蛇形管蒸发器选型比较

(1) 蒸发器壳侧和管侧均有相变发生，若蒸发器选用蛇形管结构，则只能采用立式布置；

(2) 卧式蛇形管结构检修时，管内积水难以彻底排尽，管束易锈蚀。再次投运时，易出现水堵现象；

(3) 蒸汽发生器管侧进出口介质温差不超过 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，管侧与壳侧温差不超过 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。蛇形管结构适用于大温差、高温、高压等特殊工况条件，主要优势为具备良好的热弹性。该系统蒸发器设备采用U形管结构即可满足性能使用要求。采用U形管结构，管板设计厚度约 $300\text{ mm}$ 。由于管板并不厚，在各运行工况下，管板两侧及上下各位置温差较小，不会出现过大的热应力，可以满足设备长寿命使用要求。

综上所述，从蒸发量、蒸汽品质、振动、厂房布置等多方面考虑，蒸发器采用卧式釜式结构表现更优，适应性更好。

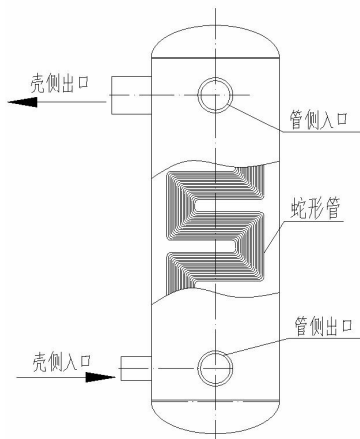


图7 立式蛇形蒸发器结构简图

釜式蒸发器采用U形管-管板式结构，管侧为加热蒸汽/凝结水，通过管内加热壳侧的除盐水发生

相变，保持沸腾状态，顶部蒸汽出口设置汽水分离装置，提高出口蒸汽的干度，产生的饱和蒸汽进入过热器进一步加热至符合要求的工业蒸汽。根据设计参数，蒸发器管侧出口温度为过冷疏水，且低于蒸发温度，换热过程存在温度交叉和逆向传热的情况，要实现此功能常规布置至少需要三级换热才能达到。为了解决这个问题，本文采用一种新型高效蒸发器，兼具预加热、疏水调节和多级蒸发功能于一体。该蒸发器采用四管程分段设计，充分利用加热蒸汽的潜热，进一步降低疏水出口温度，提高了加热蒸汽的能量利用率，同时还从根本上解决设置多级换热设备带来的复杂布置和控制难问题。

在结构布置上，对蒸发器布管及壳侧内部结构进行了特殊布置，管侧设有四管程双分程隔板，内部设有凝结水缓存空间，容积不小于 $30\text{ s}$ 的凝结水流量，并装设液位测量装置，以控制凝结水水位，调节蒸汽流量，保证下游设备换热性能。蒸发器壳侧考虑换热分区设置，避免温度交叉影响设备性能，同时也设有液位测量装置，控制除盐水给水流量，保证蒸发器水位。蒸发器结构如图8所示。

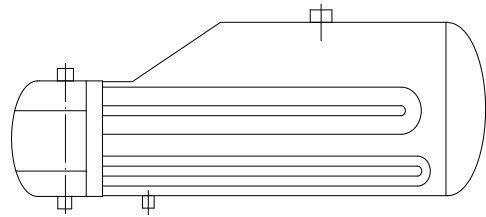


图8 高效蒸发器结构简图

### 2.4 过热器

过热器为管侧主蒸汽换热的第一级，考虑到整个系统控制从简的原则，加热主蒸汽全流量通过过热器管侧，释放潜热加热壳侧蒸汽。设备选型综合考虑运行参数及工质特性，选型原则与预热器相同，采用常规U形管-管板式型式，结构相对比较简单，且在设计、制造、运行各方面经验都较丰富，是过热器设备的首选结构。过热器外形如图9所示。

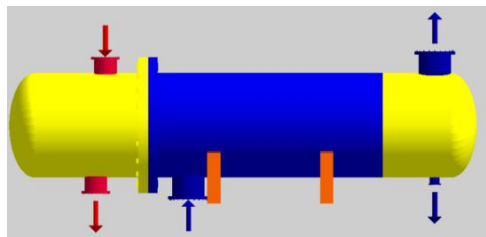


图9 过热器外形图

## 2.5 除氧器

除氧器布置在一级预热器壳侧和二级预热器壳侧之间，以系统产出的工业蒸汽为加热源，对经过一级预热器预热后的除盐水进行除氧和加热，经二级给水泵升压后送入二级预热器预热。

除氧器在蒸汽转换系统中为共用设备，配置一台，正常运行工况时，经过除氧的给水含氧量 $\leq 10 \mu\text{g/L}$ 。除氧器定压运行，采用内置式喷雾鼓泡一体化型式，结构简单，布置紧凑。除氧器结构<sup>[6]</sup>如图 10 所示。

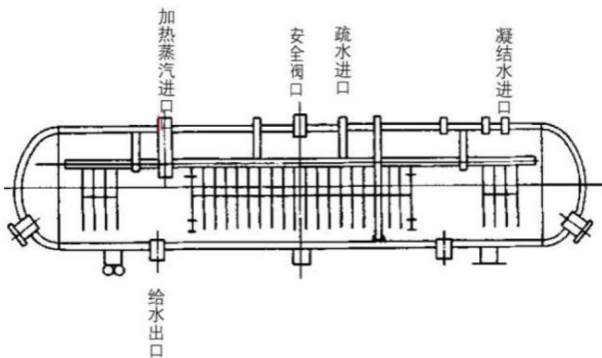


图 10 除氧器结构简图

## 2.6 排污扩容器

为控制蒸发器生产的工业蒸汽品质，蒸汽转换系统共用一台排污扩容器，收集各蒸发器的排污水并进行减温减压，最大排污量为给水量量的 1%，同时接收系统启停、运行等过程中产生的疏水。排污扩容器通大气且接有一根水封管将排污水接到能源站热废水收集系统的工业蒸汽侧热废水坑。

为方便系统布置，减少占地面积，排污扩容器采用立式布置。

## 3 系统布置方案

蒸汽转换系统根据工质流程及设备特点采用分层布置，主要布置原则是：

(1) 根据供汽规模采用多套蒸汽转换设备并联布置，并考虑热备用问题，系统实际为  $n+1$  列设备长期运行。其中一列故障时，实现系统间的快速切换。

(2) 过热器和除氧器布置在能源站厂房内最高层，与蒸发器保持一定的高度差，蒸发器布置在中间层，一级预热器、二级预热器、排污扩容器布置在较低层，保证水动力的安全性。

(3) 壳侧除氧器布置较高位置，增加除氧器供水压头，减少给水泵选型成本，同时保证系统停运或事故工况时，给水泵具有一定的汽蚀余量。

(4) 工业蒸汽出口管道上设置辐射监测仪表，防止放射性物质释放到用户侧，同时系统内仪表阀门的布置充分考虑各设备安装及检修空间的要求。

## 4 结语

蒸汽转换系统主要设备包括一级预热器、二级预热器、蒸发器、过热器、除氧器、排污扩容器，分别实现对除盐水的预热、加热、蒸发、过热和除氧、排污等功能。过热器和除氧器高位布置，蒸发器中间层卧式布置，预热器和排污扩容器低位布置。蒸发器采用釜式结构，高效四管程方案，管、壳侧均设置液位自动控制装置，一级预热器和二级预热器采用 BFU 结构，内部逆流布置，避免温度交叉，提高设备换热效率。其中一级预热器采用两台重叠串联 BFU 型式，避免端差过大，减小管板热应力，提升设备启停速率。合理设置系统整体布置及热备用的分列运行方案，既经济合理，又保证了蒸汽转换系统的安全运行。

## 参考文献：

- [1] 王建强, 戴志敏, 徐洪杰. 核能综合利用研究现状与展望 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34 (4): 460-468
- [2] 成军, 王立恒, 张达等. 一种用于压水堆核电机组的工业蒸汽生产系统: CN 111834026[P]. 2020-10-27
- [3] GB/T151—2014, 热交换器[S]. 北京:中国标准出版社, 2015
- [4] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [5] 秦叔经, 叶文邦. 化工设备设计全书-换热器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [6] 蔡锡琼, 蔡文钢, 火电厂除氧器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007

