DONGFANG ELECTRIC REVIEW

公开 ISSN 1001-9006 第38卷第2期 (总第150期) 国内邮发代号：62-187
发行 CN 51-1333/TM 出版日期:2024年3月25日 国 内 定 价：8.00 元

东方电气评论 第三十八卷 第二期 二〇二四年三月

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM

2

2024

第38卷 总第150期

東方電氣評論

DONG FANG DIAN QI PING LUN

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

ISSN 1001-9006
03>
9 771001 900248

中国东方电气集团有限公司
四 川 省 动 力 工 程 学 会 主办

2
2024
第38卷第2期 总第150期
（双月刊，1987年创刊）

東方電氣評論

目 次

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：胡修奎
副主编：董娜 唐健
本期责任编辑：李宏
英文编辑：张媛
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：028-87898263
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

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*b*A4*88*zh*p￥8.00*750*18*2024-02

DONGFANG ELECTRIC REVIEW

2
2024
2024-3-25 Vol.38 No.2
(Bimonthly, since 1987)

CONTENTS

Sponsor: Dongfang Electric Corporation
Chief Editor: HU Xiukui
Vice Chief Editors: DONG Na, TANG Jian
Executive Editor: LI Hong
English Editor: ZHANG Yuan
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: 028-87898263 **Fax:** 028-87898267
E-mail: dfdqpl@dongfang.com
Overseas Distrbution by:
China National Publishing Industry Trading Corporation
(P. O. Box 782, Beijing, P. R. C.)

质子膜燃料电池耦合反应模型研究

李敏[1] 李婷[2] 张媛[1] 胡小勇[3*]

1.东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731；

2.东方电气（成都）氢燃料电池科技有限公司，成都 611731；3.东方电气（福建）创新研究院有限公司，福州 350108

摘要：本文提出了一种基于多孔介质两相流传质过程的质子交换膜燃料电池三维理论模型，通过流体力学、两相流传质、膜传输以及电化学反应等过程的多重耦合，研究多物理过程对于燃料电池性能影响的协同机制。研究结果表明，氢气空气同向流条件下，燃料电池内部液态水主要产生于中部及出口端，且流道脊区域的多孔介质液态水含量远高于流道区域；由于质子膜内阻、阴极氧气浓度以及多孔电极液态水含量的综合作用，电流密度峰值位于反应区中部区域，达到进口处电流密度的两倍以上。

关键词：质子交换膜燃料电池；两相流模型；局部性能分布

中图分类号：TM911.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）02-0001-07

Two-phase Three-dimensional Model Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

LI Min[1], *LI Ting*[2], *ZHANG Yuan*[1], *HU Xiaoyong*[3*]

(1. DEC Academy of Science and Technology Co.,Ltd., 611731, Chengdu, China; 2. Dongfang Fuel Cell Technology Co.,Ltd., 611731, Chengdu,China; 3. Dongfang Electric (Fujian) Innovation Institute Co., Ltd., 350108, Fuzhou,China)

Abstract: A three-dimensional model of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) based on two-phase flow theory is proposed. Multi-physical processes including fluid dynamics, two-phase mass transport, water transport in membrane and electrochemical reactions are considered to study the localized fuel cell performance. The results show that liquid water condenses from mid area to the outlet portion of the fuel cell under co-flow operation of hydrogen and air. The liquid water saturation in porous electrode shows much larger value under the rib portion than that of the gas channel. According to the simulation results, the current density reaches the peak around the mid part of the reaction area which shows twice that at the inlet portion The current density distribution is dependent on localized membrane water content, oxygen concentration and liquid water saturation in porous electrode.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; two-phase model; local performance

在碳达峰碳中和的背景下，我国加快构建“清洁、低碳、安全、高效”的能源体系刻不容缓。氢作为一种零碳排放的二次能源，能方便地转换成电和热，是未来能源变革的重要组成部分。在氢能利用中，质子交换膜燃料电池（PEMFC）是一种通过富氢燃料与氧化剂的电化学反应直接发电的新型发电装置，其发电过程不受卡诺循环的限制，理论发电效率高达 80 %以上，考虑反应极化、燃料利用率以及附属部件能耗等因素，系统发电效率可达 45～60 %。PEMFC 具有清洁高效、结构紧凑、比

收稿日期：2023-11-28

作者简介：李敏 (1988－)，女，2012 年毕业于复旦大学粒子物理与原子核物理专业，硕士，高级工程师。现工作于东方研究院战略与技术研究所，主要从事新能源和双碳等领域的研究工作。

胡小勇（1973－）男，1996 年毕业于合肥工业大学高分子材料与工程专业，硕士，高级工程师，现任东方电气（福建）创新研究院有限公司副总经理。通信邮箱：huxy@dongfang.com。

功率高等优点，因此在大型电站、家用电热联供系统、备用电源以及交通领域等多个领域拥有广阔的应用前景与巨大的市场潜力。国内外科研院所及相关企业在燃料电池的基础研究与产品开发方面均已投入大量研究工作。

由于 PEMFC 的质子交换膜电解质工作特性，电池内部的水热管理对其工作性能与寿命的影响至关重要，目前国内外研究者主要通过建立不同的 PEMFC 理论模型，分析电池内部水热分布特性及其与电池性能的关系[1-13]。然而，PEMFC 内部反应过程涉及多个物理过程的相互作用，包括反应气体在流道与多孔介质中的流动特性、气-液态水及膜内解离态水的相转变与传质过程、阴阳极催化层电化学反应过程以及多组分传热传质特性等，因此建立一个收敛、可靠且能充分描述实际电池内部各物理化学过程的耦合模型是研究燃料电池工作特性与设计优化的重点。

本文综合考虑了质子交换膜燃料电池内部多物理场过程，建立了一种三维多相流耦合模型，并在课题组前期工作基础上通过电池原位监测技术进行多参数验证[13]，重点研究了稳态条件下电池内部主要特征参数的分布特性与水的多相传质过程，从而为燃料电池堆的设计与运行参数优化提供了理论基础。

1 质子交换膜燃料电池理论模型

1.1 模型几何结构

理论模型基于质子交换膜燃料电池单电池结构，由阳极集流板、氢气流道、膜电极、空气流道以及阴极集流板构成。如图1所示，氢气与空气同向进入电池进行反应，蓝色部分为氢气流道（上侧）与空气流道（下侧），由位于电池中间的膜电极隔开；阳极集流板（厚度d_1）、阴极集流板（厚度d_1）以及流道间的流道脊（厚度d_2）均为石墨导电材料；膜电极由阳极气体扩散层（厚度d_3）、阳极催化层（厚度d_4）、质子交换膜（厚度d_5）、阴极催化层（厚度d_4）以及阴极气体扩散层（厚度d_3）组成；流道宽度为a_1，流道脊宽度为a_2，电池宽度为X，电池长度为Y。模型的主要结构参数如表1所示。

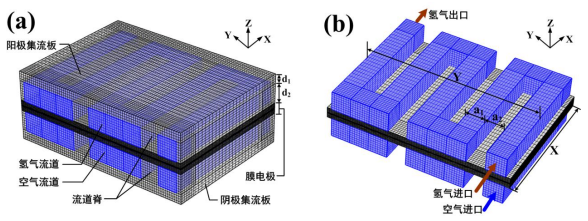


图 1 质子交换膜燃料电池模型结构图

表 1 燃料电池三维模型的几何结构参数

mm

符号	参数	数值
a_1	流道宽度	1
a_2	流道脊宽度	1
d_1	集流板厚度	0.5
d_2	流道深度	1
d_3	气体扩散层厚度	0.25
d_4	催化层厚度	0.01
d_5	质子交换膜厚度	0.03
X	电池宽度	7
Y	电池长度	9.5

1.2 模型控制方程

反应气体流道中通过Navier-Stokes方程与连续性方程描述气体流动特性：

$$\rho\vec{u}\cdot\nabla\vec{u}=-\nabla P+\nabla\cdot\left(\mu(\nabla\vec{u}+(\nabla\vec{u})^{\mathrm{T}})-\frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot\vec{u})I\right) \quad (1)$$

$$\nabla\cdot(\rho\vec{u})=0 \quad (2)$$

其中，ρ为气体密度，u为液体线速度，P为压强，μ为动态粘度系数。

在多孔介质中，气相与液相的流体特性由达西方程描述：

$$\frac{\mu_{\mathrm{g}}}{KK_{\mathrm{rg}}}\vec{u}_{\mathrm{g}}=-\nabla P_{\mathrm{g}} \quad (3)$$

$$\frac{\mu_{\mathrm{l}}}{KK_{\mathrm{rl}}}\vec{u}_{\mathrm{l}}=-\nabla P_{\mathrm{l}} \quad (4)$$

其中 P_{g}与 P_{l}分别为气相与液相压强，$\vec{u}_g$ 与 $\vec{u}_l$ 为气相与液相流速，μ_{g}与μ_{l}为气相与液相粘度系数，K_{rg} 与 K_{rl} 气相与液相的相对渗透率。K 为多孔介质的绝对渗透率。

相对渗透率由多孔介质的液态水填充系数s 决定：

$$K_{\mathrm{rg}}=(1-s)^3 \quad (5)$$

$$K_{\mathrm{rl}}=s^3 \quad (6)$$

多孔介质中的气液两相流传输过程通过毛细

压方程计算：

$$P_c = P_g - P_l \tag{7}$$

其中，毛细压强由 Leverett $J(s)$经验公式给出:

$$P_c = \sigma\cos\theta\left(\frac{\varepsilon}{K}\right)^{0.5} J(s) \tag{8}$$

其中σ为表面张力，θ为接触角，ε多孔介质本征孔隙率。$J(s)$在亲水表面（θ<90°）与疏水表面（θ>90°）分别为：

$$J(s) = 1.417(1-s) - 2.120(1-s)^2 + 1.263(1-s)^3 \text{，} \theta < 90^\circ \tag{9}$$

$$J(s) = 1.417s - 2.120s^2 + 1.263s^3 \text{，} \theta > 90^\circ \tag{10}$$

液态水与水蒸气表面的传质速率$\dot{m}_i^{liq}$与水蒸气分压$\chi_v P_g$、液态水填充系数及饱和蒸汽压P_{sat}密切相关，水蒸气凝结速率与液态水蒸发速率分别表示为：

$$\dot{m}_{H_2O}^{liq} = k_{con}\frac{\varepsilon(1-s)}{RT}\chi_v(\chi_v P_g - P_{sat}),\ \chi_v P_g - P_{sat} > 0 \tag{11}$$

$$\dot{m}_{H_2O}^{liq} = k_{evp}\frac{\varepsilon s \rho_l}{M_1}(\chi_v P_g - P_{sat}),\ \chi_v P_g - P_{sat} < 0 \tag{12}$$

其中k_{con}与k_{evp}分别为凝结与蒸发速率常数。

针对质子交换膜采用稀溶液模型，通过Nernst-Planck方程描述膜内各组分的传质过程：

$$\vec{N}_i = -D_i^d \nabla c_i^d - z_i c_i^d \mu_i \nabla \Phi_e + \vec{u}^d c_i^d \tag{13}$$

其中c_i^d为组分i的解离态浓度,D_i^d组分i的膜内有效扩散系数，z_i与μ_i分别为组分i的电荷数与迁移率，Φ_e离子电势，膜内的对流传质项$\vec{u}^d c_i^d$忽略不计。

膜内水含量λ是反应气体相对湿度a的函数，通过经验方程给出：

$$\lambda = 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36a^3 \tag{14}$$

电迁移系数由膜内水含量计算：

$$n_{drag} = \frac{2.5}{22}\lambda \tag{15}$$

基于全氟磺酸膜体系的质子交换膜离子电导率由以下方程给出：

$$\sigma_e = \exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right](0.514\lambda - 0.326) \tag{16}$$

针对燃料电池电化学反应过程，采用线性Butler-Volmer 方程描述阳极氧化反应（HOR），通过 Butler-Volmer 方程描述阴极还原反应（ORR），转移电流密度计算如下:

$$j_A = A^{eff} i_A \sqrt{\frac{c_{H_2}}{c_{H_2,ref}}}\left(\frac{\alpha_A + \alpha_C F\eta}{RT}\right) \tag{17}$$

$$j_C = A^{eff} i_C \frac{c_{O_2}}{c_{O_2,ref}}\exp\left(-\frac{\alpha_C F\eta}{RT}\right) \tag{18}$$

其中A^{eff}为催化层有效比表面积,i_A与i_C分别为阳极与阴极催化剂的交换电流密度$c_{H_2,ref}$与$c_{O_2,ref}$分别为氢气与氧气的参比浓度，R为理想气体常数，η为极化电压。由于液态水的存在，降低了多孔催化层的内部比表面积，因此通过多孔介质液态水填充系数调整催化层的有效比表面积

$$A^{eff} = A(1-s) \tag{19}$$

反应极化电压则通过电子电势Φ_s、离子电势Φ_e以及平衡电势E^0计算：

$$\eta = \Phi_s - \Phi_e - E^0 \tag{20}$$

阳极与阴极的反应平衡电位E^0分别由 Nernst 方程给出：

$$E_a^0 = 0 \tag{21}$$

$$E_c^0 = 1.23 - 0.9\times10^{-3}(T - 298.15) + \frac{RT}{2F}\ln\sqrt{C_{O_2}} \tag{22}$$

催化层内部的电子与离子传导遵循电荷守恒定律：

$$\nabla\cdot(\vec{j}_s + \vec{j}_e) = 0 \tag{23}$$

其中，电子电流密度$\vec{j}_s$与离子电流密度$\vec{j}_e$均遵循欧姆定律：

$$\nabla\cdot\vec{j}_s = -\nabla\cdot(\sigma_s\nabla\Phi_s) = -j \tag{24}$$

$$\nabla\cdot\vec{j}_e = -\nabla\cdot(\sigma_e\nabla\Phi_e) = j \tag{25}$$

1.3 模型假设及边界条件

理论模型假设：

（1）研究体系为恒温；

（2）材料物理特性参数各向同性；

（3）由于流道内气体线速度与压强梯度较低，因此流动方式假设为层流；

（4）阴阳极反应气体的各组分形成理想混合气体。

边界条件设定：

（1）阴阳极流道壁面采用无滑移边界条件；

（2）多孔介质内的液态水到达流道-电极界面时，受气体对流作用迅速排出；

（3）阳极集流板外表面电位设置为零；

（4）阴极集流板外表面设置平均电流密度：

$$I_{\mathrm{dis}} = 0.6A/cm^2 \tag{26}$$

（5）阳极与阴极气体的流量分别为其化学计量比 $Stoich_{\mathrm{A}}$ 与 $Stoich_{\mathrm{C}}$ 的函数：

$$u_{\mathrm{A,in}} = Stoich_{\mathrm{A}} \frac{I_{\mathrm{dis}}}{2Fc_{\mathrm{H_2,in}} A^{\mathrm{s}}_{\mathrm{A,in}}} \tag{27}$$

$$u_{\mathrm{C,in}} = Stoich_{\mathrm{C}} \frac{I_{\mathrm{dis}}}{4Fc_{\mathrm{O_2,in}} A^{\mathrm{s}}_{\mathrm{C,in}}} \tag{28}$$

$$Stoich_{\mathrm{A}} = 1.5 \tag{29}$$

$$Stoich_{\mathrm{C}} = 2.0 \tag{30}$$

其中，$c_{\mathrm{H_2,in}}$ 与 $c_{\mathrm{O_2,in}}$ 氢气与氧气在阳极与阴极流道进口处的浓度；$A^{\mathrm{s}}_{\mathrm{A,in}}$ 与 $A^{\mathrm{s}}_{\mathrm{C,in}}$ 为阳极与阴极流道截面积。

（6）阴阳极流道进口处相对湿度为零；

（7）阴阳极流道出口处压强为 1bar；

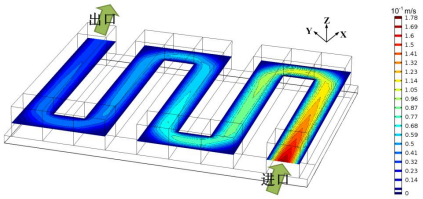
（8）燃料电池工作温度为 50℃。

2 结果与讨论

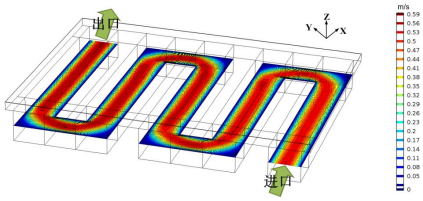
本文根据上述理论模型分析了质子交换膜燃料电池稳态工作条件下的内部参数分布特性，研究反应气流场、电化学极化、多相水分布以及膜内传质过程对于燃料电池性能的协同影响机理。

2.1 反应气体流场分布

燃料电池反应气体流道采用经典的“蛇形”单流道设计，且阴阳极流道在膜电极两侧一致。图 2 显示了阳极与阴极气体在 1.3 所述工作条件下的气体流速分布。由于流道壁面无滑移边界条件，反应气体靠近壁面处流速较低，在流道中心位置较高。阳极侧，氢气流速在进口端最高，随着反应的消耗，气体流速逐渐降低，出口端气体流速远低于进口端流速。尽管氢气的湿度逐渐增加，但是水蒸气的摩尔增量远低于氢气的反应消耗量，因此阳极体积流速大幅降低。阴极侧，空气流速从进口端至出口端略有增加，主要由于阴极的反应生成水导致阴极气体的水蒸气摩尔量增加，且增量大于氧气的反应消耗量。



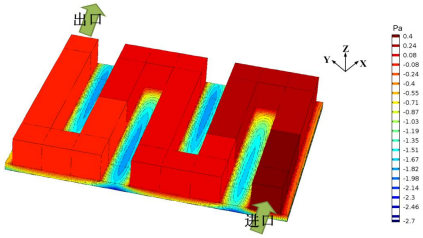
（a）阳极



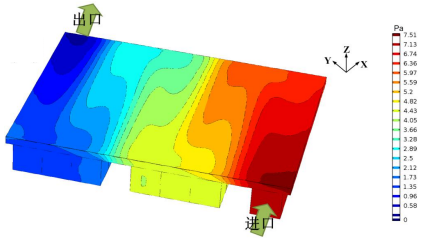
（b）阴极

图 2　燃料电池反应气体流道内部线速度分布

图 3 为相应的阴阳极反应气体压强分布图。由于进口端阳极气体流量约为阴极的 30%，且阳极气体总摩尔量随着反应进行大幅下降，而阴极则略微升高，因此阳极进出口压差远低于阴极。其中，阴极多孔介质内部气体压强与对应位置流道内压强基本保持一致；而阳极多孔介质内部压强则为负压（尤其在流道脊部位），远低于流道内气压，主要是由于催化层反应消耗大量氢气。



（a）阳极



（b）阴极

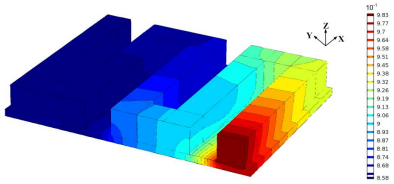
图 3　燃料电池流道及多孔电极内部压强分布

2.2 反应物浓度分布

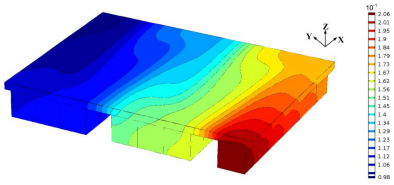
图 4 显示阴阳极反应物浓度分布，氢气与氧气的摩尔浓度均随着反应的进行，由进口端到出口端

逐渐降低。其中，阳极气体由氢气与水蒸气组成，氢气摩尔百分比保持在 85 %以上，同时由于阳极催化反应活性极高，因此出口端氢气浓度略微下降对于反应性能的影响可忽略不计。阴极气体包括氧气、氮气及水蒸气，其中进口处氮气浓度达到 78 %，随着反应的进行，氧气浓度由进口处 21 %降低至出口约 10 %。由于阴极催化反应是燃料电池电化学反应速率的瓶颈，因此出口端氧气浓度下降一倍对于反应速率影响尤为明显。

流道及多孔介质中的反应气体相对湿度如图 5 所示，由于本文中氢气与空气为同向流，因此相对湿度的分布在膜两侧基本保持一致。其中，从进口端的干燥气体氛围逐渐润湿（反应生成水及膜内水的互扩散），至电池中部达到水蒸气饱和状态并维持至电池出口端。因此，电池中部至出口端的多孔电极区域将产生一定程度的液态水（2.4 部分）。

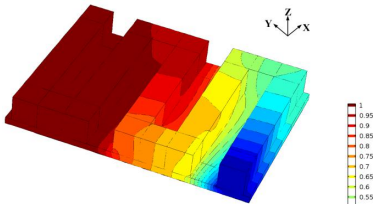


（a）阳极氢气浓度

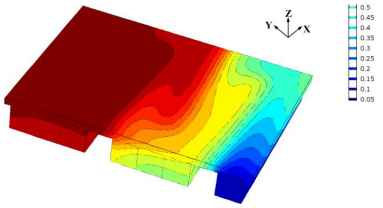


（b）阴极氧气浓度

图 4　燃料电池流道与多孔介质内部反应物摩尔百分比分布



（a）阳极



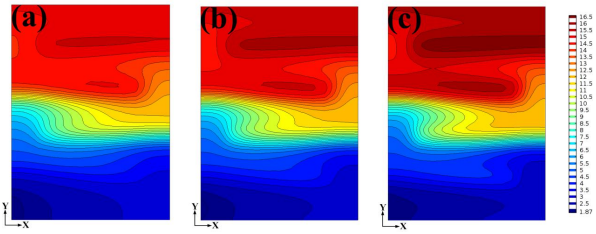
（b）阴极

图 5　燃料电池流道与多孔介质内部气态水相对湿度分布

2.3 膜内水传输过程

燃料电池质子交换膜的质子导电性与膜内含水量密切相关（方程（16）），而质子交换膜含水量在燃料电池不同位置可能存在较大差异，从而导致电池性能的不均一性。膜内含水量主要由两方面决定：①膜-气体界面的水交换，及气态水与解离态水的相转变与质量交换过程；②膜内部的水传输过程，包括对流扩散、浓差扩散以及电迁移。其中，水在膜内的对流扩散过程决定于膜两侧压强梯度，由于气体压差较小，在本文中忽略该过程。

图 6 显示了稳态条件下质子交换膜的水含量分布。其中，反应气体进口处的膜内含水量较低（干燥气体氛围），而反应气体出口处的膜内含水量较高（水蒸气饱和）。膜内含水量沿着气体流道方向逐渐增加，相邻流道间由于存在水含量梯度，因此形成一定的横向浓差扩散。图 7 为膜内水的净扩散速率分布，主要受浓差扩散与电迁移的共同影响。从进口端到电池中部，流道与流道脊覆盖区域膜内水扩散行为迥异：流道区，水由阳极扩散至阴极；流道脊区，水由阴极扩散至阳极。从电池中部至出口端，流道及流道脊区域水的净扩散方向一致，均由阴极扩散至阳极。



（a）阳极侧表面　（b）膜中间层　（c）阴极侧表面

图 6　质子交换膜水含量分布（λ）

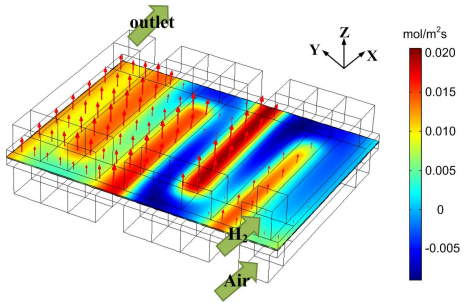
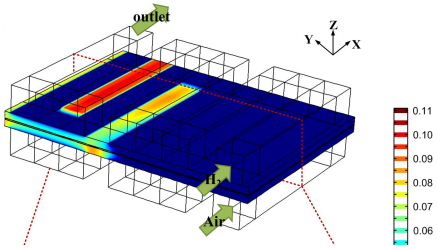


图 7　质子交换膜内水的净扩散速率分布

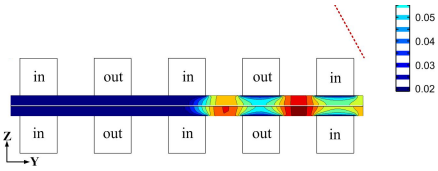
2.4 多孔电极液态水分布

随着反应生成水的积累，反应气体的相对湿度逐渐增高，当达到过饱和时发生液态水凝结。多孔介质中气态与液态水的相转变过程（蒸发与凝结）

与其内部液态水填充率密切相关。图 8 显示了阴阳极多孔介质（气体扩散层与催化层）内部液态水填充率分布。液态水主要产生于电池中部至出口之间的区域，这与前文中反应气体相对湿度的分布结果吻合。由图 8（b）的截面图所示，多孔介质中的液态水含量在流道脊区域远高于流道覆盖区域；阴极多孔介质液态水含量高于阳极，且最高值达到 0.11。液态水填充率表征了燃料电池电极的水淹程度，该值的升高将抑制反应气体的传质过程，造成燃料电池局部性能下降，从而导致电池整体电压降低。图 9 分别显示了阳极与阴极气体扩散层的液态水含量，膜两侧总体分布基本保持一致，且阴极侧水含量略高于阳极侧。



（a）三维分布



（b）YZ 平面分布

图 8　燃料电池多孔介质液态水含量分布

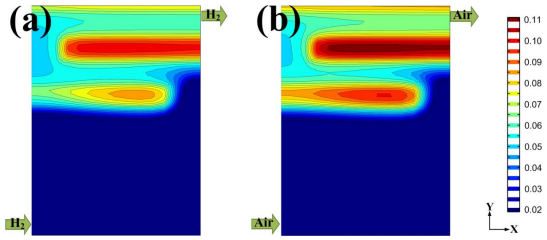


图 9　阳极（a）与阴极（b）气体扩散层中部液态水含量分布（XY 平面）

2.5 反应特性分布

燃料电池局部反应分布特性受多因素共同影响，包括膜的导电性能、反应物浓度分布以及传质过程等。图 10 为燃料电池内部电流密度分布。电池进口区域电流密度最低 0.36 A/cm^2，沿 Y 轴方向逐渐升高，在中部区域达到最高值 0.76 A/cm^2，到出口端再逐渐降低。其中，进口区域反应气体干燥，且质子交换膜水含量较低，导致膜内阻升高，降低了反应电流；中部区域反应气体水蒸气达到饱和状态，质子交换膜充分润湿从而提升离子电导率，因此局部电流密度升至最高；出口端阴极反应气体中氧气浓度大幅下降，且多孔介质中液态水的积累进一步抑制了氧气的传质过程，因此反应电流逐步下降。另外，流道脊覆盖区域电流密度远高于流道覆盖区域，主要是由于多孔电极的反应电流通过流道脊汇流至电池外部集流板；而流道区域的反应电流则需通过电极、气体扩散层以及集流板的横向导电进行集流，增加了欧姆内阻，因此流道区域电流密度较低。

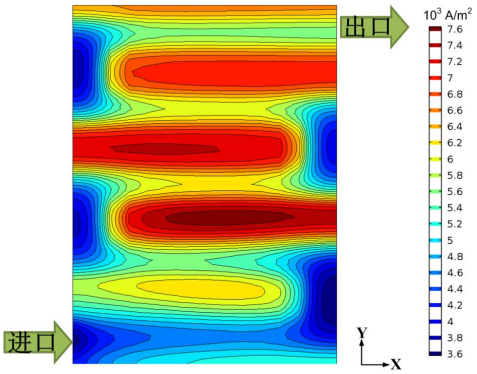
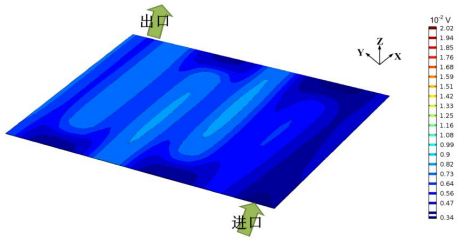
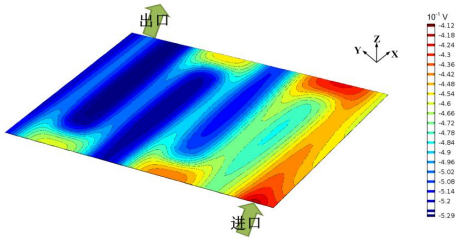


图 10　质子交换膜中间层电流密度分布

图 11 为燃料电池阳极与阴极催化层的反应极化电压分布。其中，阳极氢气氧化反应的催化活性远高于阴极氧气还原反应，阴阳极电催化交换电流密度相差约 6 个数量级，导致阳极极化电压（最高值约 20 mV）远低于阴极（最高值约 412 mV）。因此，阴极电化学催化反应活性提高与氧气传质过程优化是燃料电池整体性能的关键。



（a）阳极



（b）阴极

图 11　燃料电池催化层反应极化电压分布

3 结语

本文综合质子交换膜燃料电池内部多物理场过程，建立了燃料电池三维多相流耦合模型，研究燃料电池内部流体、反应、传质、相变等过程的相互作用机理，以及局部物理参数对电池性能的影响。主要结论如下：

（1）氢气与空气同向流条件下，电池进口端至电池中部为水蒸气未饱和区域，而电池中部至出口端为过饱和区域，且膜内含水量分布与反应气相对湿度分布趋势基本一致。

（2）燃料电池内部液态水主要产生于水蒸气过饱和区（电池中部至出口端），流道脊区域的多孔介质中液态水含量远高于流道区域，阴极多孔介质含水量高于阳极，且阴极出口端多孔介质的高含水量抑制了氧气的传质过程。

（3）由于质子膜内阻、阴极氧气浓度以及多孔电极液态水含量的综合作用，电流密度峰值位于反应区中部区域，达到进口处电流密度的两倍以上。

参考文献：

[1] Wang C Y. Fundamental Models for Fuel Cell Engineering [J]. Chem. Rev. 2004, 104: 4727-4766

[2] Djilali N. Computational modelling of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells: Challenges and opportunities [J]. Energy, 2007, 32:269-280

[3] Rostami L, Nejad P M G, Vatani A. A numerical investigation of serpentine flow channel with different bend sizes in polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Energy, 2016, 97:400-410

[4] Xing L, Mamlouk M, Scott K. A two dimensional agglomerate model for a proton exchange membrane fuel cell [J]. Energy, 2013, 61:196-210

[5] Xing L, Liu X, Alaje T, et al. A two-phase flow and non-isothermal agglomerate model for a proton exchange membrane (PEM) fuel cell [J]. Energy, 2014, 73:618-634

[6] Xing L, Du S, Chen R, et al. Anode partial flooding modelling of proton exchange membrane fuel cells: Model development and validation [J]. Energy, 2016, 96:80-95

[7] Abdollahzadeh M, Pascoa J C, Ranjbar A A, et al. Analysis of PEM (Polymer Electrolyte Membrane) fuel cell cathode two-dimensional modeling [J]. Energy, 2014, 68:478-494

[8] Kang S. Quasi-three dimensional dynamic modeling of a proton exchange membrane fuel cell with consideration of two-phase water transport through a gas diffusion layer [J]. Energy, 2015, 90:1388-1400

[9] Siegel C. Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells [J]. Energy, 2008, 33:1331-1352

[10] Rostami L, Nejad P M G, Vatani A. A numerical investigation of serpentine flow channel with different bend sizes in polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Energy, 2016, 97:400-410

[11] Rakhshanpouri S, Rowshanzamir S. Water transport through a PEM (proton exchange membrane) fuel cell in a seven-layer model [J]. Energy, 2013, 50:220-231

[12] Ju H, Meng H, Wang C Y. A single-phase, non-isothermal model for PEM fuel cells [J]. Int J Heat Mass Tran, 2005, 48: 1303-1315

[13] Yin C, Gao J L, Wen X H, et al. In situ investigation of proton exchange membrane fuel cell performance with novel segmented cell design and a two-phase flow model [J]. Energy, 2016, 113: 1071-1089

集团简讯

新闻简讯

2024 年 3 月 7 日，东福研究院与四川轻化工大学校企合作协议签约仪式在四川轻化工大学举行。东方研究院副总经理、东福研究院执行董事、总经理刘泰生，四川轻化工大学党委副书记、校长庹先国代表双方进行友好交流，签署校企合作协议。

庹先国表示，希望双方进一步拓宽合作领域、助力发展新质生产力，共同为我国能源利用和高端装备制造领域的发展贡献智慧和力量。刘泰生表示，校企合作协议的签订，是双方共同推动产学研深度融合、实现优势互补和资源共享的重要里程碑，东福研究院将依托四川轻化工大学学科优势和科研实力，共同开展相关领域技术研发创新和高水平人才培育，为双方高质量发展添能蓄势。

来源：东方电气研究院微信公众号

山地复杂地形风场相邻测风塔数据相关性研究

朱旭东[1] 韩宇生[2] 李强[1] 张君备[1]

1.东方电气风电股份有限公司，四川 德阳 618000；2.海南气象局，海南 海口 570203

摘要：风能资源的测量与评估有相关规范要求，根据常规规范要求，测风塔代表半径范围为山地风场 3 公里、平原风场 5 公里。而在实际测风中，尤其是山地区域，地形复杂多变，同一型号规格的测风塔代表范围在实际中需根据地形地貌进行布置。本文将讨论山地风场相邻同型测风塔之间的相关性，从风速频率、风速的日变化、风向频率、最大风速日变化等数据相关性做出对比分析。

关键词：风能资源；测风塔；山地风场

中图分类号：TM614 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）02-0008-04

A Study on the Data Correlation Between Adjacent Wind Towers in Mountain Complex Terrain Wind Fields

ZHU Xudong[1], *HAN Yusheng*[2], *LI Qiang*[1], *ZHANG Junbei*[1]

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

2. Hainan Provincial Meteorological Bureau, 570203, Haikou, Hainan, China）

Abstract: There are relevant regulatory requirements for the measurement and evaluation of wind energy resources. According to conventional regulatory requirements, the representative radius range of the wind tower is 3 kilometers for mountainous wind farms and 5 kilometers for plain areas. In actual wind measurement, especially in mountainous areas, the terrain is complex and variable. The representative range of wind measurement towers of the same model and specification needs to be arranged according to the terrain and topography in practice. This article will discuss the correlation between adjacent wind towers of the same type in mountainous wind fields, and compare and analyze the data correlation from wind speed frequency, daily variation of wind speed, wind direction frequency, and daily variation of maximum wind speed.

Key words: wind energy resources; wind measuring tower; mountainous wind farms

开发风电场需要对风力发电场地进行完整年度测风，不同时间周期内风资源[1-2]的各项数据有一定差异，从完整年的气候、天气全面掌握区块风资源情况，从而根据风资源情况进行机位布置、机型选型[3]核算等工作。根据政府相关规范，测风塔选址应具有代表性。原则上，按照半径不超过 3 公里设立测风塔，测风塔高度不低于 100 米，有效测风时间不得低于 1 个完整年。然而，在实际山地风场开发中，由于山地地形地貌，3 公里范围内风能资源数据在频率、速度等要素的变化都比较大[4]，为了能够对山地风场复杂地形下[5]的风能资源变化有一个较为直观的认识，本文将讨论两个相邻测风塔（两测风塔直线距离 4.36 公里）实测风资源数据的相关性，对数据的相关性做出评判。从风速、风向多角度进行观测比较[6]。

收稿日期：2023-08-14

作者简介：朱旭东（1987－），男， 2010 年毕业于西安理工大学机械系机械设计专业，本科。2020 年毕业于西南交通大学机械工程专业，硕士，高级工程师。现任东方电气风电产业和市场开发中心资源开发经理，主要从事资源开发研究方向开发工作。

1 测风设备与数据

1.1 观测点与测风设备

四川省凉山彝族自治州是四川省清洁能源风电基地，观测点位于凉山州境内，该处属于青藏高原东南缘，风速高，山地地形复杂，区域海拔跨度较大[7]，具有较好的观测比较价值。

测风设备符合 IEC（国际电工技术委员会）和 GL（德国劳埃德船级社）制订的技术规范和标准，满足《风电场风能资源测量方法》GB/T 18709-2002、《风电场工程风能资源测量与评估技术规范》NB/T 31147-2018、《风电场风能资源测量和评估技术规定》（发改能源[2003]1403 号）标准。两个观测塔均采用 120 米高度塔，测风设备[8]在 120 米处配置 2D 超声波风速风向仪、风速传感器、风向传感器。对比观测时间为 2023 年 4~6 月。

1.2 观测点与测风设备

观测数据为风速日变化(即逐时风速)、风向频率、风速频率、最大风速日变化。测风塔数据完整率超过 90 %，处理过程中筛选明显不合理部分，对余下有效数据进行对比分析。

2 观测数据比较研究

2.1 分析方法

根据书籍《气象统计分析与预报方法》定义，衡量任意两个气象要素(变量)之间关系的统计量是协方差与相关系数。对于其中的变量 x 和变量 y，如果均取 n 个资料样本，它们的协方差定义为：

$$s_{xy}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y}) \tag{1}$$

若将 x 和 y 的 n 次观测记作列向量：

$$\boldsymbol{x}=[x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{y}=[y_1,y_2,y_3,\cdots,y_n]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

则协方差可表示为：

$$s_{xy}=\frac{1}{n}(\boldsymbol{x}-\overline{x})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{y}-\overline{y}) \tag{4}$$

协方差是反映两个气象要素协同变化的密切程度。例如 x 代表塔 1 的风速日变化，y 代表塔 2 的风速日变化，两者日变化基本趋同（如图 2）。本文对比相邻两测风点的数据，协方差可对比出同周期测风塔数据变化量。

对两个测风数据变量 x 和变量 y 进行对比，其相关系数计算公式为：

$$R_{xy}=\frac{\frac{1}{n}(\boldsymbol{x}-\overline{x})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{y}-\overline{y})}{\sqrt{\frac{1}{n}(\boldsymbol{x}-\overline{x})^2}\sqrt{\frac{1}{n}(\boldsymbol{y}-\overline{y})^2}} \tag{5}$$

R_{xy} 表示变量 x 和变量 y 之间线性相关的程度，R_{xy} 的绝对值越趋于 1，则表示两个变量间的线性相关关系越强。

2.2 数据与边界条件

观测对比时间：2023 年 4~6 月；

观测对比地点：四川省凉山州；

观测对比数量：测风塔 1、测风塔 2，两塔高均为 120 米，直线距离 4.36 公里。

两塔距离如图 1。

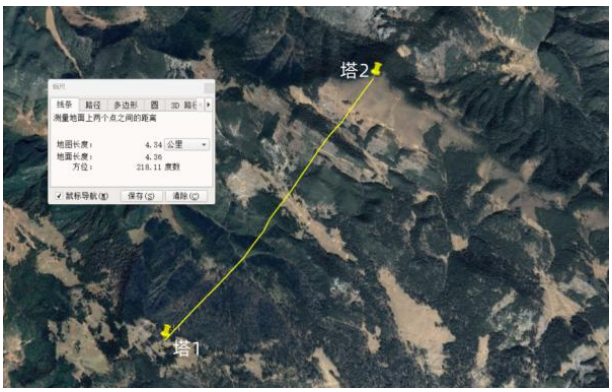


图 1　两塔之间的直线距离

2.3 比较结果

对比了两塔的风速日变化（逐时风速）、风向频率、风速频率、最大风速日变化，并计算了各要素不同高度层的相关系数，以对比两塔之间的相关性。

2.3.1 风速日变化

局地风速日变化的是在太阳辐射、地形、大尺度天气背景等因素下共同影响形成的。

日 24 小时风速数据见表 1、表 2。

表 1　风速日变化(1~12 时)

时间 (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
塔 1 (m/s)	8.808	8.525	8.153	7.631	7.359	7.13	6.633	6.847	6.495	5.499	6.218	6.274
塔 2 (m/s)	9.796	9.69	9.644	9.375	8.813	9.244	8.772	8.089	6.119	5.667	6.493	7.295

表 2　风速日变化(13~24 时)

时间 (h)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
塔 1 (m/s)	6.731	7.422	8.248	8.279	9.018	9.275	9.279	9.381	8.792	8.47	8.477	8.74
塔 2 (m/s)	8.691	9.137	9.254	9.851	10.404	10.448	10.613	10.423	9.438	9.216	9.799	9.796

两塔的日风速变化有一定差异性，塔 2 的风速在各时段明显高于塔 1，但各时段趋势一致性较好。塔 1 与塔 2 风速差距最大的时间段出现在上午 7:00，风速差-2.139 m/s。塔 1 与塔 2 风速差距最小时段出现在 9:00~10:00，处于交叉状态。

风速日变化曲线见图 2。

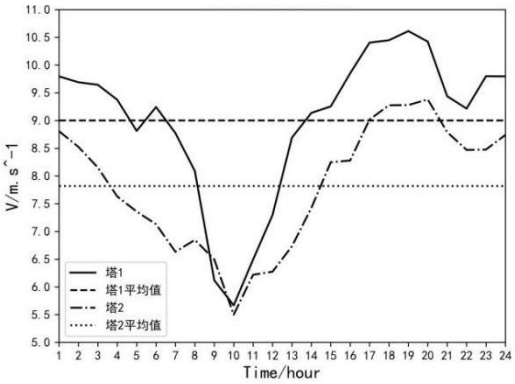


图 2　风速日变化曲线

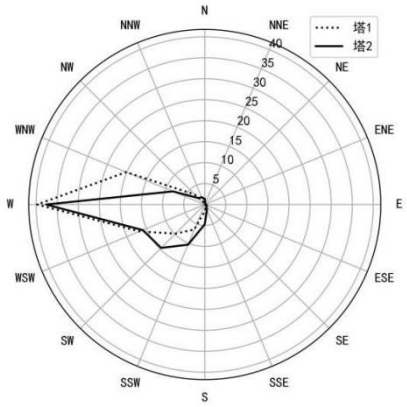


图 3　风向频率

2.3.2 风向频率

风向频率见表 3。

表 3　风向频率

风向(°)	0	45	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5
塔 1　(%)	1.296	0.093	0.278	0.556	0.509	1.343	4.722	10.37	14.63	15.926	37.639	8.194	2.176	1.898
塔 2　(%)	0.098	0	0.163	0.293	0.26	0.65	1.528	6.439	9.821	16.748	39.772	20.195	3.415	0.52

由风向频率可以看出，塔 1 与塔 2 风有较好的一致性，均为西风，但整体看，塔 1 南北方向频率大致相同，塔 2 偏南。此处风能方向集中，开发价值较大。风向频率如图 3。

2.3.3 风速频率

风速频率见表 4。

表 4　风速频率

风速区间(m/s)	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
塔 1 (%)	2.5	6.667	16.62	25.741	27.593	13.843	5.833	1.019	0.185	0
塔 2 (%)	0.488	4.163	10.407	20.39	27.154	22.569	10.699	3.285	0.715	0.13

由风速频率可以看出，塔 1 的风速频率集中区域随风速升高而频率比升高明显先于塔 2，塔 2 高风速区间的频率更多。由此可知，塔 2 平均风速更大。风向频率如图 4。

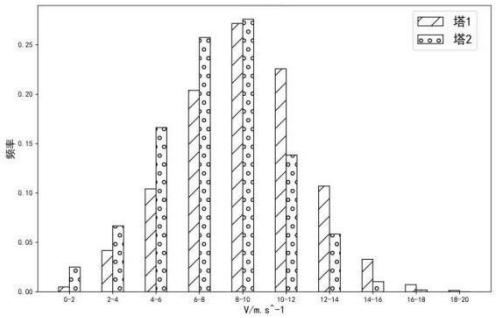


图 4　风速频率

2.3.4 最大风速日变化

最大风速日变化是一段时间周期内，因外界环境影响，如太阳辐射、天气(晴雨天)、气候(冬夏)等因素的叠加对风速的最大影响，体现了日风速的极端情况。本文集中在 4~6 月，故主要体现一季度内气候及天气的影响。

一日 24 小时最大风速数据见表 5、表 6。

表 5　最大风速日变化(1~12 时)

时间 (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
塔 1 (m/s)	14.803	13.237	13.652	13.549	14.963	12.484	13.886	10.559	11.237	11.04	16.286	16.511
塔 2 (m/s)	16.076	14.514	18.242	17.207	14.916	16.055	14.545	12.725	12.216	12.3	12.732	14.769

表 6　风速日变化(13~24 时)

时间 (h)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
塔 1 (m/s)	13.744	15.19	16.516	17.573	14.983	15.483	13.411	14.51	13.693	12.082	13.435	13.626
塔 2 (m/s)	17.322	15.747	19.084	18.761	18.328	16.543	17.659	15.597	15.368	14.076	14.123	14.354

正常情况下，海拔高的塔 2 风速高于海拔低的塔 1，但由于叠加了气候与天气影响，如季节变化与天气变化使日照对大气层结产生较大的扰动，随着太阳升起，塔 1 与塔 2 的风速会出现一定交错，塔 1 风速高于塔 2 的情况。随着正午过后，塔 2 逐渐与塔 1 出现正相关。

最大风速日变化曲线如图 5。

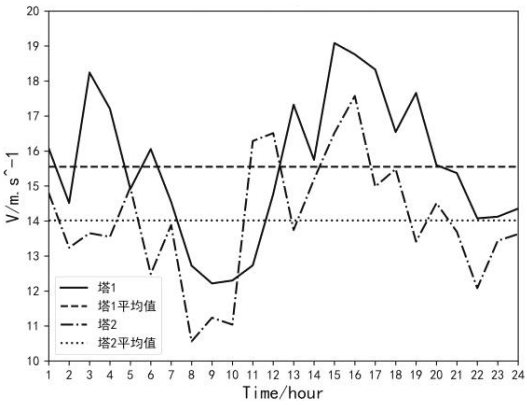


图 5　最大风速日变化曲线

2.3.5 两塔数据的相关性

根据式（2~5）计算两测风塔同一要素在同一高度的相关系数，结果见图 6。

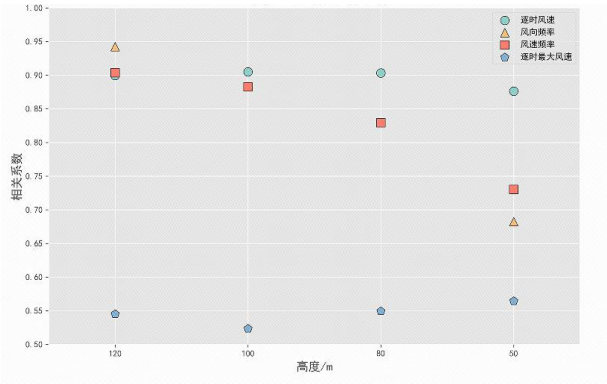


图 6　各要素同一高度相关系数

从图 2~6 中可以明显看出两测风塔除逐时最大风速外，其他要素的相关系数随高度的增加逐渐变大；在 120 m 处除逐时最大风速外，其他各要素两测风塔的相关系数均在 0.90 及以上。

3　结语

根据风速日变化、风向频率与风速频率可以得到：理想情况下，同一大致区域相邻测风塔相关系数均在 0.9 左右，相关度较高，半径 4 km 的测风塔数据的风向具有较高的参考价值。但由于气候、天

（下转第 16 页）

变转速抽蓄交流励磁控制研究

吉磊　唐煜程　周平　刘基涛

东方电气集团东方电气自动控制工程有限公司，四川 德阳 618000

摘要：不同于传统的静态励磁系统，交流励磁系统的励磁电流是三相正弦，因此可以通过调节励磁电流的相位和频率来适应机组负载和转速的变化。这种拥有良好调节特性的励磁系统应用于变转速抽蓄机组，用于平抑电网波动，取得了良好的经济效益。本文分析了交流励磁的原理，并进行了仿真研究。

关键词：交流励磁；变转速抽蓄

中图分类号：TV743　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0012-05

AC Excitation Control Research of Variable Speed Pump Storage Unit

JI Lei, TANG Yucheng, ZHOU Ping, LIU Jitao

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

Abstract:Unlike traditional static excitation systems, the excitation current of AC excitation systems is 3-phase sine, so the phase and frequency of the excitation current can be adjusted to adapt to changes in unit load and speed. This excitation system of excellent characteristic is gradually applied to variable speed pumping and storage, used to dump grid surge, achieved good economic benefits. This article analyzes the principle of AC excitation and conducts simulation research.