# 一种风电机组单叶片吊装电动盘车装置试验研究

郭旺<sup>1\*</sup> 强喜臣<sup>2</sup> 王琦<sup>1</sup> 梁臣<sup>2</sup> 王月坤<sup>3</sup>

1. 中国三峡建工(集团)有限公司, 成都 610000; 2. 东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000;

3. 福州海峡发电有限公司, 福州 350000

**摘要:** 本文介绍了直驱机组采用电动盘车装置的测试方案和测试结论, 通过测试验证了装置的控制指标。

**关键词:** 单叶片吊装; 电动盘车; 试验

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0074-03

## Experimental Research of A Electric Turning Gear for Wind Turbines Single-blade Hoisting

GUO Wang<sup>1</sup>, QIANG Xichen<sup>2</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, LIANG Chen<sup>2</sup>, WANG Yuekun<sup>3</sup>

(1.China Three Gorges Construction Engineering Corporation, 610000, Chengdu, China;

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

3. Haixia Electricity Generation Fuzhou Co., Ltd, 350000, Fuzhou, China)

**Abstract:** This paper introduces the test plan and test conclusion of the direct drive unit using the electric turning device, and the control index of the device is verified by the test..

**Key words:** single blade hoisting; electrical turning gear; testing

直驱风电机组单叶片吊装是目前风电机组吊装的一个难题, 随着塔筒高度和叶片长度不断增加, 尤其是海上吊车高度的限制, 只能采用叶片平插方式进行单叶片吊装。叶片平插吊装方式需要对叶轮在没有安装叶片、安装了一支叶片和安装了两支叶片情况下进行盘车, 文献 [5] 对电动盘车原理和计算过程给出了说明, 为了验证盘车装置的有效性, 需要对盘车装置进行测试, 以验证其效果。

### 1 试验台及测试方案介绍

本试验在福建三峡产业园东方电气 12 MW 全功率试验台上进行, 拖动对象为 10 MW 直驱双绕组发电机。试验系统由柴油发电机、盘车装置、发

电机等电气设备通过动力电缆相连接, 盘车编码器测量设备通过控制电缆连接到盘车装置。通过盘车装置控制发电机在目标转速下进行盘车测试, 检验盘车变流器系统的各项性能指标以及能否满足风场吊装需求。

试验指标如下:

- (1) 发电机在 360°范围内都可以旋转。
- (2) 叶轮运行到指定位置, 并可以微调角度。
- (3) 验证盘车装置的额定电流下发电机温升

满足盘车运行要求。

#### 1.1 盘车装置试验系统介绍

盘车装置系统如图 1 所示, 主要包括柴油发电机、升压变压器、高压开关柜及变频器集装箱、电

收稿日期: 2022-09-26

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目。

作者简介: 郭旺 (1993—), 男, 2015 年毕业于华中科技大学电气工程及其自动化专业, 工程师, 从事机电技术管理、工程管理等。通讯邮箱: guo\_wang@ctg.com.cn。

缆等。

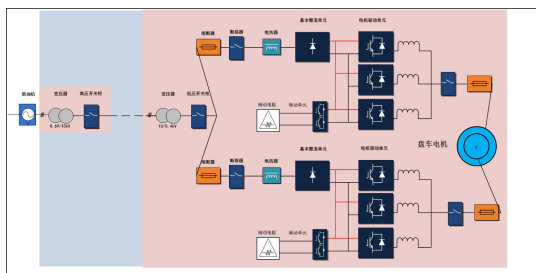


图1 盘车装置系统示意图

## 1.2 试验台安装及布局

将 10 MW 电机安装在试验底座上，并且安装好冷却风扇，固定好冷却风管，连接好冷却风扇的动力电缆（图 2）。



图2 电机安装示意图

两台柴油发电机放置水平放置在试验站围栏里，盘车变频器放置在平车上，通过平车将其运至试验站设备房间里，试验布局见图 3 所示。

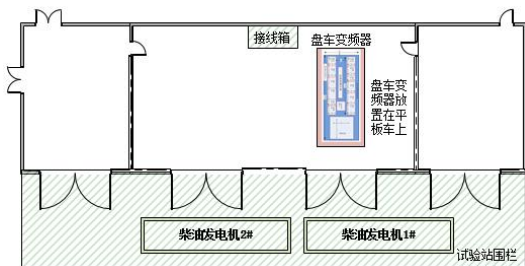


图3 试验台布局图

## 2 试验项目及结果

### 2.1 盘车装置控制发电机旋转测试

通过盘车装置控制发电机旋转并记录旋转角度，转速为 0.5 rpm。编码器机械角度原始值（0~360），如图 4 所示。

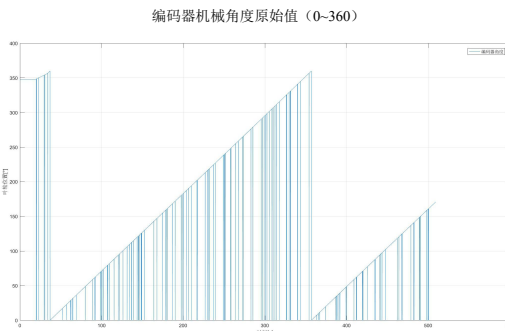


图4 盘车装置控制发电机旋转编码器信号（0-360°）

### 2.2 发电机温升考核

风机发电机保持静止，一个绕组电流加到 4 000 A，另外两个绕组分别为 2 000 A，运行 10 分钟（图 5）。

本试验主要是为了考核发电机温升情况，验证在盘车装置控制叶片静止投入锁销过程中发电机是否存在过温风险（图 6），试验结果见表 1。

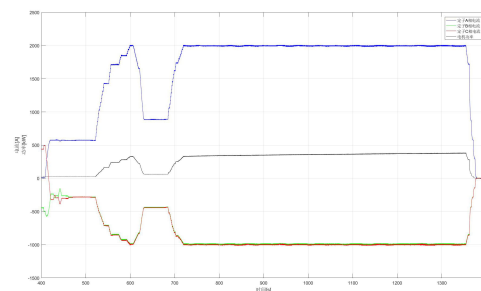


图5 盘车变频器单柜检测电流 A 相 2 000 A，时间 10 分钟

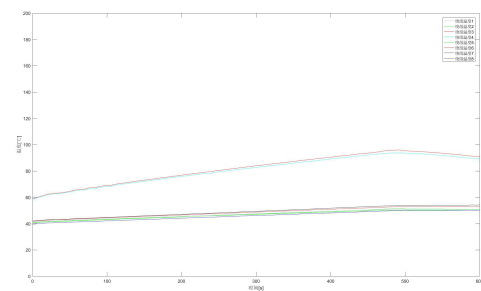


图6 发电机绕组温升曲线

表1 发电机温升电流记录表

检测内容	A 相电流	风机发电机绕组最高温度	限值	结论
发电机温升	4000A	92.8℃	140℃	Pass

### 2.3 定位控制

模拟风机对锁销孔过程，依据定子和转子划线，判断锁销孔是否对准。

从一个标准位置，移动另一个标准位置的角度偏差；分别正向和反向3次旋转120°，最小微调精度0.1°（图7），具体测试数据见表2。

表2 发电机定位测试记录表

检测内容	基准位置	偏差	微调精度	能否到达指定位置	结论
定位测试	120	0.5	0.1	是	Pass
定位测试	240	0	0.1	是	Pass
定位测试	360	0	0.1	是	Pass
定位测试	240	0	0.1	是	Pass
定位测试	120	0	0.1	是	Pass

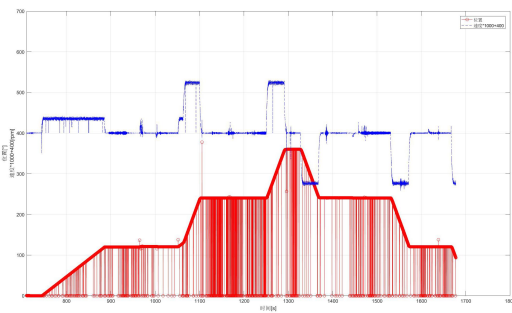


图7 定位测试记录（圆圈标记为微调投锁销）

### 3 结果和讨论

通过上述测试，针对电动盘车的控制指标进行了检验，总结如下。

（1）通过发电机拖动旋转测试很好的验证了电动盘车拖动发电机旋转的可控性，极低转速下电机拖动平稳，无发电机振动等问题，为单叶片电动盘车的实施提供了支撑；但由于发电机本身体积大，编码器安装受到发电机加工误差和安装精度影响，测试过程中对编码器信号进行了校正和补偿。