Key words: AC excitation system; variable speed pump storage unit

随着最近几年能源互联网的开展，特高压建设的加快，建成投产的特高压工程越来越多[1]。同时，由于碳达峰战略的实施，传统的火电比重逐渐降低，取而代之的是风、光等新能源装机容量的爆发式增长。这为电网带来了压力。一是调峰压力，二是调频压力。这就需要增加调峰调频手段。目前缓解调峰调频压力的主要手段是燃机电站和抽水蓄能电站。从国家十四五规划以及国家能源局关于《抽水蓄能中长期发展规划（2021～2035）》中可以看出，十四五期间，抽水蓄能将得到迅猛发展[2]。

由于转子绕组采用交流电，由基本原理可知，交流励磁可变抽水蓄能机组（AC excitation variable speed pump storage unit）的励磁磁场是由交流电和机械转轴合成的合成磁场。交流电的调节速度远远高于机械转轴。当机械转轴的转速与电网频率有差时，通过调节交流电可以快速弥补。此能力对抑制新能源的波动，增加电网调节手段提供了有力支撑。

交流励磁的难点主要在于电力电子容量和控制算法的选择。随着电力电子技术的发展，逆变器的功率越来越大，价格也越来越便宜。已经可以满足大型变转速机组的商业需求。因此研究交流励磁越来越有现实意义。本文通过数学推导，分析了变转速机组交流励磁的模型，并对模型进行了仿真。

1　变速机组分析

1.1 建设变转速机组的目的

抽水蓄能电站的主要作用是调频调峰。它的机械转矩可以增加电力系统惯性，提高电网稳定性，即满足调频需求。通过在用电高峰发电，在用电低谷抽水，达到储能作用，满足调峰需求。

收稿日期：2023-08-14

作者简介：吉磊（1982－），男，2007年毕业于电子科技大学学校信通专业，硕士研究生，高级工程师。现任东方自控设计工程师，主要从事电力电子方向设计工作。

水轮发电机组运动方程为：

$$\begin{cases} J\dfrac{d\omega}{dt}=M_t-M_g \\ \Delta P=M_t-M_g \end{cases} \quad (1)$$

J—转动惯量，d—微分算子，ω—机组电频率，M_t—水轮机转矩，M_g—发电机负荷阻力矩。

由式（1）可知，当功率变化ΔP一定时，如果转动惯量J越大，则频率变化越小。传统的水火电机组转子具有较大的转动惯量，能够抑制由于有功波动带来的频率变化。但随着新能源所占比重越来越大，特别是没有任何转动惯量的光伏并网，电网的转动惯量越来越小，频率波动就越来越大。这就是电网频率不稳定的根本原因[3]。又由式（1）可知，当频率发生变化时，如果有很强的功率源能对功率的变化ΔP进行相应的补偿，那么频率的变化也能得到抑制。这就需要一个调节能力很强的功率源对功率的瞬时变化做出快速响应。而这正是变转速机组的优点。

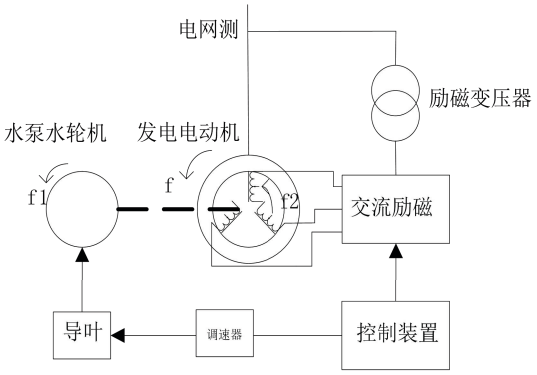


图 1 交流励磁结构框图[4]

由图 1 可知，控制装置根据策略分别控制调速器和励磁。即由控制装置根据运行曲线计算出当前机组所需的机械转速，有功和无功。调速器和交流励磁作为执行机构进行调整。

变转速抽蓄的目的是实现有功的快速控制。交流励磁通过电磁方式控制功率比调速器通过机械控制功率要快得多。因此，目前流行的策略是在发电工况时，调速器只控制转速，励磁控制有功和无功。抽水工况时，调速器只控制导叶开度，励磁控制有功和无功。文献[3][5][6]对这方面进行了深入研究。但这些研究侧重于控制策略，对如何将控制策略应用于变频器缺乏深入探讨。

发电机是多变量耦合系统，如何实现解耦控制是交流励磁控制策略的关键。下文通过分析交流励磁的数学模型来导出控制框图。

1.2 变转速机组模型推导

发电机的定转子是相对运动的。不利于进行分析。但从定子侧和转子侧的电压电流的关系看，都可以看作电阻和漏感，互感的串联。由此可以得到发电电动机等效电路图。如图 2 所示。

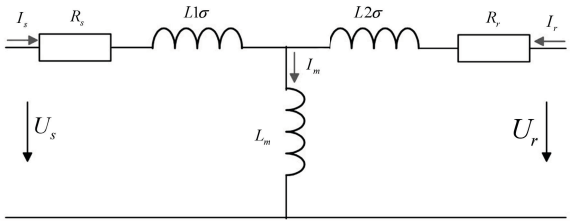


图 2 发电电动机模型

U_s—机端电压，U_r—磁场电压，R_s—机端绕组等效电阻，$L1\sigma$—机端绕组等效漏感，R_r—磁场绕组等效电阻，$L2\sigma$—磁场绕组等效漏感，L_m—定转子间等效互感。

由图 2 可列出以下电磁方程：

$$\begin{cases} U_s^s=R_s i_s^s+\dfrac{d\psi_s^s}{dt} \\ U_r^r=R_r i_r^r+\dfrac{d\psi_r^r}{dt} \\ \psi_s^s=L_s i_s^s+L_m i_r^s \\ \psi_r^r=L_m i_s^r+L_r i_r^r \end{cases} \quad (2)$$

其中：上标“s”指矢量定于定子坐标。上标“r”指矢量定于转子坐标；U_S、U_r为三相定、转子相电压瞬时值，$U_S=[Ua\quad Ub\quad Uc]^T$，$U_r=[U_u\quad U_v\quad U_w]^T$；$I_s$、$I_r$为三相定、转子相电流瞬时值，$i_s=[i_a\quad i_b\quad i_c]^T$，$i_r=[i_u\quad i_v\quad i_w]^T$；$\psi_s$、$\psi_r$为三相定、转子磁链瞬时值，$\psi_s=[\psi_a\quad \psi_b\quad \psi_c]^T$，$\psi_r=[\psi_u\quad \psi_v\quad \psi_w]^T$；$L_s$、$L_r$为定、转子等效自感，$L_s=L_{1\sigma}+L_m$，$L_r=L_{2\sigma}+L_m$。

上式的方程基于两个坐标系，显然不适合进行分析。因此将式（2）进行推导，归到同一个坐标系。以下以发电工况为例进行分析。

2 控制模型的数学推导

发电时，机端电压为正序电压，旋转方向为逆时针。定子和转子参考坐标系以转子电角频相率对旋转。为统一到一个坐标系下，将式中转子坐标系的方程乘以转子电角度，即 $e^{jw_r t}$,其中 w_r 为转子电角频率。得到定子静止坐标系下的方程（上标“s”

省略）：

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + \dfrac{d\psi_s}{dt} \\ u_r = R_r i_r + \dfrac{d\psi_r}{dt} - j w_r \psi_r \\ \psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r = L_m i_s + L_r i_r \end{cases} \tag{3}$$

由第 1 节的分析可知，交流励磁的主要目的是为了控制有功和无功功率。有功功率和无功功率的计算为：

$$\begin{cases} P = \dfrac{3}{2}(U_{sd} \times i_{sd} + U_{sq} \times i_{sq}) \\ Q = \dfrac{3}{2}(U_{sq} \times i_{sd} - U_{sd} \times i_{sq}) \end{cases} \tag{4}$$

其中，U_{sd}为机端电压 d 轴分量，U_{sq}为机端电压 q 轴分量，i_{sd}为机端电流 d 轴分量，i_{sq}为机端电流 q 轴分量。

由式(4)可知，PQ 值的计算在旋转坐标系下进行，此坐标系下的机端电压电流是直流分量。为方便 PQ 值的计算，将式(3)的定子坐标系转换为电角频率ω_s下的 dq 坐标系，即将式(3)乘以$e^{-j\omega_s t} = e^{-j\theta_s}$，其中$\omega_s$为同步电转速。得到同步角频率$\omega_s$坐标系下的磁链方程：

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + \dfrac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s \\ u_r = R_s i_r + \dfrac{d\psi_r}{dt} + j\omega_{sl} \psi_r \\ \psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r = L_m i_s + L_r i_r \end{cases} \tag{5}$$

其中：$\omega_{sl}=\omega_s-\omega_r$，$\omega_{sl}$为转差频率。

分析公式（5）可知，该公式中含有旋转参数ω，但是没有确定的相位参数，这意味着坐标系中的 0° 相位没有固定，可以任意选择。一般选择转子磁链定于 d 轴或者定子磁链定于 d 轴，使某些参数在坐标系中的值为 0，化简计算过程。

由于机端电流的频率始终是 50 Hz，定子电阻的压降远远小于电机反电动势，电阻可忽略不计[7]。由于定子磁链定于 d 轴，则全部的磁链都在 d 轴，q 轴的磁链为 0，得出公式（6）。

$$\begin{cases} \psi_{sq} = 0 \\ \psi_{sd} = \dfrac{U_g}{\omega_s} \end{cases} \tag{6}$$

其中，U_g为机端电压标量。

带入公式(6)得到机端电压电流 dq 值为：

$$\begin{cases} u_{sd} = 0 \\ u_{sq} = U_g \\ i_{sd} = \dfrac{U_g}{\omega_s L_s} - \dfrac{L_m}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\dfrac{L_m}{L_s} i_{rq} \end{cases} \tag{7}$$

将式（7）代入式（4）得到

$$\begin{cases} P = \dfrac{3}{2} u_{sq} i_{sq} = \dfrac{3}{2} U_g \dfrac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ Q = \dfrac{3}{2} u_{sq} i_{sd} = \dfrac{3}{2} \dfrac{U_g^2}{\omega_s L_s} - \dfrac{3}{2} U_g \dfrac{L_m}{L_s} i_{rd} \end{cases} \tag{8}$$

由式（8）可知，PQ 值与 $i_{rq}i_{rd}$ 呈线性关系，其余参数都是系统定值。只要将定子电压转变为旋转坐标系下的 dq 分量，再使用反馈控制，就可以分别控制有功和无功。

整理式（5）可得到励磁电流与励磁电压的关系

$$\begin{cases} u_{rd} = R_s i_{rd} + \sigma L_r \dfrac{di_{rd}}{dt} - \omega_{sl} \sigma L_r i_{rq} \\ u_{rq} = R_s i_{rq} + \sigma L_r \dfrac{di_{rq}}{dt} + \omega_{sl} \sigma L_r i_{rd} + \dfrac{L_m}{L_s} s U_g \end{cases} \tag{9}$$

写作矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \sigma L_r d & -\omega_{sl} \sigma L_r \\ \omega_{sl} \sigma L_r & R_s + \sigma L_r d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{L_m}{L_s} s U_g \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中：σ为电机漏磁系数，$\sigma = 1 - L_m^2/(L_r L_s)$，$s=(\omega_s-\omega_r)/-\omega_s$。

3 交流励磁逆变器

由以上分析可知，通过 dq 变换，PQ 值只与转子侧交直轴电流有关。现在研究交流励磁的实现方式。要实现电流的频率和相位可调，必使用逆变器。逆变器分为电流源型逆变器和电压源型逆变器。电流型逆变器的直流侧是恒定的电流，变流器仅仅改变直流电流的流通路径，因此交流测的电流是矩形波，并不能满足变转速抽蓄中控制电流的要求。因此采用电压源型逆变器。

电压源型逆变器的原理如图 3 所示：

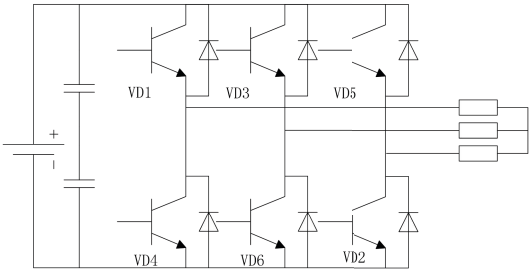


图 3 电压型桥式逆变电路

电压源型逆变器采用全控器件，实现器件换流。由于在源端有大电容，因此可以近似将直流源端看作时电压源。通过控制 VD1~VD6 的开通和关断，即可控制输出电压的相位和频率。主流的控制算法有 SPWM 和 SVPWM 两大类。

SPWM 算法通过相差 120º 的三个参考正弦波，使用三角形载波对参考正弦波进行调制，在载波与参考波的交点得到开关器件的开断时刻。该算法不需要知道相位和频率等参数，只需要得到三相参考波形即可。

SVPWM（Space Vector PWM)。是将三相电压看作是一个旋转整体。通过控制开关器件的开断顺序和时间来形成圆形旋转磁链。算法的关键是需要计算参考矢量的位置，由此得到功率器件的开断时间。

由此可见，SPWM 算法需要知道参考波形，SVPWM 需要知道波形参数。选择 SPWM 算法可以比 SVPWM 在工程实现上更简单。但 SVPWM 可以更方便的选择开关器件的开断顺序，以此降低发热。使用 SPWM 还是 SVPWM 可以根据实际情况来定。

根据以上分析，由闭环控制理论可得到控制框图如图 4 所示：

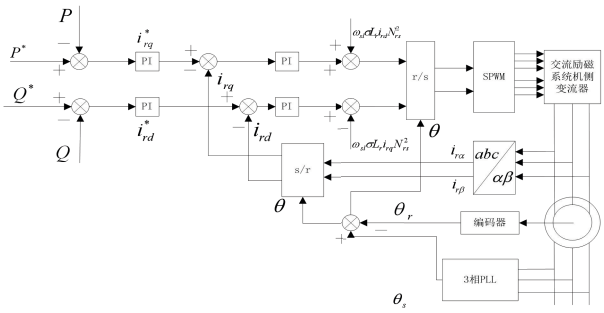


图 4 变转速励磁系统框图

使用 simulink 对模型进行仿真。在 10 s 时，做一个有功给定阶跃，可以看到有功快速响应。无功没有变化，说明该模型成功进行了解耦控制。控制波形如图 5~7 所示。

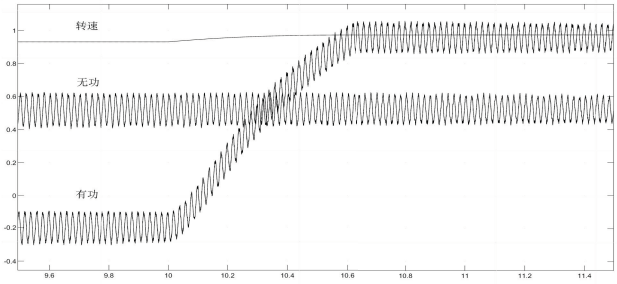


图 5 有功阶跃

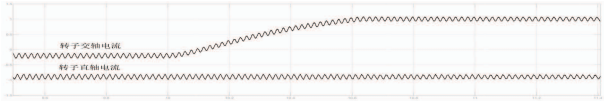


图 6 转子 dq 分量变化

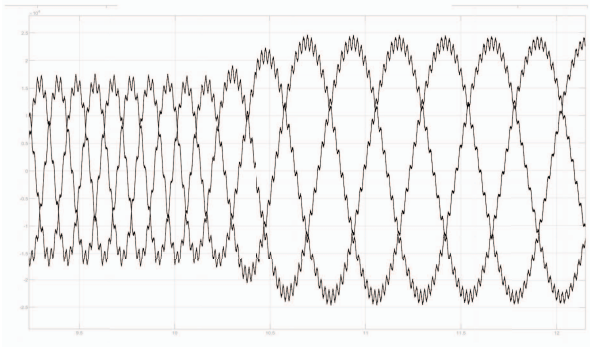


图 7 交流励磁电流变化

4 工程实现

由上文分析可知，该算法能够实现快速响应，满足调频需求。以该算法为基础设计程序实现，分析算法复杂度。算法复杂度该算法有较多乘法和加法运算，因此，采用 DSP 数字信号处理器来实现。

如果 ADC 的采样速度越快，精度越高。那么变流器输出的波形就越接近正弦波。但受限于 IGBT 导通频率限制以及运算芯片发热等问题，实际的采样频率需要考虑多种因素。依据工程经验，采用 5 kHz 的采样频率较为合适。DSP 芯片采用 TMS28335 芯片作为核心运算芯片，采用该芯片的考虑因素有该芯片由独立的硬件乘加单元，有独立的 ECAP 模块，能够快速捕获编码器的信号。支持

6 对 PWM 硬件电路。能够满足核心处理算法。且该芯片已有国产化替代方案，满足国产化的需求。

程序主流程框图如图 8 所示。

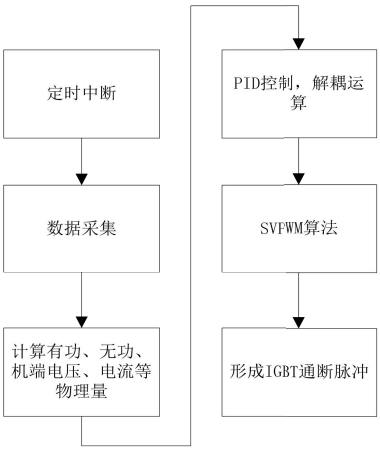


图 8 程序主流程

5 结语

本文从交流励磁的模型出发，通过数学推导，得出了交流励磁的 PQ 控制只与励磁电流相关。控制相应的励磁电流可以控制 PQ。通过数学推导和控制理论，得出了交流励磁控制模型。并对模型进行了仿真。由仿真证明，当有功变化时，变转速机组能够实现快速响应，满足调频的任务。

依据算法和仿真结果。选择匹配数字信号处理器进行程序实现。程序测试结果表明，该型号的数字信号处理器能过够满足算法的处理速度等要求。没有发现程序超时和中断异常等错误。芯片在 25 ºC 的环境温度下温升为 5 ºC。能够满足工程需求。

参考文献：

[1] 毋红星, 李大鹏. 以优化控制技术为支撑的深度调频调峰管理[J]. 企业管理, 2021(S2):86-87

[2] 赵志宏. 储能变流器并网电流环控制与离网发电应用研究[D]. 东南大学, 2017

[3] 赵军科, 刘云平, 刘建俊, 等. 变转速抽水蓄能机组控制策略选择[J]. 水电与抽水蓄能, 2021,7(6):62-64

[4] 周金邢, 姜建国, 吴玮. 可变速抽水蓄能机组控制系统研究[J]. 电气自动化, 2015,37(4):1-3

[5] 闫伟, 石祥建, 施一峰, 等. 交流励磁可变速抽蓄机组控制策略研究[J]. 大电机技术, 2020(6):84-90

[6] 高洪, 陈旭东, 冯宇鹏, 等. 大型变速抽水蓄能交流励磁功率控制策略[J]. 自动化技术与应用, 2021,40(5):14-19

[7]高扬, 于会群, 张浩, 等. 基于定子磁链定向的双馈风力发电解耦控制研究[J]. 电气传动, 2014,44(12):17-20

（上接第 11 页）

气的变化，极端环境下最大风速日变化的相关系数仅 0.545，相关度较低。

山地风场相邻测风塔数据拟合度较高，但距离 4 km 两座测风塔的实际平均风速相差约 1.2 m，对机组选型与经济性评估有较大影响，开发地形复杂的山地风电场宜适当紧密布置测风塔并完成一个完整年度测风，掌握准确风速及全年大气稳定度[9]以做出可靠评估。

参考文献：

[1] 李云涛. 测风时间尺度对风电场设计参数的影响研究[J]. 电力与能源, 2017, 38(4):463-466

[2] 高小力. 平均时间周期对风资源评估的影响[J]. 电力勘测设计, 2016(S2):191-194

[3] 朱晓蕾. 基于风资源评估的风电机组设计风速分析[J]. 科技风, 2014(24):85

[4] GB/T 18710-2002, 风电场风能资源评估方法[S]

[5] 陈欣. 复杂地形风资源精细化评估研究. 北京市, 中能电力科技开发有限公司, 2020-12-01

[6] 江志新, 江莉莉, 施洲洲, 等. 海门沿海风的观测比较研究[C]//中国气象学会气候资源应用研究委员会, 国家气候中心. 第 26 届中国气象学会年会气候资源应用研究分会场论文集, 2009:9

[7] 刘航. 薛文亮, 垂直坡度地形风电场的风资源特性研究[J]. 水电与新能源, 2021, 35(3):11-13

[8] 商志伟, 漆随平, 王中秋,等. 测风传感器现状与发展综述[J]. 气象水文海洋仪器, 2023, 40(1):128-132

[9] 张宇, 王凤昊, 刘洋, 等. 大气稳定度对山地风电场发电量影响研究[J]. 电工电气, 2023(4):26-31

灯泡贯流式水轮发电机轴流风机故障原因分析及应对措施

施明星　罗显莅　郑棣

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：针对灯泡贯流式水轮发电机轴流风机易发故障的问题，进行了原因分析和现场试验论证，确定了风机故障的根本原因。通过采取更换轻质叶片、优化风机选型参数、改进风机支撑结构和增加风机智能控制系统等综合措施，提高了风机运行可靠性和使用寿命，为后续灯泡贯流式水轮发电机的轴流风机选型设计或风机改造提供参考。

关键词：灯泡贯流水轮发电机；轴流风机故障；轻质叶片；风机选型；智能控制；可靠性

中图分类号：TM312　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0017-03

Fault Cause Analysis and Countermeasures of Axial Flow Fan for Bulb Type Hydro-generator

SHI Mingxing, LUO Xianli, ZHENG Di

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

Abstract: Aiming at the problem that axial fans for bulb type hydro-generator were prone to failure, the cause analysis and field test demonstration were carried out, and the root causes of fan failure were determined. By adopting comprehensive measures such as replacing light weight blades, optimizing fan selection parameters, improving the fan support structure and adding a fan intelligent control system, the operation reliability and service life were improved, which can provide reference for the subsequent axial flow fan selection design or fan transformation for bulb type hydro-generator.

Key words: bulb type hydro-generator; axial flow fan fault; light weight blades; fan selection; intelligent control; reliability

灯泡贯流式水轮发电机一般采用外加轴流风机的密闭强迫循环轴径向混合通风冷却方式。因此，轴流风机的运行可靠性对于灯泡贯流式水轮发电机的通风冷却和安全稳定运行至关重要。近年来，根据多个灯泡贯流式电站的反馈，轴流风机易发故障，并且由于结构布置和空间的限制，风机的更换很不方便。因此，提高轴流风机的运行可靠性，降低轴流风机的故障率，是目前迫切需要解决的问题。本文通过对灯泡贯流式水轮发电机轴流风机的常见故障进行原因分析，制定了一套综合的风机改造措施，并在 T 电站进行实施，以提高风机运行的可靠性和风机的使用寿命。

1　原因分析

通过对灯泡贯流式电站轴流风机易发故障的情况进行调查和了解，目前灯泡贯流式水轮发电机的轴流风机故障基本都表现为风机轴承损坏。在电

收稿日期：2023-07-04

作者简介：施明星（1986－），男，2010 年毕业于浙江大学控制理论与控制工程专业，工学硕士，高级工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事水轮发电机设计工作。

罗显莅（1984－），男，2009 年毕业于东北大学机械电子工程专业，工学硕士，高级工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事智慧产品设计工作。

郑棣（1997－），男，2019 年毕业于上海交通大学电气工程及其自动化专业，工学学士，助理工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事水轮发电机设计工作。

站拆开轴流风机的电机后，发现风机轴承封盖已经损坏，轴承润滑油脂已干，有些轴承的滚珠已经跑出。另外，风机电机的定子绝缘局部有碰伤，也是由于轴承损坏后导致电机转子碰伤了定子线圈。经过对电站投运以来机组运行情况、轴流风机故障和风机分布情况综合分析以及电站现场对风机的试验论证，确定了轴流风机易发故障的根本原因如下：

（1）风机叶片材料较重，因悬臂结构导致风机轴承承受的径向载荷较大。

（2）风机要求的风压较高，风机轴承承受较大的轴向负荷。

（3）因配重、制作、安装等原因，部分风机振动情况更为恶劣，加剧风机轴承在径向和轴向承受的冲击负荷，导致部分风机轴承更易损坏。

2 应对措施

为了进一步确认电站轴流风机易发故障的主要原因，并制定彻底的轴流风机易发故障的解决措施，在 T 电站进行了通风温升试验和风机振动测试试验，收集了风机实际运行参数和风机实际振动情况。制定了轴流风机故障的应对措施，并在 T 电站进行了实施，具体如下。

2.1 风机叶片优化为轻质叶片

以往电站轴流风机的叶片基本采用的是铸铁，铸铁叶片材质较重，风机故障率较高。后来电站的风机叶片改为比铸铁要轻的铸铝材质，风机的故障率有所下降。但是目前的铸铝风机叶片仍然较重，因悬臂结构导致风机轴承承受的径向载荷仍然较大，动平衡精度不高。随着技术进步，轴流风机的叶片材质不断的升级更新，重量不断减轻，平衡精度更高。根据风机厂家对一些电站贯流机组轴流风机的改造技术论证，通过更换风机叶片，采用重量较轻的 PAG 玻璃纤维增强聚酰氨材质的风机叶片，风机轴承易出现故障的问题得到解决。有研究表明，在现场发生的风机轴承振动中，属于转子质量不平衡的振动占多数[1]。综合分析不平衡振动故障，有以下 3 个故障特征：转速一定时振动幅值及相位稳定、一倍频分量占通频幅值 70 %以上、多次启动振动再现性好[2]。通过对 T 电站 2#机组两台风机的振动测试结果分析可知，风机振动较大并且主要以一倍转频为主，见表 1。因此，T 电站轴流风机改造采用平衡精度更高的 PAG 玻璃纤维增强聚酰氨材质的轻质叶片，可以有效减少风机振动和风机轴承所承受的径向载荷。

表 1　电站 2#机组的两台风机改造前振动测试值

mm/s

		只投风机	机组满负荷
1#风机垂直	通频	6.81	6.76
	转频	4.66	4.22
1#风机水平	通频	10.16	9.38
	转频	8.48	7.82
2#风机垂直	通频	5.23	6.39
	转频	4.06	4.8
2#风机水平	通频	5.02	4.27
	转频	4.31	3.62

2.2 优化风机的选型参数

根据风机所用电机的相关选型手册，电机的轴承寿命跟所承受的轴向、径向载荷以及振动大小相关，电机轴承一般不宜承受较大的轴向载荷，否则会减少轴承的寿命。因此，在满足水轮发电机通风冷却需求的前提下，适当降低风压，可以减少风机轴承承受的轴向负荷，有助于提高其使用寿命。

2019 年 12 月初对 T 电站水轮发电机进了通风试验和温升试验，为轴流风机改型提供参考数据。T 电站共装设 3 台单机容量为 14 MW 灯泡贯流式水轮发电机组，每台发电机通风系统中装设有 6 台轴流风机。通过 T 电站机组通风和温升试验，得到主要试验结果如下：

（1）风机工作点为(978 Pa, 15 600 m^3/h)，6 台风机全部投运时，电机总风量为 26 m^3/s。

（2）在发电机额定工况（额定功率、额定功率因数）下，发电机定子最高温升 49.9 K，定子铁心最高温升 43.5 K，转子平均温升为 68 K。

根据通风、温升试验结果分析，风机的风压和风量参数具有一定的余量。因此，进一步对发电机的通风温升及风机改型进行了复核计算论证。首先，利用网络法[3]获得的电机风阻特性计算结果见图 1。其次，根据电机温升试验结果及图 1 所示的

电机风阻特性计算结果，通过理论计算可得到在额定工况下风机改型前后电机各部位温升情况对比，见表 2。

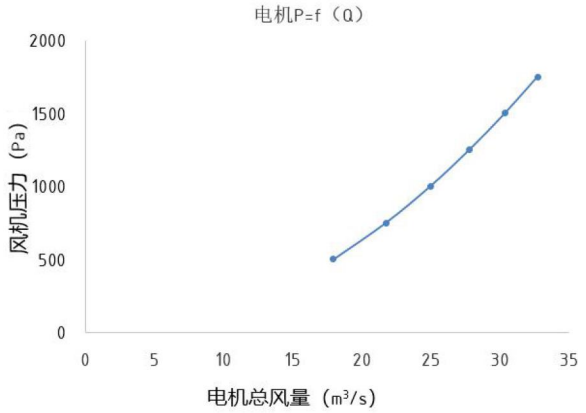


图 1　电机风阻特性计算结果

表 2　额定工况下风机改型前后电机各部位温升

	改型前实测值	改型后计算值	考核值
风机压力/Pa	978	800	
风机流量/m³/h	15 600	13 500	
电机总风量/m³/s	26	22.5	
定子线圈温升/K	50	56	≤80K
转子线圈温升/K	68	72	≤80K

根据表 2 的计算分析结果，推荐按照工作点（800 Pa，13 500 m³/h）进行单台风机参数改型，以保证电机运行具有合适的温升裕度，同时有利于减少轴承故障损坏的概率，延长风机轴承使用寿命。因此，将单台风机的选型参数由（1 000 Pa，1 5000 m³/h）优化为（800 Pa，13 500 m³/h），风机径向轴承承受的轴向负荷可以减小约 20 %。

2.3 改进风机支撑结构，增强风机的支撑刚度。

有研究表明，如果风机外壳的支撑系统各部件结构刚度及连接刚度偏低，会使得原本高于工作频率的自振频率降低，落入了工作频率的共振区。在激振力一定的情况下，会引起风机振动增大[4]。因此，提高风机的支撑和连接刚度，可以在一定程度上改善风机的振动。

因此，在 T 电站风机原支撑架支臂之间增加横向连接支撑，来增强风机支撑架的刚度，可以进一步减少风机振动，以减少风机轴承在径向和轴向承受的冲击负荷，见图 2。

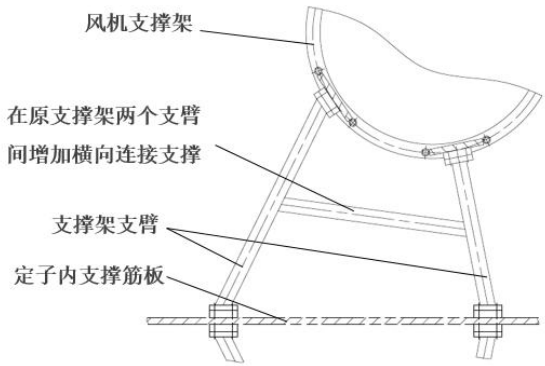


图 2　风机支撑架改进

2.4 增加风机智能控制系统

根据 T 电站机组的实际带负荷和运行温升情况，以及电站基本不做无功调节、仅做有功发电的运行特点，发电机在不带无功的情况下运行，定、转子温升裕度较大。鉴于此种情况，实际运行中可实施让轴流风机根据实际情况退出一定数量，然后让各个风机按照一定的策略轮流运行。这样在保证发电机实际温升满足技术要求的同时，可以降低轴流风机轴承的故障率、延长风机使用寿命、减少电站运维检修工作量。此外，通过上述措施也能够在一定程度上减少机组辅机设备耗电量，提高运行经济性。因此，在 T 电站风机改造方案中增加了风机智能控制系统，功能如下：

（1）对风机的工作状态进行在线监测、自动判断，实现故障风机的及时预警和切除。

（2）结合机组运行工况和定子温度分布，设定智能判断逻辑，确定当前需投入的风机数量，以及启用风机的位置，实现风机启动和退出智能运行。

（3）设定智能运行逻辑，实现每隔一定周期的主备用风机切换和轮循投入。

3　结语

本文介绍了灯泡贯流式水电站发电机的轴流风机易发故障问题的根本原因和综合应对措施，并于 2022 年 4 月成功对 T 电站 3#机组的轴流风机进行了改造实施。目前改造后的轴流风机已经运行了超过 1 年时间，风机运行稳定，状态良好。在额定工况下，风机改造前后的机组运行实测数据见表 3。

（下转第 36 页）

电加热元件套管角焊缝工艺改进研究

戴光明　何冰　杨小杰　池乐忠

东方电气（广州)重型机器有限公司，广州 511455

摘要：稳压器电加热元件套管焊接问题一直以来困扰着各大核设备制造厂。本文提出了套管角焊缝结构下焊接工艺改进措施，并通过焊接数值模拟方法进行了模拟分析，改进了稳压器电加热元件套管角焊缝结构焊接工艺，解决了根部焊接裂纹问题，减小了焊接变形。为打破国外材料技术封锁、加快电加热元件材料国产化提供有力支持。

关键词：稳压器电加热元件套管；根部裂纹；焊接模拟；工艺改进

中图分类号：TM623　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0020-05

The Analysis and Improvement of the Fillet Weld Technology for Pressurizer Electric Heater

DAI Guangming, HE Bing, YANG Xiaojie, CHI Lezhong

(DongFang (GuangZhou) Heavy Machinery Co., Ltd., 511455, Guangzhou, China)

Abstract: The problem of the welding for pressurizer electric heater has been an obstacle to manufacturers of nuclear island equipment. In this paper, the improvement measures of welding process were proposed. In addition, the welding process of it was optimized by welding simulation to solve weld crack problem and deformation. Which provides strong support for breaking the blockade of foreign material technology and speeding up the localization of pressurizer electric heater materials.