（2）发电机温升考核满足预期设计方案，验证了极端电流下发电机温升情况，确保电动盘车过

程中电机安全性。后期研究利用发电机冷却系统延长电动盘车的操作时间优化方案。

（3）拖动发电机定位控制模拟了现场电动盘车过程整个操作步骤，盘车定位控制精度可以满足现场盘车控制要求。

（4）通过本次试验，测试了电动盘车系统的控制精度和现场操作步骤，验证了电动盘车结构简单和操作灵活的特点。

### 4 结语

本文根据电动盘车的设计参数，提出了电动盘车的检测指标和试验方案，并搭建试验台进行了测试，测试结果满足设计指标要求。

测试过程中发现的编码器安装精度和发电机温升时间问题需要进一步结合实际项目在实施过程中进行优化。

风电机组单叶片吊装的电动直接驱动发电机盘车系统属于风电行业首创，电动盘车方案结构简单，操作灵活，有利于单叶片吊装现场实施，对于大型风电机组单叶片吊装具有指导意义。

### 参考文献：

- [1] 王弟方, 龚波涛, 熊圣新等. 一种风机单叶片吊装盘车装置的研究[J]. 船舶工程, 2020, 42(S2):277-281
- [2] 王斌, 陈晨, 卓沛骏等. 高兆瓦级风力发电机盘车系统优化方法[J]. 装备制造技术, 2020 (9): 133-134+145
- [3] 李红峰, 张竹, 王九华等. 大型海上风力发电机组水平单叶式吊装盘车工装装备[J]. 船舶工程, 2020, 42(S1): 615-619
- [4] 何俊尉, 赵海燕, 应华冬等. 采用液压驱动的风电机组风轮翻转工装设计[J]. 装备制造技术, 2020(8):69-72
- [5] 强喜臣, 梁臣, 钟运鹏等. 一种单叶片吊装电动盘车装置[J]. IT 经理世界, 2021 (9): 265-266

### 集团要闻

## 东方电气签署海水直接制氢技术合作协议

2022年12月16日，中国工程院院士谢和平领衔指导的四川大学、深圳大学博士团队与东方电气股份有限公司、东方电气（福建）创新研究院有限公司在深圳签署“海水无淡化原位直接电解制氢原创技术中试和产业化推广应用”的四方合作协议。中国工程院院士谢和平，东方电气集团党组成员、副总经理张彦军，深圳大学副校长汪永成等出席签约仪式。

来源：东方电气微信公众号

# 风力机塔筒涡流激振分析软件系统开发及应用

胡宗邱<sup>1</sup> 龚学进<sup>2</sup> 杨张斌<sup>1</sup> 王其君<sup>2</sup> 张斯翔<sup>1</sup>

1. 中国三峡建工(集团)有限公司, 成都 610000; 2. 东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 在风电机组塔筒涡流激振分析软件系统的开发过程中, 采用面向对象的开发工具 VB 编制了基于 Windows 操作系统的应用软件, 实现了塔筒涡流横向振动计算的图形化、可视化, 工程设计人员在良好人机交互界面菜单引导下实现 1 分钟时间内快速完成整个设计计算分析流程。通过对某案例多工况分析验证了软件的可靠性和实用性, 该软件系统的开发对提高风电机组设计效率和可靠性具有较好的指导意义和经济效益。

**关键词:** 风电机组塔筒; 涡流激振; VB; 面向对象; 软件开发

中图分类号:TK83

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 04-0077-06

## Development and Application of Software System for Vortex-induced Vibration Analysis of Wind Turbine Tower

HU Zongqiu<sup>1</sup>, GONG Xuejin<sup>2</sup>, YANG Zhangbin<sup>1</sup>, WANG Qijun<sup>2</sup>, ZHANG Sixiang<sup>1</sup>

(1.China Three Gorges Construction Engineering Corporation, 610000, Chengdu, China;

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

**Abstract:** In the development process of wind turbine tower vortex induced vibration analysis software system, the application software based on Windows operating system is compiled by using the object-oriented development tool VB, which realizes the graphical and visual calculation of tower vortex lateral vibration. Under the guidance of good man-machine interactive interface menu, engineering designers can quickly complete the whole design calculation and analysis process within 1 minute. The reliability and practicability of the software are verified by the multi condition analysis of one case. The development of the software system has good guiding significance and economic benefits to improve the design efficiency and reliability of wind turbine.

**Key words:** wind turbine tower; vortex-induced vibration; VB; object oriented; software development

风电塔筒在风载作用下存在顺风向和横风向振动, 有时横风向振动不容忽视、影响因素很多, 在设计中主要考虑塔筒涡流横向振动。在经济效益最大化的推动下, 风电机组正朝着大功率、大风轮直径、高塔筒的方向发展, 其整机一阶固有频率会降低, 由此带来的塔筒结构振动问题也越来越突出。在机组吊装过程、调试并网前期和运维期间, 若涡

流激振考虑不当, 机组及人员安全将受到威胁。最早、最系统的涡流机理研究来源于欧标<sup>[1-5]</sup>, 国内学者对风电机组塔筒涡流激振原理、风险危害等方面也做了大量的理论和实验研究<sup>[6-10]</sup>。

风电机组塔筒涡流激振分析存在输入参数多、计算原理和分析流程较复杂等特点, 业内多采用手动计算方式, 设计繁琐落后、效率低下、计算结果

收稿日期: 2022-06-28

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目。

作者简介: 胡宗邱 (1988—), 男, 2013 年毕业于华中科技大学流体机械及流体工程专业, 硕士, 高级工程师, 参与三峡集团与东方风电 10 MW 海上风电机组联合研制与示范应用项目。

可靠性不高。为呼应国内制造业转型升级和智能化制造需求，计算机辅助软件开发在机械制造业中得到了极大推广<sup>[1-13]</sup>。本文通过对塔筒涡激振动分析原理、计算流程等深入研究，利用 VB 语言开发了一套完整的塔筒涡激分析软件系统，在友好的人机操作界面下通过不同菜单和按钮引导可快速完成塔筒多工况涡激振动分析，开发的软件系统具有操作简单、高可靠性、高性价比的特点，该软件系统的开发对丰富风电机组机械设计方法具有一定的借鉴和指导意义。

## 1 塔筒涡激振动分析理论依据

当风载荷作用时，在特定条件下高耸结构两侧或背面会产生两道非对称排列的旋涡，其中一侧的旋涡若按顺时针方向转动，则另一旋涡按逆时针方向旋转，这两排旋涡相互交错排列，即卡门涡街。结构由于漩涡发放而产生的垂直于来流方向的振动即为涡激振动。涡激振动兼有强迫振动与自激振动的性质，是一种在低风速下易于发生的振动。考对于风电机组塔筒横截面为圆形，则风绕流塔筒产生的卡门涡街以及升阻力方向如图 1 所示。

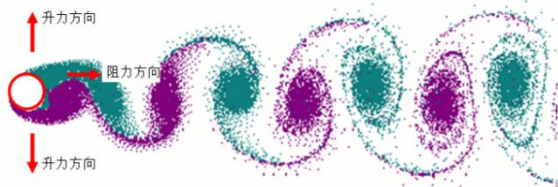


图 1 卡门涡街与升阻力方向

对于风电机组圆柱形塔筒而言，决定圆柱绕流流态主要因素的是雷诺数值  $Re$ ，来流湍流度、柱体表面粗糙度以及边界条件等因素也会对绕流产生一定程度的影响。风绕流塔筒产生的升力主要由卡门涡街造成，其方向垂直于来流方向，为脉动力，频率与漩涡脱落频率相同；绕流阻力主要由摩擦以及压差等因素造成，包括沿流向稳定的阻力和沿流向脉动的阻力。当涡流脱落频率与机组一阶弯振固有频率  $f$  相同时的风速为临界风速  $V_{crit}$ ，其中  $V_{crit} = d * f / S_t$ 。根据规范<sup>[1]</sup>，仅考虑塔筒涡流对筒体焊缝损伤影响时，在工程算法中将圆柱体型塔筒的斯特劳尔数  $S_t$  取值 0.18，等效激振位置的筒体直径  $d$  取 5/6H 处的横截面外径（H 为塔筒高度），雷诺数

$Re = d * V_{crit} / \nu$ ，空气黏度  $\nu$  取  $1.5e-5m^2/s$ 。

塔筒发生涡振时第  $i$  节筒体受到的横向惯性力  $F_i = m_i(2\pi f)^2 \Phi_i Y_{max}$ 。其中  $n$  为筒体总分节数， $i$  自下而上取值 1、2...、 $n$ ， $m_i$  为第  $i$  段筒体质量， $\Phi_i$  为第  $i$  段筒体归一化后的振型， $Y_{max}$  为塔筒最大等效振幅。惯性力计算过程所有中间量取值方法详见规范<sup>[1-3]</sup>。

塔筒发生涡振时第  $i$  节筒体受到第  $i$  节以上所有横向惯性力  $F_i$  产生的附加弯矩：

$M_i = (F_i + F_{i+1} + \dots + F_n)h_i + M_{i+1}$ ，其中  $h_i$  为第  $i$  到  $(i+1)$  两惯性力作用点间距。

根据载荷  $F_i$  和  $M_i$  就可以计算筒体节  $i$  横截面上对应的名义等效应力值，最后根据对接焊缝 SN 曲线<sup>[4-5]</sup>计算当前涡激横振载荷下的许用循环次数，根据规范<sup>[1-3]</sup>计算实际涡激载荷循环系数，最后根据 Miner 理论计算涡激横整下塔筒横向焊缝的累积损伤。GL 规范<sup>[5]</sup>规定涡激振动产生的损伤须小于机组运行设计寿命期间总损伤的 1/20。

## 2 软件系统具体设计方法

面向对象的软件设计方法以其人机数据交互友好性和逻辑思维通畅等优点而深受到广大工程设计人员喜欢，该方法以被广泛应用于机械设计的各种领域中。软件主界面将整个设计流程模块化、流程化，使用程序代码方式可以使整个设计过程从“参数输入-中间变量-终端参数输出”更加直观、清晰易懂，整个程序的开发具有极大灵活性和拓展性。面向对象设计方法具有对象、方法和属性等基本要素，结合对象将一个复杂系统进行模块化分割和集成。采用面向对象的程序开发语言 VB 对提高风电机组塔筒设计效率和可靠性具有极大的优势。图 2 为塔筒涡激分析软件开发主框架拓扑图，登陆界面主要是用于管理软件使用人员账号和密码，程序主界面中各独立模块间共性数据可以实现相互调用。

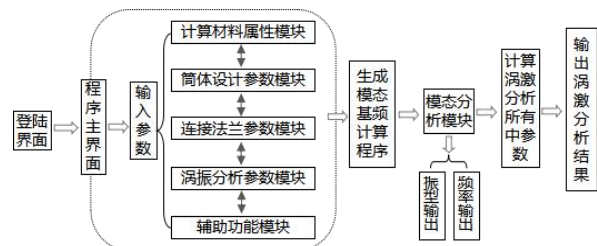


图 2 软件开发主框架拓扑图



软件编制时先建立 VB 窗体 Form、Command、Textbox 控件按钮等对象，然后编制窗体事件、过程和自定义函数等。各模块输入参数可采用 textbox 等控件手动逐项输入或自编函数 get\_tower\_datas 整体数据导入两种模式，塔筒设计完成后关键数据利

用自定义函数 write\_tower\_section2020 自动导出，筒体设计参数存储在 "Output\_Tower\_design\_datas\_for\_paper.mac" 文件中，塔筒参数自动导出和导入程序截取片段如下图 3：

```

""""保存塔筒数据到指定文件中
Private Function write_tower_section2020()
    Dim i,j,k As Integer
    Open "Output_Tower_design_datas_for_paper.mac"
        --For Output As #2 '存储相关参数
    With fg1
        k = 0
        For i = 2 To .Rows - 1 '获取塔筒最大分节数
            ...
            For j = 2 To k + 1
                Print #2, Val(.TextMatrix(j, 0)); Tab(6); ...
            ...
        Next
    End With
    Close
End Function

Close
End Function

""读取塔筒筒体基本信息
Private Function get_tower_datas()
    ...
    With fg1
        For j = 2 To .Rows - 1 'find_data(j,i)查询函数
            For i = 1 To .Cols - 1
                .TextMatrix(j, i) = find_data(j + 2, i + 1)
            Next
        Next
    End Function

```

图 3 塔筒参数自动导出和导入程序截取片段

塔筒设计常见材料 Q355,Q390,Q235 等的力学性能参数利用程序录入到材料库中，软件运行过程中可以自动查询和应用。模态分析模块充分利用 Dos 批处理优势，通过简单的命令 Modal\_solve\_tower.bat 在 10s 内实现一键式后台调用 Ansys 程序(不用打开 Ansys 界面)并输出计算结果。调用程序如下：

```

"e:\... \ansys\bin\winx64\ANSYS160.exe" -b -i
Modal_ANSYS_FEA_APDL.Mac

```

Modal\_ANSYS\_FEA\_APDL.Mac 文件为模态基频计算程序自动生成的 ANSYS 软件 APDL 程序，其中塔筒采用变截面梁单元方式建模，其 APDL 程序截取片段如下图 4：

```

/PREP7                R,2,640000000000          N,400,-3.530,92.847          D,300,ALL
ANTYPE,MODAL          N,1,0,0.000              SECTYPE,1,BEAM, CTUBE      D,301,ALL
MODEOPT,SUBSP,100    N,2,0,2.750              SECOFFSET,CENT             D,302,ALL
ET,1,BEAM188          N,3,0,5.500              SECDATA,2,206,2.250,60    FINISH
ET,2,MASS21           N,4,0,8.000              ...                          /SOLU
ET,3,COMBIN14,,,1    ...                       TYPE,1                      SOLVE
MP,DENS,1,8007        N,35,0,88.400            MAT,1                        FINISH
MP,EX,1,206000000000 N,200, 0,91              SECNUM,1 $E,1,2           !节点坐标/振型提取程序
MP,NUXY,1,0.3        N,300, 0.6               ...                          Write_ResultList_node
R,1,0,0,0            N,301,,-0.6              !基频自动提取程序
                    N,302,,,0.6              Write_frequency_modal

```

图 4 APDL 程序截取片段

涡激振动损伤计算主函数 get\_tower\_datas\_vortex 共计 290 行代码,主要功能是汇总前面所有计算参数、计算最大振幅、激振力、等效应力、

载荷许用循环次数、涡激频次、涡激年累积损伤等,程序截取片段如下所示图 5:

```

""读入涡激损伤计算主函数""
Private Function get_tower_datas_vortex()
    Dim i,j,k As Integer
    ...
    With fg1
        For j = 2 To k + 1
            '读入塔筒各分节底部截面位置高度
            .TextMatrix(j, 1) = Val(find_data(j + 2, 3))
            ...
            .TextMatrix(j, 2) = Val(find_data(j + 2, 2))
            If Val(.TextMatrix(j, 13)) > 0.025 Then
                '计算壁厚修正因子
                .TextMatrix(j, 14) = 0.025/Val(.TextMatrix(j, 13)) ^ 0.2
            Else: .TextMatrix(j, 14) = 1
                ...
            If Val(Form10.Combo1.ListIndex) >= 0 Then
                Select Case Form10.Combo1.ListIndex
                    Case Is = 0
                        .TextMatrix(k + 2, 5) = Form10.fg1.TextMatrix(2, 2)
                        For j = 2 To k + 2
                            ...
                        Next j
                    ...
                End Select
            Else: End If
        End Function
    End With
End Function