Key words: pressurizer electric heater; root crack; welding simulation; process improvement

稳压器是核电站中的重要核安全设备，主要作用是对一回路主系统进行压力和容积的调节和控制，以保证一回路主系统压力边界的完整性[1]。

以往稳压器制造厂采用的是如图 1 所示的对接接头形式，该接头的结构形式由法国法玛通公司设计，母材为 316 型，熔化衬环为 Z01CN26-01 铁素体不锈钢，焊缝要求全焊透，焊缝质量要求高，焊接难度大，焊接缺陷产生后难以返修。其中电加热器连接件与电加热元件的角焊缝由电加热器元件供应商焊接，设备制造商装配电加热元件时进行电加热器元件与套管的焊接[2]。其焊接工艺为横焊位置带熔化环自动氦弧焊不填丝自熔焊。

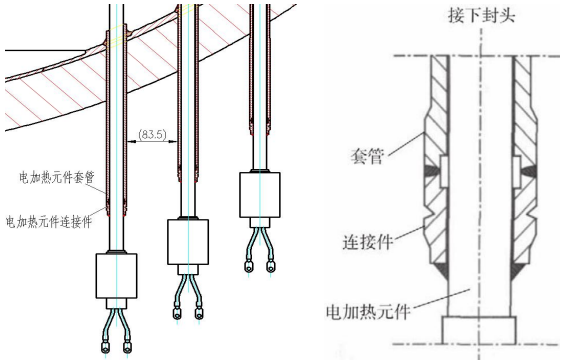


图 1　稳压器电加热元件套管焊接-带熔化环对接

近几年来，根据稳压器制造厂的制造经验反馈，此种带熔化衬环对接技术对材料的不均匀性适应性差，当不同批次材料的化学成分（S 元素）和电性能（电导率和电阻率）存在差异时，会导致产

收稿日期：2023-11-22

作者简介：戴光明（1982－），男，2005 年毕业于西南交通大学材料科学与工程专业，学士，高级工程师。现就任于东方电气（广州)重型机器有限公司，主要从事核能相关主设备的焊接及热处理工艺开发和技术管理工作。

生焊缝成型不良，严重时产生局部未熔合。此外，上述工艺所涉及的原材料由国外供货，供货厂家完全不响应设备制造厂家所提出的原材料可焊性能的控制要求，而国内尚无厂家具备此种材料的制造能力。

为了从根本上解决电加热元件套管与套管连接件焊接质量问题，解决材料卡脖子问题，在各个设计院的支持下，部分稳压器的电加热元件套管与套管连接件焊接结构更改为套管角焊缝的结构形式，如图 2 所示。其相应的焊接工艺为仰焊位置手工钨极氩弧焊填丝焊接。此种结构的特点是可以通过手工填丝来解决不同批次原材料因材料成分以及电性能差异所导致的焊接成型缺陷。

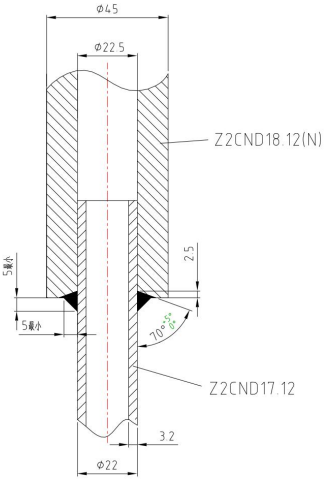


图 2　套管角焊缝结构

但是，套管角焊缝结构因其结构设计原因以及更为严苛的检验要求，其焊接难度更大。根据某项目设计方的要求，套管角焊缝结构的根部不允许有任何缺陷，相比于 RCC－M 标准中 SI400[3]规定的不超过 0.8 mm 缺陷合格的要求更为严苛。另外，此种结构存在初始装配间隙，在此处会产生明显的应力集中，焊接过程的应力以及残余应力的大小将直接影响根部裂纹的萌生以及扩展。若要最大限度的抑制根部焊缝裂纹的萌生和扩展，则必须采取有效的措施来降低该区域的应力水平，改善其应力分布状态[4]。

本文针对套管角焊缝的根部缺陷问题，采用数值模拟方法对影响套管角焊缝结构根部裂纹的关键因素进行分析，优化套管角焊缝结构的焊接工艺。研究成果对于类似产品的焊接具有指导性意义，对于同行业焊接工艺研究及优化具有参考价值。

1　焊接工艺简介

1.1 焊接结构简介

本文研究对象为某项目套管角焊缝结构。电加热元件套管（Z2CND18-12(N)）与电加热元件（Z2CND17-12）采用间隙装配，装配后进行点焊固定，采用 ER316L 焊丝进行仰焊位置密封焊接。

1.2 缺陷分析

套管间存在初始装配间隙，在前期工艺开发阶段发现套管角焊缝根部存在焊接裂纹（图 3）。从图 3 缺陷形态可以看出：裂纹起始于装配间隙，向焊缝一侧扩展，裂纹的扩展方向基本垂直于焊缝横向收缩方向。该缺陷的产生是由于初始装配间隙的存在导致该处发生应力集中，焊接过程中在高温区产生较大的拉伸应变，形成热裂纹，在应力作用下沿着焊缝晶界发生扩展。

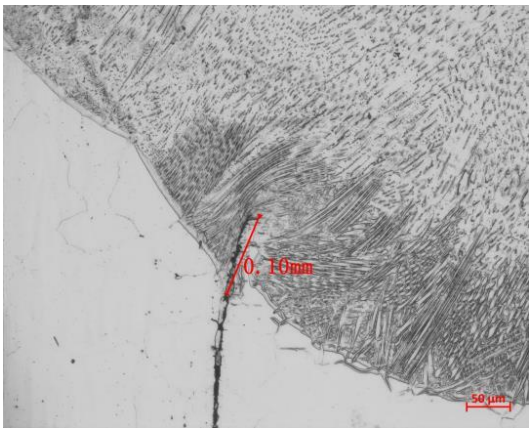


图 3　根部焊接裂纹

1.3 改进分析

通常情况下，对于管对接或套管环形焊接结构，如若在工艺上不做控制，则会导致焊接后两个管子往起弧和收弧的叠加位置（高热量区域）偏置和弯折；此时焊接残余应力在圆周方向上的分布即为不均匀，导致圆周方向上某一局部区域应力和应变明显大于其他区域。圆周方向上局部过大的应力、应变分布对于本文中所研究的带有初始装配间隙非全焊透的套管角焊缝的根部裂纹是极为不利的。

通常情况下，较好的解决方式为对称焊接，使得焊接应力和应变更为均匀化，焊接过程为：装配调整间隙→对称点焊调整间隙→对称施焊。在此种焊接方式下焊接后的间隙以及圆周应力分布相对更为均匀，但是在前期试验验证阶段发现；在对称施焊的工艺条件下，解剖后 4 个金相截面的裂纹最大尺寸减少，但是裂纹数量增加，由之前的 1~2 处大裂纹变为 4 处小裂纹，此外焊接后的间隙相对于点焊后测量的间隙也有明显的差异，且点焊焊点区域解刨后裂纹尺寸更大，数量更多。这说明：对称施焊相比于连续整圈焊接，应力分布更为均匀，原本低应力区的应力水平提高，高应力区的应力水平降低，由于点焊焊点的强度不足，在后续连续对称施焊过程中，焊接应力水平高于焊点所能承受的极限，从而被拉裂。

现有工艺采用的焊接方法是手工氩弧焊，其特点是焊缝成型窄而薄，用于打底焊缝时具有更好的成型和操作性，可以更好的控制热输入和变形，从而获得较好的焊缝质量。但是由于其本身成型特性，其焊缝强度（焊缝厚度相对更薄）相对更低，在结构拘束较大的环境时，容易在应力作用下发生开裂。此外，点焊区域由于受后续对称施焊持续累积应力的影响，并且其本身焊缝强度更差，其焊接质量相对于正常根部焊缝更差。

基于上述分析，解决根部裂纹问题的关键有两点：一是改善应力状态，使其更均匀、更低；二是提高焊缝本身强度，增加抗裂性。本文提出的改进思路有两方面，一是通过优化焊接顺序、焊道排布以及增加点焊焊点厚度的方式改善受力状态；二是通过去除点焊焊点后重新焊接的方式改善焊缝质量。

2 焊接模拟分析

2.1 模型建立以及变量设置

本节采用 sysweld 软件以不同焊接顺序、焊道排布、点焊焊点处理方式作为考察变量进行定性对比分析，对电加热元件套管角焊缝的焊接过程进行模拟分析，以根部焊道的残余应力分布和水平来评判工艺的合理性。图 4 为电加热元件套管角焊缝模型示意图。如表 1 和图 5 所示为模拟分析条件设置及示意图。

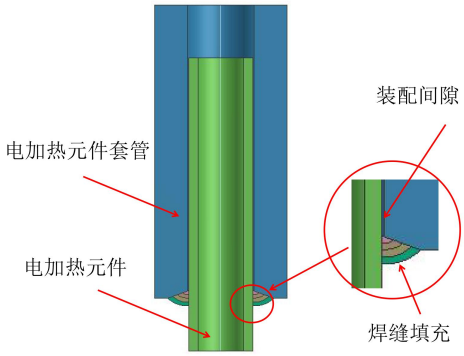


图 4　电加热元件套管角焊缝模型示意图

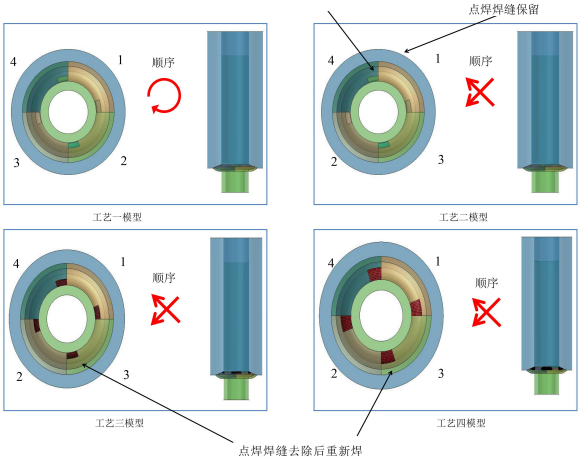


图 5　模拟分析条件设置表

表 1　模拟分析条件设置

变量	工艺一	工艺二	工艺三	工艺四
点焊厚度	点焊厚度小	点焊厚度小	点焊厚度小	点焊厚度大
分道情况	4 道/层	4 道/层	4 道/层	4 道/层
对称施焊方式	无对称施焊	对称施焊	对称施焊	对称施焊
点焊处理	无处理	无处理	第一层焊接后去除	第二层焊接后去除
焊接电流（A）	打底 50 填充 80	打底 50 填充 80	打底 50 填充 80	打底 50 填充 80
焊接电压（V）	12~13	12~13	12~13	12~13
焊接速度(mm/s)	0.5	0.5	0.5	0.5

2.2 变形结果分析

前文提到，若在焊接工艺上不做变形控制，即

点焊后连续整圈焊接，会导致电加热元件与套管两者之间产生偏置和弯折。

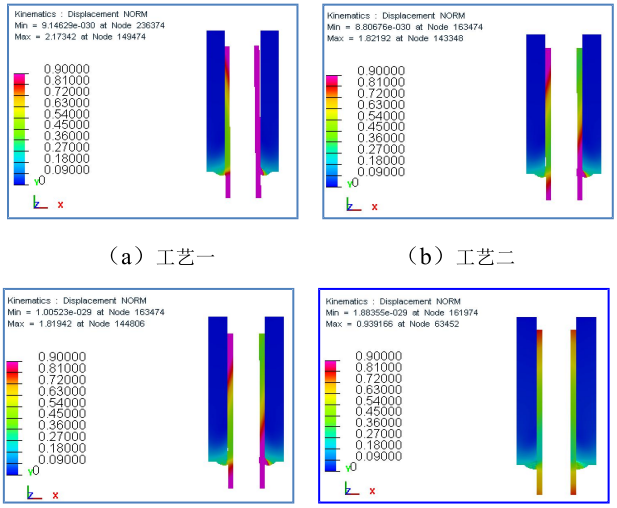
如图 6（a）、（b）、（c）、（d）所示为不同焊接工艺下电加热元件与套管焊后变形的结果。从图中可以看出以下规律：

（1）对称焊接工艺相比于非对称焊接工艺其电加热元件与套管的变形量更小。

（2）点焊焊缝是否去除对于电加热元件与套管的变形影响很小。

（3）点焊厚度越大，刚性越好，电加热元件与套管的变形越小。

小结：对称施焊+增加点焊焊缝厚度可明显减小电加热元件与套管的变形。



（a）工艺一　（b）工艺二

（c）工艺三　（d）工艺四

图 6　不同焊接工艺下电加热元件与套管焊后变形结果

2.3 残余应力结果分析

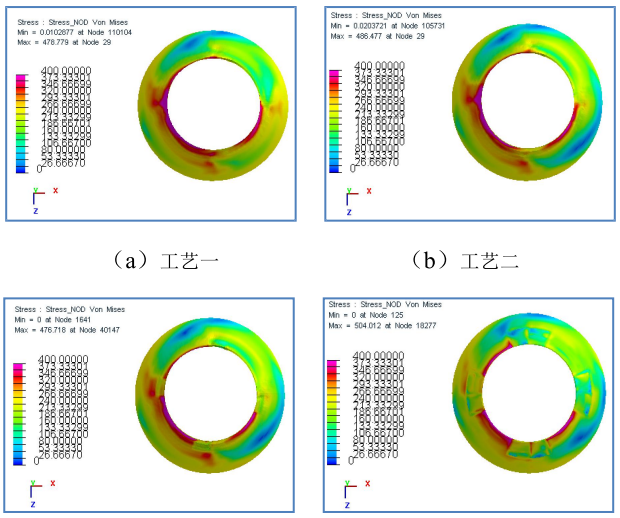
焊接残余应力是评判焊接质量的重要指标。残余应力多集中在焊缝、热影响区及约束区域，当焊接残余应力与承载的工作应力叠加，其数值超过材料的屈服极限时，工件就会在焊缝附近产生焊接变形、断裂等现象。此外，焊接残余应力也是造成异种金属焊缝发生应力腐蚀开裂的重要因素[5]，

前文提到：在存在初始间隙的情况下，焊缝根部三相交汇区域更易产生应力的集中，焊接过程的应力以及残余应力的大小将直接影响根部裂纹的萌生以及扩展。

对于本文中的套管结构，其焊接顺序控制、点焊焊缝的厚度以及是否重新焊接对于焊缝的残余应力均有影响。如图 7（a）、（b）、（c）、（d）所示为不同焊接工艺下电加热元件与套管焊后残余应力结果。

对比图（a）、（b）可以看出：对称施焊会增加结构刚性，使得焊缝根部的残余应力最大值增加，数值上影响较小，应力分布向均匀化趋势改变；

对比图（b）、（c）、（d）可以看出：增加点焊厚度会增加结构刚性，使得焊缝根部的残余应力最大值增加；局部焊道去除后重新焊接可有效减小该区域的残余应力；但是，随着重复焊接量增加，附近焊缝区域的残余应力水平会增加，数值上影响较大。



（a）工艺一　（b）工艺二

（c）工艺三　（d）工艺四

图 7　不同焊接工艺下电加热元件与套管焊后残余应力结果

2.4 根部热裂纹分析

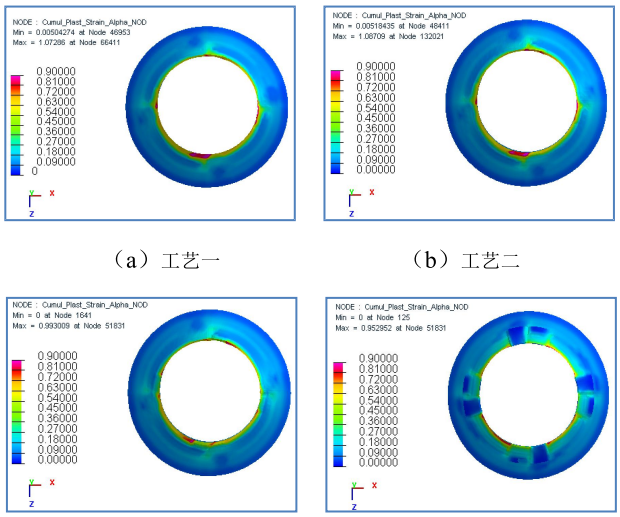
焊缝的残余应力不是评判裂纹的唯一指标，为进一步分析焊缝根部的裂纹敏感性，本文将进一步分析不同焊接工艺下焊缝根部区域的热裂纹敏感性。

凝固裂纹和液化裂纹与液膜有关，产生在焊缝金属以及凝固过程的最终阶段，此时温度略高于固相线，焊缝金属结晶接近完成，但晶粒间尚存在着很薄的液相层，塑性很低，即使在应变很小的情况下也会引起裂纹的萌生（该温度区间为脆性温度区间 BTR），当由冷却不均匀收缩而产生的拉伸变形超过临界值时，即沿晶界液相层开裂，本文通过计算 BTR 区间的累计塑性应变量来对比分析不同工艺对焊缝根部热裂纹敏感性的影响[6]。

如图 9（a）、（b）、（c）、（d）所示为不同焊接工艺下电加热元件与套管焊后累计塑性应变的结

果，从图中可以看出：

与残余应力影响相同的是，局部焊道去除后重新焊接可有效减小该区域的累积塑性应变，同样的，可以通过局部焊缝去除后重新焊接的方式来达到降低某一固定区域累积塑性应变的目的，从而控制裂纹的产生；与残余应力影响不同的是，重新焊接对周围焊缝的累积塑性应变基本无影响，并不会引起 BTR 温度区间内的累积塑性应变的增加。



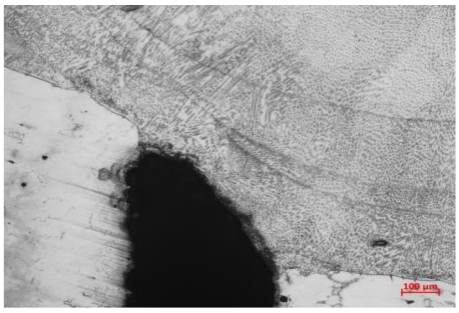
（a）工艺一　（b）工艺二

（c）工艺三　（d）工艺四

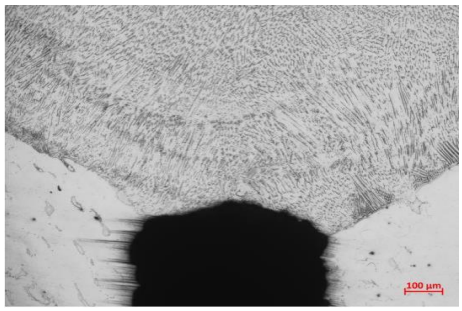
图 8　不同焊接工艺下电加热元件与套管焊后累积塑性应变结果

3　结果验证

为进一步验证分析以及工艺改进措施的合理性，采用前节所示的方法进行控制，对试验件以及产品焊缝进行了焊接验证，结果如图 9 所示。从图中可以看出：采用改善后的工艺进行电加热元件套管角焊缝焊接，根本裂纹问题得以解决，试验件以及产品均一次合格。验证结果与前文分析一致，工艺改进措施验证有效。



（a）根部金相一



（b）根部金相二

图 9　产品焊接验证

4　结语

本文通过有限元分析方式，研究了不同焊接工艺对电加热元件套管角焊缝结构焊接后根部开裂的影响分析以及相应的工艺改进措施，结论如下：

（1）为保证电加热元件套管角焊缝结构后续装配尺寸以及使用功能的有效性，采用对称点焊以及增加点焊焊缝厚度来提升结构刚性从而减小焊接变形是必要的；

（2）对称施焊以及增加点焊焊缝厚度可以改善焊缝残余应力分布的不均匀性，但是会增加残余应力的峰值，但不会对累积塑性应变产生影响；

（3）可以对称施焊及增加点焊焊缝厚度来提高结构刚性，保证应力分布的均匀性，再通过局部焊缝去除后重新焊接的方式来达到降低某一固定区域焊缝残余应力以及累积塑性应变量，从而达到控制整个焊缝根部区域的裂纹敏感性的目的。

参考文献：

[1] 武小强，吴兵兵．稳压器电加热元件连接件与套管焊接问题及解决方案[J]．中国核电，2021，14(6):799-803

[2] 唐国军，张涛，李浩．稳压器电加热元件焊接工艺失效分析与对策[J]．电焊机，2021,51(7):80-85+117

[3] RCC－M SI400[S]2000 版 +2002

[4] 陈俊锋．CRDM 管座贯穿件密封焊工艺改进研究[J]．电焊机，2020，50(11):58-63+145

[5] 邹杰，何冰，江国焱，等．冷却剂泵壳与蒸汽发生器焊接过程数值模拟[J]．压力容器，2018，35(10):37-43

[6] 江国焱，杜晓波，何冰．管子管板封口焊接头设计分析[J]．东方电气评论，2018，32(3):82-88

核电末级双联低加中湿蒸汽的影响及预防

杨浩[1] 高秀志[1] 王宇[1] 季丹[1] 张译升[2]

1.东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000；2.东方电气自动控制工程有限公司，四川 德阳 618000

摘要：核电末级双联低加是核电汽轮发电机组回热系统中不可或缺的辅助设备之一，它可以有效利用汽轮机低品位抽汽来加热再热器给水，并带走级间疏水，从而极大的提高了热力系统的循环效率。由于混入级间疏水，进入双联低加的蒸汽湿度很大。本文通过分析湿蒸汽的来源以及特点，研究了湿蒸汽对低压加热器的影响，提出了一些预防措施，以期使低压加热器在核电机组中运行的更安全，提高设备的利用效率。

关键词：双联低压加热器；湿蒸汽；影响；预防

中图分类号：TK266 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）02-0025-03

Influence and Prevention of Wet Steam in the Last Stage Combined Low Pressure Heater of Nuclear Power Plant

YANG Hao[1], GAO Xiuzhi[1], WANG Yu[1], JI Dan[1], ZHANG Yisheng[2]

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

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

Abstract: The last stage combined low pressure heater is one of the important auxiliary equipments in nuclear turbine regenerative system. It uses the turbine extraction steam to heat the feedwater, and take away the interstage hydrophobic, thus greatly improving the thermodynamic cycle efficiency of the system. The steam, which flow into the combined LP heater, has a high humidity while mixed with the interstage hydrophobic. By analyzing the sources and characteristics of wet steam, this paper research on the influence of wet steam, and propose some preventive measures to make the operation of low pressure heater safer in nuclear power plants, improve the efficiency of the device.

Key words: combined LP heater; wet steam; influence; prevention

汽轮发电机组常采用提高蒸汽初始参数的方法来提高蒸汽动力装置热经济性，但压水堆核电汽轮机仅能采用低参数饱和蒸汽。按照核能反应堆的设计，一回路的压力通常不超过 16 MPa，对应的饱和温度约 347.4 ℃。考虑到传热温降以及两个回路之间的传热端差存在，二回路工质的温度一般仅为 280 ℃左右。

由于主蒸汽参数较低，汽轮机组末几级抽汽（一般为2~4级后）以及抽汽的级间疏水均会进入低压加热器，因此进入末级低加的抽汽湿度很大，其中LP2能达到15 %，LP1能达到45 %[1-5]。

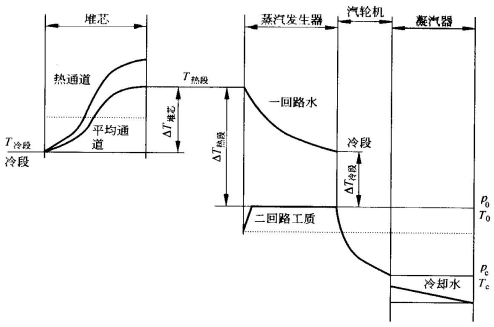


图 1 核能系统各回路参数相互制约关系

收稿日期：2023-08-16

作者简介：杨浩（1986－），男，2009 年毕业于中国科大机械设计及自动化专业，本科，高级工程师。现任职东方汽轮机有限公司产品研发中心，从事辅机系统及设备研发工作。

1 湿蒸汽对低压加热器的影响

通常情况下，蒸汽的密度仅为水的百分之一，但蒸汽进入低压加热器时流速很大。由于湿蒸汽密度远大于干蒸汽，当核电末级的湿蒸汽直接冲击低加内部的换热管,将引起换热管强烈振动,导致一系列危害[6-9]：

（1）冲蚀。高速湿蒸汽对换热器的隔板、换热管长期冲击，会造成换热器内部构件的损坏，如隔板冲蚀，换热管断裂等。

（2）碰撞。相邻的换热管之间或换热管与临近装置之间碰撞，使换热管受到磨损而产生裂缝。

（3）振动。换热管受冲击产生的振动,将导致换热管与支撑隔板磨损而产生破裂。

（4）泄漏。当换热管与管板的连接处受到外力的作用时，就可能出现泄漏的情况。

（5）噪声污染。由于换热管的振动、碰撞,势必产生极大的噪音,引起噪音污染。

（6）回闪现象。当发电机甩负荷时，主汽阀关闭，流入汽轮机内部的蒸汽迅速减少，从而导致压力剧降。从抽汽管道往喉部低压加热器流动的湿蒸汽可能发生倒流（回闪现象），进而造成汽轮机叶片高频激振疲劳开裂，若开裂加重将导致叶片破损。

2 冲蚀的机理

当饱和蒸汽进入管路，随着其内部温度和压力的降低，会形成一些微粒状的液滴一起高速流动；当湿蒸汽经过弯曲的路径时，液滴受离心力的作用冲击管壁，并在管壁成为一层薄薄的液态，并不断二次破裂和凝聚。近代物理学研究表明，通过光电学技术可以观察到，水滴的大小可以在几微米至几百微米之间变化，但最大值通常在400微米左右。

冲蚀对于换热管来说实际上是一种表面材质的磨损，目前，学术界按照磨损机理分为四大基本类型[10]：一是粘附磨损，由于粘附作用使基体材质转移，其特点是剪切破坏；二是微粒磨损，由外部微颗粒造成的基材破坏，其特点是表面有划痕或犁沟；三是表面疲劳磨损，由于材质表面的循环变形导致，其特点是在一定的循环次数后才出现的表面麻坑状结构；四是化学或电化学腐蚀。

3 湿蒸汽的预防

由于湿蒸汽对双联低加的巨大影响，必须采取必要的措施来避免。在实际设计工作中，通常采用两种方法来减小湿蒸汽对双联低加的影响。

（1）控制湿蒸汽流速

进入双联低加的蒸汽由于湿度较高，密度远大于干饱和蒸汽，若流速设计太高，则冲蚀作用将大大增强，对双联低加的内部结构造成巨大损坏。

常用控制湿蒸汽流速的办法是计算湿蒸汽的体积流量，通常设定湿蒸汽流速不高于 50 m/s（按照设计经验），通过计算反推蒸汽管道的规格。

表 1 蒸汽入口流速

项目	筒径(mm)	LP1 侧(m/s)	LP2 侧(m/s)
宁德	DN 2 300	44.24	45.41
红沿河	DN 2 000	44.4	51.8
台山	DN 2 800	35.8	34.5
石岛湾	DN 2 600	49.1	35.8
福清	DN 2 600	36.5	37.5
田湾	DN 2 600	45.4	44.8

（2）设置开孔防冲板

壳程流体进入时，其方向垂直换热管,虽然通过合理选择蒸汽管道规格已经降低了蒸汽流速，但双联低加内部构件长期在湿蒸汽的冲击下，还是很容易损坏，难以达到设计使用寿命。因此，我们通常在双联低加蒸汽进口的下方设置开孔防冲板。

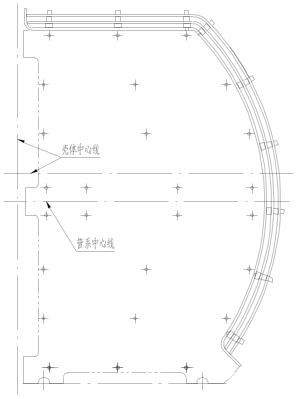


图 2 防冲结构示意图

由于蒸汽的湿度很大，在蒸汽进口处可采用三层不锈钢防冲板（图 2），每层防冲板上的开孔相互完全错开。采用有限元分析方法建立三维模型，每层防冲板厚度 10 mm，开孔直径Φ 16，孔桥距 40 mm，防冲板之间间隔 20 mm，对三层多孔防冲板的速度场及流场进行模拟仿真，其结果如图 3、图 4 所示。

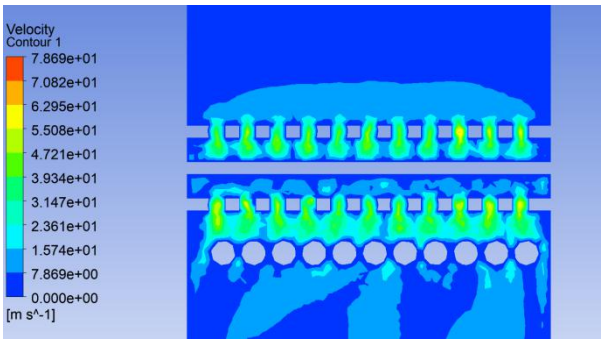


图 3 三层多孔防冲板的速度场分布

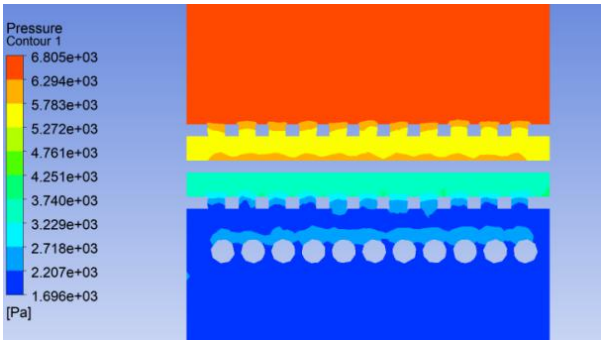


图 4 三层多孔防冲板的压力场分布

图 3、图 4 结果显示，其流速在靠近换热管时，已降低至 25 m/s 左右；压力由 6.8 kPa 降至 2.7 kPa 左右，冲击力已极大降低。因此，三层多孔板具有优异的防冲蚀能力，能有效减小湿蒸汽对换热管的冲击，减轻震动[11]。

4 结语

核电末级双联低加是核电汽轮发电机组回热系统中不可或缺的辅助设备之一，它可以有效利用汽轮机低品位抽汽来加热再热器给水，并带走级间疏水，从而极大的提高了热力系统的循环效率。

本文通过分析湿蒸汽的来源以及特点，研究了湿蒸汽对低压加热器的影响，提出了一些预防措施，并进行数值模拟验证，结果表明采用三层多孔防冲板结构预防末级湿蒸汽冲蚀具有明显效果。

参考文献：

[1] 黄鹏飞，黄伟. 核电汽轮机的特点分析[J]. 科技视界, 2015(24): 260+269

[2] 杨晓辉，单世超. 核电汽轮机与火电汽轮机比较分析[J]. 汽轮机技术, 2006(6):404-406+438

[3] 张小勇，刘琦，杨志平，等. AP1000 核电厂二回路热力系统计算与分析[J]. 热能动力工程, 2018,33(9):107-113

[4] 杨浩，高秀志，孙莲，等. 汽轮机热力系统耦合凝汽器余热回收方式浅析[J]. 东方汽轮机, 2022(3):5-8+22

[5] 高秀志，胡勇，郑湘泉. 低压加热器设置过热蒸汽冷却段的条件[J]. 东方汽轮机, 2021(4):1-4+18

[6] 徐万里. 湿蒸汽条件下的冲蚀机理研究[D]. 清华大学, 2010

[7] 潘治国，胡传顺，朱健，等. 湿蒸汽发生器辐射段弯头腐蚀原因分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006(5):377-379

[8] 刘月芹. 浅谈换热器防冲板[J]. 化工设备与管道, 2002(5): 20-21+25

[9] 黄柳燕，范志飞，苟小平，等. 汽轮机蒸汽力对动叶变形影响的数值计算分析[J]. 东方汽轮机, 2021(1):1-5

[10] 弥鹏. 核电蒸汽发生器面内振动致换热管间冲击磨损行为研究[D]. 浙江工业大学, 2020

[11] 朱小丽，袁德文. 湿汽在孔板和文丘里管内流动压降特性分析[J]. 科技创新导报, 2015,12(22):56-58

16 m 双柱立车在核电汽轮机低压内缸研制中的必要性分析

谢龙飞　刘祥　罗霞　吴攀　张斌

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：本文根据自主型核电汽轮机低压内缸结构、尺寸、重量、精度，加工现状，以及核电汽轮机发展趋势和市场前景，提出了添制16 m双柱立车在核电汽轮机低压内缸研制中的必要性，同时拟定了机床的主要技术参数。

关键词：核电汽轮机；低压内缸；加工现状；立车

中国分类号：TK266　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006-（2024）02-0028-04

Necessity Analysis about 16 m Double Column Vertical Lathe in Low Pressure Inner Cylinder of Nuclear Power Turbine

XIE Longfei, LIU Xiang, LUO Xia, WU Pan, ZHANG Bin

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

Abstract: According to the structure, size, weight, accuracy, processing status, development trend and market prospect of low pressure inner cylinder of nuclear power turbine, this paper puts forward the necessity of adding 16m double column vertical lathe in the development of low pressure inner cylinder of nuclear power turbine, and formulates the main technical parameters of the machine.

Key words: nuclear power steam turbine; low pressure inner cylinder; machining status; vertical lathe

至 2023 年，东方汽轮机从大型核电汽轮机的分包生产、引进制造到目前自主研发已 20 年。在这过程中，通过硬件投资，目前的厂房、设备能力已能满足各种引进机型的制造。随着引进机型产量的萎缩，自主机型已成主角并已开始走出国门，发展前景令人欣慰。核电是国家重点发展的清洁能源，国内市场稳定，海外市场看好。自主机型与引进机型相比，尺寸更大、重量更重、制造要求更高。特别是低压内缸支撑方式由轴向改为径向后，其宽度尺寸达 13 220 mm，实重达 270 t，由于上下半重量差异较大，车削时还需配重。工件的尺寸和重量均已超过公司现有最大立车的加工范围，见图 1。该立车最大加工直径、高度、承重分别为 12.5 m、6 m、250 t。因立车能力不足，自主核电汽轮机低压内缸只能改变正常的设计结构，此举不但影响机组的总体设计，同时大幅增加制造难度、制造成本。全面分析、比较，添制大型立车是目前解决低压内缸研制的最佳途径。

图 1　12.5 m 立车

收稿日期：2023-10-24

作者简介：谢龙飞（1963－），男，1982 年毕业于成都一机校机制专业，2004 年毕业于电子科大计算机及其应用专业，大专，主任工程师，主要从事汽轮机、燃气轮机、风电静子零部件加工及装配工艺等方面工作。

1 自主核电汽轮机低压内缸结构

低压内缸总体结构如图 2 所示，合缸后外型尺寸长×宽×高=4 440 mm×13 220 mm×10 226 mm，总重约 220 t，上下半结构。由于立车的加工直径不够，设计时不得不将下半纵向剖分成低压内缸左支撑装置、低压内缸下半、低压内缸右支撑装置三段，三段通过法兰螺栓连接为一体，见图 3、图 4。缸的两端接上下半结构导流环，通过螺栓与汽缸连接，见图 4。合缸实重约 237 t，见图 3。导流环外型尺寸直径×高=9 300 mm×1 712 mm，实重约 16.5 t。汽缸上下半和两付导流环毛坯实重约 300 t。各部件均为焊接结构件。

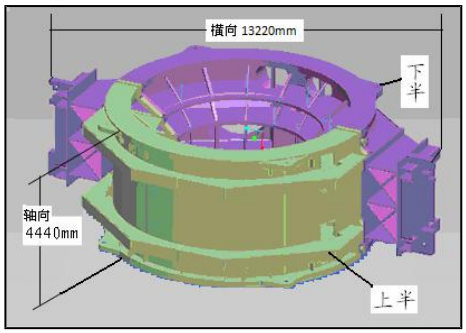


图 2 低压内缸

图 3 合缸状态的低压内缸

图 4 与导流环接配后的低压内缸下半

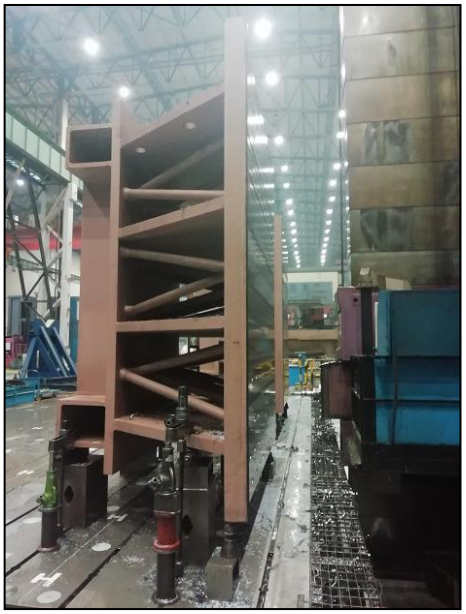


图 5 精加工支撑装置纵向接配面

2 自主核电汽轮机低压内缸加工现状

低压内缸上半加工方式与引进型低压内缸上半一致；下半和支撑装置先加工纵向接配面，三段连接后的加工方式与引进型低压内缸下半接近，立车工序需拆下支撑装置，见图 6。加工下半支撑猫爪前完成三段最终连接。各部件主要工序加工流程如下：

图 6 低压内缸精车

2.1 低压内缸上半

毛坯验收→负荷分配、划线→半精铣中分面→上下半组合半精车各内孔、大端面→堆焊隔板定位面→根据基准做负荷分配、划线→精铣中分面、钻螺栓通孔→合并上下半、组合精加工、拆开上下半等工序见下半加工流程→钻铣大端面螺孔、加工进人孔法兰→钳工收尾→装配。

2.2 低压内缸下半

毛坯验收→负荷分配、划线→半精铣中分面、

支撑装置接配面→上下半组合半精车各内孔、大端面→堆焊隔板定位面→根据基准做负荷分配、划线→留量精铣中分面→精铣纵向接配面、钻铣螺栓孔→装支撑装置→精铣中分面→用上半号划中分面螺孔→按线钻铣中分面螺孔→合并上下半，钻铰中分面锥销孔→拆支撑装置→精车各内孔、大端面→拆开上下半→钻铣大端面螺孔，镗下半抽、进汽管口，镗铣隔板定位销孔、支撑槽→装支撑装置→加工支撑装置猫爪→钳工收尾→装配。

2.3 左右支撑装置

毛坯验收→负荷分配、划线→精铣纵向接配面、钻螺栓通孔→与低压内缸下半接配，钻铰接配面锥销孔→后继组合加工见低压内缸下半加工流程。

2.4 导流环上下半

毛坯验收→负荷分配、划线→校型→车出汽侧装夹基准→半精铣中分面→临床合并上下半→精车内孔、端面→钻端面螺栓通孔→与低压内缸接配、测量中分面配铣量→精铣中分面→钳工收尾→装配。

从各部件主要工序加工流程中可以看出，低压内缸上半和导流环因结构简单、合理，其加工工序少，制造方便。低压内缸下半的加工极度繁琐，须先加工纵向接配面和支撑装置接配面，接下来的工序须反复装拆支撑装置。图 5、图 7 分别是镗床加工支撑装置和低压内缸下半纵向接配面，图 7 是接配中的支撑装置和低压内缸下半，图 6 是低压内缸精车。三段结构的低压内缸下半与整体结构的相比较，其备料、焊接、热处理、吊运、加工、装配、检验等过程的工作量会多出 40 %左右，材料实际消耗增加约 30 t，下半整缸的三个部件仅四个纵向接配面加工掉的材料就接近 9 t，重量增加 17 t。

图 7　精加工低压内缸下半纵向接配面

图 8　支撑装置与低压内缸下半接配

3　立车规格及主要技术参数的选择

须根据工件的结构、尺寸、重量和加工要求等指标选定立车类型和最大加工高度、直径、重量及主要技术参数。由于汽缸内孔轴向尺寸大、精度要求高，故选择双柱立车。导流环内孔与低压转子末级叶片叶顶有通流间隙要求，故导流环内孔须与低压内缸的内孔同心，合理的加工方案是将两侧导流环分别与低压内缸组合进行内孔加工。立车的加工高度须≥工件高度＋工件装卡高度＋安全空间＝6140＋300＋200＝6 640 mm，另考虑到卡爪高度一般有 450 mm 左右，故立车的加工高度最小须≥7 090 mm。加工直径须≥工件旋转直径＋安全空间＝13 220＋300＝13 520 mm。工作台的承重须≥工件重量＋工装重量＋配重块＝255＋16.5＋工装重量＋配重块≈295 t。再考虑到后继机型的大型化和其他零部件加工的需求，故工件的最大加工高度（刀架至工作台的距离）和直径分别按 9 000 mm 和 16 000 mm 选定，工作台承重按 400 t 选定，在确定承重同时考虑了厂房和吊车均只有 350 t 承载能力等因素。

其他主要技术参数：

（1）工作台：直径φ12 000～13 000 mm，转速 0.2～14 r/min，最大扭矩 800 000 N·m。

（2）横梁：行程 7 500 mm，升降速度 300 mm/min。

（3）刀架：水平最大行程-400～8 500 mm，垂直最大行程 4 500 mm，进给速度 0.1～1 000 mm/min，快速进给速度 4 000 mm/min，最大切削力 100 kN，方滑枕截面尺寸 550 mm×550 mm，刀架宽度 800 mm，见图 9。刀杆截面尺寸高×宽＝120 mm×100 mm。

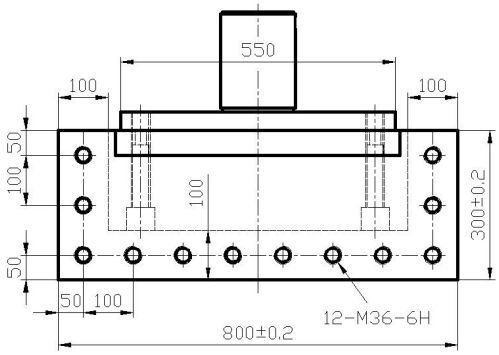


图 9　刀架简图

4　具备 16 m 双柱立车条件下低压内缸下半的研制

4.1 低压内缸下半结构完善

目前结构的低压内缸已完工十多套，如具备 16 m 双柱立车，下半汽缸除可按图 2 原方案整体设计外，还可根据制造中出现的制造问题进行结构优化，进一步降低制造成本。

4.2 低压内缸下半加工方式的优化

低压内缸下半设计成整体结构后，加工流程会得到质的优化，其主要工序加工流程如下：

毛坯验收→负荷分配、划线→半精铣中分面→上下半组合半精车各内孔、大端面→堆焊隔板定位面→根据基准做负荷分配、划线→精铣中分面→用上半号划中分面螺孔→按线钻铣中分面螺孔→合并上下半，钻铰中分面销孔→精车各内孔、大端面→拆开上下半→钻铣大端面螺孔，镗下半抽、进汽管口，镗铣隔板定位销孔、支撑槽、猫爪→钳工收尾→装配。

原导流环和低压内缸各自独立加工，内孔同轴度要求需接配时保证，不仅工作量大，而且同轴度保证困难，有了 16 m 立车后，可将导流环把在内缸上一起车削内孔，既保证了加工精度，又提高了生产效率，同时大幅降低了制造成本。

5　结语

总结目前已完工的十多套自主核电汽轮机低压内缸，其制造成本约为下半按整体缸设计的 1.25 倍，粗略计算，生产十五套低压内缸增加的成本便可购置一台加工直径、高度、承重分别为 16 m、9 m、400 t 的双柱立车。故从产品研发和制造两方面考虑，添制 16 m 双柱立车都非常必要。还有两个最有利的条件：一是核电产业发展势头良好,二是立车结构简单、价格相对低廉，不存在投资风险。与同功能机床比较，立车的优势是通用性好、价格低。添制大型立车后还可解决近邻企业立车能力的不足，带来额外的经济效益。除此之外，本文观点还为电站主机设备的制造指明了一条不同的思路，具有实用的参考价值。

参考文献：

[1] 朱佳生. 透平机械制造工艺学[M]. 西安交通大学出版社. 2005

[2] 王宛山. 机械制造手册[S]. 辽宁科学技术出版社. 2002

[3] 谢龙飞, 刘祥, 张斌, 等. 某 1 000 MW 级核电汽轮机低压内缸制造技术研究[J]. 东方电气评论, 2020, 34(3): 53-59

[4] 谢龙飞, 刘祥，罗霞, 等. 大功率汽轮机低压内缸加工技术现状及改进方向初探[J]. 东方汽轮机, 2020 (4): 43-47

[5] 谢龙飞. 某 1 000 MW 超超临界汽轮机铸造汽缸加工技术研究[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(1): 77-80+28

[6] 张斌, 巩丽, 申鹏, 等. 大型立车超长刀排的结构设计与工程应用[J]. 制造技术与机床, 2021 (2): 131-133+139

[7] 谢龙飞, 刘祥, 吴攀, 等. 自主核电汽轮机低压内缸结构优化及工艺改进[J]. 中国重型装备, 2022(4): 90-96+99

科工法〔2005〕311号与GJB 9001C-2017的比较、分析及应用

魏巍[1] 罗磊[2] 杨静[3] 周勇[1] 刘勇[1]

1.东方电气（武汉）核设备有限公司，武汉 430200；2.海装驻武汉地区第六军事代表室，武汉 430064；3.东方电气股份有限公司，成都 611731

摘要：本文对科工法〔2005〕311号《国防科技工业军用核设施质量保证规定》（以下简称科工法311号文）与GJB9001C-2017《质量管理体系要求》（以下简称GJB9001C）这两种质量管理法规/标准的具体条款进行详细比较、分析；并以某试验堆项目为例，介绍设备制造过程中质量保证体系的建立如何同时满足上述法规标准的要求，保证物项和服务满足核安全要求。

关键词：科工法311号文；GJB9001C；比较与分析；结合应用

中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）02-0032-05

The Comparison, Analysis and Application of Science and Engineering Law〔2005〕No. 311 and GJB 9001C-2017

WEI Wei[1], LUO Lei[2], YANG Jing[3], ZHOU Yong[1], LIU Yong[1]

(1. Dongfang Electric(Wuhan) Nuclear Equpiment Co.,Ltd., 430200, Wuhan, China; 2. Naval Representative Office in Wuhan, 430064, Wuhan, China; 3. Dongfang Electric Corporation, Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: This article compares and analyzes the specific provisions of Science and Engineering Law〔2005〕311 “National defense science and technology industry military nuclear facilities quality assurance regulations”, hereinafter referred to as “science and engineering law No. 311”, and GJB 9001C-2017 “Quality management systems requirements”, hereinafter referred to as GJB 9001C, and finds the similarities and differences. Taking a test reactor project as an example, the establishment of quality assurance system in equipment manufacturing process is introduced to meet the requirements of the above regulations and standards, to ensure that items and services.