```

图 5 涡激振动损伤计算程序截取片段

软件开发过程中充分利用 MSHFlexGrid 控件良好的存储、交换数据特性及文件操作函数强大文件处理能力等,编制了 25 个自定义函数共计 2850 行源代码,开发完成的涡激分析软件能在 1 分钟内完成机组 4 个常用工况下塔筒涡激损伤分析评估。

### 3 软件系统案例应用效果

以某陆上项目 3 MW 机组为例,应用该软件完成整机、无风轮、无发电机和光塔筒共 4 种吊装工况下塔筒涡激横振损伤评估。如图 6 所示,输入用户名和账号后就进入软件的主界面,左侧菜单栏为

塔筒设计所需的相关输入参数,对于涡激分析只需完成材料设置、筒体外形参数、法兰重量及塔顶集中质量点信息即可。



图 6 软件系统主界面

整个分析过程在输入完基本参数后可通过逐项按钮菜单引导完成或点击主界面"Calculation"按钮一键完成涡激分析评估,下面分步简要介绍下整个操作分析流程。

打开塔筒设计参数模块或直接打开涡激分析参数模块进行图7所示的塔筒基本参数输入,可采取两种输入方式:①输入每段塔筒接口尺寸、法兰质量、分节高度和壁厚即可;②点击按钮"恢复上次数据"或"查看/自动导入分析塔筒参数"即可编辑和调用已有的设计数据文件"Output\_Tower\_design\_datas\_for\_paper.mac"。其中ComboBox材料类型列表控件与"材料标准库模块"相关联,选择对应材料后其相关计算所需参数自动导入。



图7 筒体基本参数输入

点击筒体分析参数模块中的"导入涡激分析参数"按钮即进入图8所示的涡激分析参数模块,手动或点击"恢复"按钮导入塔顶集中质量点信息,其中塔顶集中质量点详细信息自动存储在"Output\_Tower\_Vortex\_mass"后台文件中。选择分析工况并点击"FEA"按钮将后台自动生成3个文件:模态分析前处理程序"Modal\_ANSYS\_FEA\_APDL.mac"、频率提取后处理程序"Write\_frequency\_modal.mac"、节点坐标和模态振型后处理程序"Write\_ResultList\_node.mac",随之软件自动进入模态分析模块的求解和后处理流程,该过程无需打开Ansys软件主界面就可10s内高效快速完成整个分析流程并导出结果,节点坐标、位移参数及频率结果分别存储在"Output\_coord\_fea.mac"和"Output\_modal\_frequency.mac"文件中。

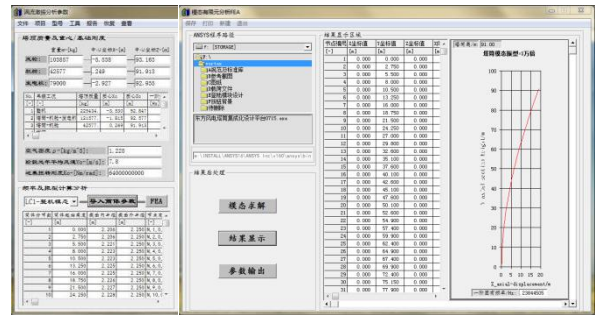


图8 涡激分析参数输入及模态分析前后处理模块

点击图9中"参数输出"按钮就进入涡激分析主界面(如图9),与此同时程序自动将相关参数反馈到下一流程。点击OptionButton选择控件按钮选择风场等级,点击"涡激分析"按钮进入涡激计算求解并输出结果,后台涡激计算详细参数如图9右侧所示。

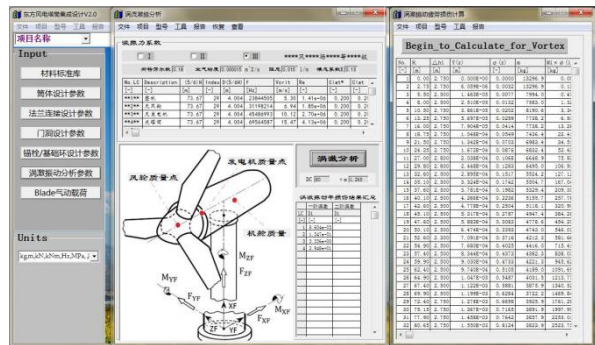


图9 塔筒焊缝涡激振动损伤分析模块

数据选取类型精度相同时,该软件计算的涡激损伤值与手动计算结果完全一致,该软件计算得到的整机一阶固有频率0.238 445 Hz与GH bladed软件相差小于0.3%。整个分析过程耗时小于1分钟,软件设计具有操作简易、高可靠性、高效率等特点。假设机组设计运行寿命20年,当只考虑塔筒自身涡流对筒体焊缝损伤而言,从图6中涡激损伤结果汇总中可知该机组整机吊装工况下塔筒最大振幅0.100 4 m、年涡激损伤8.604 E-3,远小于GL规范要求允许的最大年损伤值0.05,故塔筒自身涡流对塔筒焊缝损伤可以忽略不计。但随着塔顶的质量逐渐减少时塔筒涡流对筒体焊缝损伤影响不可忽略,塔顶质量越少时涡激损伤越大,不装风轮工况、不装发电机工况和不装机舱工况的年涡激损伤分别为0.134 7、3.336、29.48,故机组吊装时必须尽快装上机舱、发电机和风轮全套部件。

#### 4 结语

(1) 选用面向对象的编程语言 VB 开发的塔筒涡振分析软件系统极大地提高了机组设计效率, 传统、易出错的手工计算方式耗时大于 2 小时, 应用该系统只需 1 分钟;

(2) 软件操作系统具有良好的人机交互性, 可分项计算也可“一键式”输出计算结果, 计算结果高效、可靠;

(3) 软件各分析模块将整个设计流程无缝自动衔接, 同时具备中间计算参数查看功能, 用户能在 10 分钟内熟练掌握整个操作流程, 该系统的开发思路对制造业设计智能化有一定的借鉴意义;

(4) 软件系统在海量设计数据管理和辅助功能开发方面还有待进一步完善, 对大风轮叶片涡流对塔筒涡流的影响方面也有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] British Standard Institution. EN 1991-1-4:2005. Eurocode 1:Actions on structures-Part 1-4:General actions-Wind actions[S]. April 2005  
[2] German Industrial Standards Association. DIN4133-1991:Steel

Stacks[S]. November 1991

- [3] German Industrial Standards Association. Action on structures-Part4: Wind Loads(DIN1055-4)[S]. Beuth Verlag, Berlin, 2005  
[4] British Standard Institution. Eurocode 3:Design of steel structures (BS/EN 1993-1-9)[S]. London, BSI, 2005  
[5] Germanischer Lloyd. IV-Part 2 GL 2012: Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines[S]. Hamburg: GL Renewables Certification, 2012  
[6] 龙凯, 贾娇. 大型水平轴风力机塔筒涡激振动焊缝疲劳分析[J]. 太阳能学报, 2015, 36(10):2455-2459  
[7] Li Deyuan, Liu Shengxiang, Huang Xiaohua. Numerical analysis of vortex- induced vibration of the large scale wind turbine cylindrical tower[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2008, 29(11): 1432-1437  
[8] 陈东阳, 肖清, 顾超杰等. 柱体结构涡激振动数值计算[J]. 振动与冲击, 2020, 39(19):7-12+47  
[9] 苏洋, 李鹏, 胡朋等. 施工态下塔吊对钢桥塔涡激振动影响的风洞试验[J]. 公路交通科技, 2020, 37(9):67-72+89  
[10] 詹昊, 李万平, 方秦汉等. 不同雷诺数下圆柱绕流仿真计算[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(12): 129-132  
[11] 蔡汉民, 李宗成, 李相飞. C#开发 AutoCAD 在盘形槽凸轮参数化绘制中的应用[J]. 机电工程, 2019, 36(1):40-43  
[12] 沈卫华, 徐志刚, 杨得玉等. 基于三维 CAD 软件 SINOVIATION 梁设计软件开发[J]. 现代制造工程, 2018(11):77-84  
[13] 陈力, 刘关四, 丁克勤. 起重机械疲劳寿命分析预测软件开发及工程应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(9):138-145

(上接第 63 页)