Key words: science and engineering law No.311; GJB 9001C; comparison and analysis; application

科工法311号文与GJB 9001C均属于质量管理的要求。科工法311号文由国防科学技术工业委员会发布，适用于军用核设施选址、设计、建造、调试、运行及退役各阶段，强调贯彻“安全第一、质量第一”的方针，不断强化核安全文化和质量意识。GJB 9001C是中央军委装备部颁发的，适用于军队装备及配套产品论证、研制、生产、试验、维修和服务任务。

现从科工法311号文与GJB 9001C的比较、分析着手，介绍设备制造过程中采用两者结合应用的办法。

1 质量法规标准的分析与比较

科工法311号文有五大章节，GJB 9001C有十个章节。两者总体上均遵循了PDCA循环，但具体质量管理要素编排存在差异。总体结构对比如表1~2所示。

现从总则、质量保证体系的建立、质量控制的

收稿日期：2023-11-25

作者简介：魏巍（1992－），女，2011年毕业于河南科技大学工业工程专业，本科，工程师。现任东方电气（武汉）核设备有限公司，主要从事质量管理工作。

实施、验证、持续改进五个方面进行比较分析。

表 1　总体结构对比

科工法 311 号文	GJB 9001C
第一章总则	1 范围 2 规范性引用文件 3 术语和定义
第二章质量保证体系的建立	4 组织环境 5 领导作用 6 策划 7 支持
第三章质量控制的实施	8 运行
第四章验证	9 绩效评价
第五章持续改进	10 改进

1.1 总则

表 2　总则对比

内容	科工法 311 号文	GJB 9001C
颁布机构	国防科学技术工业委员会	中央军委装备发展部
目的	为规范国防科技工业军用核设施质量保证工作，保障军用核设施的安全	证实其具有稳定提供满足顾客要求及适用法律法规要求的产品和服务的能力；增强顾客满意
适用范围	军用核设施；各种陆基反应堆，包括生产堆、研究堆、试验堆、临界装置等；放射性废物管理设施；其他需要监督管理的军用核设施（交付军队使用的核设施除外）。	军队装备及配套产品论证、研制、生产、试验、维修和服务任务及其他军用产品和服务
适用对象	承担军用核设施选址、设计、建造、调试、运行以及退役等各阶段的营运单位和承(分)包单位	各种类型、不同规模、提供不同产品和服务的组织
监管单位	国防科工委	顾客（产品和服务的接受者）
规范性引用文件	未明确引用的标准或法规，关联的有《国防科技工业军用核设施安全监督管理规定》《军工核安全设备监督管理办法》 标准规范配套较少	引用国家标准 1 项，国家军用标准 23 项 通过引用标准，将这些标准中的技术内容纳入其中，成为其中一部分内容，以保持该标准内容的完整性、协调性和一致性
体系形式	质量保证大纲、程序文件	质量手册、程序文件
认证方式	项目制造许可证（按项目）	管理体系认证证书（按产品类型）

1.2 质量保证体系的建立

组织机构方面，科工法 311 号文要求单位建立质量保证组织机构、能够确保质量保证体系有效实施，规定内部职责、组织机构图、职责分配表。GJB 9001C 中规定了最高管理者的职责，要求在最高管理层中指定有一名成员分管质量管理体系工作，保证各岗位的职责、权限得到分配、沟通和理解。

人力资源方面，科工法 311 号文规定本单位法定代表人及相关负责人、质量控制人员、质量控制监督人员、质量保证监查人员等四类质量保证人员应在质量保证组织机构中。要求制订质量保证人员的选择标准和配备计划，制定实施培训措施和程序。相比较之下，GJB 9001C 规定较为广泛，组织应结合业务实际确定、配备所需的人力资源。

质量保证文件构成方面，科工法 311 号文将质量保证文件分为三个层次，各单位应按要求实施；规定每一级质保大纲审评的责任主体为上一级单位。GJB 9001C 中质量管理体系建议通过质量手册、程序文件等文件形式发布，未强制规定。

沟通方面，科工法 311 号文要求单位确定内、外接口种类、制定程序。GJB 9001C 要求按 5W1H 确定内外部沟通，并确定需保留的记录；要求建立质量信息管理制度，规定收集、传递、处理、贮存和应用质量信息的途径、方法。

1.3 质量控制的实施

文件控制、记录和报告控制方面，科工法 311 号文具体提出了文件的层次划分。GJB 9001C 成文信息包括文件控制、记录和报告控制的两大方面内容，涵盖各种格式（语言、软件版本、纸质或电子版等）。

设计控制方面，科工法 311 号文将设计控制分为设计过程、接口、验证、修改与变更等方面，制定措施进行控制。GJB 9001C 对设计和开发过程从策划、输入、控制、输出、更改五个流程进行规定，其中设计和开发控制包括评审、验证、确认三个过程。另，GJB 9001C 规定需进行新产品试制，从产品试制前准备状态检查（一般生产部门组织）、工艺评审（一般技术部门组织）、首件鉴定（一般技术部门组织）、质量评审（一般质量部门组织）四个方面进行落实；设计和开发的试验过程控制要求；关键/重要特性、关键件和重要件控制要求。

采购控制方面，科工法 311 号文规定采购的流程及控制要求。GJB 9001C 规定对外部提供过程、产品和服务的控制要求，增加了对外部供方绩效的控制和监视、再评价要求。对于顾客关注的外包过程评审，应提交顾客批准。

物项控制方面，科工法 311 号文要求就物项的标识、清洁、包装、搬运、装卸、运输、贮存、发放与领用、保护、维护以及余料回收等方面，制订措施和程序。GJB 9001C 通过标识和可追溯性、顾客或外部供方的财产（包括原材料、零部件、知识产权等）、防护（包括标识、处置、包装、储存等）三个条款进行规定。未对余料回收的控制提出要求。

监视和测量方面，科工法 311 号文通过工装和测试器具控制、检验测量和试验控制，两个条款进行规定。GJB 9001C 通过三个条款规定：一是监视和测量资源，包括从事监视和测量的人员、设备、工辅料、方法、环境及保障条件等，两者要求差异不大；二是监视和测量顾客满意度；三是产品和服务放行时的质量控制要求，重点强调在得到授权人或顾客批准后方可接收和放行。

场地与环境控制方面，科工法 311 号文要求制订措施和程序，对场地范围标记、安全设施及其标识、场地整洁与环境要求、安全保卫等方面进行管控。GJB 9001C 要求确定运行过程所需的环境，包括人为因素和物理因素。

过程控制方面，科工法 311 号文中列举的过程均与军用核设施相关；要求从人、机、料、法、环各方面进行管控，特种工艺过程人员应事先取得相应的资格证书。GJB 9001C 要求应在受控条件（可概括为人、机、料、法、环、测、管七方面）下进行生产和服务的提供；另外明确特殊过程的定义，提出了特殊过程确认的要求。

不符合项控制方面，科工法 311 号文规定了对不符合项从发现到处理关闭的全流程管理，其中重大不符合项应向监管单位报告。GJB 9001C 采用术语为不合格，规定了不合格输出的识别和控制要求。强调对不合格纠正后的验证确认工作。

1.4 验证

质量控制监督方面，科工法 311 号文规定了质量监督的类别、方式、范围，以及质量控制监督人员的资格要求和职责。GJB 9001C 无类似要求。

体系符合性和有效性的监视方面，科工法 311 号文采用质量保证监查一词，规定了监查活动开展流程，强调了监查人员的资质要求。除内部监查外，还包括外部监查（比如对供方）、接收外部监查时的配合工作。GJB 9001C 采用术语为内部审核，规定了其实施流程、对审核方案和审核员的要求。

1.5 持续改进

改进方面，科工法 311 号文的要求与以前版本的 GJB 9001B 内容大致相同。GJB 9001C 包括不合格和纠正措施、持续改进两部分内容，详细描述了实施要求，持续改进确保质量管理体系的适宜性、充分性和有效性。

分析与评价方面，科工法 311 号文要求制订质量趋势分析和质量保证趋势分析程序，对分析资料的收集和汇总、分析频度和方法、分析报告、分析结果的响应行动等方面进行规定。GJB 9001C 未规定分析与评价结果发布的形式，仅要求利用分析结果对产品和服务的符合性、顾客满意程度、质量经济性等八方面进行评价，将评价结果应用于改进。

评价体系的适宜性、充分性、有效性方面，科工法 311 号文要求每年至少由单位法人组织和主持一次内部审查，规定了其开展流程。GJB 9001C 采用管理评审的方式，由最高管理者组织，规定了开展时机、目的、输入输出内容及要求等。两者对比来看，GJB 9001C 管理评审输入内容还包括了外部供方的绩效、资源的充分性等方面内容。

1.6 其他 GJB 9001 特有要求

理解组织及其环境、理解相关方的需求和期望（如投资方关注投资回报、合作伙伴关注长期合作的双赢关系、员工价值诉求等）、应对风险和机遇的措施、基础设施（如工作场所、软件和硬件设备、运输资料等）、组织的知识（如法律法规、组织内部刊物等）、以顾客为关注焦点等条款是 GJB 9001C 特有要求。

上述内容围绕企业运营开展，目的是将质量体系与企业核心流程相融合、不再游离于企业运营。与科工法 311 号文围绕军用核设施开展、确保设施设备质量的要求不同。

2 两种质量法规标准的结合

以某试验项目主设备研制任务为例，根据合同要求需按照科工法 311 号文以及 GJB 9001C 要求，制订《XXX 项目设备制造质量保证大纲》（以下简称质保大纲）。承前述两个质量法规标准存在差异，需解决如何建立质保大纲，确保有效实施该项目质量要求、且同时满足上述两个质量法规标准要求。

2.1 建立质保大纲采用的原则

建立质保大纲时采用如下原则：

（1）按照科工法 311 号文的结构要素编排，同时增加 GJB 9001C 中有关管理要求；

（2）涉及的质量术语、过程和要素的优先使用顺序是科工法 311 号文、GJB 9001C；如：GJB 909 中不合格品控制引用了 GJB 571《不合格品管理》，而科工法 311 号文中明确规定了“不符合项控制”的要求，则执行科工法 311 号文的规定。

（3）采用 GJB 9001C 有关管理要求及其引用的国军标时，所采用的方法和方案至少应具有科工法 311 号文相同的安全水平；如 GJB 9001C 的 8.3.7 新产品试制中引用了 GJB 908《首件鉴定》，而科工法 311 号文未明确规定首件鉴定的要求，则执行 GJB 908 的规定。

按照上述原则增加的 GJB 9001C 内容有：5.1.1 最高管理者对体系的领导作用、5.1.2 以顾客为关注焦点、7.6 质量信息、8.3.4 设计和开发控制、8.5.3 顾客或外部供方的财产、8.3.7 新产品试制、8.5.1 生产和服务的提供的控制部分内容、8.4 外部提供的过程、产品和服务的控制、8.1 外包过程评审、8.5.5 交付后的活动、8.5.7 关键过程、8.6 产品和服务的放行。

2.2 项目制造过程的实施

依据 2.1 条确定的原则和内容，该试验堆项目制造过程中增加开展的 GJB 9001C 有关活动主要有：

➢ 最高管理者对体系的领导作用

对最终产品和服务质量负责；确保质量管理部门独立开展工作；确保顾客能够及时获得产品和服务质量问题的信息；建立质量诚信管理制度，与员工签订质量诚信承诺书，确保组织的质量诚信。

➢ 顾客满意

建立制度并落实，安排专人负责、定期征求顾客对产品和服务质量及其改进方面意见。

➢ 质量信息

质量信息包括产品质量数据、质量问题、顾客要求、上级主管要求等。按月度定期收集、分析，形成质量趋势，指导后续工作开展。

➢ 技术状态管理

在产品和服务实施前，经识别发现需要变更技术状态要求时向设计方发出变更申请；或制造过程中设计单位进行技术状态变更时，核实产品实物状态、及时反馈是否可接受实施。

➢ 外包过程评审

外包过程评审在外包实施前组织，评审供方提供合格产品能力的影响，主要内容包括：外包的必要性、对产品和服务的要求以及双方的技术接口和组织接口要求是否明确，可能的风险及其应对措施，供方应具备的资质和能力，对供方的监督和控制方式，供方应保留和向组织提供的成文信息等。该项目外包过程经过评审后组织实施、过程监控，有效降低了质量问题的发生。

➢ 试制和生产准备状态检查

开工前，对试制的准备状态进行了系统的检查，确定人、机、料、法、环、检等条件是否具备产品批量生产的技术和质量保证能力。

➢ 首件鉴定

对于试制产品，首先确定了首件鉴定的范围、编制首件鉴定目录，经顾客同意后发布；在首件鉴定过程中有关作业文件、检验记录、数控程序、零件等均作“首件标识”，检验原始记录保存完整、填写《首件鉴定检验报告》；制造、检验完成后编制首件鉴定审查报告，组织顾客等对首件的过程及资料进行文件方式或会议方式鉴定。首件鉴定合格后批量投产。

该项目对 5 种锻件、1 种管材、9 项零部件制造进行了首件鉴定。

➢ 工艺评审

对新产品试制的工艺评审重点对象有工艺总方案，包含关键重件、关键工序、特殊过程的工艺文件。

➢ 关键过程控制

原材料采购阶段，在采购文件中明确采购要求和验收标准，入厂复验合格后做关键件、重要件标识。

产品制造阶段，识别关键件、重要件、关键过程，并编制关键过程明细表；在图纸、质量计划和规程等工艺文件中按 GJB 909A 的规定，采用“Z”和“G”标识关键特性、重要特性，并在相应的技术要求中明确指出；设置控制点、编制作业指导书以便能有效指导、监视；关键特性及重要特性实施百分之百检验（可行时）；形成可追溯的过程和结果记录。

➢ 特殊过程控制

焊接、热处理、表面处理等属于特殊过程，实施前组织从人机料法环测等方面进行特殊过程确认。涉及外包的，由外包供方组织特殊过程确认。

➢ 产品质量评审

建立产品质量评审程序，完成产品试制后编制质量分析报告、组织评审会；邀请顾客、设计单位等参加，对制造过程、工艺、质量控制等内容进行评审，形成评审结论。

➢ 产品和服务的放行

出厂前由授权的放行人员按出厂验收细则进行自查，自查合格后提交顾客验收。

➢ 交付后的活动

建立售后服务团队、制定售后服务流程。对交付后活动各环节进行控制。提供技术支持和资源，对顾客在现场安装中提出的有关产品技术和质量方面的问题，及时委派技术服务人员到现场服务。

3 结语

质保大纲按上述要求建立、经监管单位评定认可，作为项目设备制造质量保证的纲领性文件，是对项目设备制造全部质量保证工作实施有效控制的根本依据。设备制造活动的过程中，始终贯彻“安全第一、质量第一”的方针，严格按照国家相关核安全法规和顾客要求进行控制，严格按照质保程序文件进行生产和管理，对各项活动进行质量监督控制，确保体系运行正常、有效，各项活动受控。

参考文献：

[1] 关于印发《国防科技工业军用核设施质量保证规定》的通知[J]. 中华人民共和国国防科学技术工业委员会文告, 2005(3):2-7

[2] 中央军委装备发展部. 质量管理体系要求: GJB 9001C-2017[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部. 2017:7

（上接第 19 页）

表 3 电站 3#机组在风机改造前后的实测数据对比

	风机改造前	风机改造后
风机压力/Pa	978	745
单台风机流量(m^3/h)	15 600	14 340
电机总风量(m^3/s)	26	23.9
定子线圈最高温升/K	50	56
转子线圈平均温升/K	68	75
风机运行的平均电流值/A	18.6	14.2
风机水平振动平均值(mm/s)	/	1.8
风机垂直振动平均值(mm/s)	/	2.1

由于检修时间限制，电站 3#机组风机改造前的振动测试未进行。更换风机后，在额定负荷运行时，转子线圈平均温升上升 7 K 左右，定子线圈测点最高点的温升上升了 6 K。考虑到定子线圈温度较低，并且电站实际运行时一般不带无功负荷或者带的无功负荷很小，实际运行时定子和转子的温升裕度较大，更换风机后电机完全能满足正常运行要求。从表 3 可以看出，改造后的轴风机振动值较小，从风机的运行电流可以判断出风机轴承负荷相比改造前减少约 24 %。

本文提出的针对灯泡贯流式水轮发电机轴流风机故障的应对措施，在保证机组安全运行的同时，能让风机的运行环境大幅改善，从根本上避免了风机轴承故障频发的问题，同时实现了风机更佳的运行经济性，可为后续灯泡贯流电站机组的轴流风机选型设计或风机故障处理提供思路。

参考文献：

[1] 应光耀, 吴斌, 董益华, 等. 发电厂风机常见振动故障及处理[J]. 浙江电力, 2013, 32(2):45-47

[2] 柳磊, 王新良, 王东, 等. 电站风机振动故障诊断的方法研究[J]. 黑龙江电力, 2020, 42(1):22-25

[3] 廖毅刚. 大型灯泡贯流式水轮发电机通风系统研究[J]. 东方电气评论, 2003(17):55-61

[4] 李素卿, 王文龙, 武文萍. 300MW 机组引风机振动原因分析[J]. 山西电力, 2007(4) : 41-42

高炉热风炉烟气超低排放技术路线研究

李灵均[1,2] 周东锋[3] 甘丽江[1,2] 魏文丁[1,2] 杜文韬[1,2] 张晶辉[1,2] 任江[1,2] 武娟[1,2]

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

3.安阳钢铁集团有限公司，河南 安阳 455000

摘要：高炉热风炉是钢铁行业生产过程中主要的烟气污染物排放源之一，通过分析当前高炉热风炉烟气污染物排放标准，结合高炉热风炉的烟气特点，提出两种适用于高炉热风炉烟气超低排放的技术路线，经过技术经济对比发现，采用中高温烟气脱硝更具优势。

关键词：热风炉；超低排放

中图分类号：TF578 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）02-0037-05

Study on the Technical Route of Ultra Low Emission of Flue Gas from Blast Furnace Hot Stove

LI Lingjun[1,2], ZHOU Dongfeng[3], GAN Lijiang[1,2], WEI Wending[1,2], DU Wentao[1,2], ZHANG Jinghui[1,2], REN Jiang[1,2], WU Juan[1,2]

（1. Dongfang Boiler Co., Ltd., 611731, Chengdu, China; 2. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China; 3. Anyang Iron & Steel Group Co., Ltd.,455000, Anyang, Henan, China）

Abstract: Blast Furnace Hot Stove is one of the main emission sources of flue gas pollutants in the production process of iron and steel industry. By analyzing the current emission standards of flue gas pollutants of hot stove and combining the characteristics of flue gas, two technical routes suitable for ultra-low emission of flue gas of hot stove are proposed. Through technical and economic comparison, it is found that the investment and operation cost of high temperature flue gas denitrification technology is more advantageous.

Key words: blast furnace hot stove; ultra low emission

热风炉是炼铁高炉的重要附属设备，其作用是为炼铁高炉持续提供高温热风，热风炉最重要的指标是热风温度。研究表明，每提高风温 100 ℃，可以提高喷煤量 20~30 kg/t Fe，降低焦比约 2.5 %，提高高炉产量约 2.5 %[1]。目前先进的现代热风炉风温可以达到 1 250 ℃以上，毛庆武[2]对首钢京唐钢铁公司 1 号 5 500 m^3 特大型高炉顶燃式热风炉进行了设计和运行优化，热风炉风温达到了 1 300 ℃，达到了国际领先水平。热风炉是炼铁高炉生产过程中主要的烟气污染物排放源之一，孟凡双[3]统计了鞍钢本部八座高炉热风炉排放量，在没有环保设施且热风炉运行正常的情况下，热风炉烟气颗粒物排放浓度范围为 0~10 mg/Nm^3，二氧化硫排放浓度范围为 10~60 mg/Nm^3，氮氧化物排放浓度范围为 30~200 mg/Nm^3。2019 年 4 月，生态环境部等五部委联合印发的环大气〔2019〕35 号《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》中，首次明确提出热风炉烟气污染物超低排放限值。在此之后，多个省份又相继出台了地方钢铁行业超低排放标准，表 1 汇总了热风炉烟气污染物排放标准。

收稿日期：2023-07-03

作者简介：李灵均（1987－），男，2012 年毕业于天津大学化学工程专业，硕士，工程师。主要从事烟气净化技术研发与设计工作。

表 1 高炉热风炉烟气污染物排放标准

标准名称	排放限值（mg/Nm³）		
	颗粒物	二氧化硫	氮氧化物
《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》	10	50	200
DB 13/ 2169-2018 河北省《钢铁工业大气污染物排放标准》	10	50	150
DB41/1954-2020 河南省《钢铁工业大气污染物排放标准》	10	50	150
DB14/2249-2020 山西省《钢铁工业大气污染物排放标准》	10	50	200
DB37/990-2019 山东省《钢铁工业大气污染物排放标准》	10	50	150

对比表 1 中数据可以看出，各省的地方标准与《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》中颗粒物和二氧化硫的排放限值相当，河北、河南和山东省对于氮氧化物的排放浓度更加严格。然而，在热风炉烟气污染物排放标准中，二氧化硫和氮氧化物的排放限值较为宽松，表 2 整理了钢铁企业不同生产工序烟气污染物排放限值。

表 2 钢铁企业不同生产工序烟气污染物指标限值

生产工序	生产设施	基准氧%	排放限值（mg/Nm³）		
			颗粒物	二氧化硫	氮氧化物
烧结（球团）	烧结机机头	16	10	35	50
	球团竖炉				
	链篦机回转窑	18	10	35	50
	带式球团焙烧机				
炼焦	焦炉烟囱	8	10	30	150
炼铁	热风炉	—	10	50	200
自备电厂	燃煤锅炉	6	10	35	50
	燃气锅炉	3	5	35	50
	燃气轮机组	15	5	35	50

从表 2 数据可以看出，在钢铁企业各生产工序和生产设施中，热风炉的二氧化硫和氮氧化物排放浓度限值最为宽松。相较于燃料和排烟含氧量都基本相当的燃气锅炉，热风炉的二氧化硫和氮氧化物排放浓度限值分别是燃气锅炉排放标准的 1.43 倍和 4 倍。因此，热风炉的烟气污染物排放标准有待进一步提高，研究能够对标燃气锅炉排放标准的热风炉烟气超低排放技术路线是十分必要的。

热风炉排放烟气中的污染物是在热风炉烧炉过程中高炉煤气与空气燃烧产生的，其中主要的污染物成分有氮氧化物、二氧化硫、颗粒物等。

热风炉排放烟气中的二氧化硫和颗粒物主要来自其燃料（高炉煤气），高炉煤气中的含尘量直接影响热风炉排放烟气中的颗粒物浓度，高炉煤气中的含硫量直接影响热风炉排放烟气中的二氧化硫浓度。而高炉煤气中的硫主要来自高炉的原料，其原料中的大部分硫会随铁水、渣排出，部分硫以 H_2S 和有机硫气体等形式进入高炉煤气中，在高炉煤气燃烧过程中，硫化物发生热分解并被氧化生成 SO_2，故热风炉排放烟气中 SO_2 的生成途径主要属于燃料型[4]。

热风炉排放烟气中氮氧化物的生成量与炉内运行工况紧密相关，根据 NOx 的反应机理，燃烧形成的 NOx 主要可分为燃料型、热力型、快速型 3 类[5]。根据张福明的研究，热风炉排放烟气中的氮氧化物主要为热力型 NOx[6]，其中主要含有 95 %的 NO 和 5 %的 NO_2，除此之外还有少量的 N_2O 和其他氮氧化物。

热风炉是一种间歇式蓄热换热器，运行过程包括烧炉、送风、换炉 3 个状态。大型高炉一般配置 3~4 座热风炉，采用两烧一送或两烧两送的运行模式。单座热风炉按照“烧炉→换炉→送风→换炉”方式周期性运行，其中热风炉在烧炉和换炉的过程中会排放氮氧化物，并且在不同的运行状态下氮氧化物的排放量差别很大。刘红军[7]研究了在热风炉燃烧过程中氮氧化物产生的过程，研究表明热力型 NOx 主要是在火焰燃尽区产生的，燃烧中心区温度是最显著的影响因素，当该区域温度低于 1 400 ℃时，热力型 NOx 生成速率较慢，而当该区域温度进一步升高时，温度每升高 100 ℃，NOx 生成速率增加 7～9 倍。刘华平[8]总结了沙钢 2 500 m³ 高炉改造经验，发现热风炉在送风转烧炉换炉期间的 NOx 产量远高于其烧炉阶段，其原因主要是此阶段热风炉内的 O_2 浓度远高于烧炉阶段，且 N_2 与 O_2 的接触时间长（可达 3～5 分钟），为热力型 NOx 的生成提供了有利条件。

1 烟气脱硫脱硝技术选择

1.1 烟气脱硫技术

烟气脱硫技术分为湿法烟气脱硫技术、半干法烟气脱硫技术以及干法烟气脱硫技术。其中湿法烟气脱硫技术包括石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术、双碱法烟气脱硫技术以及氨法烟气脱硫技术等。湿法烟气脱硫技术因其脱硫效率高，是钢铁行业使用最为广泛的烟气脱硫技术之一。在湿法烟气脱硫技术中，根据脱硫塔入口烟气条件的差异，脱硫塔出口烟气的温度约为 50～60 ℃，且以饱和湿烟气的状态存在，这样的烟气不能用于干燥高炉所用煤粉，因此，湿法烟气脱硫技术不适用于热风炉排放烟气脱硫。

半干法烟气脱硫技术具有技术成熟、系统可靠、工艺流程简单、耗水量少、占地面积小的优点，是广泛应用于钢铁行业的烟气脱硫技术。目前应用较为广泛的半干法烟气脱硫技术主要有两种：旋转喷雾干燥法烟气脱硫技术和循环流化床法烟气脱硫技术。旋转喷雾干燥法烟气脱硫技术的核心装置是布置于脱硫塔顶部的旋转雾化器，该旋转雾化器属于高速运转的机械设备（转速超过 10 000 r/min），故障率高、检修频繁、系统运行可靠性较低，不能适应热风炉需要长期连续、稳定运行的要求。循环流化床法烟气脱硫技术为了实现脱硫效率依赖在脱硫塔内形成循环物料与新加脱硫剂的稳定床层，要求维持较大比例（相对设计值）且稳定的烟气量，而由于高炉热风炉出口烟气的温度和烟气流量均呈现周期性、大范围的波动，很容易导致脱硫塔塌床，且一旦发生塌床事故要再建立起稳定的床层则需要较长的时间，严重影响热风炉的安全、稳定运行。因此，上述两种半干法烟气脱硫技术也不适用于热风炉排放烟气脱硫。

干法烟气脱硫技术通过向原烟气中喷射碱性的粉状脱硫剂，在一定温度下与烟气中的硫氧化物（SOx）发生化学反应生成硫酸盐和亚硫酸盐从而达到脱除硫氧化物（SOx）的目的，通常与布袋式除尘器组合使用，实现烟气中硫氧化物（SOx）和颗粒物协同脱除。最常见的干法脱硫剂是碳酸氢钠，也就是 SDS 钠基干法脱硫技术。SDS 钠基干法脱硫技术以其系统简单、投资和运行成本低、脱硫效率高等优势，在钢铁行业受到越来越多的关注和应用。额尔德木吐[9]针对唐山市某钢厂高炉热风炉的脱硫改造项目，采用的是 SDS 钠基干法脱硫技术，取得了良好的应用效果，并研究了影响脱硫效率的各个因素。SDS 钠基干法脱硫技术烟气温降低，在满足烟气脱硫效率的同时，不影响将经过脱硫后的高炉热风炉排放烟气用于干燥高炉所用煤粉，可以作为高炉热风炉烟气脱硫的优选技术。

1.2 烟气脱硝技术

用于钢铁行业的烟气脱硝技术主要有氧化法烟气脱硝技术、SNCR 烟气脱硝技术和 SCR 烟气脱硝技术。其中氧化法烟气脱硝技术的原理是使用强氧化剂（如：双氧水、臭氧、亚氯酸钠等）将烟气中的一氧化氮氧化成为容易被碱型物质吸收的 NO_2 或 N_2O_5，然后再配合半干法烟气脱硫或者湿法烟气脱硫系统完成对烟气中氮氧化物的脱除。由于半干法烟气脱硫技术和湿法烟气脱硫技术都不适用于高炉热风炉烟气脱硫，故氧化法烟气脱硝技术不适用于高炉热风炉烟气脱硝。

SNCR 烟气脱硝技术是将脱硝还原剂在 800～1 150 ℃温度区域喷入含 NOx 的原烟气中，脱硝还原剂有选择性地还原烟气中氮氧化物，生成无污染性的氮气和水，从而达到脱除烟气中 NOx 的目的。SNCR 烟气脱硝技术系统简单、投资和运行成本低，但是需要在特定的烟气温度窗口和足够的反应时间条件下才能实现较好的脱硝效果，常用于锅炉烟气脱硝。在燃煤锅炉和燃气锅炉中应用可以实现 30～40 %的脱硝效率，应用于循环流化床锅炉可以实现 70～80 %的脱硝效率。由于高炉热风炉排放烟气的温度在 260～330 ℃，最高温度约 400 ℃[10,11]，远低于 SNCR 烟气脱硝技术所必需的温度窗口，因此 SNCR 烟气脱硝技术不适用于高炉热风炉烟气脱硝。

SCR 烟气脱硝技术全称为选择性催化还原法烟气脱硝技术，是目前应用最广泛、最为成熟的脱硝技术，其核心设备是脱硝催化剂，随着脱硝催化剂技术的不断进步，SCR 烟气脱硝技术可以在中低温（180～260 ℃）和中高温（260～420 ℃）条件下轻松实现 90 %以上的脱硝效率。SCR 烟气脱硝技术效率高、可靠性好，脱硝产物是对环境无害的 N_2 和 H_2O，且对负荷变化适应性强，能够适应高炉

热风炉排放烟气的周期性波动。当 SCR 烟气脱硝技术应用于高炉热风炉的烟气脱硝时，可以采用中高温 SCR 烟气脱硝方案，也可以选用中低温 SCR 烟气脱硝方案，具体根据高炉热风炉的运行需要确定。

2 烟气超低排放技术路线研究

以某钢厂 4 800 m^3 高炉为例，该高炉配置 4 座顶燃式热风炉，其设计参数及热风炉出口排放烟气的参数如表 3 所示。该高炉热风炉的烟气净化采用 SCR 烟气脱硝技术完成氮氧化物脱除，NOx 排放浓度不高于 50 mg/Nm^3；同时，采用 SDS 钠基干法脱硫技术配合布袋式除尘器完成二氧化硫和颗粒物的协同脱除，实现 SO_2 排放浓度不大于 35 mg/Nm^3，颗粒物排放浓度小于 5 mg/Nm^3。

表 3 某高炉配套热风炉设计参数及出口烟气参数

序号		项目	单位	参数	备注
1	热风炉参数	燃烧形式	/	顶燃式	
2		年作业时间	h	8 400	
3		热风炉数量	座	4（二烧二送）	
4	烟气原始数据	正常生产期间烟气温度	℃	260～320	
5		烟气流量（湿态）	Nm^3/h	570 000	最大量
6		二氧化硫	mg/Nm^3	均值＜150	
7		氮氧化物	mg/Nm^3	均值＜180，最高 260	
8		颗粒物	mg/Nm^3	均值＜15	
9	污染物排放浓度限值	二氧化硫	mg/Nm^3	35	
10		氮氧化物	mg/Nm^3	50	
11		颗粒物	mg/Nm^3	5	
12		氨逃逸	ppm	3	

当采用中高温 SCR 烟气脱硝技术时，工艺路线为：所有高炉热风炉出口排放烟气经主管汇集后进入 SCR 脱硝反应器，在 SCR 脱硝反应器前入口烟道上合适位置处向原烟气中喷入脱硝还原剂（如：采用尿素热解工艺制备的氨气），脱硝还原剂与烟气中的氮氧化物经充分混合后，在中高温脱硝催化剂的作用下发生化学反应转变为无害的氮气和水蒸气。经过脱硝后的烟气进入管式换热器，在管式换热器中热烟气与高炉煤气进行换热被“冷却”至 180～200 ℃，同时高炉煤气被加热至 185～220 ℃。经换热冷却之后的烟气进入 SDS 钠基干法脱硫装置，在 SDS 脱硫反应器前烟道上合适位置处喷入经小苏打研磨系统制备成的碳酸氢钠超细粉，在与烟气充分混合过程中与烟气中的 SOx 发生化学反应，生成硫酸钠颗粒并随烟气一起进入布袋式除尘器内进行除尘净化。烟气经 SDS 脱硫及除尘装置的温降约为 10～15 ℃，通过烟气引风机将经 SCR 脱硝、SDS 脱硫和布袋式除尘净化后的烟气送入烟囱排放，并在烟气引风机后抽取部分热烟气送去烘干高炉用煤粉。在布袋式除尘器中收集下来的硫酸钠颗粒和少量反应不充分的碳酸钠颗粒、烟尘在除尘器下灰斗中汇集后通过气力输灰系统送至后产物储仓，然后由吸引压送罐车运输至脱硫灰处理点，或者通过打包机打包成吨袋运输出厂。此工艺路线如图 1 所示：

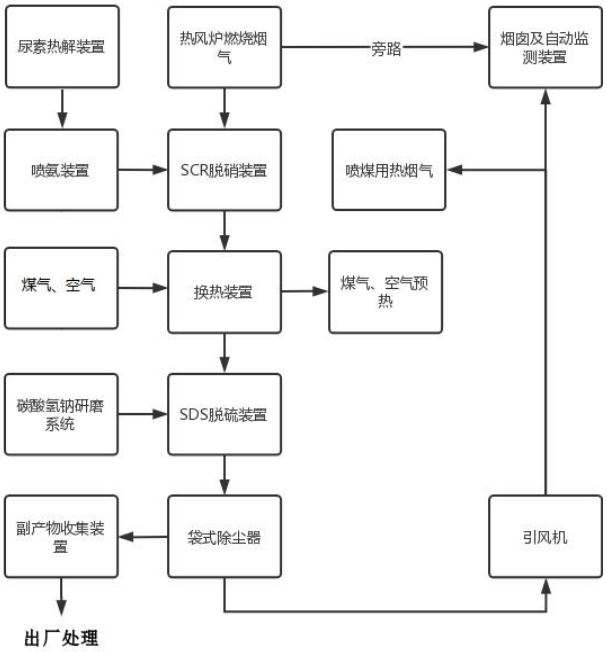


图 1 高炉热风炉烟气超低排放工艺路线 1

采用中低温 SCR 烟气脱硝技术时，将 SCR 脱硝反应器布置于 SDS 脱硫配套布袋式除尘器之后，SCR 脱硝反应烟气温度约为 190 ℃，其余工艺路线相同，如图 2 所示。

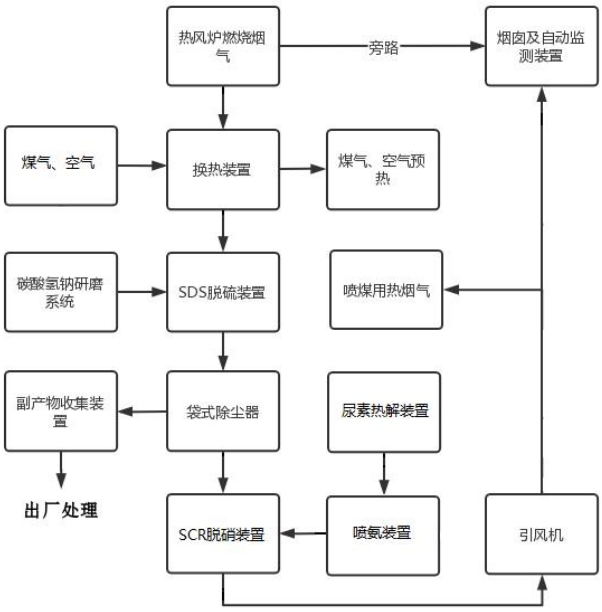


图 2 高炉热风炉烟气超低排放工艺路线 2

上述两种工艺路线除了 SCR 烟气脱硝反应入口条件有差别导致脱硝催化剂选型不同外，其余的换热装置和 SDS 脱硫、布袋式除尘系统设备的选型参数基本相当。表 4 比较了上述两种工艺路线 SCR 烟气脱硝催化剂的设计参数。

表 4 两种工艺路线脱硝催化剂设计参数

序号	项目	单位	中高温催化剂	中低温催化剂
一	设计条件			
1	设计烟气量	Nm^3/h	570 000	570 000
2	设计温度	℃	280	190
3	NOx 浓度	mg/Nm^3	260	260
4	脱硝效率	%	81	81
5	氨逃逸	ppm	3	3
二	催化剂参数			
1	反应器数量	个	1	1
2	催化剂层数	层	2+1（备用）	2+1（备用）
3	催化剂模块布置	n×n	6×8	6×8
4	催化剂孔数	孔	25	25
5	催化剂体积	m^3	126.75	167.96
6	催化剂压降	Pa	350	350
7	催化剂化学寿命	h	24 000	24 000

对比上述两种工艺路线下脱硝催化剂的设计参数可以看出，中高温 SCR 烟气脱硝路线的反应温度更高，脱硝催化剂的催化活性更好，因此脱硝催化剂的体积量只有中低温 SCR 烟气脱硝路线的约 75.5 %。由于中低温脱硝催化剂的配方中含有更多的活性组分，且其生产工艺难度更大，故中低温脱硝催化剂的单价要高于中高温脱硝催化剂，在综合了两种脱硝催化剂的用量和单价后可知：采用中高温 SCR 烟气脱硝路线时，脱硝催化剂的年运行费用约为中低温 SCR 烟气脱硝路线的 30～40 %。

其次，SCR 烟气脱硝采用尿素热解工艺制备脱硝还原剂，需要抽取热烟气作为尿素热解反应的热源，然后经由电加热器将其进一步加热升温至约 650 ℃后进入尿素热解炉，该系统的主要用电设备有烟气升压风机和电加热器，因上述两种工艺路线 SCR 脱硝入口烟气温度的差异导致烟气升压风机和电加热器的电耗有所区别。表 5 比较了两种工艺路线下尿素热解制氨系统烟气升压风机和电加热器的设计参数：

表 5 两种工艺路线尿素热解系统电加热器设计参数

序号	项目	单位	中高温 SCR 脱硝路线	中低温 SCR 脱硝路线
1	热解烟气量	Nm^3/h	1 350	1 350
2	升压风机全压升	Pa	8 000	8 000
3	升压风机运行温度	℃	280	190
4	升压风机运行电功率	kW	18.5	15
5	电加热器入口温度	℃	280	190
6	电加热器出口温度	℃	650	650
7	电加热器电功率	kW	195	240
8	热解系统总电功率	kW	214	255

对比表 5 中的数据可知：采用中高温 SCR 脱硝路线时，尿素热解系统电加热器的电耗为采用中低温 SCR 脱硝路线时的约 83 %，针对某 4 800 m^3 高炉配套热风炉烟气超低排放工程，按年运行 8 400 小时计算，每年可节电约 348 600 kW，经济效果十分明显。

3 结语

（1）在钢铁企业各生产工序和生产设施中，高炉热风炉的烟气污染物排放标准较为宽松，有待进一步提高。而高炉热风炉作为钢铁企业生产过程中主要的烟气污染物排放源之一，迫切需要研究出

（下转第 74 页）

某660 MW超临界W型火焰锅炉水冷壁拉裂数值模拟研究

郑刚[1] 刘友利[1] 赵义[2] 冉燊铭[1] 俸锦兴[1] 马定波[2] 莫春鸿[1] 李小荣[1] 秦荣江[2] 李铁[1]

1.东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡，643001；2.国能织金发电有限公司，贵州 毕节，552106

摘要：本文通过对某660 MW超临界W型火焰锅炉水冷壁拉裂问题进行分析，采用数值模拟和应力分析对水冷壁应力进行比较，分析了影响水冷壁拉裂的主要因素和原因，发现了水冷壁膨胀受阻导致水冷壁热应力急骤上升是造成水冷壁开裂的根本原因，从而为后续水冷壁拉裂治理奠定了理论基础。

关键词：W型火焰锅炉；水冷壁拉裂；应力分析

中图分类号：TM621.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）02-0042-08

Numerical Simulation Study on Water Wall Cracking of 660 MW Supercritical W-shaped Flame Boiler

ZHENG Gang[1], LIU Youli[1], ZHAO Yi[2], RAN Shenming[1], FENG Jinxing[1], MA Dingbo[2], MO Chunhong[1], LI Xiaorong[1], QIN Rongjiang[2], LI Tie[1]

(1. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., 611731 , Chengdu , China; 2. Guoneng Zhijin Power Generation Co., Ltd., 552106 , Bijie , Guizhou, China)

Abstract: This article analyzed the problem of water wall cracking in 660 MW supercritical W-shaped flame boiler.The stresses of the water wall were compared by numerical simulation and stress analysis techniques, and the main factors and causes that affect water wall cracking were analyzed. It was found that the rapid increase in thermal stress caused by the blockage of water wall expansion was the fundamental reason for water wall cracking, which established the theoretical foundation for the subsequent treatment of water wall cracking.