到水平状态, 试验过程如图 4 所示。

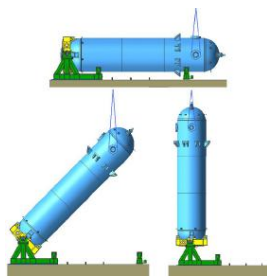


图 4 试验过程示意图

载荷试验按上述方案实施, 起吊及回落过程平稳, 无咬合、卡死或滑移现象, 各零部件无明显变形或失稳, 卸载后对各零部件检查, 表面状态及尺寸均完好。

#### 4 结语

本文设计了核电稳压器现场翻身专用工具, 并

开展了 1.1 倍载荷试验验证, 试验模拟了稳压器翻转全过程。试验结果表明, 该翻转工具能够承受翻转过程载荷并实现稳压器辅助翻身功能, 可用于现场设备翻身。

#### 参考文献:

- [1]王庆春, 李玉龙. 大型构件吊装翻转过程动载荷分析[J]. 宇航测绘技术, 2011, 31(6):21-24  
[2]郑东宏, 刘宝勇, 陈晶晶等. AP1000 反应堆压力容器安装技术[J]. 发电设备, 2013, 27 (6): 401-405  
[3]许跃武, 高宝宁. AP1000 核电机组反应堆压力容器的安装[J]. 压力容器, 2012, 29(1):69-74  
[4]张鹏, 高宝宁. AP1000 核电机组蒸汽发生器的吊装[J]. 电站辅机, 2012, 33(3):35-38  
[5]赵卫权. 塔类设备吊装过程中几个特殊点的受力分析[J]. 化工建设工程, 2004, 26(2):32-34

# 拉美水电设备出口从产品设计到工程安装全流程质量管控创新实践

奚红 刘孝皎

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**东方电机有限公司，作为拥有行业领先水力发电设备研制技术的国有企业，根据几十年形成的成熟的质量体系，不断探索满足水力发电设备现场安装质量管控的市场需要，不断转变观念，形成了秉承“安装以我为主”的安装模式取得很好的成就，特别是在拉美市场的批量化生产安装得到进一步检验，在拉美市场（杰瑞项目）获得成功。这在国内行业中属于首次。该项目获得国家最高领导层的表彰。

**关键词：**拉美水电设备出口；全流程质量管控创新实践

中图分类号：TV734

文献标识码：A

文章编码：1001-9006（2022）04-0083-06

## Full Process Innovation Practice From Design to Engineering Installation for Hydro-electric Equipment Exported to Latin-America

*XI Hong, LIU Xiaojiao*

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

**Abstract:** Dongfang Electrical Machinery, as State-owned Company with leading development & manufacturing technology of Hydro-electric equipment, according to mature quality system which has been established for decades, keeps exploring market demand in installation quality control and management and keeps changing ideas, finally achieved in forming its owned management mode of “installation quality is on me”, especially verified and succeeded in batch installation in Latin-American market which is the first for domestic industry. This project is honored by the country’s highest leadership.

**Key words:** hydro-electric equipment exportation to Latin-American; full process innovation practice;

### 1 实施背景

东方电气集团东方电机有限公司（简称：东方电机），是中国东方电气集团有限公司的全资核心子企业，是全球发电设备、清洁能源产品和服务的主要供应商。其中水电装备制造能力达年产水轮发电机组 500~700 万千瓦的世界一流水平，建立了高效的生产制造体系、科学的质量保障体系和完善的售后服务体系。

拉美作为全球水力资源丰富，最重要的水电市场，是中国机电出口的重要组成部分。民众受教育程度低，工人文化程度较低。高素质劳工不足，高技能技工不足。巴西没有专门的水电安装公司，工地安装工人流动性大。拉美市场的惯例是由设备厂家向工地派驻大量现场人员监督指导控制安装公司的安装质量。巴西劳工法对本国劳工保护严重，严格限制外籍劳工。

巴西杰瑞项目机组容量大批量大，是拉美市场

收稿日期：2022-02-24

**作者简介：**奚红（1973—），女，2004年毕业于利兹城市大学国际贸易与金融，硕士，美国 PMP 专业认证，高级经济师。现在东方电气集团东方电机有限公司项目部工作，主要从事项目管理工作。

刘孝皎（1984—），男，2009年毕业于华中科技大学电气工程及其自动化专业，学士，工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司项目部工作，主要从事项目管理工作。

的典型代表。业主明确表示东方电机负责左岸 22 台机组设备安装质量管控(图 1)。下面的安装调试过程展开,清晰展示了东方电机的核心工作是进行安装过程质量管控和物料管控。

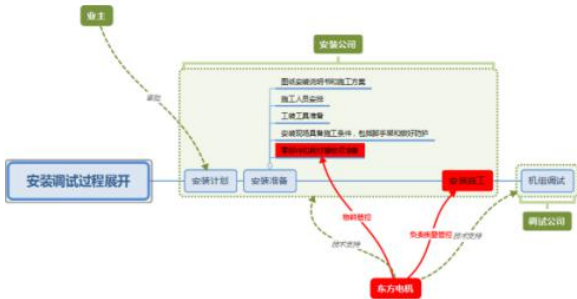


图 1 安装调试过程展开

## 2 以终为始的分阶段质量策划和创新实践

自主负责独立完成拉美国家大型机组批量安装的全过程质量管控,满足不同文化背景和法律环境下工程质量要求,充分调研评审拉美水电市场安装的现状和问题,因地制宜,瞄准顾客需要:

以“防错法”为底层思维,秉承防错立足于预防,在所有可能产生问题的地方均考虑防错方法。

运用系统分析原理和全过程控制原理,分层级遵循 PDCA 循环的科学规则,项目策划层层递进。将识别的需求灌输到产品实现的整个过程,有些必须在设计工艺阶段解决,有些必须在制造过程中解决,有些在设备安装过程中解决;通过过程控制,最后落实到现场最后一个关口,使需求得到完整满足。

首先进行质量计划展开,根据图 1“安装调试过程展开”,重点对安装公司,进行顾客需要展开:

表 1 顾客需要展开

序号	初级需要	次级需要	三级需要
1	安装过程质量管控	负责安装质量	A 部套完成度高,尽量减少现场安装活动
			B 尽量沿用巴西常规安装方法
			C 安装工装/工具易用
			D 安装手册尽量细化,并附上检查记录表式
			E 安装要求尽量量化,减少对高安装技能的要求,减少复杂的程度

		F 保证特殊吊具的安全性
		G 对安装全过程监督指导和控制
	台账管理	H 安装准备阶段提供物项箱号供查找并记录
2	物料管控	I 记录、汇总管理机组安装挪用清单并制定缺件增补计划完成交付
	特殊材料绝缘胶漆的管控	J 根据安装计划和实际进展,制定绝缘材料采购计划并完成交付

### 2.1 第一阶段策划和实践

根据表 1 项 1 安装公司的顾客需要展开分析,将顾客需要 A 到 F 项转化为产品特征,为设计制造提供输入。秉承防错立足于预防和在所有可能产生问题的地方均考虑防错方法的观念。保证安装质量,系统性的解决思路是:

(1) 部套尽量做到整装出厂,减少工地现场安装活动,减少安装的复杂程度,缩短安装周期。

在产品阶段,为了将工地的工作量最大程度减少,将能在厂内安装的全部规划好。定子结构上采取整体设计。完成制造后定子整体发运到现场,最大程度消除犯错的可能性,现场人员只需要把剩下不多的必须在工地完成的试验和吊装过程管控住,极大降低了管控的难度。

设计人员采用三维方式虚拟装配,对零部件装配安装进行干涉型检查。

改变转轮体的工序。将常规在工地进行的转轮体装配序在厂内完成,整装出厂。

(2) 组织设计工艺等技术人员走访国内贯流水电站,从安装方法改进、降低安装难度的角度进行调研,设计从结构上进行优化使得设备更加便于安装,设计不再只覆盖到制造而是延展到安装过程,降低工地施工的复杂度和难度,让作业对于巴西工人而言,更容易完成。根据电站调研过程中了解到的导水机构吊装翻身工具的使用情况,设计改进和优化了翻身工具。在杰瑞工地,不用服务人员专门指导,安装公司自己就可以轻松使用翻身工具,一次性完成导水机构在安装间的起吊翻身。