Key words: W-type flame boiler; cracking of the water-cooled wall; stress analysis

某660 MW超临界W型火焰锅炉自2016年投产发电以来，多次发生水冷壁拉裂现象，尤其是前墙中间过渡段区域尤为突出，对机组的安全可靠运行造成严重影响，有必要针对上述问题进行系统性分析和研究。

本文采用有限元方法，以某660 MW超临界W型火焰锅炉前墙水冷壁管屏结构为对象，分析水冷壁温度偏差较大时的应力状态分布，以及水冷壁开膨胀缝对应力分布的影响。通过数值模拟的分析和比较，找出影响水冷壁拉裂的主要因素和原因，从而为后续水冷壁拉裂治理奠定理论基础。

1 模型及边界

1.1 温度偏差

根据某660 MW超临界W型火焰锅炉实际运行情况，前墙水冷壁沿炉宽方向共有668根管子，布置温度测点27个，通过对前墙水冷壁上部实测温度数据进行分析，取最恶劣工况，即温差最大值为118 ℃时的温度分布作为温度场输入数据，如图1所示。

收稿日期：2023-12-19

作者简介：郑刚（1979－），男，2013年毕业于浙江大学动力工程专业，硕士研究生。现就职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司，高级工程师，主要从事锅炉产品设计及技术服务工作。

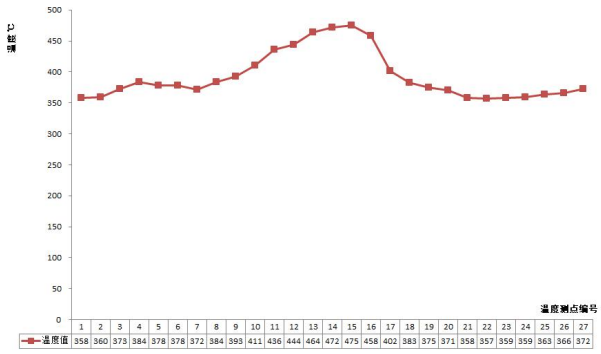


图 1　水冷壁实测温度分布（温差最大工况）

1.2 输入参数

计算输入参数如表 1 所示：

表 1　计算输入数据

名称	单位	内容
管子规格	mm	Φ31.8×7.5
管子节距	mm	44.8
扁钢厚度	mm	6.4
管子内压	MPa	29.69
单管载荷	N	28 028
管子材料		12Cr1MoV
扁钢材料		12Cr1MoV
介质温度	℃	温度分布数据见图 1
换热系数	W/m²・K	15 000
向火面热流密度	kW/m²	50

管子和扁钢材料性能参数如表 2 所示：

表 2　12Cr1MoVG 材料性能参数

温度 ℃	弹性模量 GPa	线膨胀系数 10^{-6}mm/mm·℃	导热系数 W/(m·℃)	许用应力 MPa
25	208	13.60	36.3	169
100	205	13.60	36.9	165
200	201	13.70	37.2	159
250	197	13.85	37.1	156
300	192	14.00	36.7	153
350	187	14.10	36.2	150
400	181	14.20	35.4	146
450	174	14.35	34.6	141
500	165	14.50	33.7	123
550	157	14.60	32.8	73
580	152	14.68	32	49.8

1.3 计算模型

根据分析目的及水冷壁管屏结构，按表 1 结构及计算参数，取 29 根管子建立膜式管屏，管屏长度 4 500 mm。采用六面体单元划分网格，管屏中部网格加密处理，生成 5 637 471 个节点，1 154 300 个单元。

建模坐标系说明：

+X 轴——沿管屏宽度方向，从炉右指向炉左；

+Y 轴——垂直管屏平面，指向炉内；

+Z 轴——竖直向上

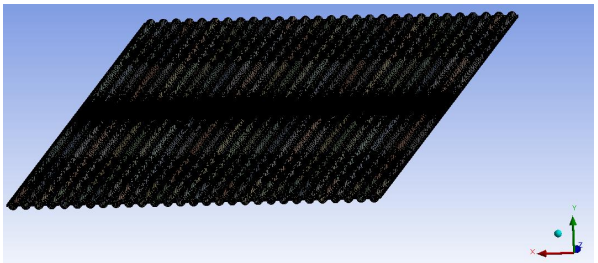


图 2　有限元模型

1.4 边界条件

管子介质温度按图 1 温度分布；管屏向火面赋热流密度 50 kW/m²。

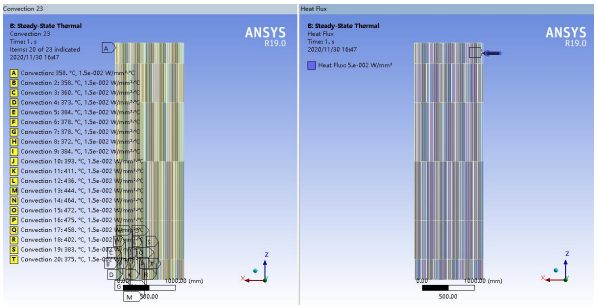


图 3　温度场计算边界条件

结构位移边界条件：模型上端面，法向约束。Dz=0；模型最左侧端面，Dx=0；模型中部刚性梁位置处背火面节点：Dy=0；管子内壁压力：29.69 MPa；管屏下端面上，29 根管子横截面施加内压的等效面力，截面法向方向，即-Z 方向，管屏受拉伸；管屏整个下端面（含扁钢截面），施加重力及附件载荷，单根管子 28 028 N，共 29×28 028=812 812 N，方向向下，管屏受拉伸。

2　水冷壁完整结构计算结果

2.1 温度场计算结果

从图 4~7 可见，管子受热后，金属壁温较介质温度整体升高，且在总体趋势上保持介质温度的分布规律。若相邻管子介质温度相当，则连接管子的扁钢中部温度较两管温度更高；若相邻管子介质温差较大，则较高介质温度的管子金属壁温也较高，而不是在两者的扁钢中部。这一现象符合传热学原理。

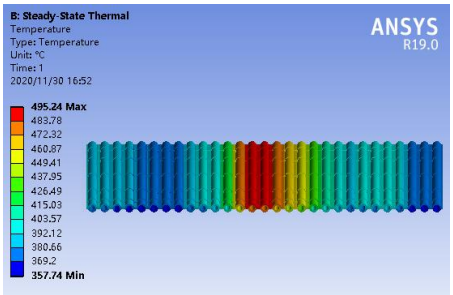


图 4　温度场分布

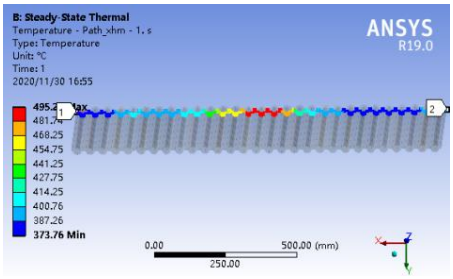


图 5　管屏向火面温度场分布

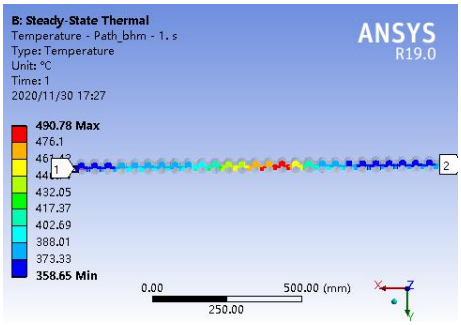


图 6　管屏背火面温度场分布

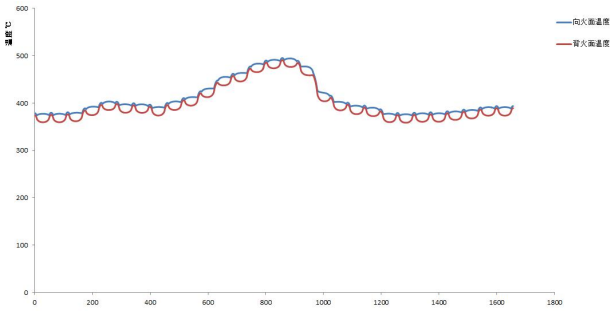


图 7　管子向火面和背火面温度分布曲线对比

2.2 应力计算结果

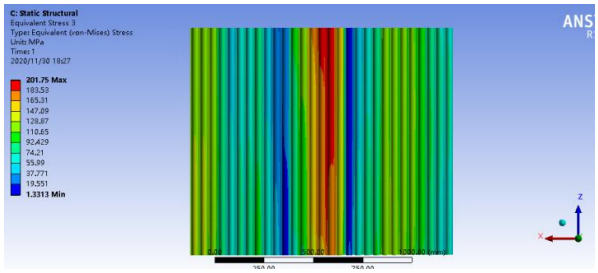


图 8　第三强度当量应力分布结果

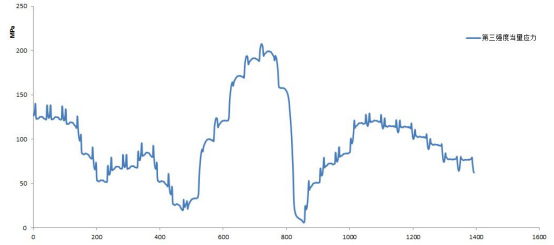


图 9　水冷壁管子沿向火面应力分布曲线

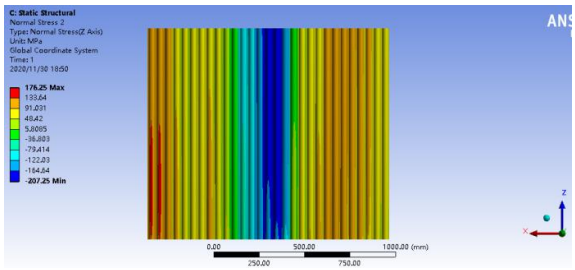


图 10　沿管子轴向应力分布

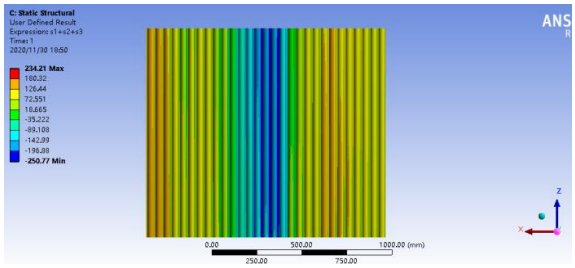


图 11　三向主应力之和分布

根据 JB/T 4732-1995（2005 年确认）《钢制压力容器-分析设计标准》规定评定，水冷壁完整屏结构，在计算温度条件下，管屏应力强度合格。

3　水冷壁开膨胀缝结构计算结果

在上述模型从左往右数第 13 与 14 根，17 与 18 根之间开间隙为 2 mm 的膨胀缝，其他计算条件不变。

3.1 温度场计算结果

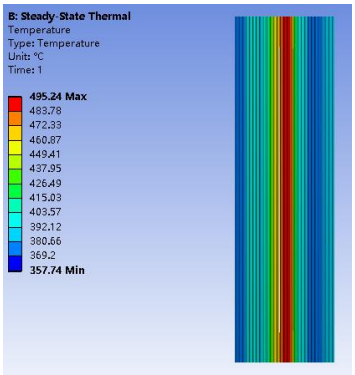


图 12　水冷壁开膨胀缝温度场分布

从图 12 可见，由于介质温度和热负荷不变，开膨胀缝几乎不会影响水冷壁温度场分布。

3.2 应力计算结果

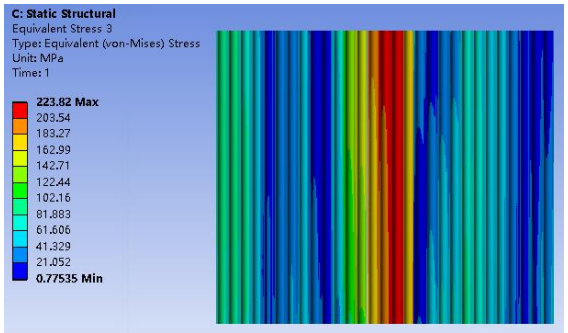


图 13　膨胀缝区域第三强度当量应力分布结果

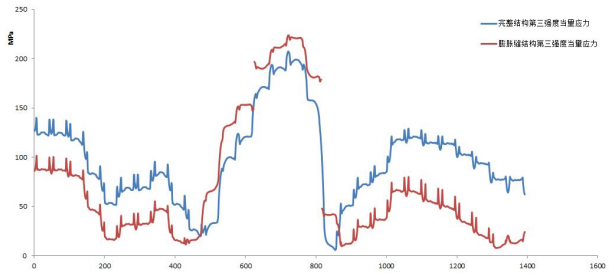


图 14　水冷壁后沿向火面应力分布曲线对比

从图 13~14 可见，水冷壁开缝后的应力较完整屏整体降低，但也有局部升高，综合来看，开膨胀缝有利于降低水冷壁管屏温度应力。从图 14 可知，应力增大处的最大增幅为 6.2 %，应力降低处的最大降幅为 89.7 %。应力的升高、降低或者不变，取决于膨胀缝的位置及温度场的分布特点，而温度场的分布具有一定的随机性，因此，水冷壁开膨胀缝总体上有降低温度应力的作用，但不能从根本上消除温度应力。

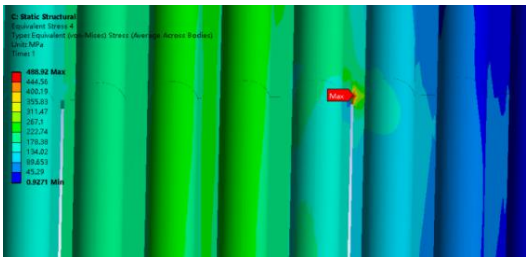


图 15　膨胀缝根部应力集中

从图 15 可见，在膨胀缝根部区域产生较大的应力集中现象，因此，必须对膨胀缝根部进行绕焊，光滑过渡，开止裂孔等措施，以降低应力集中，提高疲劳寿命。

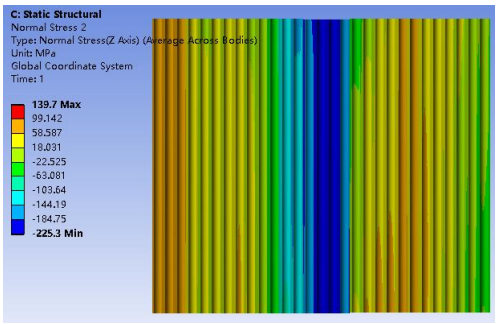


图 16　沿管子轴向应力分布

从图 16 可见，开膨胀缝后，水冷壁管屏的最大轴向应力为 139.7 MPa，而完整水冷壁管屏的最大轴向应力为 176.25 MPa（图 10），开膨胀缝后，轴向应力下降了 20.7 %。

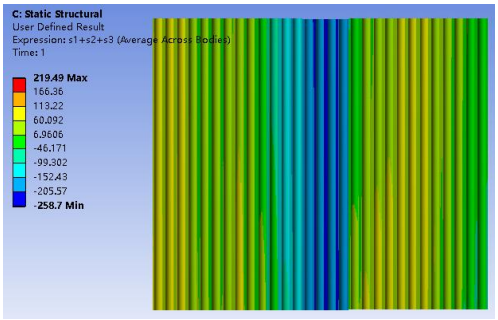


图 17　三向主应力之和分布

从图 17 可见，开膨胀缝后，水冷壁管屏的最大三向主应力之和为 219.49 MPa，而完整水冷壁管屏的最大三向主应力之和为 234.21 MPa（图 11），开膨胀缝后，三向主应力之和下降了 6.28 %。

4　小结——膨胀缝效果评估

上述水冷壁的分析，是基于水冷壁整体处理自由膨胀的状态下，考虑温度场分布不均匀，以及内压和附加重量的影响进行的，对上述结果分析，可以得到以下结论：

（1）水冷壁整体自由膨胀状态下（即设计状态），在本报告所示的温差分布、内压和自重作用下，水冷壁强度合格。

（2）水冷壁开膨胀缝，总体有利于降低管屏温度应力，但也存在局部应力升高和膨胀缝根部应力集中的问题，必须对膨胀缝根部进行绕焊，光滑过渡，开止裂孔等措施。而且膨胀缝的位置对应力分布是有影响的，必须知道温度场的分布，才能做到科学、精准开缝，以有效降低温度应力，而温度

场的分布具有一定的随机性，因此，水冷壁开膨胀缝总体上有降低温度应力的作用，但不能从根本上消除温度应力。

（3）水冷壁整体自由膨胀状态下（即设计状态），不需要开膨胀缝。

（4）基于上述分析及裂缝实验检测结果推断，造成水冷壁开裂的根本原因是热应力过大，而产生较大热应力的原因不是载荷边界引起的，即水冷壁温度场分布不均不是造成水冷壁开裂的根本原因，但是温度场分布不均也会造成水冷壁应力分布恶化。

5 水冷壁完整结构膨胀受阻分析

图 18 水冷壁开裂现场照片

从图 18 水冷壁耳板的变形分析，水冷壁与张力板存在膨胀受阻，没有达到设计意图上的沿张力板长度方向自由膨胀。另外，可以从炉膛膨胀批示器记录数据与锅炉热膨胀系统图对比，分析实际膨胀量与理论膨胀量的差异，得到水冷壁膨胀受阻的证据。

如图 19 所示，张力板与水冷壁耳板通过销轴接触连接，本报告定性分析销轴与张力板不能自由滑动时的水冷壁变形及应力分布。

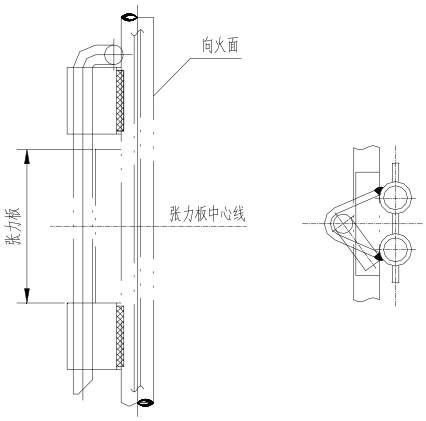


图 19 水冷壁耳板

5.1 温度场结果

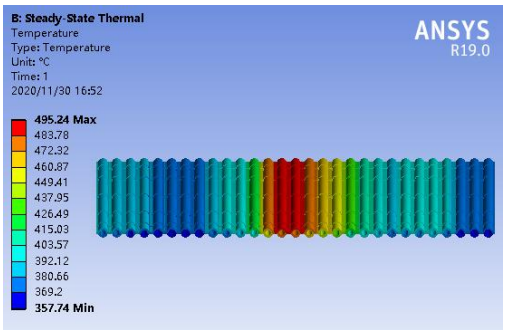


图 20 水冷壁温度场分布

如图 20 所示，由于温度场的分布与约束边界无关，因此水冷壁膨胀受阻，温度场分布与水冷壁自由膨胀结构相同。

5.2 变形位移分析

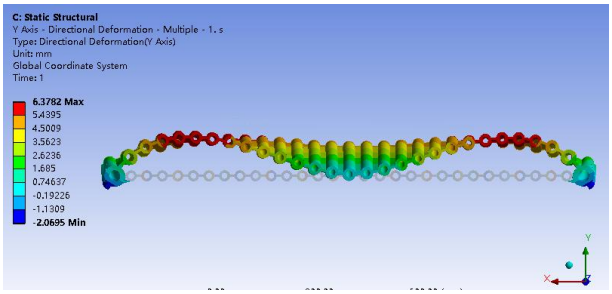


图 21 水冷壁膨胀受阻变形图

如图 21 所示，当水冷壁面内（X 方向）膨胀受阻时，水冷壁发生非常明显的弯曲变形，在水冷壁法向方向产生内凹或外凸，最大变形量为 6.378 2 mm。

5.3 应力计算结果

从图 22~24 可见，并与图 8~11 对比分析，水冷壁膨胀受阻后，第三强度当量应力，X 向法向应力，三向主应力之和较水冷壁设计状态均发生大幅增加，且最大应力点位于扁钢上。为了更清晰研究膨胀受阻对应力分布的影响，取刚性梁层处水冷壁的外壁应力分布曲线进行分析说明。

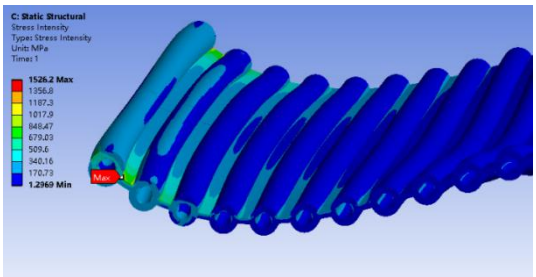


图 22 第三强度当量应力

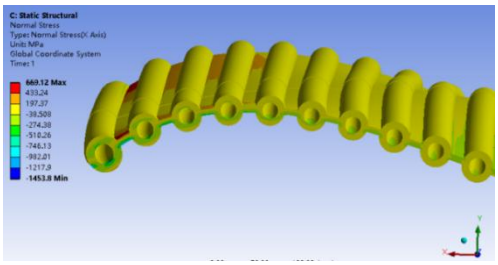


图 23　X 向法向应力

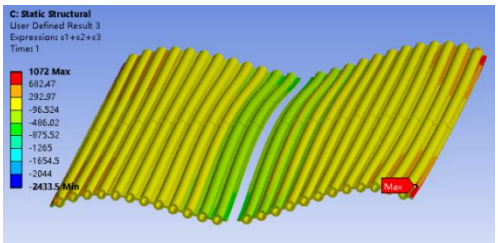


图 24　三向主应力之和分布

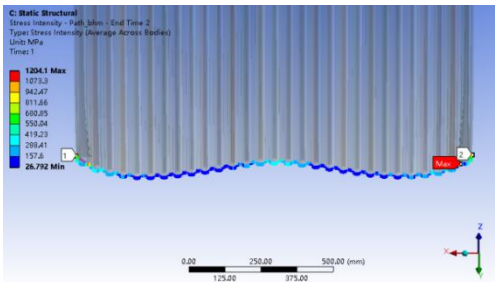


图 25　沿水冷壁向火侧外壁第三强度当量应力分布

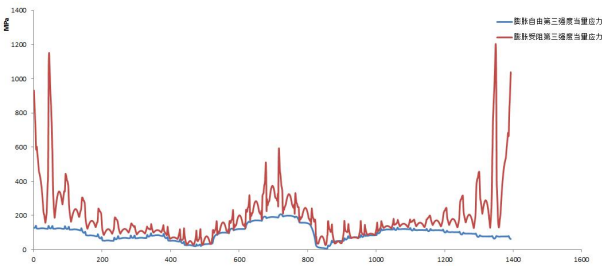


图 26　水冷壁膨胀自由与膨胀受阻时的应力分布对比曲线

从图 25~26 可见，当水冷壁膨胀受阻时，沿分析路径，第三强度当量应力急骤增加，特别是在受阻耳板附近的区域，应力增加非常明显，而且最大应力点位于扁钢处。

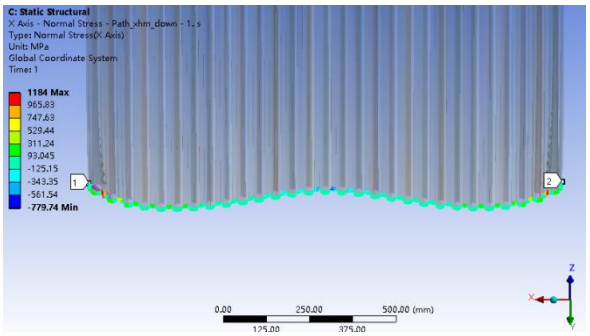


图 27　沿水冷壁向火侧外壁 X 法向应力分布

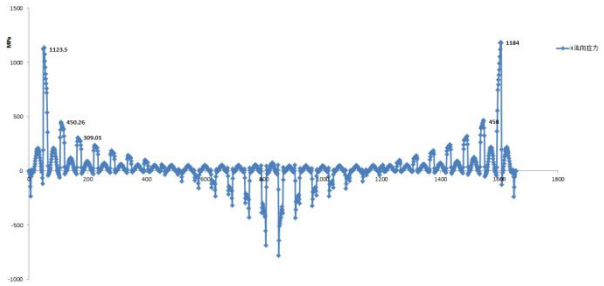


图 28　沿水冷壁向火侧外壁 X 法向应力分布曲线

从图 27~28 可见，最大 X 法向应力为 1 184 MPa，位于扁钢中部。

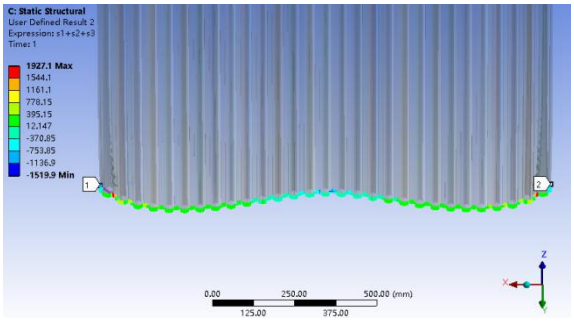


图 29　沿水冷壁向火侧外壁三向主应力之和分布

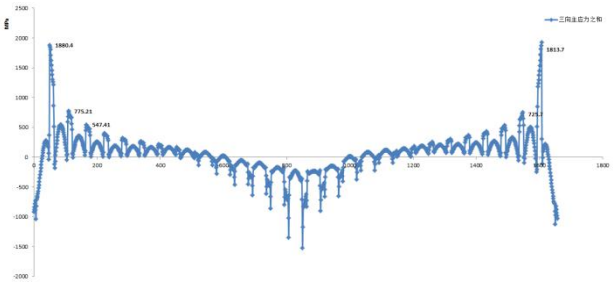


图 30　沿水冷壁向火侧外壁三向主应力之和分布曲线

从图 29~30 可见，最大三向主应力之和为 1 927.1 MPa，位于扁钢中部。

5.4 分析小结

从上述水冷壁变形位移，当量应力，法向应力，三向主应力之和等各项应力指标结果分析可见，若水冷壁膨胀受阻，水冷壁会发生较明显的弯曲变形，有三方面的原因。一是膨胀受阻导致水冷壁面内刚度增大，产生极大的膨胀反力，引起水冷壁发生面内失稳，造成弯曲变形。二是向火面与背火面存在温差，由于两侧膨胀不协调，会引起弯曲变形。三是炉膛压力作用，对弯曲变形有促进作用。由于温差和炉膛压力无论膨胀是否受阻都同样存在。因此，水冷壁发生明显弯曲变形的主要原因是膨胀受阻。

随着水冷壁弯曲变形，各项应力指标急骤增加，大幅超过设计标准要求，甚至超过材料的抗拉强度，且最大应力位于扁钢处，极易引起扁钢破坏失效。

6 水冷壁开膨胀缝结构膨胀受阻分析

本节在第 5 节的模型基础上，在从左往右数第 7 与第 8 根，第 23 与 24 根之间开间隙为 2 mm 的膨胀缝，其他计算条件不变。分析水冷壁开了膨胀缝后的变形及应力分布，评判当水冷壁膨胀受阻时，开膨胀缝对降低应力水平的有效性。

6.1 温度场结果

如图 31 所示，由于温度场的分布与约束边界无关，因此水冷壁膨胀受阻，温度场分布与水冷壁自由膨胀结构相同。

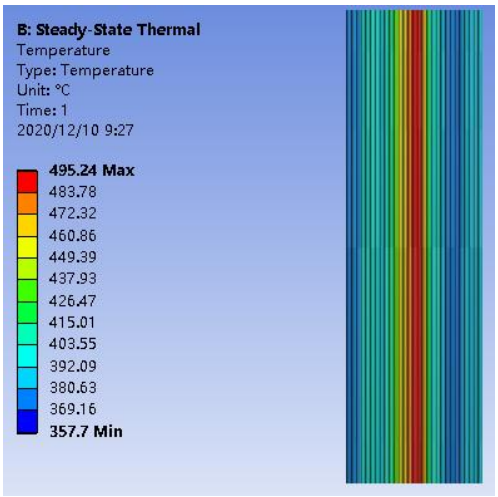


图 31　水冷壁温度场分布

6.2 变形位移分析

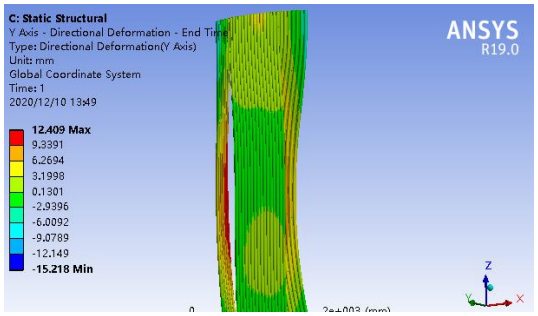


图 32　水冷壁膨胀受阻开膨胀缝后的变形图

如图 32 所示，当水冷壁面内（X 方向）膨胀受阻，并在相邻耳板之间开膨胀缝隙后，水冷壁发生非常明显的弯曲变形，在水冷壁法向方向产生内凹或外凸，最大变形量为 12.409 mm。

6.3 应力计算结果

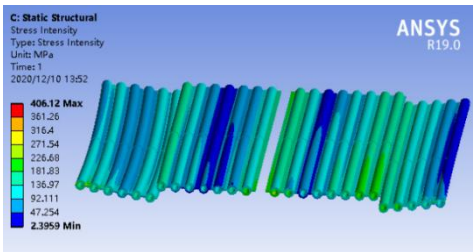


图 33　第三强度当量应力

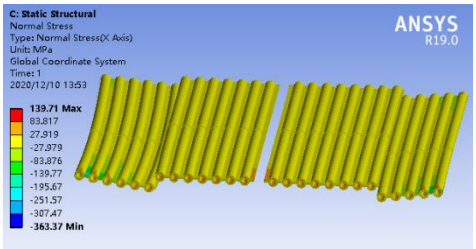


图 34　X 向法向应力

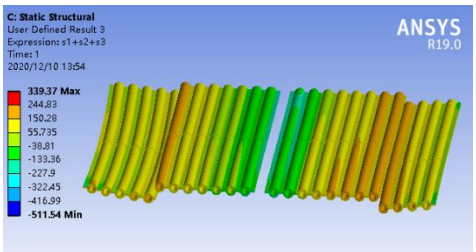


图 35　三向主应力之和分布

从图 33~35 水冷壁膨胀受阻开缝后各应力指标结果可见，并与开膨胀缝前，即图 22~24 相同部位各应力指标结果对比分析，水冷壁膨胀受阻开膨胀缝后，第三强度当量应力，X 向法向应力，三向主应力之和均发生明显下降。为了更清晰研究膨胀受阻开膨胀缝对应力分布的影响，取图 25~30 相同部位，即刚性梁层处水冷壁的外壁应力分布曲线进行分析说明。

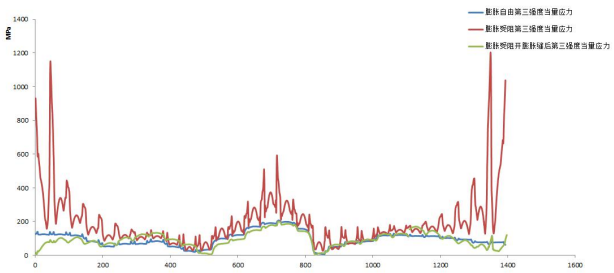


图 36　水冷壁膨胀自由与膨胀受阻和受阻开膨胀缝的应力分布对比曲线

从图 36 可见，水冷壁膨胀受阻开膨胀缝后，水冷壁沿分析路径上的第三强度当量应力最大值仅为 200.36 MPa，沿路径的整体分布趋势明显下降，

特别是水冷壁膨胀受阻处的峰值应力区，平均应力下降 93.4 %。

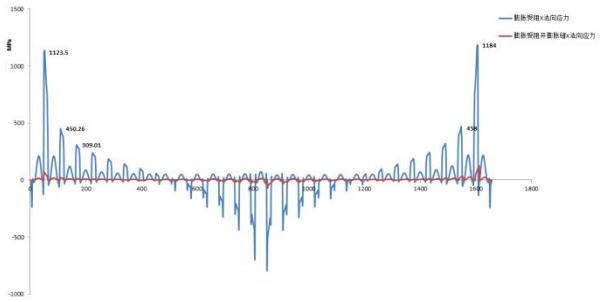


图 37　膨胀受阻和受阻开膨胀缝沿水冷壁向火侧外壁 X 法向应力分布对比曲线

从图 37 可见，水冷壁膨胀受阻开膨胀缝后，水冷壁沿分析路径上的 X 法向应力水平极低，最大值仅 125.62 MPa。沿路径的整体分布趋势明显下降，特别是水冷壁膨胀受阻处的峰值应力区，平均应力下降 95.6 %。

从图 38 可见，水冷壁膨胀受阻开膨胀缝后，水冷壁沿分析路径上的三向主应力之和水平极低，最大值仅 220.77 MPa。沿路径的整体分布趋势明显下降，特别是水冷壁膨胀受阻处的峰值应力区，平均应力下降 94.1 %。

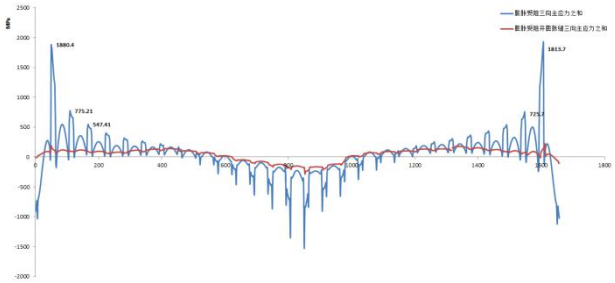


图 38　膨胀受阻和受阻开膨胀缝沿水冷壁向火侧外壁三向主应力之和分布对比曲线

7　结语

（1）水冷壁整体自由膨胀状态下（即设计状态），水冷壁强度合格，且无需开膨胀缝。

（2）水冷壁温度场分布不均会造成应力分布恶化，但不是造成水冷壁开裂的根本原因。

（3）水冷壁与张力板之间的膨胀受阻，对水冷壁造成了强约束，并直接导致水冷壁的热应力急骤上升，是造成水冷壁开裂的根本原因。

（4）在水冷壁膨胀受阻的情况下，在相邻耳板之间开膨胀缝可以起到降低热应力的作用，可以有效缓解水冷壁的膨胀受阻问题。

集团要闻

《东方电气评论》第六届编辑委员会第一次工作会议顺利召开

2024 年 2 月 7 日，由东方电气集团主管主办的《东方电气评论》期刊第六届编辑委员工作会议在成都总部园区顺利召开，此次会议采用“线上+线下”同步方式开展。东方电气集团股份公司副总裁、第六届编辑委员会主任编辑委员胡修奎出席会议，会议由东方研究院副总经理、期刊副主编唐健主持。

唐健代表编委会作第五届编辑委员会工作总结报告，充分肯定了期刊编审管理提升、发表周期缩短、交流宣传加强，在助力国家能源设备行业技术进步与发展等方面取得的成绩。

胡修奎为各企业编委代表颁发编委聘书，并与参会编委围绕期刊定位、稿源质量、专题专刊、交流宣传等方面进行深入研讨，为期刊提升办刊水平提供新的发展思路。

胡修奎作总结讲话，并对编委会工作提出要求：一是要持续发挥期刊编委会优势，切实提升办刊质量。二是要积极创新办刊模式，激发办刊活力。三是要树立正确价值导向，加大宣传力度。

来源：东方电气研究院微信公众号

火电机组低负荷运行对末叶片可靠性的影响

贺伟　罗方　谢苏燕

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：在双碳目标下，为了配合新能源的发展，火电机组的调峰能力得到了前所未有的关注。结合电力需求增速放缓的现状，火电机组将较长时间运行在低负荷工况下。本文选取某 660 MW 空冷机型末三级级段进行了多个低负荷工况下的 CFD 分析，获得了负荷下降过程中末级流场的变化特征，并分析了相关变化对末叶片可靠性的影响，介绍了相关的解决措施。

关键词：深度调峰；水蚀；鼓风现象；末叶片；颤振

中图分类号：TK262　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0050-06

Impact of Low Load Operation of Thermal Power Units on Last Stage Blade Reliability

HE Wei, LUO Fang, XIE Suyan

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

Abstract: Under the Double Carbon target, the peaking capacity of thermal power units has received unprecedented attention. In order to coordinate the development of new energy sources,combined with the slowdown in power demand growth, thermal power units will operate under low load conditions for a larger hourage. In this paper, CFD analysis of the last three stages of a 660 MW air-cooled model was carried out under several low load conditions to obtain the characteristics of the changes in the flow field of the last stage during the load drop, and to analyse the impact of the relevant changes on the reliability of the last stage blade and introduce the relevant solution measures.

Key words: deep peaking; water erosion; blowing phenomenon; last stage blade; flutter

在双碳目标下，风电、光伏等可再生能源在电力总装机中的比重将继续快速增长。但由于风力、光伏发电具有间歇性和波动性，其大规模并网加剧了电网的调峰压力。与此同时，双碳目标的提出也宣告了火电装机快速增长时代的结束。火电机组的运行目标将从追求高效节能转变为注重提升机组的灵活性、机组深度调峰及快速启停能力。这也是我国未来煤电机组运行的发展趋势[1]。在碳达峰前后相当长的时间内，煤电与新能源将处于竞争合作的关系，合作关系体现在煤炭将从基础能源向重要能源转变，煤电加速“让路”新能源发电，配合新能源发展[2]。因此，在电力需求增速放缓、新能源快速增长的现状下，提升电网中数量众多火电机组的调峰能力，既是解决电网调峰压力和新能源吸纳障碍的有效途径，也是实现发电企业自身转型的必要选择。

在此背景下，经过灵活性改造的火电机组将较长时间运行在低负荷下。而机组的调峰深度一般受限于锅炉的最低稳燃负荷。有研究表明，通过对锅炉采取一系列技术手段，其最低稳燃负荷可达到 20 %~25 %BMCR[3]。这也直接决定了汽轮机组低负荷运行的下限。由于汽轮机通常以 THA(Turbine Heat Acceptance)工况作为经济性的设计点，当低负荷运行时，气动参数的偏离将导致通流效率明显下降。除此之外，随着负荷下降，汽轮机通流中叶片的工作环境也会发生明显变化，给其可靠运行带来不利影响。这其中以低压末叶片尤为突出，其通常工作在湿蒸汽区，承受着水滴侵蚀和极大的离心

收稿日期：2023-06-01

作者简介：贺伟（1982－），男，2004 年毕业于西安交通大学能动专业，本科，高级工程师，现于东方汽轮机有限公司主要从事汽轮机通流设计工作。

力。随着负荷下降到一定程度，末叶片将处于小容积流量工况运行，发生鼓风现象导致排汽温度升高。

针对受负荷变化影响最为明显的低压末叶片，本文通过 CFD 方法对机组负荷下降过程中的低压末三级流场进行计算，并分析了不同负荷下流场参数变化对末叶片可靠性的影响。

1 计算模型及计算方法

本文选取某 660 MW 空冷机组末三级静动叶通流作为分析对象，见图 1。分析对象的选取考虑了为末级提供更为准确的进口参数分布。应用商业软件 Numeca 对分析对象进行了多工况三维 CFD 计算。网格划分采用 AutoGrid5 进行，叶型周围流动区域采用 HOH 拓扑结构。各排叶栅网格正交性最小为 21.6°。分析对象末三级通流总的网格数量为 275 万。

计算工质为水蒸汽，数值模型为 Navier-Stokes 方程，湍流模型采用 Spalart-Allmaras。为了加速收敛，计算中应用了多重网格技术。各算例迭代了约 2 000 步，级段效率、流量、残差收敛。

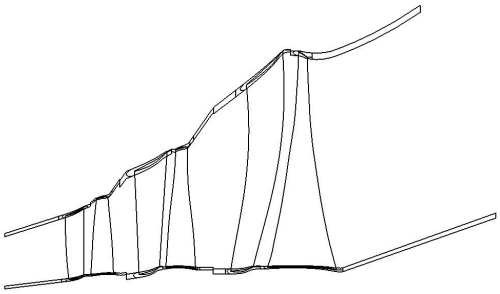


图 1 CFD 计算模型

每个算例的边界条件给定出口平均背压，末三级级段进口静温和湍流粘性（见表 1）。参考一维热力设计结果，通过调整通过末级的质量流量来模拟末三级通流的不同负荷工况。工况计算范围为 20 %~100 %THA。在背压不变的条件下，机组负荷和末级通流中质量流量关系如图 2 所示，二者近似呈线性关系。

表 1 计算热力边界条件

参数	入口总温	入口湍流粘性	出口背压
单位	K	m^2/s	MPa
数值	427.8	0.000 1	0.009

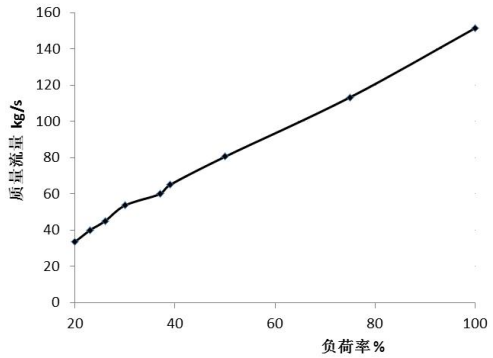


图 2 机组负荷率和末级质量流量的关系

2 计算结果分析

相比质量流量，末级通过的容积流量更能反映其在不同负荷工况下的流场气动特性。考虑到末级动叶片环形排汽面积不变，因此文中采用环形速度（V_{an}）来表征通过末级的容积流量。其定义如下：

$$V_{an} = \frac{q * \upsilon}{A_{an}} \quad (1)$$

式中：

q—通过末级通流的质量流率;

υ—末级排汽比容;

A_{an}—末级出口环形面积，由末级通流平均直径和汽道高度决定；

根据各工况计算结果，背压不变时各负荷下末级排汽环形速度如图 3 所示。环形速度水平从 THA 时的 231 m/s 下降到 20 %负荷时的 56 m/s。

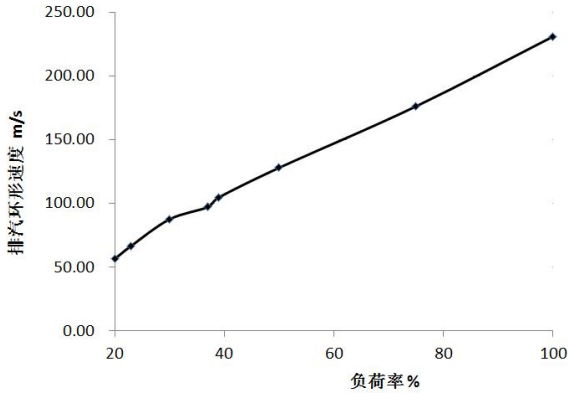


图 3 机组负荷与末级环形速度关系

由于 THA 工况环形速度在排汽损失曲线上通常都为偏右设计，因此在机组负荷下降的过程中，末级效率通常是先上升再下降。反映在末三级级段效率上如图 4 所示。当机组负荷从 100 %下降到

50 %过程中，级段效率变化较为缓慢；从 50 %继续下降到 30 %负荷，级段效率下降有所加快；从 30 %继续降低机组负荷时，级段效率下降非常明显。

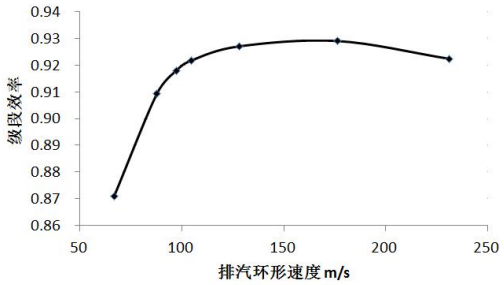


图 4　环形速度与级段效率的关系

图 4 中较低的环形速度对应了较低的机组负荷。在较低负荷下，导致级段效率明显下降的因素除了末级余速损失的变化，还有脱流损失的影响。且随着负荷继续下降流场进一步恶化，脱流损失的影响会明显增加。在低负荷下，受级段效率变化的影响，末级排汽焓将随着负荷下降上升。

2.1 低负荷运行对末叶顶部水蚀的影响

末级叶片通常运行于湿蒸汽区，此时部分蒸汽凝结成水，以十分细小水滴的形式悬浮于气相中（俗称一次水滴）。在机组运行过程中，一次水滴在汽流、离心力等影响下，逐渐聚集在静叶表面形成水膜，在高速汽流的冲刷下，水膜在静叶片尾部边缘破裂，形成二次水滴。一般认为二次水滴只占湿度份额的 5 %～10 %，但是由于其质量相对较大，在靠近末叶片顶部较高线速度下，对动叶进汽边造成较大冲击，从而引起叶片水蚀。

由图 4 可见，当机组负荷下降时，总体上级段效率下降，排汽焓上升，末级级间焓值相应上升，湿度下降。同时，随着机组负荷下降，末级焓降下降，末级级间压力降低，蒸汽密度下降，湿蒸汽中的水滴直径有变大的趋势。这两方面因素都会影响到水滴对末叶片的侵蚀程度。工程上通常采用侵蚀系数[4]E 进行末叶片水蚀风险的评估：

$$E = \frac{y^2}{P_0}\left(\frac{N_s}{3000}D_{SW}\right)^3 \qquad (2)$$

式中：

y—计算点蒸汽湿度；

P_0—计算点蒸汽静压；

N_s—转速；

D_{sw}—动叶片外径；

应用侵蚀系数方法对本文的计算对象末叶片靠近叶顶进汽边位置进行水蚀风险评估，计算点的蒸汽湿度和静压均取自各工况 CFD 计算结果。如图 5 所示。

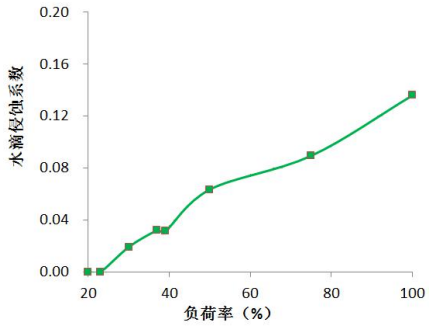


图 5　末叶片顶部侵蚀系数随负荷变化关系

图中可见，随着负荷下降，该空冷末叶片水滴侵蚀系数基本呈单调下降趋势。当负荷低于 25 %时，末叶片靠近叶顶进汽边位置蒸汽湿度消失，此时不再存在叶顶水蚀问题。由此可见，随着机组负荷下降，该空冷末叶片入口湿度下降，其水蚀风险下降。

2.2 低负荷运行对末叶工作温度的影响

上文提到，在机组降低负荷的过程中，由于效率变化末级排汽焓会逐渐上升。相应的，末级工作温度会相应上升。工作温度的上升，一方面会降低末叶片材料的机械强度，其安全裕度有所减小；另一方面，工作温度上升，材料的弹性模量降低，其固有频率会有所变化。这两方面影响都需要在方案设计时重点关注，并进行校核以确保末叶片在低负荷下运行时的安全性。

根据 CFD 计算结果，末叶片入口温度随环形速度变化关系如图 6 所示。每个负荷工况沿叶高选取了 3 个位置。其数据为进行周向平均后的结果。

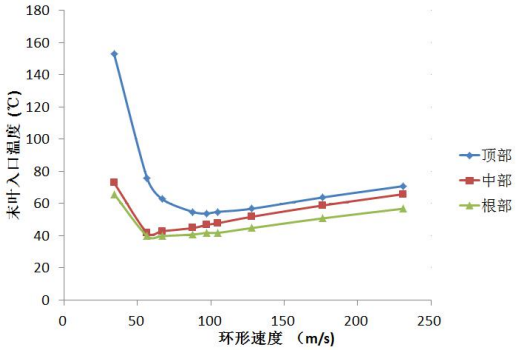


图 6　末叶入口温度与环形速度关系

如图 6 所示，各负荷下从根部到叶顶，末叶入口温度沿着叶高总体上呈上升趋势。根部温度相比顶部，至少存在 12 ℃以上的温差。在 20 %负荷时，此时环形速度 56 m/s,根顶部的温差达到 36 ℃。如果负荷继续降低，该温差将继续扩大。

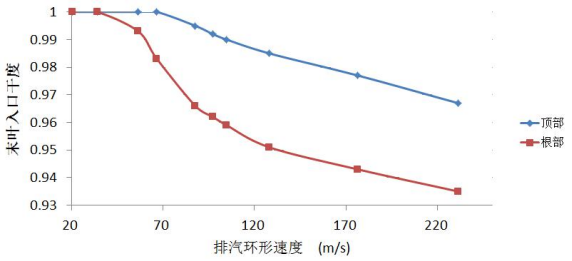


图 7　末叶入口干度与环形速度关系

结合末叶片入口干度，如图 7，由于叶顶温度相对较高，叶顶在负荷 25 %时湿度开始消失。而根部由于温度较低，约在 15 %负荷时湿度开始消失。当处于湿蒸汽状态时，其温度为蒸汽的饱和温度，只和蒸汽压力相关。当进入干蒸汽状态，蒸汽温度将随着焓值升高快速上升。

同时可见，高负荷时由于沿末叶叶高温度变化较小，采用平均温度进行强度校核误差较小。而在低负荷下，由于沿叶高温度差别相当大，此时在进行叶片不同部位的强度校核时，为了减小计算误差，有必要采用当地的温度进行。

2.3 末叶鼓风现象及根部水蚀

随着机组负荷下降，末级通流中容积流量通常随之减小，末级焓降和轮周功也将相应减小。当末级轮周功为零时，称为零功率工况，也称为过渡工况。随着机组负荷继续下降，末级将进入鼓风工况。此时，末级动叶出口压力将高于入口。如图 8 所示。