(3) 安装服务部门对安装过程中的重点和难点提前梳理。在设计联络会期间和巴西技术专家交流和讨论各自国家的安装方法和经验,充分照顾到巴西水电安装的常规作法,这样既减少了中方现场

服务的工作量，也避免安装公司以不熟悉的安装方法施工时犯错。

经过讨论确定方案后，或者设计人员通过图纸规定，或者在安装说明书中规定。例如工地转子磁极挂装，业主讲解了巴西的常规操作方法，在跟业主方充分讨论后，对图纸和安装说明书做了调整和修改。

在原贯流机安装说明书的基础上，按照巴方要求的习惯的模式进行全面改写，对内容全面细化，在每一个说明书后面附上检查记录表，用来进行安装过程控制和记录。产生 37 个安装说明书，205 个检查记录表式（表 2）。

从图纸、技术规范到安装调试运维手册，全套技术文件满足拉美水电市场顾客需要。这是工地安装活动的理论基础。

表 2 杰瑞安装说明书清单

序号	文件名	文件号	版本号
1	Checking, Acceptance and Storage of Equipment at Site	1615-JI2-MM-C2E/GE-00001	00
2	Safe Instructions	1615-JI2-MM-C2E/GE-00002	00
3	General Instruction	1615-JI2-MM-C2E/GE-00003	00
...			
7	Rotor Assembly Manual	1615-JI2-MM-C2E/GE-00007	04
...			
21	UMS-Assembly Manual	1615-JI2-MM-C2E/GE-00813	01
...			
30	Assembly Manual Draft Tube Liner	1615-JI2-MM-C2M/TU-00003	02
...			
37	Transportation and Storage of Runner assembly	1615-JI2-MM-C2M/TU-00015	00

## 2.2 第二阶段策划和实践

表 1 项 1 中的顾客需要 G 是整个策划的核心部分。根据安装说明书和图纸，发电机部套级的安装活动有 27 个，重要关键的部套安装活动占比达到 52%。当以“部套安装活动质量”为衡量指标，占优要素“人”的需要量，测算为 32~44 人。

将专业技术和质量技术有机结合，打破以部套安装为数据分析最小单位的常规视角，提出新的视角，将 27 个部套级的安装活动进一步细化，一共 195 个安装子过程，将其作为数据分析单位，按照

发生问题的可能性和发生后果的严重程度逐一打分，加权后重要程度得以区分和清晰的呈现（表 3）。创造了新的选择。

表 3 安装子过程加权分析

部套级安装活动	安装子过程	可能性	严重程度	加权值	
1 封水盖板基础安装	1	0.2	0.2	0.04	
	2	0.2	0.2	0.04	
	3	0.5	0.5	0.25	
	4	0.5	0.5	0.25	
...					
12 转子装配安装	88	0.5	0.2	0.1	
	89	0.3	0.5	0.15	
	90	0.2	0.5	0.1	
	91	1	0.8	0.8	
	92	0.5	0.2	0.1	
	93	1	1	1	
	94	0.5	0.5	0.25	
	95	1	1	1	
	96	0.1	0.2	0.02	
	97	0.2	0.5	0.1	
	...				
	27 机组启动试运行	187	1	1	1
		188	1	1	1
		189	1	1	1
190		1	1	1	
191		1	1	1	
192		1	1	1	
193		1	1	1	
194		1	1	1	
195	1	1	1		

这 195 个安装子过程的重要程度通过加权后得以区分和清晰的呈现。加权值最高的两个值 0.8 和 1，对应的安装子过程属于关注级别最高级，是资源投入的重点。这两种最重要的安装子过程占总数 31.8%；加权值合计占所有子过程加权值合计的 81.75%。这个重要的结论符合帕累托法则，控制住 31.8% 关键安装子过程，即能控制 81.75% 的安装质量，是安装活动创新的专业数据基础和重要依据。

### 2.3 第三阶段策划和实践

前面两个阶段的分析策划覆盖了东方电机面临的复杂性、顾客需要、当地同行知名企业的竞争压力、成本冲击、限制约束因素和不可避免的变革，是第三阶段电站工地现场进行精准策划的基础。

东方电机发挥技术优势，技术人才储备优势，对安装全过程进行相匹配的精准的质量管控和资源配置，既百分百保证关键资源有效利用，关键环节和过程得到有效技术质量控制，又避免系统浪费。核心思想是“分级管控”。

#### (1) 安装过程分级管控

首先体现在现场团队组成不仅包括东电的员工，还包括对安装过程质量管控有贡献的公司和人员（图2）。

根据图1“安装调试过程展开”，东方电机现场团队的工作有三个：负责安装质量，物料管控和常规的技术支持。

核心工作是负责安装质量，表3中重要程度最高的0.8和1代表的主要/关键安装过程。团队主力成员来自东方电机：服务部从事水轮机和发电机安装服务的工程师，还包括水轮机、发电机和控制设备三个专业的设计和工艺人员各一人，以及水轮机分厂高级技师二人。

一方面，设计、工艺和技师在服务部各自专业工程师的领导下进行日常的安装服务工作，为安装

调试活动提供技术支持、指导以及监控。

同时，将设计、工艺和技师直接派到现场，充实了现场团队的技术力量，现场问题现场及时解决。将与国内总部的沟通需要降至最低，解决了两个国家时差12小时，工作时间颠倒，以及工地电话网络不畅。极大地提高了安装效率。

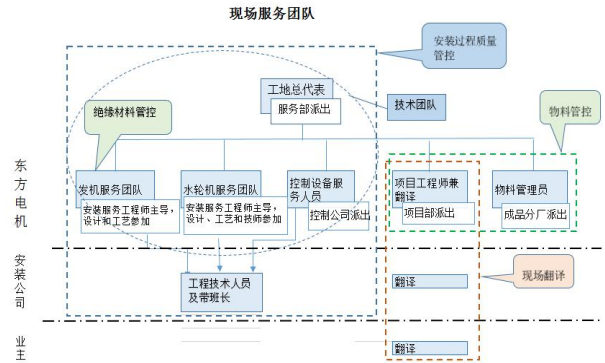


图2 杰瑞工地现场服务团队

对于“分级管控”中重要程度级别最高的0.8和1的安装子过程（图3），东方电机的策划是：

“事前”-在每一次施工前，基于QCR表，图纸和安装说明书，东方电机技术团队对安装公司这台机的施工人员进行技术交底；

“事中”-在安装过程中监督指导；

“事后”-东方电机技术人员亲自复测、复核数据。

（SGDPE-电站线上文件审批管理信息系统）

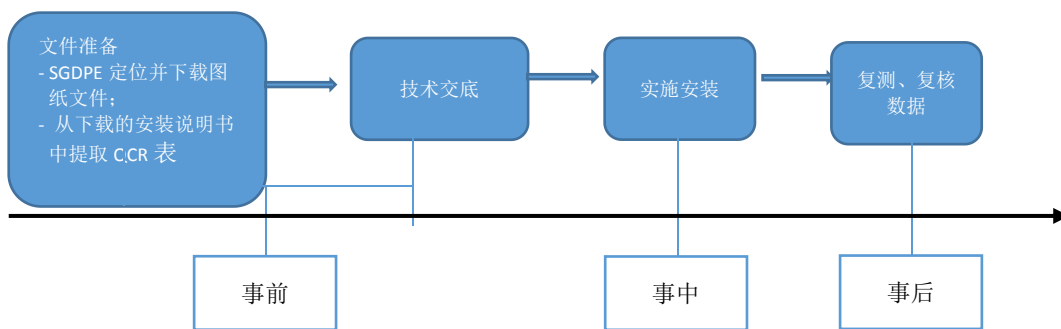


图3 重要安装过程管控

表3中级别0.5的安装子过程，团队成员增加了来自安装公司的工程技术人员和带班干活的工长。由他们指导监督工人施工。中方人员事后检查QCR结果并亲自复测。

级别最低的0.2的安装子过程，中方人员检查QCR结果并在巡检中监控。

东方电机现场技术团队专门为安装公司实施左岸设备安装编写制定了通用安装要求（表4）：



表4 杰瑞工地通用安装要求

通用安装要求
1. 所有运至安装间和现场安装的部件，在安装前对其进行外观检查，判定是否符合图纸的设计
2. 所有部件的加工面在清扫完防护油脂后应检查加工面是否有高点、碰损、毛刺和生锈等缺陷，如有需研磨去除
3. 所有螺纹孔需用丝锥进行清理，所有公称直径大于 56 的螺栓需按照安装说明书的要求进行预装
4. 所有螺栓应根据图纸给定力矩或者拉伸值把紧，如果图纸未规定力矩则按安装说明书的力矩表进行把紧；M36 以下的螺栓根据图纸可靠锁定，图纸未给定锁定方式的螺栓应涂抹螺纹锁固胶
5. 所有把合面检查接触情况，应 0.05mm 塞尺不能通过。
6. 所有部件应按机组编号进行对应安装；有配对要求的部件需根据编号标记进行配对安装