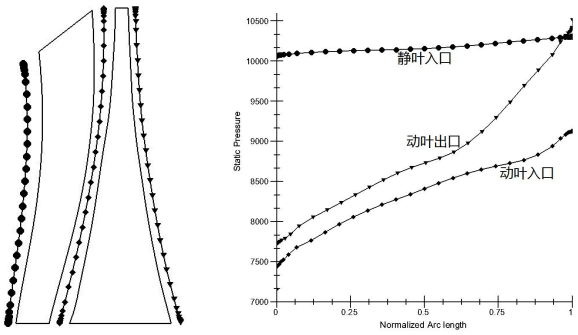


图 8　20 %负荷时末级进出口压力沿叶高分布

本文计算对象在 20 %负荷时即处于典型的鼓风工况。此时末级焓降为正，级内动叶焓降为负，级反动度为负，蒸汽对转子做负功。关于末级是否处于鼓风工况，可以通过末级动叶所承受的力矩来判断。而末级动叶所受力矩主要由叶型表面压力分布来决定。通过对末级动叶内背弧表面压力分别进行积分处理，得到内背弧分别所受的汽流力，如图 9 所示。

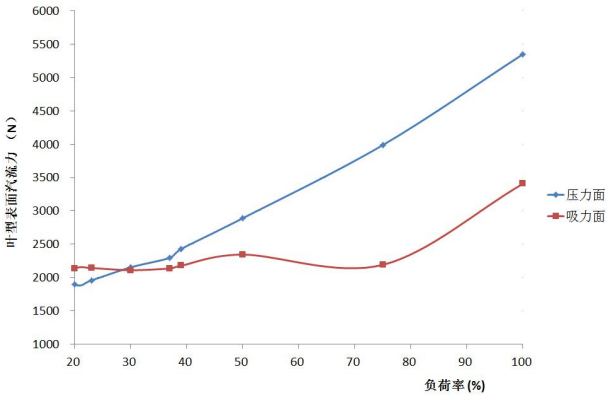


图 9　不同负荷下末级动叶表面汽流力

由上图可见，随着机组负荷下降，压力面与吸力面汽流力的差值先增加后减小。当负荷低于 ~28 %时，末级动叶进入鼓风工况。在鼓风工况下，压力面的压力将低于吸力面；末级排汽焓和排汽温度将随着负荷下降快速上升。

当排汽温度高到一定程度时，为了满足机组的可靠运行，通常会投入喷水装置。喷水可以明显降低鼓风工况下的排汽温度，保证排汽缸、轴系的可靠运行，且会对末级动叶根部及轮缘起到一定的冷却作用。但是，喷水操作也可能会对末级动叶出汽边根部及轮缘带来水滴侵蚀问题。

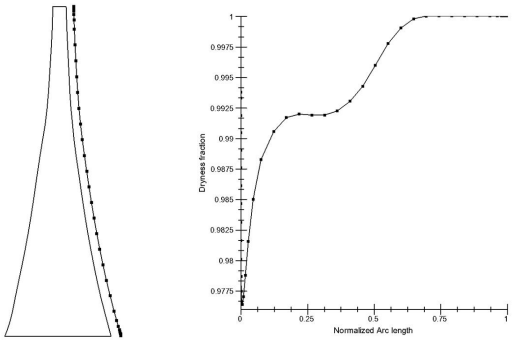


图 10　20 %负荷时末级出口干度沿叶高分布

由图 10 可见，末级动叶出口沿叶高干度逐渐增大。中部与根部的干度差值在 2 %左右。排汽平均温度要触发喷水动作，那么沿叶高相当大的范围内蒸汽为干蒸汽。考虑沿叶高的干度分布，靠近根

部区域的蒸汽湿度较小甚至消失。

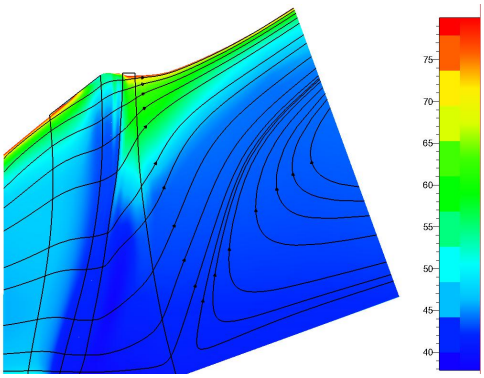


图 11　20 %负荷时末级子午视图流线及温度分布

如图 11 所示，鼓风工况下末级动叶出口存在指向动叶出汽边根部的反向回流。但由于出现回流时此处湿度较小，线速度较低——约为叶顶的 50 %，叶根区域流场本身的湿度不会对末叶出汽边根部附近造成水蚀。通过对 20 %~30 %负荷工况叶根出汽边进行式（2）计算，结果表明侵蚀系数均低于 0.05。通常认为侵蚀系数小于 0.2 时，不会存在水蚀风险，也不需要进行表面防护。由上面分析可见，鼓风工况下流场本身湿度不会对叶根出汽边附近造成水蚀风险。

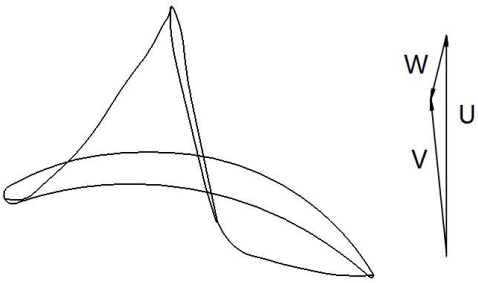


图 12　20 %负荷时末级出汽边根部速度三角形

除了流场本身湿度，另一个引起根部侵蚀的水滴来源就是排汽温度较高时触发的排汽缸喷水。这也是造成叶根出汽边及附近轮缘区域水滴侵蚀的主要因素。如图 12 所示，依据 20 %负荷工况 CFD 计算结果绘制出汽边根部速度三角形。出汽边根部流场汽流相对速度指向根部出汽边背弧。喷水形成的水滴会沿着回流冲击叶根出汽边区域。此时相对速度水平约为 90 m/s。由于根部区域圆周速度相比叶顶明显较低，水滴的相对速度也相应较低。根部水蚀的程度通常相比叶顶较轻。

为了改善鼓风工况下叶根出汽边附近的水滴侵蚀，可以考虑以下几方面措施。

（1）在设计上，末级根部可设计成较高的根部反动度，推迟鼓风工况发生的时机，也就相应的减少了喷水的作用时间。

（2）当排汽温度高触发喷水时，由于鼓风状态下末级流场存在较大的温度梯度，根据 CFD 分析结果，叶根和轮缘在此时的温度是明显低于平均温度的。因此，根据相关结构的应力安全裕度可以对喷水开启的时机进行优化，可以明显改善根部水蚀状况。同时，需要对喷水的雾化效果进行优化，水滴尺寸越小，水滴侵蚀的程度越轻。

（3）低负荷下，适当的降低再热温度和背压也可以起到降低排汽温度、增大排汽容积流量改善鼓风程度，从而起到减轻水蚀的效果。

（4）可以对叶根出汽边附近采取超音速火焰喷涂[5]等表面强化措施。

2.4 颤振现象

根据不同负荷工况下 CFD 计算结果，在机组降低负荷末级进入鼓风工况后，首先末级动叶根部出现回流，可参照图 11 所示。随着负荷进一步下降，在末级叶顶静动叶间也将出现涡流。在负荷降低时，末级焓降减小，静叶出口的绝对速度 C1 也相应减小。由于圆周速度不变，根据叶顶位置速度三角形，动叶入口相对汽流角变大，动叶入口出现较大的负攻角。在此大负攻角下，动叶叶型内弧侧将出现大尺度流动分离，诱发一种“自激振动”就是失速颤振。

颤振是由汽流力、弹性力和惯性力三者相互耦合所引起的振幅不衰减的自激振动。汽轮机末叶片可能发生的失速颤振以大负攻角诱发的流动分离为主要特征，有别于流体始终附着在叶型上的经典颤振。在鼓风工况小容积流量下，由于流动分离，沿着末叶片周向将会出现非定常表面压力扰动。扰动引发的初始振动幅值通常较小，当非定常汽流力对末叶片所做的功大于结构阻尼所消耗的功时，叶片振幅将逐步增大。于是发生失速颤振，出现末叶片动应力突增现象。

针对机组低负荷运行末级鼓风工况下可能出现的末叶片颤振现象，通常可采取以下措施。

（1）末叶片结构设计。以本文计算对象中末叶片结构设计为例，其叶顶围带采用了扭转恢复成圈自带冠结构，叶身中部设计有拉筋凸台结构，如图 13 所示。

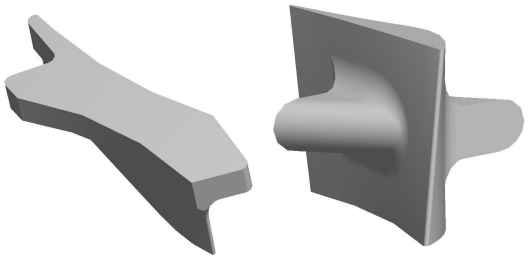


图 13　末叶片围带及拉筋结构

末叶片安装在转子上，在静止状态下时，相邻叶片围带之间、拉筋之间存在间隙。而在工作转速下，末叶片在离心力作用下发生扭转，相邻叶片围带之间、拉筋之间紧密贴合，并存在足够的接触应力，形成成圈结构。此种结构可以提高末叶片的机械阻尼及固有频率，对颤振的发生起到明显的抑制作用。

（2）末叶片叶型设计。由于失速颤振的发生条件是末级动叶片入口大负攻角引发的流动分离，因此在叶型设计时，可以对动叶靠近叶顶截面入口几何角进行优化设计，消除大负攻角出现的条件。

3　结语

本文通过对某 660 MW 空冷机型的低压末三级通流进行了不同低负荷工况的 CFD 分析，获得了负荷下降过程中末级流场的特征变化，并分析了相关变化对末叶片可靠性的影响，介绍了相关的解决措施。通过上文的分析，主要结论如下：

（1）随着机组负荷下降，末三级级段效率呈现先上升后下降的特征。

（2）随着机组负荷下降，该空冷末叶片叶顶水蚀风险逐渐下降；当负荷低于 25 %时，末叶片靠近叶顶入口区域湿度趋于消失；

（3）在各负荷工况下，末叶片顶部入口温度均高于根部；此温差随着负荷下降将逐渐增加，当机组负荷低于 20 %时，该温差增加将明显加速；此时采用平均温度进行强度校核可能存在明显偏差。

（4）当负荷低于~28 %时，末级进入鼓风工况。随着负荷进一步下降，末级排汽温度将快速上升；

（5）鼓风工况下，排汽温度高触发的喷水操作是造成末叶片根部水蚀的主要原因；由于根部较低的线速度，根部出汽边水蚀通常相比叶顶进汽边水蚀程度较轻；

（6）末叶片成圈结构设计和叶型优化设计可对鼓风工况下颤振的发生起到明显的抑制作用。

参考文献：

[1] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. 热力发电, 2018,47(5):8-13

[2] 孙旭东, 张蕾欣, 张博. 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究[J]. 中国矿业, 2021,30(2):1-6

[3] 牟春华, 居文平, 黄嘉驷, 等. 火电机组灵活性运行技术综述与展望[J]. 热力发电, 2018,47(5):1-7

[4] 中国动力工程学会. 火力发电设备技术手册: 第二卷:汽轮机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007

[5] 朱熹, 谢明江, 黄建强, 等. 汽轮机低压缸零出力供热技术研究[J]. 机械工程师, 2019(11):118-119+122

循环流化床锅炉输给煤系统堵煤问题探析

高家平

广西华磊新材料有限公司发电厂，广西 平果 531400

摘要：输给煤系统是循环流化床锅炉的生命线，负责锅炉所需燃料的输送、储存和供给，锅炉是否能“吃好、吃饱”，取决于输给煤系统设备的连续稳定运行及防堵煤的处理能力，尤其是防堵煤措施的有效性，是循环流化床锅炉安全稳定运行的前提。基于此，本文对循环流化床锅炉输给煤系统各环节可能存在的堵煤原因及解决措施进行了详细论述。

关键词：循环流化床锅炉；堵煤原因；解决措施；输给煤系统

中图分类号：TK229.66　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0056-04

Discussion on Coal Blocking in Coal Conveying System of Circulating Fluidized Bed Boiler

GAO Jiaping

（Power Plant of Guangxi Hualei New Materials Co., Ltd., 531400, Pingguo, Guangxi, China）

Abstract: The coal conveying system is the lifeline of the circulating fluidized bed boiler, which is responsible for the transportation, storage and supply of the fuel required by the boiler. Whether the boiler can "eat well and be full" depends on the continuous and stable operation of the coal conveying system equipment and the coal blocking prevention capacity, especially the effectiveness of the coal blocking prevention measures, which is the premise for the safe and stable operation of the circulating fluidized bed boiler. Based on this, this paper discusses in detail the possible reasons and solutions of coal blocking in each link of circulating fluidized bed boiler coal conveying system.

Key words: circulating fluidized bed boiler; feasons for coal blockage; solution measures; coal conveying system

广西华磊新材料有限公司发电厂现有三台 350 MW 超临界循环流化床机组，出线为 220 kV，并入装机容量仅有 232 MW 的局域网，同时向电解铝企业供电、向氧化铝工艺供应高低压蒸汽，该局域网和用户对机组的安全可靠运行要求极高，尤其是给煤系统的微小波动，都会造成整个局域网网内负荷的极大波动，从而影响其稳定运行。发电厂现有循环流化床锅炉原煤仓内的燃煤主要靠自身重力沿原煤仓内壁侧下落，原煤仓结构呈现上宽下窄的结构形式，燃煤在进入给煤机及锅炉前，落煤点会出现急剧收缩的状态，燃煤在重力的作用下会加速挤压，尤其是在燃煤水份、灰份和含粉率偏大时，极易造成板结，堵塞的情况，以上各点只要其中一处出现中断给煤，锅炉燃烧工况将发生剧烈变化，炉内燃烧强度将减弱、床温下降、负荷降低，供热退出，严重时会发生锅炉打闸灭火事故，威胁机组的正常安全运行。因此，以上问题越来越受到重视。

1　目前循环流化床锅炉给煤形式

广西华磊新材料有限公司 3×350 MW，DG1242/25.4-II1 型锅炉是东方锅炉股份有限公司为超临界机组设计的循环流化床锅炉（CFB），是东方锅炉自主开发的 350 MW 超临界 CFB 锅炉。锅炉采用前墙给煤的形式，即原煤仓中的燃煤经底部落煤管进入给煤机后，通过前墙给煤口直接进入炉膛，因

收稿日期：2023-11-10

作者简介：高家平（1986－），男，2022 年毕业于桂林电子科技大学工商管理专业，本科，助理工程师。现任职于广西华磊新材料有限公司，主要从事发电厂输煤系统燃煤管理以及设备管理工作。

煤仓间大多布置在炉前，从原煤仓出口到锅炉给煤口距离不长，一般小于 20 m，给煤机采用裙边皮带给煤机的形式，带有计量功能。这种给煤方式具有以下优点：①机械机构简单，运行、检修维护方便，故障率低；②带有计量功能，便于生产、运行上的管理。但这种给煤方式也有缺点：①前墙给煤使炉内燃料分布不均匀，造成炉内燃料燃烧不充分，炉温不均衡，造成负荷波动；②采用裙边皮带给煤机，如有异物进入，有撕毁皮带的风险；③采用裙边皮带给煤机，当高温炉烟因运行不当向上反串时，皮带烧坏的风险较大[2]。

2 循环流化床锅炉给煤系统堵煤原因

2.1 煤质堵煤的原因

（1）水分的影响。发电厂每年约使用 441 万吨燃煤，煤种主要是印尼进口煤和国内北方煤，以上煤种主要通过火车和汽车从南方沿海码头拉运进厂，受到南方特有阴雨天气的影响，每年约有 6 个月的时间处于连续降雨的天气，燃煤在港口堆存和运输进厂过程中会存在长时间被雨水淋湿，车厢表面和底部经常会出现积水和滴水的情况，造成入厂燃煤全水份经常超过公司要求的 35 %的水份标准，超标水份的燃煤进入输煤系统和锅炉给煤系统，造成系统堵塞。

（2）灰份的影响。为了节约燃煤使用成本，公司会安排采购低热值的燃煤，该燃煤热值约 3 200 大卡，灰份在 25 %左右，以上低热值的燃煤如果在旱季没有使用完或者在雨季进厂，会造成被雨水淋湿的情况；另受到本身高灰份的影响，会造成该热值燃煤异常黏结，如和高热值燃煤混配，则会造成整体燃煤处于黏结、板结的情况，从而造成输给煤系统堵塞。

2.2 煤仓堵煤的原因

煤仓结构及内部设计不适合南方雨季天气和设计煤种。原煤仓设计一般为上部圆柱体，下部锥体及落料管的结构形式，上部直径大，结构呈现垂直状态，燃煤承受的摩擦力小且下落速度快，燃煤在仓壁停留时间短，降低了粘结的风险；下部锥体直径逐渐变小，结构呈现缓坡状态，燃煤承受的摩擦力大且下落速度变慢，粘结的概率增大。燃煤进入给煤机的速度主要取决于煤仓的垂直度、燃煤与煤仓的摩擦力以及底部阀门的开启大小，如果煤仓锥体部分的垂直角度过小，会造成燃煤下落的流速变慢或停滞，造成堵煤的情况；另锥体内部如果表面粗糙，衬板焊接部分没有打磨，出现不规则、连续台阶的情况，燃煤进入到锥体部分时摩擦力会增大，且在非光滑面，燃煤开始逐渐堆积并出现堵塞的情况。基于以上情况的出现，燃煤在原煤仓相互挤压和摩擦，流速会逐渐变慢，堆积和板结情况会越来越严重，在下部锥体和落煤管出现堵死的情况[1]。

2.3 原煤仓出口落煤管堵煤原因

（1）受原煤仓内部锥体处燃煤流速变慢的影响，燃煤在出口落煤管停滞和受积压的时间延长，长时间的挤压造成料管内壁出现粘结、板结，从而造成燃煤在落煤管处堵塞。

（2）原煤仓在锥体部分出现堵煤后，经过清堵机、空气炮和人工清堵后的板结煤块下落过程中卡在落煤管处，从而造成堵塞的情况。

2.4 给煤机出口落煤管堵煤原因

（1）板结煤块的影响：原煤仓内部清理的板结煤块会经过给煤机皮带进入给煤机出口落煤管，由于落煤管管径只有 500 mm，且呈现喇叭口并逐渐收窄的结构，大块板结的燃煤会卡在喇叭口处，从而造成堵塞的情况[2]。

（2）落煤管管径偏小：由于落煤管管径只有 500 mm，管道距离长且存在坡度，给煤机的湿煤进入管内，湿煤附着在管壁上面，造成积煤、堵塞的情况。

（3）炉内正压的影响：落煤管与炉膛接触段存在微正压，燃煤经过落煤管时煤流流速降低，增加了燃煤挂壁堆积的概率，从而造成堵塞落煤管的情况[3]。

2.5 给煤机皮带堵煤原因

（1）设备本身故障。当给煤机发生故障时，煤的输送发生中断，不能保证锅炉燃烧所需的燃煤，从而影响机组负荷，甚至影响锅炉的安全稳定运行。

（2）原煤仓堵煤后，原煤仓内的煤板结形成大煤块，经过空气炮和疏通机的清理后掉落在给煤机皮带上，因瞬间受力过大，给煤机过载跳闸，皮带无法带走煤团，堵塞给煤机入口[3]。

3 循环流化床锅炉输给煤系统堵煤解决措施

锅炉输给煤系统防堵煤措施。锅炉堵煤主要受来煤煤质和煤仓型式以及落煤管布置的影响，防堵煤措施主要包括控制原煤水份和灰份、优化煤仓结构、配置防堵煤设备等。

3.1 煤质造成堵煤的防控措施

（1）协调厂外来煤的顺序，干湿煤搭配进厂进行混配和分区堆放，避免干湿煤分开集中到达，造成不能最大化利用库存，对入厂燃煤，在落地前，通过快速测水仪进行水份测试，对于水份超过 35 % 的入厂燃煤，采取拒收的原则。

（2）针对低热值，高灰份的燃煤，采取错峰采购的原则，根据天气情况和锅炉负荷及检修计划，在旱季前期制定总的采购计划量和使用量，确保在旱季使用完，在雨季时则不进行采购和使用。

（3）针对库存的实际情况，对于已超标的高水份燃煤，一是安排进入干煤棚进行单独翻晾和堆存，作为应急用煤储备；二是对于进入圆形煤场的燃煤，利用挖掘机采取在取煤工作面之间来煤翻晾（图 1），以及摊平煤堆锥面的方式，降低燃煤水份；三是利用钩机将圆形煤场干湿煤进行现场混配，从而达到入炉煤使用要求。

图 1　圆形煤场利用挖掘机进行翻晾

（4）利用现有的两个筒仓，将入厂干湿煤在前端进行干湿存放，通过底部活化给煤机进行初步干湿掺配，再与煤场翻晾后的燃煤进行二次掺配，从而达到入炉煤干湿要求。

（5）在非雨季，加大干煤的储备，利用雨季来临前的 1~2 个月时间，将干煤棚提高到满库粗，进入雨季后，通过倒运干煤与入厂湿煤进行掺配，从而达到减低入炉煤水份的目的，满足锅炉的使用要求（图 2）。

图 2　干煤棚利用挖掘机进行翻晾

3.2 原煤仓堵煤防控措施

（1）增加原煤仓锥体倾斜角度，提高燃煤向下的动能和流动性。

（2）原煤仓锥体内部加装不锈钢板或陶瓷衬板，焊接部分进行打磨处理，增加光滑度，减少燃煤与仓壁的摩擦力，尤其是焊接部分，不能出现台阶，防止燃煤堆积，造成板结（图 3）。

图 3　煤仓增加不锈钢板

（3）原煤仓锥体部分外壁环绕上下对称增加空气炮，根据来煤干湿度情况，进行错位振击，通过振击，将内部堆积和板结的燃煤松动，达到防止内部燃煤堆积板结的目的。

3.3 落煤管堵煤防控措施

图 4　煤仓底部出口增加旋转清堵机

（1）在原煤仓锥体下部落煤管段安装螺旋液

压疏松机，燃煤在下落过程中，如出现受积压板结堵塞的情况，通过疏松机的圆周正反运动，防止受到长时间积压出现的板结，确保内部燃煤保持持续松动状态（图 4）。

（2）将给煤机出口落煤管保温层拆除，在易堵点增加上下对称空气炮，定期进行振击疏通；如果出现无法疏通的情况，则立即停止给煤，通过关闭给煤机与落煤管之间的阀门，利用锅炉产生的辐射热量对落煤管进行持续烘管，待内部结煤烘干后，再通过空气炮进行振击疏通，从而防止内部燃煤堆积板结（图 5）。

图 5　炉前落煤管增加空气炮

（3）在易堵的落煤管内部迎煤面铺贴不锈钢板（图 6），降低摩擦阻力，减少燃煤堆积概率；迎煤面增加三防旋转清堵机，实现与皮带连锁同步运行，对产生的板结积煤实时进行清理，防止内部积煤板结堵煤（图 7、图 8）。

图 6　皮带落煤管增加不锈钢板

图 7　皮带落煤管迎煤面增加清堵机

图 8　清堵器内部旋转刮刀

3.4 给煤机皮带堵煤防控措施

（1）加强对给煤机皮带系统的日常维护点检工作，及时发现可能存在的问题，尤其是内部出现异物或皮带出现裂纹时，及时安排停机检查。

（2）运行方面精心操作，尤其是控制原煤仓的给煤量、给煤机皮带的运行速度，以上两点要相互匹配，尤其是原煤仓的给煤量不能大于皮带给煤量，防止堵塞、压死皮带。

4　结语

综上所述，锅炉输给煤系统的堵煤是一个综合性、系统性的问题，除了上述的煤质因素、原煤仓因素还有落煤管因素外，还需要我们对人员、设备、管理制度、外部环境等多方面不断的进行分析和研判，根据生产的实际情况，从而采取与生产实际相匹配的解决措施，确保锅炉生产的稳定。

上述采取的措施均已在广西华磊新材料有限公司发电厂现场实施，取得了比较明显的效果。

参考文献：

[1] 黄敦烈. 410t/h 循环流化床锅炉原煤仓堵煤问题改造探讨[J]. 机电工程技术, 2007(12):101-102+118+122

[2] 陈玉国. 循环流化床锅炉给煤系统堵塞解决方案[J]. 中国新技术新产品, 2010(10):129-130

[3] 杨利. 循环流化床锅炉给煤系统堵煤问题探析[J]. 科技创新与应用, 2020(32):117-119

大型汽轮发电机转轴加工人因防错程序开发与应用

何伟　古黎　秦纯　邢志春

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：转轴作为汽轮发电机的核心部件，具有工作转速高、运行工况复杂、转轴锻件价值高、不可修复等特点，因此要求转轴加工必须做到一次性成功。根据人因预防管理理论开发的“人因防错模块”数控程序具备转轴铣槽分度防错、铣槽深度防错、刀具参数防错、加工流程固化等功能，可以很好地实现转轴铣序加工过程防错，能有效地防止转轴的铣伤和报废。数控转子铣机床“人因防错模块”数控程序不仅让产品实现质量零缺陷目标更近了一步，而且“人因防错模块”数控程序开发成本低，具有一定经济效益，可以在数控加工机床进行推广使用。

关键词：转轴；数控程序；人因防错模块

中图分类号：TG659　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0060-05

Development and Application of Human Error Prevention Program for the Processing of Large Turbine Generator Shafts

HE Wei, GU Li, QIN Chun, XING Zhichun

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

Abstract: As the core part of the turbo-generator, the rotating shaft has the characteristics of high working speed, complicated operating conditions, high value of forging shaft, and unrepairability. Therefore, the manufacturing of the shaft must be successful at one time. The "Human Factor Error Prevention Module" NC program based on the human factor prevention management theory has functions such as groove-milling dividing error prevention, groove-milling depth error prevention, tool parameter error prevention and machining process solidification, etc. These functions can effectively prevent the milling damage and scraping of the rotating shaft. The NC program of the "Human Error Prevention Module" for CNC rotor milling machine not only brings the product closer to the goal of zero quality defects, but also the low cost of the NC program for the "Human Error Prevention Module" has certain economic benefits.The program can be popularized in all CNC machine tools.

Key words: rotor; CNC program; human factor error prevention module

汽轮发电机作为重要的能源转换设备，工作转速高，常规 50 Hz 汽轮发电机（两极）工作时转速为 3 000 r/min（图 1），核能发电机（四极）工作时转速为 1 500 r/min（图 2）。转轴作为汽轮发电机旋转、出力的核心部件，运行工况复杂，在高速运转时转轴需要承受巨大的交变应力，如果转轴在加工制造过程中存在任何质量瑕疵都可能会在机组运行时导致严重事故。目前还没有成熟的技术可以对转轴的加工缺陷进行性能修复，转轴一旦出现加工错误一般只能做让步回用，严重的加工错误将导致转轴报废，给公司带来巨大的经济损失。

汽轮发电机转轴一般采用材料为 25Cr2Ni4MoV 的优质合金钢整体锻件，目前单台转轴锻件最大重量超过 270 t（台山 EPR1750MW 核电站），转轴锻

收稿日期：2024-01-16

作者简介：何伟（1986－），男，2008 年毕业于西南科技大学机械设计制造及自动化专业，本科，高级工程师。现任职于东方电机有限公司，主要从事发电机大型零部件机械加工工艺技术工作

件成本极高。转轴铣序是汽轮发电机转轴加工中最复杂最核心的工序。汽轮发电机转子嵌线槽、鸽尾槽、通风槽、扭振槽、柔性槽、引线槽、导电螺孔、平衡螺孔等均需要在铣序加工完成，根据机组容量单台转轴铣序加工时间大约需要 20 天至 90 天。汽轮发电机转轴加工质量受到人、机、料、法、环、测等要素的综合影响，其中人因失误是导致质量问题的最主要因素。根据人因管理理论和长期的加工实践经验证明操作人员在现场高频率实时操作数控程序极易出现人因失误，常见人因操作失误包括：图纸看错、坐标轴正负向错误、小数点位置错误、进/退刀方向操作错误、用错刀具、刀具补偿错误、按键“失灵”等。常规的管理手段很难从根本上避免这种操作人因失误而且还会增加大量管理成本，迫切需要一种新的解决方法。

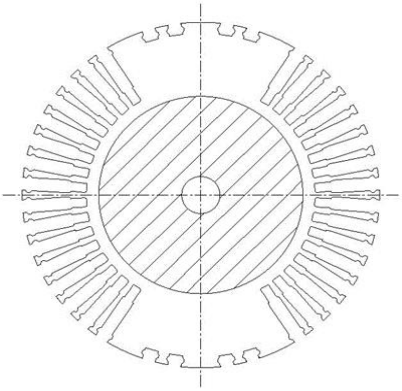


图 1　两极汽轮发电机

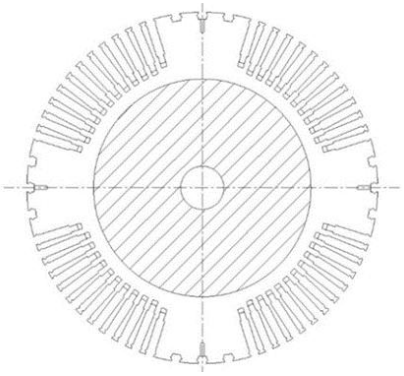


图 2　四极核能发电机

1　问题分析与改进思路

随着机床技术的不断发展和数控加工技术普及，核能发电机、燃煤发电机、燃气发电机和 300 MVar 调相机转轴均采用高精密数控机床加工（图 3）。数控机床在加工精度、效率等方面与普通机床相比都有很大的提升。但是由于目前大型数控转子铣机床自动化并不高，借助传感器、探头等自动化防错、检错方法还未推广应用，机床执行输出完全依靠接受人工指令，即“输入——输出”简单模式，一旦操作人员将错误的指令（如：刀具参数、角度参数等）输入数控机床，机床按照错误指令直接执行输出极易导致转轴加工错误。

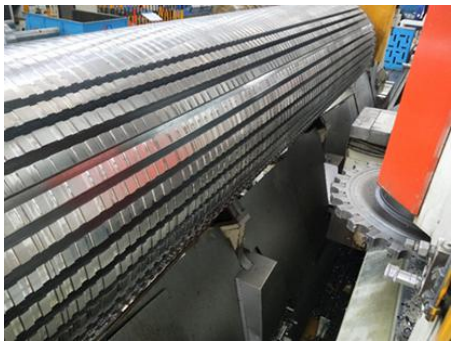


图 3　数控转子铣机床

根据人因管理理论和长期的加工实践经验证明操作人员在现场高频率实时操作数控程序极易出现人因失误，常见人因失误包括：图纸看错、坐标轴正负向错误、小数点位置错误、进/退刀方向操作错误、用错刀具、刀具补偿错误、按键“失灵”等。而且根据统计数控机床发生质量问题的严重程度和处理难度都远远超过了普通机床。

数控程序是数控加工的核心，既然数控程序可以控制数控机床精确运动，利用数控程序防错思想应运而生。通过合理设计数控程序防错语句，在转轴铣序加工数控程序中可能出现的质量风险点植入“人因防错模块”（图 4），“人因防错模块”主要具备转轴铣槽分度防错、铣槽深度防错、刀具参数防错、加工流程防错、错误报警提醒等功能，从而有效避免由于操作人员人因失误导致的质量问题。

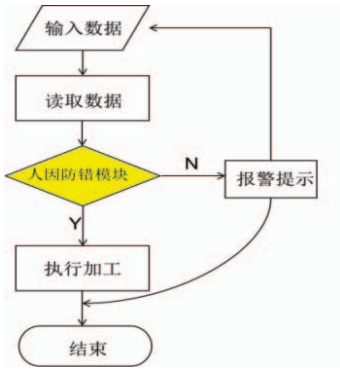


图 4　“人因防错模块”数控程序

2 “人因防错模块”数控程序

2.1 铣槽分度程序防错

分度判断防错模块：将转轴铣槽正确的角度值提前存放于一个子程序中，并设置修改权限，不能轻易改动。当主程序修改角度后，程序计算读取角度值与子程序中标准值进行对比校验。只有两次数据一致，程序才能执行，若不正确则程序立即停止，并输出“Angle is wrong!”的错误报警信息（如图 5），必须排除错误后才能继续执行程序。

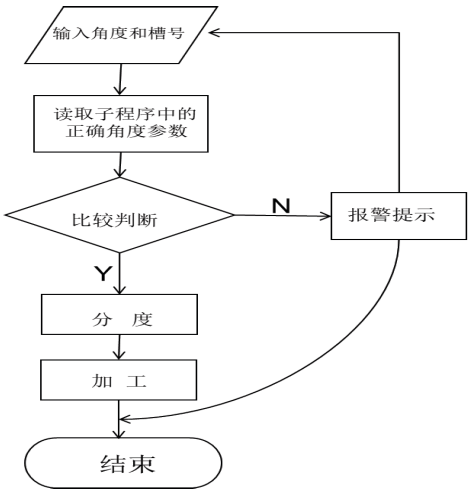


图 5 铣槽分度防错

以 300 MVar 调相机加工转轴嵌线槽程序为例，粗铣主程序中输入铣槽分度角数据后，通过调用分度角判断子程序进行对比校验，可以有效预防操作人员输入/修改转轴铣槽分度角时可能产生的正负号输入错误、小数点位置输错、由于操作不规范产生的按键“失灵”等粗心大意失误。程序设置修改权限，不能轻易改动。

300 MVar 调相机转轴粗铣槽主程序

……

N40 IF R14>R16 GOTOF MARK2；

N50 R12= ROUND(R14/2)；

N60 R28=R24+R12*R25-R25；

N70 IF(R12 MOD 2==0)AND(R14 MOD 2<>0)OR(R12 MOD 2<>0)AND(R14 MOD 2==0)

N80 R28=R28+180；

N90 ENDIF；

N100 G54 G17 G90；

N110 POS_DR2000=R28；读取计算的角度值

N120 JD_1Q15452_XXC；角度检查子程序

N130 DR2000_INDEX；

300 MVar 调相机转轴分度角判断子程序

……

N120 ED:

N130 R60=POS_DR2000；N130～N200

N140 ZH1：IF R60>=0 GOTOF ZH2；

N150 R60=R60+360；

N160 GOTOB ZH1；

N170 ZH2：R60<360 GOTOF ZH3；

N180 R60=R60-360；

N190 GOTOB ZH2；

N200 ZH3: POS_DR2000=R60；

N210 R1=0；N210～270 查找对比角度值是否一致

N240 JC:IF R1>=CS GOTOF ERR；

N250 IF POS_DR2000==JD[R1] GOTOF OK1；

N260 R1=R1+1；

N270 GOTOB JC；

N280 OK1：M17；返回主程序

N290 ERR:MSG(“Angle is wrong!”)；错误提示

N300 M0；

……

2.2 刀具参数防错

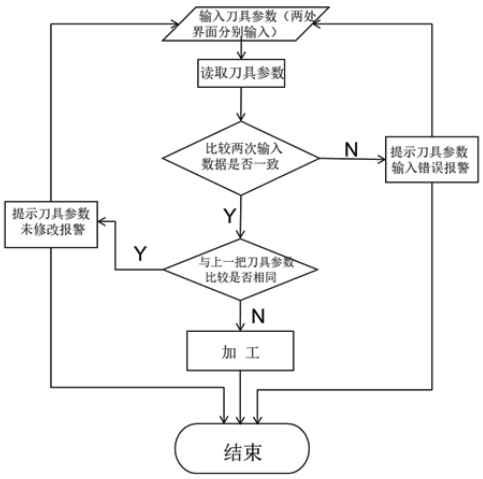


图 6 刀具参数防错

刀具参数防错模块：在“刀具参数界面”和“主程序界面”分别输入刀具参数（将“自检、互检”工作流程固化入加工程序），通过程序自动读取前后两次

输入刀具参数进行对比判断。只有两次输入数据一致，程序才能执行。如果两次输入数据不一致、仅输入一次数据或未修改刀具参数，程序不会执行并会输出刀具参数错误的报警信息（图 6），必须排除错误后才能继续执行程序。程序设置修改权限，不能轻易改动。

以 300 MVar 调相机加工精加工嵌线槽程序为例，在“刀具参数”页面和主程序（XXC_JINGXI_1Q15452）需分别输入铣刀的直径和长度两个重要参数后，程序自动读取两处数据进行对比校验。可以有效预防操作人员在输入刀具参数时的数字看错和输错、小数点位置错误、由于操作不规范产生的按键“失灵”等粗心大意失误。而且将通过防错数控程序将操作人员的“自检与互检工作流程”进行了固化，实现“流程未执行，程序不执行”，可以利用防错数控程序有效预防和解决转轴加工工作流程执行和监督问题。程序设置修改权限，不能轻易改动。

300 Mvar 调相机转轴精铣槽主程序

```
……
N40 IF R14>R16 GOTOF MARK2；判断槽号是否超
    出总数
N50 R12= ROUND(R14/2)；
N60 R28=R24+R12*R25-R25；计算角度
N70 IF(R12 MOD 2==0)AND(R14 MOD
2<>0)OR(R12 MOD 2<>0)AND(R14 MOD 2==0)；
N80 R28=R28+180；
N90 ENDIF；
N100 G54 G17 G90；建立工件坐标
N110 POS_DR2000=R28；读取计算的角度值
N120 JD_1Q15452_XXC；角度检查子程序
N130 DR2000_INDEX；分度
N140 G0 X30 Y0.2；
N150 T1 D1；调用刀具
N160 IF(DAOCHANG<>$TC_DP3[$P_TOOLNO,1])
    OR(BANJING<>$TC_DP6[$P_TOOLNO,1])；
    校验刀具数据
N170 MSG("tool data is wrong!")；错误提示信息
N180 ERR:M0；程序停止
N190 GOTOB ERR；跳转
N200 ENDIF；
……
```

2.3 铣槽深度防错

公司 600 MW 汽轮发电机、1 000 MW 汽轮发电机、400~480 MW 燃气轮发电机和核能发电机转轴嵌线槽设计有深槽和浅槽两种结构形式。为了避免由于操作人员输错数据、选错刀具等错误操作导致嵌线槽深度超标和浅槽加工成深槽这种颠覆性质量问题，防错数控程序中设置有嵌线槽加工安全深度预警，安全深度预警值选择嵌线槽深度的最大极限尺寸。防错程序对加工深度进行自动对比判断，超出安全深度，程序自动停止并输出“depth is wrong!”的错误报警信息，必须排除错误后才能继续执行程序。程序设置修改权限，不能轻易改动。

600 MW 汽轮发电机转轴粗铣槽程序

```
……
N90 R28=R28+180；
N100 ENDIF；
N110 DAN1:G54 G17 G90；
N120 STOPRE；
N130 POS_DR2000=R28；
JD_1Q3657_XXC；角度检查
N140 DR2000_INDEX；
N150 STOPRE
    IF((POS_DR2000==30)OR(POS_DR
 2000==330)OR(POS_DR2000==150)OR(POS_DR2
000==210))AND(R18>111)OR(R18>151);安全深度
    MSG("depth is wrong!")
    ER:M0
    GOTOB ER
    ENDIF
N160 G0 X330 Y0；
N170 W=R10；
N180 S50 M03；
N190 W=-R18；
N200 G1 G64 X200 F50；
N210 G1 X50 F100；
N220 G1 G60 X=-6909-30 F200；
N230 G0 W=-R18+10；
N240 X330；
N250 M5；
……
```

2.4 刀具更换自动提醒模块

转轴加工的刀具一旦超过使用寿命继续使用存在很大的质量隐患，优化后采用数控程序对换刀操作自动进行控制，到了刀具规定的换刀时间程序自动跳转至换刀指令，只有更换了新的刀具，并且重新正确输入新的刀具数据后机床才能继续加工，有效避免了由于忘记更换刀具等原因带来的加工质量风险，同时可以减少大量文字记录工作量。

1 000 MW 汽轮发电机转轴风沟槽刀具更换程序：

```
……
N370 ENDIF
N380 BJ1:IF R44>R46 GOTOF BJ2
N390 R8=R40+R44*R5-R5
N400 G0 X=R8 Y=R7
N410 T1 D1
N420 DAOJUSHUJU;*RO*；校验刀具
N470 W=R10
N480 M03 S500 F100
N490 W=-R9
N500 G1 Y=R2 M8
N510 G0 W=R10
N520 R44=R44+1
N530 GOTOB BJ1
N540 BJ2:W=R10
N550 R44=1
N560 R34=R34+1
N570 GOTOB DW1
N580 XT:R34=1
N590 M5M9
IF R14 MOD 2==0；每加工两条槽换 1 次刀
N600 G0 D0 W1200 SUPA M18
$TC_DP3[$P_TOOLNO,$P_TOOL]=999
ENDIF
N610 R14=R14+1
N620 GOTOB MARK1
N630 MARK2:M02
……
```

3 结语

当前大型数控转子铣机床自动化程度较低，短期内还很难借助先进的自动化技术和人工智能技术对转轴加工过程进行检错和防错。“人因防错模块”数控程序开发有效地集成和固化了东方电机长期在汽轮发电机转轴加工制造技术和质量管理方面的成功经验。通过开发“人因防错模块”数控程序赋予数控机床一定范围的“思考”能力和“纠错”功能，发掘出数控机床在加工质量控制方面的强大潜能。经过三年时间的不断优化完善，目前带“人因防错模块”的转轴铣序数控加工程序已实现核能发电机、燃气发电机、调相机和大中型汽轮发电机转轴加工全覆盖，经过长时间的加工使用验证“人因防错模块” 数控程序可以有效地帮助操作人员进行过程检错和防错，能有效降低转轴铣伤和报废的风险。数控转子铣机床“人因防错模块”数控程序不仅让产品实现质量零缺陷目标更近了一步，而且“人因防错模块”数控程序开发成本低，具有较高的经济效益，有助于提高公司核心产品竞争力，可以在数控设备和关键核心部件加工中推广应用。

一种内外定子结构的多风区汽轮发电机外机座卧式配装挡风板工艺应用

刘道刚

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：本文介绍了一种多风区内外定子结构的汽轮发电机卧式配装挡风板工艺方法及应用。此工艺方法解决了立式配装挡风板一直存在占用关键厂房的紧张吊车资源、T型平台资源、作业高度高、效率低等问题，对于并行作业提高生产效率有积极作用。本文在定子外机座卧式配装挡风板的专用工具设计，测量中心柱的挠度计算，现场实配应用等方面进行分析阐述。

关键词：内外定子汽轮发电机；挡风板；卧式配装工艺；挠度

中图分类号：TM311　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0065-04

Technology Application of Horizontal Air Deflector for Outer Frame of Multi-wind Area Turbogenerator with Inner and Outer Stator Structure

LIU Daogang

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

Abstract: This paper introduces a process method and application of horizontal air deflector for turbogenerator with inner and outer stator structure in windy area.This technology has solved the existing problems of vertical wind deflector, such as occupying one span of crane resources, T-platform resources, high working height and low efficiency, and has a positive effect on improving production efficiency in parallel operation. In this paper, the design of special tools for horizontal assembly of wind deflector on stator outer frame, the deflection calculation of measuring center column and the field application are analyzed and expounded.

Key words: internal and external stator turbogenerator; air deflector; horizontal assembly process; deflection

内外定子结构的空冷汽轮发电机组多采用多风区结构，为隔离冷热风区，需要在外机座合适位置配装挡风板，挡风板是一种弧形且薄而窄的钢板，在挡风板内圆上嵌入硅胶材质的挡风条，总装时内外定子组装压缩挡风条，达到隔离冷热风区的目的。目前东方电机一直采用立式配装挡风板工艺，这就需要在关键厂房翻转机座并立式放置在T型平台，占用紧张的吊车及场地资源，另外立式配装挡风板存在作业高度高、安全风险大、制造效率低等问题。为解决上述问题，开发出多风区内外定子空冷机组卧式配装挡风板工艺，该工艺方法能在满足起吊及承重的任意厂房进行配装作业，具有操作灵活性高，不占用关键厂房的吊车及平台资源，安全性高等优点，可与内定子生产并行作业，大大提高生产效率。

1　卧式配装挡风板工具设计

1.1　卧式配装挡风板工具设计

配装挡风板的关键是测量挡风板内圆到中心的距离，而机座的轴线是虚拟的，无法有效测量。因此需要将外机座虚拟的中心线实际化、可视化。为解决这一问题，考虑在机座理论轴线布置一根柱面精加工后的钢管作为测量点，即在外机座内部卧

收稿日期：2023-02-17

作者简介：刘道刚（1990—），男，2014年毕业于重庆大学机械设计制造及其自动化专业，大学本科，工程师。现工作于东方电气集团东方电机有限公司，主要从事大型汽轮发电机、核能发电机的制造工艺工作。通信邮箱：1204789380@qq.com

式安装一根测量中心柱，作为卧式配装挡风板的测量点。

汽轮发电机的机座长度通常较长，测量中心柱会在自重下发生一定弯曲变形，若直接配装挡风板，中间挡风板与机座的轴线将偏差较大，甚至后期内外定子组装后不能有效隔断冷热风区，引起汽轮发电机运行过程中的热失控。因此，测量中心柱应具有刚性好、变形小、稳定性高等特点。

以出口土耳其的某电厂230 MW空冷机组为例，结合厂内现有资源，综合选择长度为8 m，直径为φ339 mm的空心钢管作为测量中心柱。另一方面，测量中心柱需要稳定有效地支撑在机座内部，为不占用其余资源且方便调节，在机座两端外侧各设计一个测量中心柱专用可调式支撑架，该支撑架能够利用螺栓微调测量中心柱的上下左右位置，使得测量中心柱与理论轴线共线。图1为配装挡风板专用工具，图2为专用配装工具装配至外机座示意图。

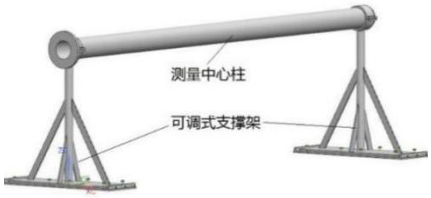


图 1　卧式配装挡风板专用工具示意图

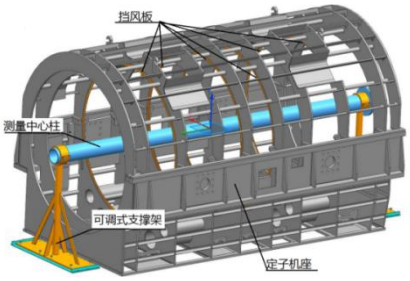


图 2　配挡风板专用工具安装至机座内示意图

1.2 测量中心柱弯曲变形分析计算

考虑到测量中心柱卧式放置时会发生弯曲变形，直径越大，变形量越小，但也不可能一直增大直径。以出口土耳其的某230 MW空冷汽轮发电机为例，结合厂内现有资源通过综合分析比较，最终选择直径为φ339 mm作为测量中心柱，重量约1.2 t。下面以230 MW空冷机组为例进行测量中心柱的变形计算。

测量中心柱可以等效为简支梁结构，其自重可等效于作用在梁AB上的均布载荷q，计算梁AB的挠曲线，进而确定机座每一环板配装挡风板的中心偏移量，见图3所示。

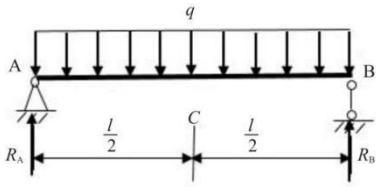


图 3　测量中心柱简化为简支梁模型

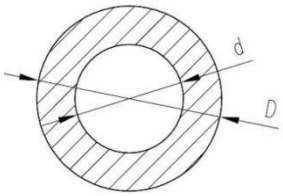


图 4　空心圆柱梁截面示意图

为求得测量中心柱的变形，需要先计算单位长度载荷及惯性距，见图4所示。

空心圆柱梁的单位长度载荷，式（1）：

$$q=\pi\left(\frac{D^2-d^2}{4}\right)\times\rho\times g-m_{孔}g \tag{1}$$

$$=\pi\left(\frac{0.339^2-0.299^2}{4}\right)\times 7800\times 9.8-3.5\times 9.8=1497\ \mathrm{N\cdot m}$$

空心圆柱梁的惯性矩，式（2）：

$$I=\frac{\pi}{64}\left(D^4-d^4\right)=\frac{\pi}{64}\left(0.339^4-0.299^4\right)=2.55956\times 10^{-4}\,\mathrm{m}^4 \tag{2}$$

由材料力学可知均布载荷简支梁挠曲线方程，式（3）和最大挠度，式（4）。

挠曲线方程

$$y=-\frac{qx}{24EI}\left(l^3-2lx^2+x^3\right) \tag{3}$$

最大挠度

$$y=-\frac{5ql^4}{384EI} \tag{4}$$

式中：E—材料的弹性模量；

I—横截面的惯性矩；

q—空心钢管的自重，N/m；

l—两支点之间的距离；

x—待求位置到支点A或B的位置；

y—梁的挠度；

查材料手册可知Q235B材料的弹性模量E=206 GP_a=206×10^9 N/m^2。

$$y=-\frac{qx}{24EI}\left(l^3-2lx^2+x^3\right) \tag{5}$$
$$=-\frac{1497\times x}{24\times 206\times 10^9\times 2.55956\times 10^{-4}}\left(7.6^3-2\times 7.6x^2+x^3\right)$$

当 $x=l/2$ 时，y 取最大值，代入数值，

$$y=-\frac{5ql^4}{384EI}=-\frac{5\times 1497\times 7.6^4}{384\times 206\times 10^9\times 2.55956\times 10^{-4}}=-1.23\ \text{mm} \tag{6}$$

可以计算出y_{max}=1.23 mm。

1.3 各环板配装挡风板偏移量计算

结合测量中心柱的挠曲线变形，如下图5所示，图中曲线为测量中心柱弯曲变形后的示意，机座环板1~6为待配装挡风板的环板，图中A、B、C、D、E、F分别为出口土耳其的某机组6环挡风板理论中心与测量中心柱在竖直方向的偏差值。

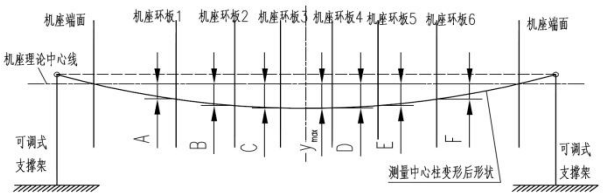


图 5　各个环板对应测量中心柱变形示意图

配装挡风板前，以机座端面加工面为基准，利用内径千分尺测量机座端面环板与测量中心柱的距离，测量上下左右四个方向的距离，微调可调式支撑架，使得其差值≤0.2 mm，即可认为测量中心柱在机座端面环板处与机座理论中心线重合。

结合机座环板间距及空心圆柱梁的挠曲线，可以计算出各个环板对应的理论偏心值，见下表1

表 1　各环板处的测量中心柱挠度　　mm

$y_{机座端环}$	y_A	y_B	y_C	y_{max}	y_D	y_E	y_F	$y_{机座端环}$
0	0.58	0.84	0.91	0.93	0.91	0.84	0.58	0

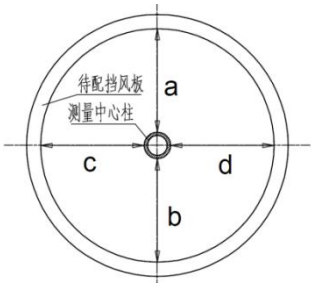


图 6　配装挡风板测量点示意图

例如：针对机座环板 1，该处的测量中心柱挠度为 y_A，配装挡风板时测量上下左右四点，即 a、b、c、d，如图 6 所示。配装时调节挡风板位置，测量下图所示的 a、b、c、d，要求水平方向 $|c-d|\leqslant$ 0.2 mm，竖直方向 $|(a-y_A)-(b+y_A)|\leqslant$0.2 mm，即可认为该环配装的挡风板内圆与机座理论轴线同心。

2　卧式配装挡风板的应用

东方电机生产的出口土耳其某电厂的230 MW多风区内外定子空冷汽轮发电机首次采用上述卧式配装挡风板的工艺方法。配装工位选择相对空闲的东方电机二跨T型平台。整个配装挡风板工艺流程如下图7所示：

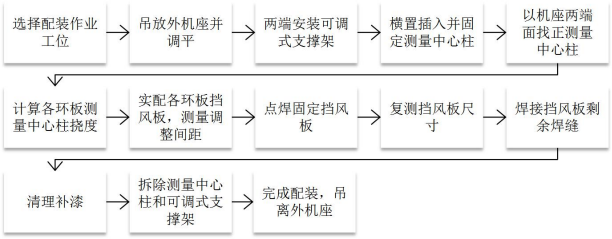


图 7　卧式配装挡风板工艺流程示意图

现对卧式配装挡风板工艺流程进行如下详细阐述：

（1）布置作业工位及布置测量中心柱。选择平整坚硬地面放置待配装挡风板的机座，厂房位置需满足机座起吊重量，在机座两端头放置可调式支撑架，横置吊放测量中心柱并固定，如图8所示。

图 8　布置机座、专用工具示意图

（2）机座端面环板与测量中心柱找同心。以机座端环板的加工面为基准，使用内径千分尺测量上下左右四点到测量中心柱柱面最小距离，其差值≤0.2 mm即认为测量中心柱与机座端面同心。同样方法完成机座两端环板的同心测量，可认为测量中心柱与机座轴线同心，如图9所示。

图 9　以机座端面找测量中心柱中心

（3）以表1挠度数据实配各环板挡风板。以图6所示的机座环板1实配为例，该环板处的挠度为0.58 mm，内径千分尺测量时，挡风板到测量中心柱的值$A=B+0.58$（A为正上方处的挡风板内圆到测量中心柱的值，B为正下方处的挡风板内圆到测量中心柱的值）。依次配装其余挡风板并点焊。

图 10　配装及点焊后的挡风板示意图

（4）挡风板点焊后，复测挡风板内圆尺寸偏差，算入挠度后，使其上下左右偏差不大于0.2 mm。

（5）按要求满焊并清理干净，装入红色硅胶挡风条（图11），完成挡风板的卧式配装工序。

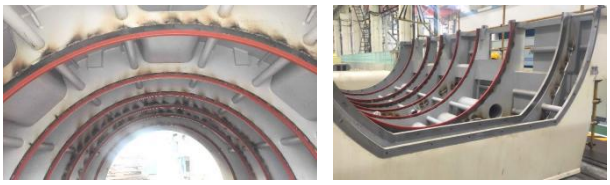


图 11　配装挡风板完毕后的机座示意图

东方电机在出口土耳其的两台汽轮发电机中成功应用卧式配装挡风板工艺。相对于立式配装挡风板有明显优势，主要体现在以下方面：

（1）作业高度大幅降低。卧式配装挡风板时，作业人员只需站在地面即可完成下半圆弧配装挡风板工作，在机座中分面搭设一层不足2米脚手架即可完成上半圆弧挡风板的配装工作，操作人员的作业高度由8 m下降至不足2 m，下降至原来的25％ 。

（2）作业人员安全性提高。 卧式配装挡风板无需攀爬8 m高以上脚手架进出机座，避免作业人员因脚滑、恐高等产生安全隐患，同时也降低高处坠物风险。

（3）配装效率大幅提高。以往立式配装挡风板方案工序繁多，需翻身机座，立放中心柱，搭设脚手架、立式配装等，操作难度均大于卧式配装，完成配装挡风板需20余天。而采用卧式配装挡风板仅需一周时间就可完成全部配装挡风板工作，可节省两周生产时间，仅为原来的1/3，为机组准时交货提供有力保障。

（4）场地利用率明显提高。以往立式配装挡风板工艺方法因需翻身机座，厂房高度需求大，只能在东方电机的关键厂房进行。该厂房区域是发电机制造的关键区域，用于发电机铁芯叠片、总装、型式试验等关键工序，是我公司的瓶颈资源。而采用上述卧式配装挡风板方案可将配装工位转移至其余满足起吊的厂房进行，释放紧张的关键行车及场地资源，提高工厂关键资源利用率。

3　结语

上述的卧式配装挡风板工艺方法采用在机座内卧放测量中心柱代替虚拟的机座中心线，使得机座中心可测量化。利用材料力学计算测量中心柱的挠度变形曲线，确定每处环板处的测量中心柱变形量，配装时补偿测量中心柱变形，使得待配装挡风板的中心线与机座理论中心线重合，完成卧式配装挡风板。

卧式配装挡风板工艺相对传统的挡风板立式配装工艺更为方便快捷，能减少机座翻身工序，消除机座翻身带来的安全隐患，减小机座变形。在场地及吊车占用，作业高度，安全性，生产效率等各方面有明显优势。

该配装工艺方法已经在东方电机出口土耳其的两台230 MW空冷汽轮发电机上首次成功应用，配装后的发电机冷热风区密封良好，型式试验温升数据优良。同时卧式配装工艺也将适用于其余容量的就发电机制造、环类件的装配，如后续生产的湖北某300 MVar调相机、350 MW空冷汽轮发电机的外机座挡风板配装，具有较好通用性，值得推广。

汽轮发电机组维修手册及可视化研究

马腾　蒲晓珉　边晓光　张哲豪

东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731

摘要：传统汽轮发电机组维修手册缺乏有效的数据管理和先进的可视化手段，主要依靠纸质手册、文字描述的方式，难以快速、准确地掌握维修操作、获取维修资源信息等，导致维修手册可视化程度低、信息理解易出错等问题。提出汽轮发电机组维修手册三维可视化方法。建立了汽轮发电机组维修手册数据模型；通过将汽轮发电机组维修资源三维模型和维修过程三维仿真结果作为基础，建立了汽轮发电机组维修手册三维可视化系统；并在某型汽轮发电机组油密封的维修过程中进行了应用验证，验证了该方法的可行性和有效性。

关键词：汽轮发电机组；维修手册；数据模型；三维可视化

中图分类号：TM311　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0069-06

Research on Maintenance Manual and Visualization of Turbo-generator Unit

MA Teng, PU Xiaomin, BIAN Xiaoguang, ZHANG Zhehao

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

Abstract: The traditional maintenance manual of turbine-generator unit lacks effective data management and advanced visualization method. Mainly relying on paper manuals and text descriptions, it is difficult to quickly and accurately acquire maintenance operations and obtain maintenance resource information, resulting in low visualization degree of maintenance manuals, easy to make mistakes in information understanding and other problems. A 3D visualization method for maintenance manual of Turbo-Generator Unit is proposed. The data model of maintenance manual of Turbo-Generator Unit is established. Based on the 3D model of maintenance resources and the 3D simulation results of maintenance process, a 3D visualization system for maintenance manual of Turbo-Generator Unit is established. The feasibility and effectiveness of the method are verified by the application in the maintenance process of oil seal of a Turbo-Generator Unit.

Key words: turbo-generator unit; maintenance manual; data model; 3D visualization

汽轮发电机组是火电厂关键设备，具有投资大、结构复杂、工作条件特殊（高温、高压、高旋转）、连续运行要求高等特点[1]。汽轮发电机组维修使用的维修手册内容繁杂、数据异构、不宜使用，对其有效的配套和查看是缩短维修周期的关键环节之一。通过对汽轮发电机组维修手册数据和内容的有效管理与呈现能够保证维修作业进度，提高作业效率。传统的汽轮发电机组维修手册主要以纸质为主，带来成本昂贵、体积庞大、维护困难、时效性差等问题[2]。因此，如何结合汽轮发电机组维修手册数据的特点，有效管理汽轮发电机组维修手册数据、保证维修内容直观、快速地查看，降低维修人员查阅和理解难度，是提高汽轮发电机组维修效率的关键环节之一。

随着信息化技术的快速发展，国内外学者针对高端装备故障维修手册进行了大量的研究。王国辉[3]等人建立了基于UML的装甲装备IETM模型并做了原型实现。李刚[4]等人开展了船舰装备交互式电子技术手册研究，提出了 IETM 开发的关键技术并开发了船舰装备 IETM 系统。樊亦婷[5]提出了三维

收稿日期：2023-09-11

作者简介：马腾（1995－），男，硕士，工程师。主要研究方向为智能制造，数字孪生，三维交互式手册。通信邮箱：mat8804@dongfang.com。

动画的设计实现，并将三维动画技术应用于直升机交互式电子手册。都业涛[2]研究了基于 GJB6600 的 IETM 系统关键技术，提出了 IETM 创编流程和数据模块编制。王宏亮[6]提出了基于 Catia 与 OpenGL 的三维模型几何重建技术，开发了基于 IETM 的虚拟维修系统。王海波[7]提出了交互式三维装配工艺发布技术，采用 Open Inventor 开发实现了原型系统。戚士斌[8]等人基于 Cortona3D 建立了面向航空装备维修的数字化工艺系统。王飞龙[9]研究了三维电子手册的在线展示技术并开发实现了原型系统。

本文针对汽轮发电机组维修手册数据管理与可视化呈现上存在的问题与需求，提出汽轮发电机组故障维修手册三维可视化方法，基于三维模型、维修工具、维修工装、维修操作、维修物料等多源异构数据，建立汽轮发电机组故障维修手册数据模型，形成汽轮发电机组故障维修手册三维可视化系统，有效管理汽轮发电机组维修手册数据，直观、高效地表达汽轮发电机组故障维修过程，提高汽轮发电机组故障维修作业效率，缩短汽轮发电机组维修周期。

1 汽轮发电机组维修手册数据模型

1.1 汽轮发电机组维修手册分析

汽轮发电机组维修主要包括机组拆卸、机组更换、机组安装三个部分。汽轮发电机组维修主要是通过维修方案与维修计划执行的，维修方案内包含了物料清单、维修手册。物料清单描述了此次维修所需要的维修工具、维修工装、维修物料等的种类与数量。维修手册包括多个此次维修地维修操作指令，每步具体采用什么工具和工装、按照什么工艺标准、针对哪个零部件、如何拆卸、更换、安装等都有详细的说明[6]。汽轮发电机组维修计划描述了汽轮发电机组维修计划的开始与结束时间、需更换部套的采购与制造、供货安排等。

维修操作指令中涉及到大量维修资源，主要包括维修工装、维修工具、维修物料、维修对象、维修操作与标准要求等。在汽轮发电机组维修现场，各类维修资源依据物料清单及时配送到维修工位，维修工人依据计划按时开展维修作业。在维修过程中，维修人员需要快速地理解并执行维修步骤，正确运用合适的维修资源，高效完成维修任务。因此，维修手册中的各类资源有效描述和直观呈现是完成汽轮发电机组维修的重要组成部分。

（1）维修工具

维修工具：在汽轮发电机组维修过程中需要使用的维修工具。如：力矩扳手、游标卡尺等。这些工具在维修工位内使用，使用后配送到下一个维修工位或送回指定库存处。

（2）维修工装

维修工装：在汽轮发电机组维修过程中使用到的工装。如：桁车、零部件暂存支架等。汽轮发电机组部套结构复杂、体积庞大的特点，造成了在维修过程中采用了大量的专用维修工装。

（3）维修物料

维修物料：汽轮发电机组维修过程中用到的各类消耗物资。如：更换结构件、喷涂用的物料等。其中更换结构件是汽轮发电机组维修的重要资源，往往需要事先在厂内加工生产后，运输到维修现场。

（4）维修对象

维修对象：要维修的汽轮发电机组的部套。如：转子、定子、油密封等。维修对象根据汽轮发电机组的装配单元划分，方便维修作业的开展。

（5）维修操作

维修操作包括汽轮发电机组维修操作步骤描述。维修操作用于指导维修人员如何使用维修工具、维修工装，如何更换维修对象，如何使用物料等。

（6）标准要求

标准要求：维修操作执行过程中必须达到技术标准。是汽轮发电机组维修质量的重要保障。

基于维修手册中对各类维修资源的要求，结合资源三维模型，实现维修手册资源的三维模型可视化描述，和维修操作过程三维仿真模拟，直观、高效地表达汽轮发电机组维修过程，保证维修人员快速了解维修操作，高效完成维修任务。

1.2 汽轮发电机组维修手册数据建模

基于对汽轮发电机组维修手册的分析，本文建立了汽轮发电机组维修手册数据模型，如图 1 所示。其中，维修物料数据是维修用到各种维修物料信息，包括物料 ID、物料名称、物料描述、物料三维模型等；维修工具数据是用到的各种维修工具，包括工具 ID、工具名称、工具描述、工具三维模型等；

维修工装数据是用到的各种维修工装，包括工装ID、工装名称、工装描述、工装三维模型等；维修对象数据是需要维修的汽轮发电机组部套对象，包括维修对象ID、三维模型、对象名称、对象描述等；维修内容数据是维修过程描述数据，包括维修仿真、维修标准、维修操作等。

2 汽轮发电机组维修手册三维可视化系统架构

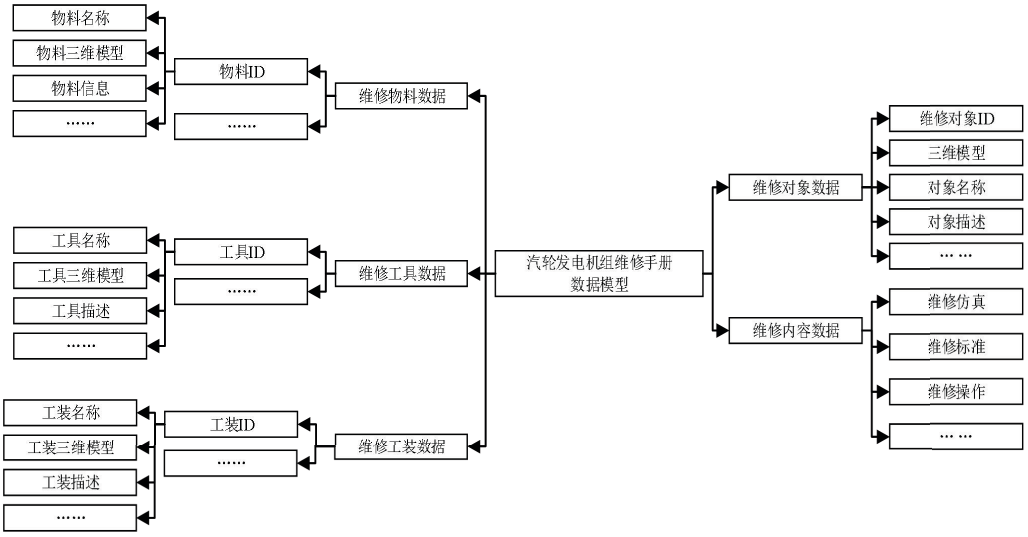


图 1 汽轮发电机组维修手册数据模型

2.1 汽轮发电机组维修手册三维可视化系统

基于汽轮发电机组维修手册数据模型，建立汽轮发电机组维修手册三维可视化系统，如图 2 所示。系统主要包括汽轮发电机组维修手册数据存储层、汽轮发电机组维修手册数据模型建立层、汽轮发电机组维修手册三维可视化层、系统支撑层和用户界面层。

汽轮发电机组维修手册存储层：存储维修工具数据、维修工装数据、维修物料数据、维修对象数据、维修操作数据与标准要求数据。各种数据存储在数据库中，通过后端框架向数据模型建立层传输。

汽轮发电机组维修手册数据模型建立层：基于汽轮发电机组维修手册数据模型，对后端传递的维修数据进行进一步的数据过滤、数据处理以及数据集成，形成汽轮发电机组维修手册数据模型数据，为三维可视化层提供数据基础。

汽轮发电机组维修手册三维可视化层：以三维可视化的方式展示汽轮发电机组维修过程。其中维修过程三维仿真可视化是本层的核心，目的是通过三维仿真技术直观、高效地展示维修过程。基于汽轮发电机组维修过程三维可视化，保证人员深度掌握维修过程，提高维修效率。

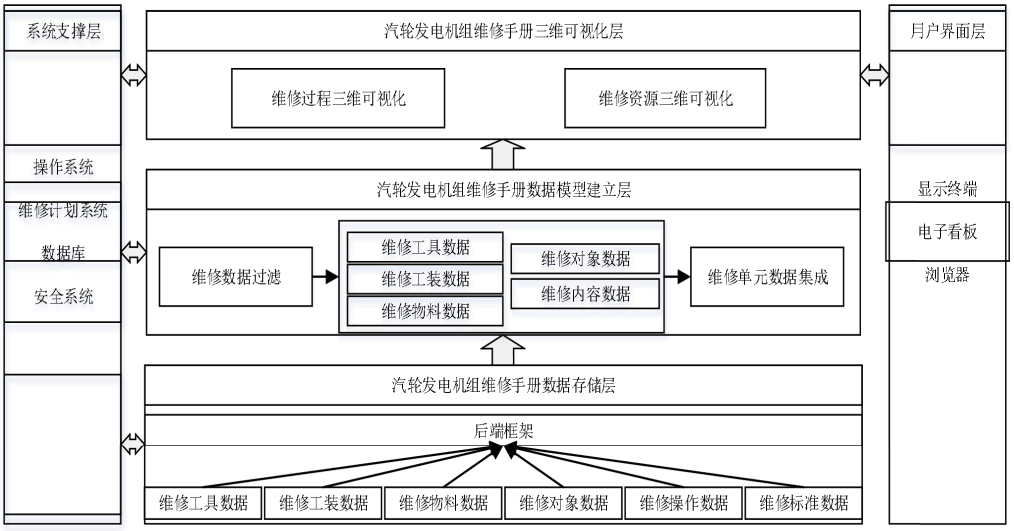


图 2 汽轮发电机组维修手册三维可视化系统

2.2 汽轮发电机组维修手册三维可视化系统

汽轮机发电机组维修手册三维可视化流程涉及到多个不同的系统以及过程信息，各个系统之间存在着数据交换以及信息传递的过程，汽轮发电机组维修手册系统运行包含以下信息：

（1）汽轮发电机组维修计划信息：从汽轮发电机组电站服务事业部的维修管理系统中获得，如MES；

（2）汽轮发电机组数模与维修工艺信息：从企业信息管理系统中获得，主要包括各类维修资源的数模信息、属性信息、维修工艺过程信息等。

汽轮发电机组维修手册数据三维可视化流程如图3所示，基于汽轮发电机组维修数据模型对数据进行处理与集成，获得汽轮发电机组维修数据，通过加载获得的富文本数据和加载渲染三维模型数据，实现汽轮发电机组维修过程三维可视化。随着维修计划的不断执行，汽轮发电机组维修手册的内容不断查询，富文本数据与三维模型数据不断更新，现场人员根据可视化内容的指导及时完成维修任务，提高维修效率。

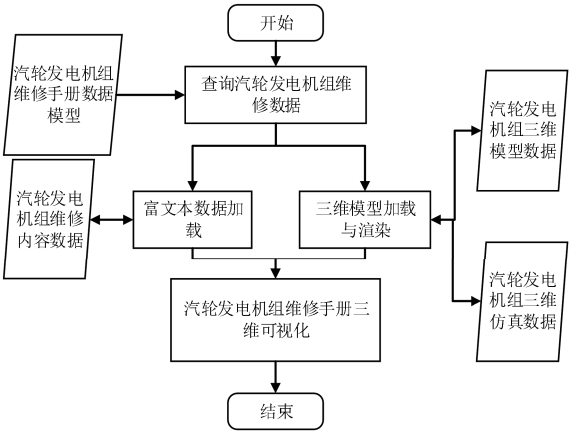


图3 汽轮发电机组维修手册数据三维可视化流程

3 应用验证

3.1 验证背景

本文以某型汽轮发电机组油密封部套的维修为应用背景，为了提高油密封维修效率，需要制定合理高效地油密封维修方案和维修计划。其中，油密封维修手册的数据是实施维修方案与执行维修计划的重要组成部分。油密封维修过程三维可视化，旨在改进传统的故障维修手册应用模式，为汽轮发电机组维修提供直观、准确地指导，提高维修效率。

油密封维修工艺流程如图4所示。油密封故障维修由油密封拆卸、油密封更换、油密封安装三个部分组成。油密封拆卸包括外挡油盖拆卸、过度环拆卸、密封座该加工、内挡油盖拆卸、挡油板、密封瓦拆卸等组成，油密封更换包括对浮动外挡油盖、绝缘板、过渡环加工、滚动内挡油盖、上半密封瓦、下半密封瓦等零部件进行检查与更换，油密封安装包括外挡油盖安装、过渡环安装、密封座盖加工、内挡油盖安装、挡油板、以及密封瓦等安装。

3.2 油密封维修资源

油密封维修资源包括维修工装、维修工具、维修对象、维修物料、维修操作以及维修标准等，如表1所示。维修工装主要包括起吊油密封零部件的吊具、吊钩、支撑梁，支撑油密封零部件地装配环、半环，以及提供动力的桁车；维修工具主要包括拆卸与安装螺栓用的扳手、平口螺丝刀、磁力钻，以及测量用的塞尺、内劲千分尺；维修对象是油密封维修单元；维修操作包括各种零部件的密封座盖、密封瓦、过渡环、密封座的拆卸与更换、安装；

维修物料包括密封剂、螺纹润滑剂、密封胶、螺纹锁固剂、待更换的零部件；维修标准包括工具使用力矩大小要求、目视检查要求、安装间隙要求。

表1 密封维修资源名称表

资源类别	资源名称
维修工装	C型吊钩、吊具、支撑梁、半环、装配环、桁车
维修工具	扳手、内径千分尺、塞尺、平口螺丝刀、磁力钻
维修对象	油密封单元
维修物料	密封剂DB202、螺纹润滑剂、TITE-SEAL密封胶、螺纹锁固剂DB119、待更换零部件
维修操作	拆卸准备、密封座盖拆除、密封瓦拆除、过渡环拆除、密封座拆除、密封座吊装、过渡环吊装、密封瓦安装、密封座盖安装
维修标准	目视检查标准要求；安装间隙要求；扳手力矩大小要求

3.3 油密封维修手册三维可视化应用

针对上述对油密封维修手册三维可视化应用的分析，本文采用Unity 3D作为开发工具，开发了油密封维修手册三维可视化系统，如图5所示。

汽轮发电机组维修手册三维可视化系统的过程包括：首先，基于信息管理平台，获得各类维修资源的数模数据；其次，基于维修资源的数模数据，构建维修手册数据模型；最后，在Unity 3D中开发

油密封维修手册三维可视化系统，以三维可视化的方式展示油密封维修过程，指导现场维修作业。图6所示的是油密封三维可视化，主要包含部套名称、部套ID、三维模型以及部套描述。现场人员可以通过三维模型直观查看部套信息。图7所示的是油密封维修过程三维可视化，包含维修操作名称、维修操作ID、仿真动画、维修步骤、以及维修标准。现场人员可以快速获得维修过程信息，掌握并实施维修操作。

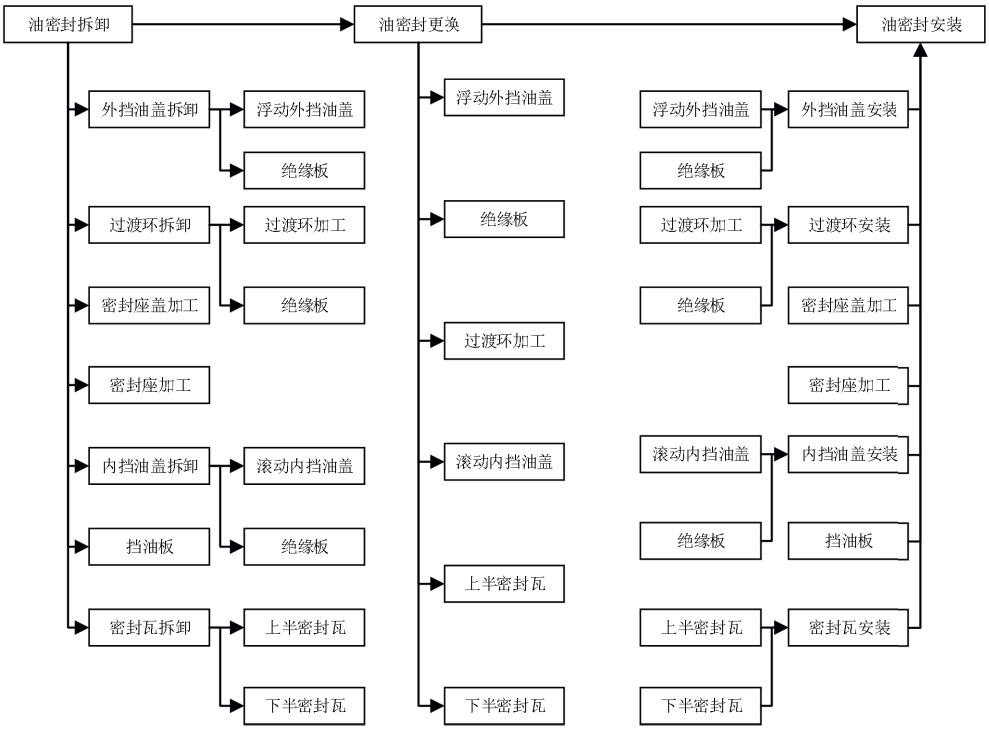


图4 油密封维修工艺流程

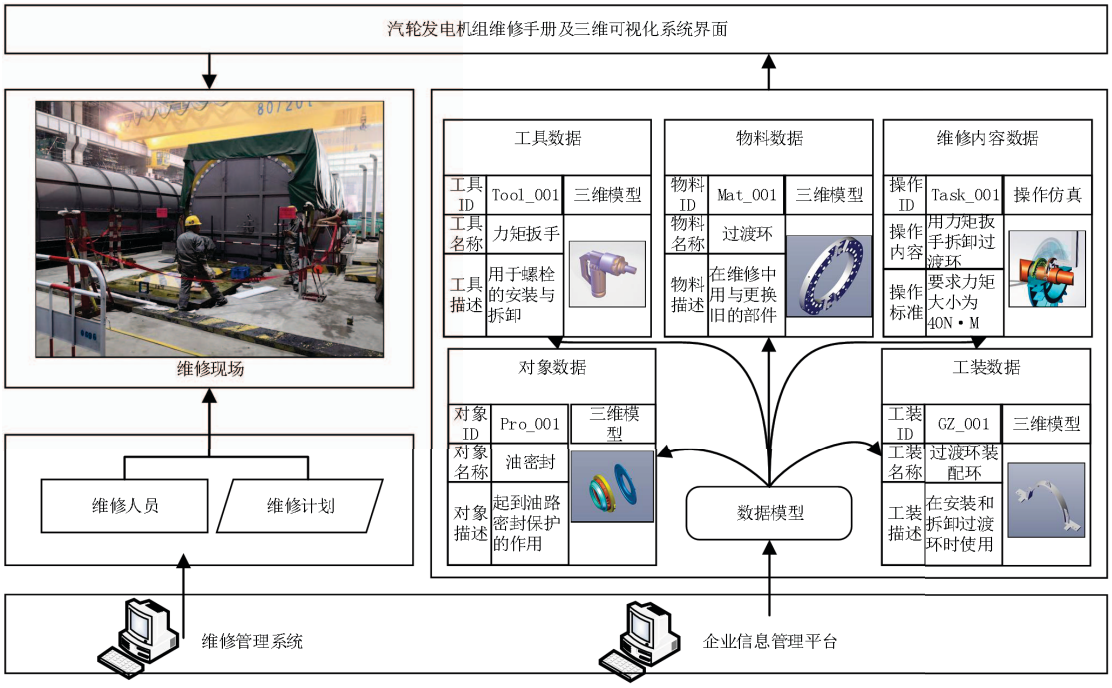


图5 油密封维修手册三维可视化系统

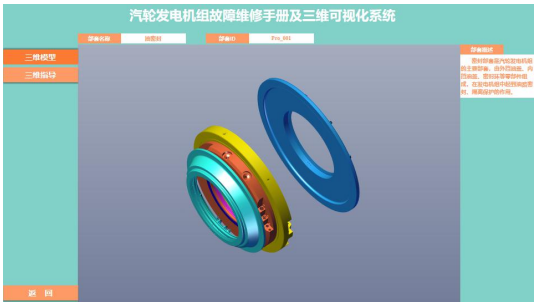


图 6 油密封三维模型展示模块

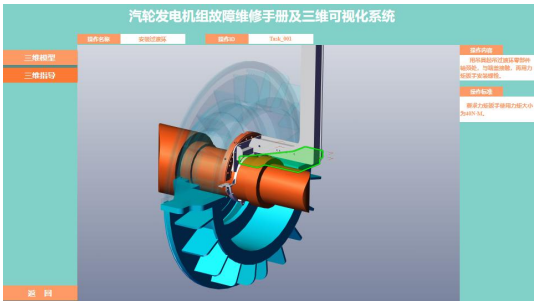


图 7 油密封维修过程三维可视化

4 结语

针对汽轮发电机组维修手册内容繁杂、数据异构、不宜使用等问题，本文基于三维可视化技术，提出了一种汽轮发电机组维修手册三维可视化方法和系统框架，基于三维模型与仿真动画信息，为现场维修指导提供技术支持。建立了汽轮发电机组维修手册数据模型，能够有效管理汽轮发电机组维修数据；以某汽轮发电机油密封维修为应用背景，进行了方法和系统的应用验证，管理人员可以直观、高效地查看汽轮发电机组维修过程，提高现场维修效率，缩短维修周期。

参考文献：

[1] 严可国. 大型汽轮发电机组故障诊断方法及监测保护系统研究[D]. 北京：华北电力大学, 2009

[2] 都业涛, 和应民, 冯伟强, 等. 基于 GJB6600 标准的 IETM 系统研究与应用[J]. 信息技术, 2012, 36(3):141-145+149

[3] 王国辉, 赵铁军. 基于 UML 的装甲装备 IETM 建模[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(8):175-179+237

[4] 李刚, 王志恩, 苏凯, 等. IETM 在舰船装备维修保障中的应用研究[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(8):1508-1511

[5] 樊亦婷. 三维动画技术在直升机交互式电子技术手册中的应用[J]. 直升机技术, 2022 (4):45-49

[6] 王玲花. 水轮发电机组安装与检修[M]. 北京：中国水利水电出版社, 2012

（上接第 41 页）

排放指标更为先进的烟气污染物超低排放技术。

（2）根据高炉热风炉排放烟气参数及其运行特点，结合各种烟气脱硫脱硝技术的工艺原理、使用条件和运行特点，通过分析、比较提出了两种适用于高炉热风炉的烟气超低排放工艺路线，并通过对比两种工艺路线中 SCR 脱硝催化剂和尿素热解系统主要设备的设计参数和运行成本可知：采用中高温 SCR 烟气脱硝技术更具经济优势。

参考文献：

[1] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社, 2005

[2] 毛庆武, 张福明, 张建良, 等. 特大型高炉高风温新型顶燃式热风炉设计与研究[J]. 炼铁, 2010, 29(4):1-6

[3] 孟凡双, 张磊, 李建军, 等. 鞍钢高炉热风炉排放水平及减排方向[C]//中国金属学会. 第十三届中国钢铁年会论文集——9.能源、环保与资源利用.冶金工业出版社（Metallurgical Industry Press）, 2022:5

[4] 杜春松, 印民. 热风炉烟气简析[J]. 鞍钢技术, 2021 (4):10-14+29

[5] Chen C, Cheng S S, Guo X. Hazard Control of NOx in Hot Stove[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2014, 21（3）:306-311

[6] 张福明, 胡祖瑞, 程树森. 顶燃式热风炉高温低氧燃烧技术[J]. 钢铁, 2012, 47(8): 74-80

[7] 刘红军, 马振军, 林桂柯, 等. 高炉热风炉氮氧化物生成机理及控制分析[J]. 山东冶金, 2012, 42(2): 28-30

[8] 刘华平, 张益虎, 刘红军. 沙钢 2 500 m^3 高炉热风炉改造实践[J]. 工业炉, 2017, 39(6): 68-70

[9] 额尔德木吐, 辛铖, 高秋廷.钠基干法脱硫工艺在高炉热风炉烟气脱硫中的应用[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(5):57-59

[10] 齐立东, Song Yunshan. 高炉热风炉煤气预热器技术改造及应用[J]. 冶金设备, 2018, 237(4): 41-43+56

[11] 张述明, 热风炉低温烟气余热回收利用新工艺[J]. 冶金能源, 2015, 34(1): 55-57

600 MW 发电机单油环密封油系统故障原因分析与改进

李世杰

大唐宁德发电公司，福建 宁德 355006

摘要：600 MW 发电机密封油系统实际运行中存在密封油真空油箱真空低无法维持规定真空运行、发电机氢气纯度下降快、密封油管路系统及密封油泵振动大、密封油浮子油箱油位波动大浮球阀易卡涩的缺陷，造成发电机频繁补氢维持发电机氢气纯度以及发电机氢气大量泄漏着火的事故。本文通过查找图纸、说明书及现场的变工况运行试验，从设计及制造方面认真分析引起密封油系统问题的主要原因，找出了 600 MW 发电机单油环密封油系统故障的解决方案，方案实施后密封油系统运行稳定可靠，消除了 600 MW 发电机密封油系统实际运行中的问题，提高了机组经济安全运行水平。

关键词：密封油系统；氢气纯度；氢气泄漏；故障原因；改进措施

中图分类号：TM623.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0075-04

Fault Analysis and Improvement of 600 MW Generator Single Oil Ring Seal Oil System

LI Shijie

(Datang Ningde Power Generation Company, 355006, Ningde, Fujian, China)

Abstract: In the actual operation of the sealing oil system of 600 MW generator, there were some defects, such as low vacuum of the sealing oil vacuum tank, inability to maintain the specified vacuum operation, rapid decline in the hydrogen purity of the generator, large vibration of the sealing oil pipeline system and the sealing oil pump, large fluctuation of the oil level of the sealing oil float tank, easily sticking of the floating ball valve. The accident was by frequent hydrogen replenishment to maintain the purity of the generator hydrogen and a large amount of the generator hydrogen leakage and fire. Though drawings, specifications and field operation tests under variable operating conditions, the main causes of the sealing oil system problems are carefully analyzed from the aspects of design and manufacturing, and the solution to the failure of the 600 MW generator single oil ring sealing oil system was found. After the implementation of the solution, the sealing oil system runs stably and reliably. The problems in the actual operation of the 600 MW generator sealing oil system are fundamentally eliminated, and the safe and economic operation level of the unit is improved.