根据发生安装子过程的重要程度对“分级管控”

进行定义（表5）：

表5 分级管控的定义

重要程度	管控工作内容定义
1	安装根据图纸、安装说明书、现场指令进行。东方电机在安装前进行技术交待，在安装过程中监督和指导，确认 QCR 记录相关数据，现场核实确认安装质量。
0.8	安装根据图纸、安装说明书、现场指令和邮件进行。东方电机在安装前进行技术交待，巡检，确认 QCR 记录相关数据，现场核实确认安装质量。
0.5	安装根据图纸、安装说明书、现场指令和邮件进行。东方电机必要时现场核实，巡检，确认 QCR 记录相关数据。安装公司反馈安装质量。
0.2	安装根据图纸或者安装说明书进行。东方电机巡检。安装公司反馈安装质量。

下面选取典型部套级安装活动“径向支撑加工”的执行进行分析（表6）。

表6 案例“径向支撑加工”

步骤	安装子过程	发生后果的严重程度	管控级别和措施
1)径向轴承清扫	清扫径向瓦，特别是高压油孔清扫检查	0.2	1)安装公司按照说明书和图纸进行安装，向东电反馈安装质量;2)过程巡检。
	按安装说明书对径向瓦进行重新编号	0.2	
	复测大轴的中心和水平，测量轴承支架同大轴距离尺寸	1	
2)径向支撑加工前相关尺寸测量	测量主轴同轴承支架间的距离	1	事前技术交待；安装过程中监督和指导；事后亲自复测核实数据,签字确认 QCR 表记录。
	测量 6 件带高压油孔的径向瓦厚度尺寸，并对径向支撑按照安装说明书重新编号	0.8	
	测量 6 件径向支撑加工前的厚度	0.8	
3)计算径向支撑加工厚度	根据测量数据计算 6 件径向支撑的加工厚度	0.8	事前技术交待；对过程巡检；事后亲自复测核实数据，签字确认 QCR 表记录。
4)径向支撑加工及尺寸复测	检查 6 件径向支撑的加工厚度，并用刀口尺检查加工面的平面度，应满足计算值和图纸的要求。	0.8	

(2)“易错”安装过程和“防错法”的使用

在做了系统防错策划并且控制住主要关键安装过程之后，东方电机再把具体的“易错安装过程”梳理出来，寻求业主方帮助监督（表7）。

表7 易错安装过程和措施

序号	描述	原因	防错措施
1	绝缘套管安装。漏装套管或者安装时不小心损坏垫圈	不熟悉产品,或者不是专业电气安装人员	事中盯守和指导
2	去除定子锥体端孔内防锈油前,须做好定子线圈的保护,以免污染	不熟悉产品,疏忽或者不是专业电气安装人员	事中盯守和指导
3	漏装密封圈或安装不小心损坏密封圈	不熟悉产品、疏忽	事中盯守和指导
4	发电机某部件Φ7和Φ14的连接头易装错	疏忽、非电气人员安装	“消除失误”:安装前先将Φ7 接头用记号笔涂成蓝色,Φ14 接头涂成红色
5	合缝面去高点/毛刺达到平面度要求	缺乏经验或技能	采用塞尺这种通/止类测量工具。
6	M36 以上除了 M110 之外的螺栓把紧	国内安装标准不能简单移植,没有规定或规定混乱	水轮机部分,在图纸上补全;发电机部分,针对性给安装公司提供力矩表,参照执行。

### 3 实施效果

东方电机提供高质量水电设备，所有机组一次性投运成功，以终为始，最终实现了适应拉美水电市场的安装服务的科学化、程序化和模块化，可复制推广。东方电机的研制技术获得了四川省科技进步特等奖。

东方电机及时总结这次管理创新带来的经验，系统融进制度形成标准化文件（表8），应用于国内外不同电站服务过程，例如非洲吉布 III 项目、柬埔寨桑河项目、巴基斯坦卡洛特项目等等，仍保持了效果和效率，因此具有适应性。

表8 制度文件

序号	文件名
1	电站服务项目管理 WBS
2	电站服务工作流程

3	电站服务工作模板
4	服务项目策划及准备表
5	现场安装技术交底验证单
6	电站服务部质量诚信考核办法
7	工地顾客满意度调查表
8	设备维修处理通知单管理程序
9	电站质量问题处置程序
10	现场临时服务人员借调程序
11	产品安装调试完工总结程序
12	产品安装调试计划准备程序
13	产品安装调试实施程序

在全球化进程中，东方电机补齐价值链中的缺口环节，提高价值链的自主性和独立性。将高附加值的部分留在国内。通过全流程创新，解决最后一个国外安装环节，提供了机电产品出口新模式。

### 集团要闻

## 东方电气集团荣获两项四川省企业文化建设优秀成果

11月2日，由中国企业联合会、中国企业家协会、四川省经济和信息化厅、四川省政府国有资产监督管理委员会指导，四川省企业联合会、四川省企业家协会、四川省企业管理协会主办，四川省企业文化研究会等单位承办的“四川省第十四届企业文化年会”在成都召开，四川省委、省政府决策咨询委员会、四川省经信厅、四川省国资委领导以及全省企业界、经济界、学术界、文化界、新闻界代表200余人参加了此次年会。东方电气集团受邀参会。

年会颁发“2020-2021年度四川省企业文化建设优秀成果”，东方电气集团荣获“四川省企业文化建设先进单位”，《弘扬“东汽精神” 坚定文化自信 以红色基因引领国有企业文化建设的探索与研究》荣获“四川省企业文化建设优秀成果一等奖”。会上，四川省企业文化研究会第五届理事会副理事长，集团公司党组办/董办/公司办副主任柯俊雄以《弘扬“东汽精神” 践行“同·创”文化》为题进行交流，与会嘉宾共同观看东方电气集团“绿色动力 驱动未来”品牌形象宣传片。

文化兴则企业兴，文化强则企业强。近年来，东方电气集团坚持守正创新，将赓续红色基因与全集团广大党员干部职工的思想行动紧密融合，以企业一个甲子发展历程中积淀的深厚文化为根基，弘扬伟大建党精神，传承企业宝贵的“东汽精神”、践行“同·创”文化，致力用一流的企业文化打造具有全球竞争力的一流企业，在高质量发展道路上谱出曲曲新韵、结出累累硕果。

“拼搏奋进争先 强国复兴有我”群众性主题宣传教育活动、弘扬“东汽精神” 践行“同·创”文化“八个一”主题实践活动、东方电气文献纪录片、统一VI标识、文化路演、系列“同·创”杯文体活动……润物无声，在一系列职工身边看得见、摸得着、能参与的活动中，勇争“一流”的文化种子悄然深植干部职工心田，显示出旺盛生机和蓬勃活力。

奋进新征程，扬帆再出发。在全面建设社会主义现代化国家新征程上，东方电气集团将坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，持续增强历史自觉、坚定文化自信，坚定不移走中国特色社会主义道路，扎根川渝、立足全国、放眼世界，在传承与发展的碰撞中，在守正与创新的交融中，为“世界的东方 一流的电气”聚拢文化合力，在更加壮丽的社会主义文化发展新篇章中绘就独特的“东方”一页，为实现中华民族伟大复兴提供更为强大的精神力量。

来源：东方电气网