Key words: sealing oil system; hydrogen purity; hydrogen leakage; the cause of the failure; improvements

某电厂超超临界 660 MW 汽轮发电机组，发电机型号 QFSN-660-2-22 型隐极式、二极、三相同步汽轮发电机，采用静止可控硅，机端变自励方式励磁，并采用端盖式轴承支撑，配有一套氢油水控制系统，采用水、氢、氢冷却方式。

发电机密封油系统采用单流环式开式循环系统，正常运行时密封油真空油箱的油由汽轮机的润滑油供给，油位由真空油箱浮球阀控制。密封油真空油箱中的油通过密封油泵升压后，通过差压阀调节到使密封油压高于发电机内氢压一定数量值供给密封瓦，防止发电机内氢气沿转轴与密封瓦的间隙向外泄露，同时也防止油压过高而导致发电机内

收稿日期：2023-10-24

作者简介：李世杰（1970－），男，1995 年毕业于华北电力大学热能动力工程专业，大专，高级工程师。现在福建大唐国际宁德发电有限责任公司工作，主要从事火力发电厂生产技术管理工作。通信邮箱:757487293@qq.com

大量进油。单油环密封油系统主要设备有；密封油真空油箱、密封油泵、循环泵、真空泵、压差阀、滤油器、发电机密封瓦、回油扩大槽、浮子油箱、空气抽出槽、防爆风机等。

汽轮发电机组正常运行的条件；密封油差压阀工作正常，正常运行油氢压差维持在 50~70 kPa。密封油真空箱油位正常，密封油循环泵、真空泵运行正常,密封油真空箱真空-90~96 kPa。密封油进油温度 25~50 ℃，回油温度不大于 70 ℃。发电机内氢压应为 0.45 MPa，氢压下降低到 0.43 MPa 及时补氢，维持机内氢压应为 0.45 MPa。发电机运行时机内氢气纯度低于 98 %，应进行排补氢保持机内氢气纯度大于 98 %，浮子油箱油位波动小于 5 mm 运行平稳。密封油系统图如图 1。

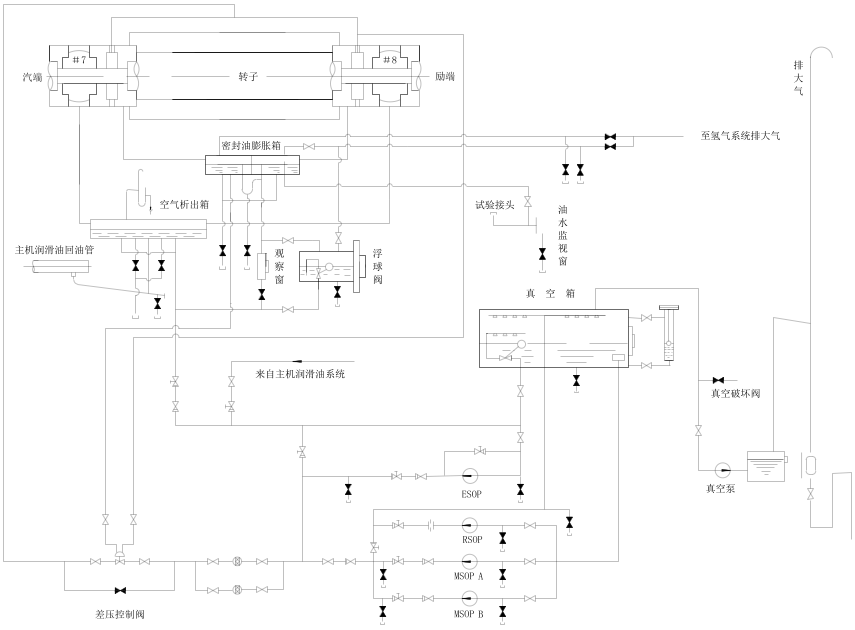


图 1　密封油系统图

1　密封油系统故障及原因分析

1.1 事情经过一

某电厂 660 MW 发电机单流环密封油系统运行时存在以问题：机组正常运行时机内氢气纯度下降快，由于机内氢气纯度低于 98 %需要通过补排氢气维持机内氢气纯度大于 98 %。密封油真空油箱真空调至－90~96 kPa 运行时，密封油系统管道振动的幅值和频率都很大，管系有异响，同时密封油泵振动和异响也很大，无法保持密封油真空油箱真空调在－90~96 kPa 区间安全运行，只能调整真空在－82 kPa 运行。

1.1.1 发电机氢气纯度下降快、密封油泵及密封油管系振动原因分析

通过现场实际运行参数分析，造成发电机氢气纯度下降快的主要原因是密封油真空油箱真空偏小没有达到设计范围值。因为单油环密封油真空油箱最重要的作用是利用混合气体的总压力等于各组成气体单独放在同一容器中产生的压力值的原理除去密封油中的杂质，从而保证发电机氢气纯度。由于密封油真空油箱真空偏小，密封油中的杂质气体多，密封瓦氢侧回油与发电机中的氢气接触，污染发电机中的氢气，造成发电机氢气纯度下降快。

密封油泵在高真空下运行，密封油泵选型时必须汽蚀余量是选定值，密封油集装制造时高度、管径、接口都已确定，运行中油温也是确定的，这样密封油泵入口的局部阻力和沿程阻力基本是定值。当密封油真空油箱真空调至－90 kPa 以上运行时，密封油泵有效汽蚀余量减小，并且小于密封油泵的必须汽蚀余量，在密封油泵入口产生汽蚀现象，造成密封油泵振动，由于密封油泵的振动，引起密封油管路系统振动。

1.2 事故经过二

某电厂负荷升至 660 MW 机组各项参数稳定，发电机密封油系统运行正常，氢压 436 kPa，氢油差压 83 kPa。机组 660 MW 运行两个小时候光字报警“发电机漏氢”，发电机汽端、励端回油漏氢含量点由 0 %迅速上升到 3.9 %，达到报警值报警。发电

机氢气压快速下降，汽机房 13.7 m 发电机汽端和励端出现明火，运行人员立即破坏真空停机，发电机紧急排氢,发电机氢压降至 48 kPa 左右后进行充 CO_2 置换，发电机两端明火熄灭。

1.2.1 发电机汽励两端漏氢原因分析

发电机汽、励两端漏氢原因为浮子油箱油封失去，氢气通过浮子油箱到达空气抽出槽，由于漏氢量大防爆风机无法将空气抽出槽的氢气抽出，空气抽出槽中的大部分氢气通过轴承回油管，返回发电机励、磁两端轴承箱，通过油档泄漏到空气中，发电机 7 号瓦处有接地碳刷，7 号瓦处有接地碳刷产生的火星点燃氢气，造成发电机 7 号轴瓦处出现明火。

发电机大量漏氢路径见图 2。

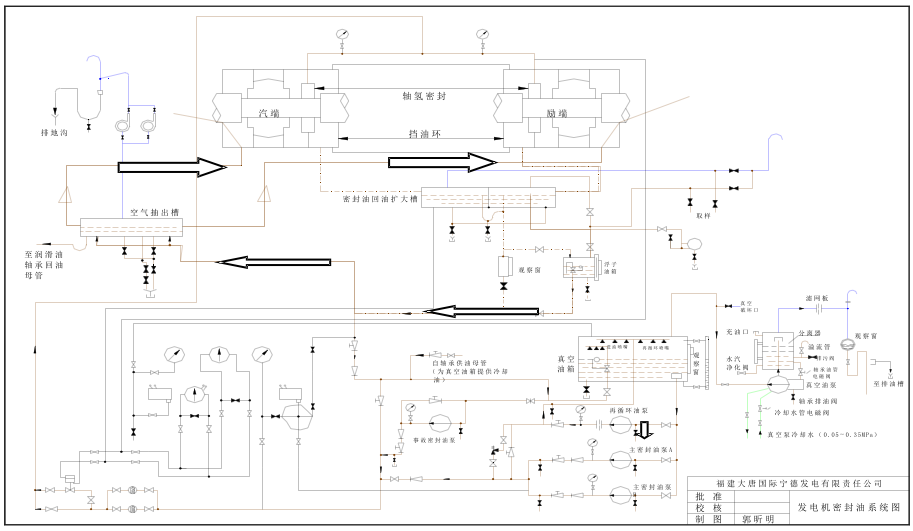


图 2　发电机大量漏氢路径

事故发生后对密封油浮子油箱浮球阀进行了检查，发现浮球阀在开位卡涩、手摇不动，检查阀体内未发现异物，阀芯橡胶密封圈完好。阀芯导向活塞处有明显卡涩磨损痕迹（图 3）。浮子油箱较为干净、浮子油箱内部及进油口布置（图 4）。浮球阀卡涩是造成本次漏氢的直接原因。

图 3 浮球阀活塞检查有明显磨痕

图 4 浮子油箱内部进油口布置

1.2.2 浮球阀结构如图 5。

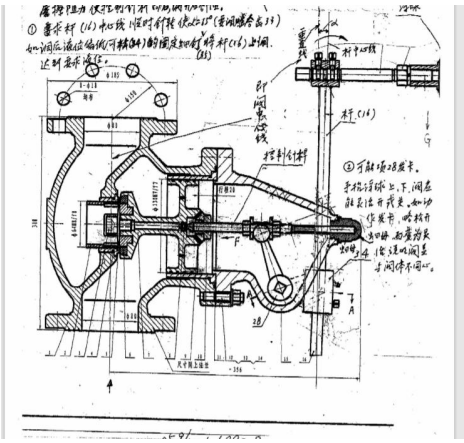


图 5　浮球阀结构图

1.2.3 浮球阀的工作原理

浮球阀由浮球、连接杠杆、活塞、阀芯导向机构、针阀等部件组成，活塞采用差压式结构，设计时活塞上部面积大于下部面积，浮子油箱的压力油进入活塞中腔并通过两个小孔进入活塞上腔，活塞中心有一个小孔与活塞上腔排油侧联通，开关由针阀控制。

当浮子油箱油位在正常位置时，通过调整杠杆

机构使针阀的锥形头封堵中心孔，使活塞上部的力大于下部的力，使浮球阀处于关闭状态，保持浮子油箱油位不变。

浮子油箱液位高于正常位置时，针阀的锥形头打开中心孔，上腔室与排油联通，使活塞上部的力小于下部的力，使浮球阀处于开启状态，浮子油箱的压力油排往空气抽出槽，使浮子油箱的油位下降。

浮子油箱液位低于正常位置时，针阀的锥形头封堵中心孔，使活塞上部的力大于下部的力，使浮球阀处于关闭状态，使浮子油箱的油位升高。

1.2.4 浮球阀卡涩的原因

（1）通过解体浮球阀针塞导向套间隙和选材不合理，密封油运行时温度在 54 ℃左右，导向杆和导向套间隙消失造成针塞阀卡涩，由针塞阀控制油失去调节，造成浮球阀卡涩。

（2）球阀设计复杂，对制造工艺及调整要求高，浮球阀运行中容易造成卡涩。

（3）浮子油箱设置的容积较小，浮球阀动作频繁且发电机回油口设置不合理，对浮球的扰动大，造成运动部件同心度变差，造成浮球阀活塞偏磨卡塞。

（4）密封油油脂不合格造成浮球阀活塞卡涩。

2 密封油系统改进

密封油系统优化改进主要从密封油真空油箱系统及浮子油箱系统两个方面进行改进，消除密封油系统存在的问题

2.1 密封油泵真空油箱系统改进措施

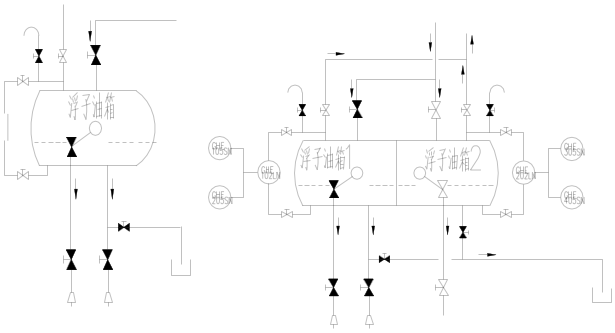
（1）真空油箱补油管路上增加一台 20 μm 双联过滤器，保证真空油箱供油品质，防止密封油油脂差引起浮球阀卡涩风险。

（2)取消真空油箱内密封油泵入口 40 钼滤网，减小入口的局部阻力损失，增加密封油泵的有效汽蚀余量，消除密封油泵在高真空下的汽化现象，从而消除密封油泵及密封油系统管道振动。

（3）由于消除了密封油泵的高真空汽蚀，密封油真空油箱运行时真空可以维持在－96 kPa 以上稳定运行，密封油中的杂质得到了很好去除，保证了发电机氢气纯度。

2.2 密封油浮子油箱系统改进措施

（1）并列增加一套改进型双浮子油箱子系统，原浮子油箱子系统取消，双浮子油箱一用一备，增加密封油系统的安全性和在线检修浮子油箱的可靠性。改造后浮子油箱增加容积，浮子油箱内部回油口设计挡油板；浮子油箱采取这两种措施，可以改善浮子油箱进油的扰动及油位的波动幅度，保证浮球阀有一个好的工作环境，可有效避免密封油进油对浮球阀造成的冲击及油位的波动幅度影响，防止密封油运行环境造成浮球阀的卡涩，提高浮球阀的安全可靠性如图 6。



改造前浮子油箱　　改造后浮子油箱

图 6

（2）浮球阀优化改进

原设计浮球阀结构复杂，制造、检修、安装工艺高，浮球阀的动作由活塞两侧的油压控制，浮球阀对密封油的油脂、制造及装配工艺要求高。改造后的浮球阀结构简单，浮球阀的动作直接由浮球和连杆的动作控制，减少中间的转换环节，增加浮球阀安全可靠性。改进后的浮球阀如图 7。

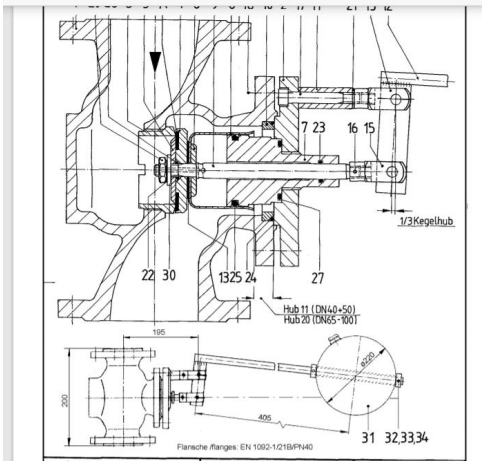


图 7　改进后的浮球阀

（下转第 82 页）

大型发电机定子槽楔紧量检测技术研究及应用

闫南峰

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：本文简要介绍了大型发电机定子槽楔松动的原因及危害，研究和总结了国内外大型发电机定子槽楔紧量检测的相关技术和设备。结合定子槽楔紧量检测设备的使用经验，分析了当前定子槽楔紧量检测设备存在的问题及今后定子槽楔紧量检测技术的研究方向。

关键词：大型发电机；定子槽楔；紧量检测

中国分类号：TM31；TP181　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0079-04

Research and Application of Detection Technology of Tightness of Stator Slot Wedges in Large Generator

YAN Nanfeng

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

Abstract: This paper briefly introduces the causes and hazards of loose stator slot wedge of large generator, and studies and summarizes the relevant technologies and equipment for detecting the tightness of stator slot wedge of large generator at home and abroad. Combined with the application experience of stator slot wedge tightness detection equipment, the problem existing in the current stator slot wedge tightness detection equipment and the research direction of stator slot wedge tightness detection technology in the future are analyzed.

Key words: large generator; stator slot wedge; tightness detection

1

定子是发电机实现磁电能量转换的关键部件，定子线棒是电能产生和传输的介质。在定子线棒安装时通常用定子槽楔将其楔紧在定子槽内。机组运行时定子线棒既受旋转磁场的电磁力作用，又因负荷变化受到热应力作用。在长时间的电磁力和热应力的共同作用下，定子线棒频繁挤压定子槽楔，定子槽楔及楔下垫条等逐渐出现磨损和塑性形变，进而导致定子槽楔松动、位移，甚至脱落等情况，给发电机的安全稳定运行带来隐患。

1　定子槽楔松动的原因及危害

定子槽楔松动原因是多方面的，是各种因素综合作用的结果。槽楔生产和安装质量差异，无法保证每个槽楔尺寸以及安装在槽内的松紧程度完全一致。反复受到挤压、摩擦，部分槽楔首先出现松动甚至滑移，逐渐对相邻的槽楔产生作用，将影响扩大。槽楔的滑移，将导致部分通风孔堵塞，引起线棒局部散热不良，表现出温升异常。振动、热应力和交变电磁力共同作用使线棒反复挤压、摩擦槽楔，导致线棒绝缘受损，加剧线棒在槽内放电腐蚀和振动，形成恶性循环。因此定期对定子槽楔楔紧程度（下文简称为紧量）进行检测成为一个标准程序。

2　定子槽楔紧量检测技术

起初定子槽楔紧量检测主要靠检查人员在抽

收稿日期：2024-01-16

作者简介：闫南峰（1986－），男，2010 年毕业于华北电力大学测控技术与仪器专业，工学学士，工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司质量检验部主要从事计量检测工作。

出转子后进入定子膛内手工锤击定子槽楔并根据敲击声音进行判断。这是一种定性的检查方法，没有客观的检测数据。这种检查方法的结果稳定性差，易受操作人员经验、职业素养、身体和精神状态等因素影响。

为了克服上述方法的缺陷，20 世纪 80 年代开始，国外专家学者开始探索对定子槽楔紧量进行定量检测的方法。1985 年 6 月 20 日德国专利 DE-A-3438468 中，公开了一种方法。将一个包含移动元件的活塞传感器插入气隙并放置在要进行检测的槽楔前面，以便传感器的移动元件朝向槽楔。启动活塞，同时测量注入流体的压力“P”和活塞的纵向位移“L”。由于楔形构件，活塞的纵向位移会导致传感器同时发生横向位移，其值“L”很容易计算。给出压力“P”作为由此获得的位移“L”函数的曲线，以此评估定子槽楔紧量。这种方法要求气隙大于 20 mm，且无法提供将传感器及其移动元件正确定位在每个待检测槽楔前面的方法。1990 年 11 月美国西屋电气提出，在不拆除转子的情况下，通过可插入大于 10 mm 气隙的微锤楔入转子。击打产生的声音用麦克风采集后由操作员使用耳机或计算机电子声音分析系统进行检测。1991 年西屋电气公开了使用一种专门设计的传感器，通过施加在楔紧波纹弹簧的压力与波纹弹簧的位移之间的函数关系来测量定子槽楔紧量的方法。该方法要求定子线圈所在的定子径向槽必须配备两组槽：一组用于定子楔块，另一组用于插入传感器。因此该方法仅具有上述结构的发电机可行，局限性较大。同年 6 月西屋电气又提出了用一种可插入交流发电机气隙的传感器，测量固定定子楔块的波纹弹簧的挠度的方法检测定子槽楔紧量。该方法结构复杂，且定子槽楔需要提前配备穿孔，因为传感器设计用于通过将波纹弹簧与杆接触来测量波纹弹簧的偏转，杆必须与所选穿孔对齐，使用微型电视摄像机进行测量。1996 年 6 月 11 日加拿大的 Jean Lavallee 等人在美国 5524474 号专利中公开了一种用于气隙 10 mm 以上即可定量检测定子槽楔紧量的方法以及实现该方法的装置。该方法使用了一种薄平板传感器，该传感器的一面有安装了活塞的凹槽。将该传感器插入交流发电机的气隙中，并定位在待检测的定子槽楔的前面，以便活塞面对该楔块。将液体注入传感器，使活塞接触，然后在传感器靠在转子上时按压楔块。通过使用安装在靠着活塞的弹性叶片上的应变计测量活塞在其气缸中的位移来测量定子槽楔的位移，并由施加的力与槽楔的位移的关系确定定子槽楔的紧量。2009 年 10 月 1 日美国 Alan Michael Iversen 等人[1]在 US 2009/0245717 Al 专利中提出一种检测定子槽楔紧量的系统和方法。该方法需要在发电机定子制造时，在定子槽楔下方的波纹板上粘接光纤应变传感器，配合数据采集和分析系统，在发电机离线和运行时均可对定子槽楔的紧量进行检测[2]。但是，此方法只适用于安装时对波纹板进行了上述光纤应变传感器的发电机。

国内相关研究起步相对晚一些。2003 年，西安交通大学的项添春、马小芹等人提出了一种由冲击源、声传感器、控制器和检测仪器构成的声检测系统。由控制器驱动冲击源敲击被测的定子槽楔，声传感器采集槽楔受到敲击产生的振动的声音信号，并传输给检测仪器进行处理和运算。最终根据声信号幅值测定定子槽楔的紧量[3-4]。该系统在国内得到了实际应用，但仅依据声信号幅值判断定子槽楔的紧量不够准确全面。2007 年，清华大学深圳研究生院的彭翔等人提出了一种由激振器、声传感器、位移传感器及检测仪器组成的检测系统。该系统增加了位移信号的采集，并用声信号和位移信号综合测定定子槽楔的紧量[5]，在一定程度上提高了检测的准确性。2009 年清华大学深圳研究生院的高胜强等人对彭翔等人的检测系统进行了一定的结构和软件优化[6]。

2018 年 4 月 10 日授权的 CN207215446 U 专利中，中广核的王建涛等人提出一种利用压力变形量试验槽楔松动的方法。该方法用机器人将所设计的装置吸附于定子铁芯，到达检测位置后，由液压缸或气缸构成的挤压机构通过活动杆挤压槽楔，传感器检测槽楔中间和两端因挤压的形变形成的高低差，超过 0.2 mm 的判定为松动，否则判定为紧固。该方法声称能在不抽转子的情况下进行检测。

2020 年 8 月 11 日公布的由东方电气的余平等人[7]申请的 CN111521380 A 专利中，提出了一种利用专门设计的结构将施力螺栓和数字百分表等装置固定到待测定子槽楔上方，检测时通过施力螺栓施加固定压力 F，用数字百分表记录槽楔压缩了 d，

由 d 的值是否处于预先计算出的变化区间测定定子槽楔的紧量。

2021 年 5 月 14 日公布的由上海电气的陈晶晶等人[8]申请的 CN112798238 A 专利中提出了一种槽楔松紧度检测装置。该装置特点在于运用超薄型爬壁机器人搭载激振器及声压传感器等利用声信号对槽楔的楔紧程度进行判定，便于不抽转子的情况下对定子槽楔进行检测[9]。

由上述文献和专利可见，国内外针对定子槽楔紧量检测的原理基本上都是给槽楔施加压力或进行敲击，检测槽楔位移量和或振动幅值，而在具体的实现方式上略有不同。工作流程如图 1 所示。

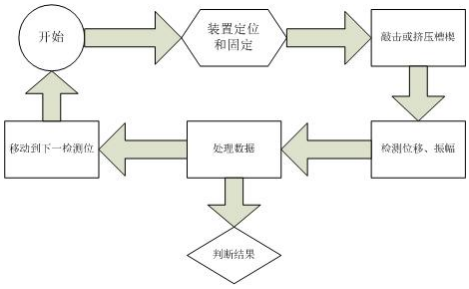


图 1　槽楔紧量检测流程图

3　定子槽楔紧量检测设备及应用

前文提及的国内外文献和专利，多是理论研究，部分转化成了实际检测设备，也仅做试验研究用，真正用于商业应用的较少。

为了实现定子槽楔紧量的量化检测，提升服务质量，引入 IRIS power 公司的定子槽楔紧量检测设备。设备主要组成部分如图 2 所示。驱动器驱动搭载了传感器的载具到达检测位置，由计算机发出检测命令经控制器处理后驱动传感器以每 3 秒 30 次的频率锤击被测槽楔，并采集振动频率和幅值信号传回计算机进行处理和运算，在计算机上显示 RTI（相对紧度指数）值。

图 2　定子槽楔紧量检测设备

该套设备在多型发电机进行检测，现场检测如图 3 所示。因设备需要交流电源驱动，数据也是有线传输，故现场检测时一般需要两人配合，一人在膛内负责引导和定位，一人在膛外控制和辅助。经过多次现场检测，对当前定子槽楔检测设备总结如下：

图 3　现场检测

（1）能实现定量的定子槽楔紧量检测，但判定松紧的 RTI 阈值因机组不同需要略作调整。

（2）载具行进顺畅度不理想。一方面，在定子下半圆周因磁力和自重的共同作用，摩擦力增大；另一方面，受定子铁芯齿部平整度等因素影响，行进方向逐渐偏移；另外，随着行进距离增加，线缆重量加大，且线缆可能在定子有缝隙处卡住。

（3）因载具和传感器等尺寸较大，无法在 10 mm 左右的气隙内灵活行进并准确定位，需要抽出转子进行检测。虽前文提及的文献、专利中有声称可在不抽转子情况下进行检测的，但尚未见实际应用案例，仅理论上可行。

（4）对定子槽深适应性不强，可调节槽深范围有限，部分定子槽较深的槽楔，因超出载具调节范围无法进行检测。

4　定子槽楔紧量检测的研究方向

4.1 微型化

要实现在不抽出转子的情况下对定子槽楔进行检测，需要让检测设备微型化，才能在 10 mm 左右的气隙顺畅的工作并确保不会卡住。这要求检测设备结构轻量化、扁平化，采用自供电系统，无源传感器，无线数据传输。

4.2 智能化

发电机定子槽楔数量大，且槽楔长短不一，通过设置固定的行进距离来控制槽楔检测设备采集数据可能采集到两个槽楔接头处失真或无效数据。想要完全摆脱或减轻槽楔检测设备工作时的人工干预程度，需融入智能化的传感器和检测技术，给检测设备加上眼睛和大脑，让其具备自主识别和决

策的能力。

4.3 多功能集成

发电机检修时间紧、任务重。如果能在进行槽楔紧量检测的同时，一并完成其他检测任务，可大幅提升检修效率。集多种功能于一身，要求同一个载具上搭载更多的传感器，各自独立完成相应检测功能且不能互相干扰。

4.4 在线实时监测

人们希望将包括定子槽楔紧量在内的各项发电机性能参数进行在线实时监测，便于第一时间对存在的缺陷进行处理，提高机组运行效益。发电机运行时的大电流和强磁场是阻碍定子槽楔紧量在线监测的主要困难，需要研究解决传感器及数据传输的抗干扰问题。

5 结语

随着传感器技术、物联网技术及人工智能技术的大力发展，相信发电机定子槽楔紧量的实时监测指日可待。此外，除了提高检测能力外，还应该从设计源头进行创新，采用更优化的结构和材料，从原理上降低定子槽楔松动的可能性。

参考文献：

[1] Lavallee J, Lavigne P , Rondot P, et al. Method and apparatus for quantitatively evaluatng the stator wedge tightness of an electric alternator: US, 5524474 [P]. 1996-6-11

[2] Iversen A M,Salem S R , Worden J A,et al. System and method for measuring stator wedge tightness: US, 0245717 Al [P]. 2009-10-1

[3] 项添春, 马小芹, 卢伟胜, 等. 声学技术在大电机槽楔松动检测中的应用[J]. 电工电能新技术, 2003(1):68-71

[4] 马小芹, 蒲工, 卢伟胜, 等. 大型发电机定子槽楔松动的声检测研究[J]. 中国电力, 2003(1):28-31

[5] 彭翔, 贾志东. 大型发电机槽楔松动检测系统[J]. 大电机技术, 2007(2):6-9

[6] 高胜强, 贾志东, 彭翔, 等. 基于DSP的大型发电机槽楔松动检测系统[J]. 中国电力, 2009, 42(1):70-74

[7] 王建涛, 刘传昌, 肖鸿坤, 等. 利用压力变形量试验槽楔松动的机器人: 中国, 207215446 U [P]. 2018-4-10

[8] 余平, 潘岩景, 姚望, 等. 一种定子槽楔紧固度检测方法及检测装置: 中国, 111521380 A [P]. 2020-8-11

[9] 陈晶晶,吴骏巍 , 柳成行,等.一种槽楔松紧度自动检测装置：中国，112798238 A [P]. 2021-5-14

（上接第 78 页）

3 密封油系统检修运行中防范措施

（1）加强油质监督管理，定期检验汽轮机润滑油、密封油油质合格。

（2）机组检修时对发电机轴承润滑油、发电机密封油系统全面认真进行清理，必要时密封油系统进行大流量冲洗，避免系统大量遗留杂质造成浮球阀卡涩。

（3）发电机密封系统重新调试，在发电机风压在维持 410～450 kPa 时，密封油箱油位变化小于±2 mm。

（4）密封油浮子油箱定期进行浮子油箱浮球阀液位扰动试验，装设远程监视仪表及漏氢速率大光字报警。

（5）浮子油箱检修维护纳入定期工作，密封油浮子油箱 6 个月在线检修清扫。

4 结语

通过对 600 MW 发电机密封油系统真空油箱进油口管道加装过滤器，拆除密封油泵入口滤网，提高了密封油泵有效汽蚀余量，真空油箱真空维持－98 kPa，密封油系统运行平稳，密封油泵及管系振动声音良好,同时发电机氢气纯度一直能保持在 98 %以上，没有发生由于氢气纯度低置换氢气的现象，保证了密封油系统的安全经济运行。浮子油箱、浮球阀及系统布置改进后，密封油系统运行平稳，浮子油箱油位波动在 2 mm 以内，浮球阀动作可靠灵敏无卡涩，同时也提高了浮子油箱在线检修的安全性。本次密封油真空油箱系统和浮子油箱系统两方面改进后，从根本上消除了密封油系统原有设计和系统布置上的缺陷，彻底解决了 600 MW 发电机密封油系统的隐患，使单流环密封油系统安全稳定性得到了显著提高。

基于 WBS-RBS 与 AHP 的 W 项目产品交付进度风险计算

郭效仪

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：“十四五”以来，国家陆续出台了系列政策文件，对抽水蓄能行业发展加强指导和支持，行业迎来前所未有的发展高潮。在工程建设期间，设备按期交付是业主与制造商关心的重要事宜，抽水蓄能项目集合了新技术、高投资、政治社会效应重大等多项特点，尤应重视项目执行过程中的风险管理。本文通过 WBS-RBS 风险识别与 AHP 层次分析法相结合，对 A 公司 W 抽水蓄能项目预埋产品交付进度风险度进行了量化评估，既有助于提高项目决策的合理化、科学化，提升管理效率和效益；同时，也是对抽水蓄能产品交付进度风险量化管理新途径的有益探索。

关键词：抽水蓄能机组设备；风险管理；WBS-RBS 风险识别矩阵；AHP 层次分析法；风险计算

中国分类号：TK266　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）02-0083-05

Risk Calculation of Product Delivery of W Project Based on WBS-RBS and AHP

GUO Xiaoyi

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

Abstract: Since the 14th Five-year plan, the authorities have successively issued a series of policy documents to strengthen guidance and support for the development of the pumped storage industry, and the industry has ushered in an unprecedented development peak. During the construction period, timely delivery of equipment is an important concern for both owners and manufacturers. Pumped storage projects combine multiple characteristics such as new technology, high investment, and significant political and social effects. Therefore, special attention should be paid to risk management during project execution. The present article quantitatively evaluates the risk level of the delivery schedule of pre embedded products in Company A's W pumped storage project by combining WBS-RBS risk identification with AHP analytic hierarchy process. This not only helps to improve the rationality and scientificity of project decision-making, but also enhances management efficiency and benefits; At the same time, it is also a beneficial exploration of new ways to quantify risk management for the delivery schedule of pumped storage products.

Key words: pumped storage unit equipment; risk management; WBS-RBS risk identification matrix; analytic hierarchy process (AHP); risk calculation

2021 年全国两会，碳达峰和碳中和目标首次被写入政府工作报告，抽水蓄能电站作为电力系统中容量大、生命周期长且最稳定、最经济的储能装置，是弥补风、光发电劣势，保障电网安全稳定运行的有效手段，也是新能源建设乃至碳达峰、碳中和目标达成的重要基石。“十四五”以来，国家陆续出台了系列政策文件，对抽水蓄能行业发展加强指导和支持。

截至 2021 年底，我国抽水蓄能电站在建总规模 6 153 万 kW，另有装机总量 5 508 万 kW 共 40

收稿日期：2024-01-16

作者简介：郭效仪（1987－），女，2021 年毕业于西南交通大学工商管理专业，硕士研究生，经济师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事抽水蓄能市场开拓工作。

个项目开展可研，装机总量 14 951.5 万 kW 共 123 个项目开展预可研[1]，行业迎来前所未有的发展高潮。

机组设备如同抽水蓄能电站的心脏，电站建设期间，设备如期交付对电站能否按期完工投产有决定性作用。对设备制造企业而言，降低订单产品交付期间的进度风险，将产品按需求准时送达也是一项必须完成的挑战。A 公司是 W 项目主机设备供应商，本文以项目预埋件产品交付为研究对象，运用 WBS-RBS 风险识别方法，结合 AHP 层次分析法，对预埋件产品交付过程中的风险因素及权重进行分析与计算，并最终通过风险度评价得出工作环节的进度风险度以及预埋件按需交付的整体风险度。

1 W 项目概况

W 抽水蓄能项目总装机容量 1 000 MW，共安装 4 台 250 MW 立轴可逆混流式机组，额定出力 255.1 MW，项目主体工程于 2020 年 12 月 10 日正式开工，计划于 2025 年 3 月首台机组并网发电。项目所在省用电负荷高，电网主要依靠火电和外送电，“十四五”期间将大力发展风电、光伏等新能源，电网调峰压力较大，W 项目的投产发电将有效缓解电网调峰压力，保障电网安全稳定运行。2021 年 11 月，A 公司与 W 项目业主签订供货合同，提供 4 台机组及附属设备的供货及设计、试验、安装支持等相关内容。

预埋件是合同签订后交付的首个装配，其安装过程与电站设计、土建等交叉作业，因此对到货有严格的时间节点要求。根据合同要求结合产品期量，项目管理人员对首台机预埋进行了交付策划，首台机交付时间 2023 年 1 月，如图 1 所示。

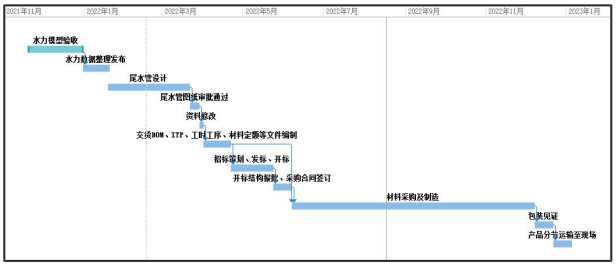


图 1 W 项目首台机预埋件制造交付进度

但在机组供货合同签订后 3 个月，业主方提出首台机预埋需 2023 年 9 月 10 日交付现场，较原计划提前 4 个月，否则土建将面临停滞，会给业主带来巨大的经济和工程进度损失。

2 预埋件产品交付进度风险识别

面对需求的变更，项目管理人员重新进行了风险管理规划，明确了首台机预埋件 2022 年 9 月 10 日交付工地的管理目标，并对产品设计、采购、制造、交付各环节中可能的风险因素进行了全面梳理。

WBS-RBS 风险识别矩阵（Work-Breakdown Structure）是通过项目工作分解结构与风险分解结构（Risk Breakdown Structure）交叉组合，对每个子任务是否会发生相关风险因素进行表示，从而进行全面风险识别。WBS 结构的复杂程度，应以风险识别的目的为导向，识别的范围为基础来进行确定[2]。W 项目管理人员将预埋产品交付活动按实施过程进行 WBS 分解，共分为三级结构，如表 1 所示。

表 1 W 项目预埋产品交付 WBS 分解结果

一级任务	二级任务	三级任务
W 项目预埋产品交付工作 A	技术准备 A1	水力模型验收 A1-1
		水力数据整理发布 A1-2
		图纸设计及审批 A1-3
		工艺文件编制 A1-4
	采购 A2	原材料采购 A2-1
		配套件采购 A2-2
	生产制造 A3	原材料下料 A3-1
		焊接、退火、打磨 A3-2
		探伤及尺寸检查 A3-3
		装配及验收 A3-4
	包装物流 A4	包装设计 A4-1
		包装工序 A4-2
		运输 A4-3

第二步操作是风险分解结构（RBS），通过将项目实施过程中可能遇到的风险进行逐层分解，从而得到各层次的子风险。全面质量管理理论中[3]，“5M”和“1E”是制造业中 6 个影响产品质量及产出的主要因素简称，“5M”包括人员（Man）、机器（Machine）、物料（Material）、方法(Method)、测量（Measurement），“1E”则是指环境（Environment）。

结合抽水蓄能产品制造特点，在 W 项目预埋产品交付进度风险分解结构中，主要从人员（R1）、场地及设备（R2）、原材料（R3）、方法（R4）、客

观因素(R5)五个方向为研究角度，对设备交付进度风险进行了细化分解，如表 2 所示。

表 2　W 项目预埋产品交付 RBS 分解结果

	风险大类	风险因素
产品交付进度风险 R	人员 R1	认知/经验不足 R1-1
		人员不足 R1-2
		未按规范操作 R1-3
	场地及设备 R2	场地不足 R2-1
		设备紧张 R2-2
	原材料 R3	原材料不足 R3-1
		原材料不合格 R3-2
	方法 R4	工序复杂 R4-1
		设备效率低 R4-2
		检验流程复杂 R4-3
	客观因素 R5	产品尺寸大 R5-1
		零件种类多 R5-2
		设计变更 R5-3
		意外事故 R5-4

WBS 和 RBS 完成后，将 WBS 中每个子任务作为矩阵中的行，RBS 中风险因子作为矩阵中的列，并逐一判断每个子任务在实施过程中是否受到每列中风险因子的影响，将判断结果填入到矩阵方格内。对于确实存在或有可能受到其影响的风险因素，矩阵对应表示 1，如果不存在，或者影响极小，矩阵对应表示为 0，这样形成 WBS-RBS 风险识别矩阵集合 B，从而判断子任务执行中哪些风险因子会给其带来进度滞后影响。

$$B=\begin{bmatrix} 1&1&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0 \\ 0&0&0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&1&1 \\ 1&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&1&1&0 \\ 1&0&1&0&1&1&1&0&0&0&1&0&1&0 \\ 0&1&1&1&0&0&1&1&0&0&1&0&1&0 \\ 0&1&1&0&0&0&0&0&0&0&1&1&0&0 \\ 0&0&0&1&0&0&0&0&0&1&1&0&0&0 \\ 0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&1 \end{bmatrix}$$

3　风险计算

要有效地将 W 项目在执行阶段所暴露出交付进度风险降至最低，以最小的经济代价、最低的管理成本达到效益最大化，就需要对子任务进行风险度排序。项目管理人员采用 AHP 层次分析法与专家打分相结合的手段，充分利用专家的专业知识与宝贵经验，同时结合了科学的计算模型，使得进度风险管理脱离了凭直觉或经验判断处理的感性范畴，更具合理性。

3.1 AHP 层次分析法

层次分析法（The Analytical Hierarchy Process）是由美国学者莎蒂（T.L.Satty）于 20 世纪 70 年代提出的一种系统分析方法。通过该方法，与决策对象的相关元素被分解为目标层、准则层以及方案层，并在此层次基础上进行量化分析，其运用可将无法量化的风险因素按照大小进行排序。实施过程如下：

（1）根据分析对象本身的特性对其分层分解。

（2）两两比较，构造判断矩阵。将因素进行两两比较，以得出相互间的影响，取值如下表 3。

表 3　两两比较法取值表

定义（a_{ij}）	标度
i 因素比 j 因素极端重要	9
i 因素比 j 因素重要得多	7
i 因素比 j 因素明显重要	5
i 因素比 j 因素稍微重要	3
i 因素与 j 因素同等重要	1
i 因素与 j 因素在上述标度之间折衷时的标度	2，4，6，8

（3）对矩阵进行计算。在 AHP 进行风险评价过程中，需要知道方案层相对于准则层的重要程度，本文采用方根法，主要步骤如下：

a）计算特征向量：

$$W_i=\left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}} \quad i=1,2,\ldots,n \qquad (1)$$

b）通过归一化，获得判断矩阵 A 的权重向量 V,V=（$V_1,V_2,\ldots V_n$）：

$$W=\sum_{i=1}^{n} W_i$$

$$V=\frac{W_i}{W} \qquad (2)$$

c）进行一致性检验，计算矩阵的相容性指标 CI(Consistency Index)与一致性指标 CR(Consistency Ratio)：

$$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$$

$$CR=CI/RI \qquad (3)$$

n 是判断矩阵阶数，RI（Random Consistency Index）是随机一致性指标，现在普遍使用莎蒂提出

的随机一致性指标，如表 4。

表 4　随机一致性指标 RI

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41

最大特征根 λ max 计算公式如下：

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{[AV]_i}{nV_i} \qquad (4)$$

当 n≤3，判断矩阵永久具有完全一致性。CI 越小，说明判断矩阵越接近于完全一致性。若一致性指标 CR＜0.1，则判断矩阵的一致性可以接受，权重向量 V 可以采纳。

d）计算层次综合重要度。通过自上而下地进行计算，最终可以得到最底层因子相对于整体的综合重要度 C。

3.2 风险度理论

风险度是通过量化，对风险发生的概率大小以及损失严重程度进行评估的方法。通过风险发生的可能性 P 和损失程度 C 可计算风险度 D:

$$D=P\times C \qquad (5)$$

D 值的计算结果可以反应风险的等级，根据 D 值的大小，可以对风险的等级进行排序，采取更有针对性的风险应对措施，提高组织管理效益。D 值及对应风险级别见表 5 所示。

表 5　风险级别

风险级别	D 数值	说明
很高	91~100	风险极大
高	81~90	风险很大
较高	71~80	风险较大
一般	51~70	风险一般
低	31~50	风险较小
很低	0~30	几乎无风险

3.3 W 项目预埋产品交付进度风险度计算

通过 WBS-RBS 风险识别进行整理得出：W 项目预埋产品交付进度风险因素主要有 5 个风险大类，14 个风险因素小项；4 个主要工作任务，以及 13 个主要工作环节，共计 44 项潜在风险事件。设立 AHP 中交付进度风险为最高目标层，风险类别 R1-R5 为准则层，工作任务 A1-A4 为方案层。

通过发放、回收问卷，并对问卷数据进行处理，得到准则层的判断矩阵 R 如下表 6：

表 6　判断矩阵 R

矩阵 R	人员 R1	场地设备 R2	原材料 R3	方法 R4	其他因素 R5
人员 R1	1	1/3	1/3	3	5
场地设备 R2	3	1	1	5	9
原材料 R3	3	1	1	5	9
方法 R4	1/3	1/5	1/5	1	3
其他因素 R5	1/5	1/9	1/9	1/3	1

整理得

$$A_R=\begin{bmatrix}1 & 0.3333 & 0.3333 & 3 & 5\\ 3 & 1 & 1 & 5 & 9\\ 3 & 1 & 1 & 5 & 9\\ 0.3333 & 0.2000 & 0.2000 & 1 & 3\\ 0.2000 & 0.1111 & 0.1111 & 0.3333 & 1\end{bmatrix}$$

根据式（1）计算特征向量：

$$W_{R1}=\left(1\times\frac{1}{3}\times\frac{1}{3}\times 3\times 5\right)^{\frac{1}{5}}=1.1075$$

$$W_{R2}=(3\times 1\times 1\times 5\times 9)^{\frac{1}{5}}=2.6672$$

$$W_{R3}=(3\times 1\times 1\times 5\times 9)^{\frac{1}{5}}=2.6672$$

$$W_{R4}=\left(\frac{1}{3}\times\frac{1}{5}\times\frac{1}{5}\times 1\times 3\right)^{\frac{1}{5}}=0.5253$$

$$W_{R5}=\left(\frac{1}{5}\times\frac{1}{9}\times\frac{1}{9}\times\frac{1}{3}\times 1\right)^{\frac{1}{5}}=0.2415$$

根据式（2）进行归一化处理，计算权重向量 V，得出 R 判断矩阵权重如下：

$$V_R=\begin{bmatrix}0.1536\\0.3699\\0.3699\\0.0728\\0.0335\end{bmatrix}$$

根据计算结果，在 W 项目预埋产品交付进度风险中，造成影响最大的风险类型是场地设备、原材料，其次是人员、方法和其他客观因素。

为了确保计算结果的可靠性，需进行一致性检查：

按照式（4），计算λmax，

$$A_R\times V_R=\begin{bmatrix}1 & 0.3333 & 0.3333 & 3 & 5\\ 3 & 1 & 1 & 5 & 9\\ 3 & 1 & 1 & 5 & 9\\ 0.3333 & 0.2000 & 0.2000 & 1 & 3\\ 0.2000 & 0.1111 & 0.1111 & 0.3333 & 1\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}0.1536\\0.3699\\0.3699\\0.0728\\0.0335\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.7864\\1.8668\\1.8668\\0.3726\\0.1707\end{bmatrix}$$

计算得出：λmax=5.0837

代入式（3）中可得 CI=0.0209，查表得 RI=1.12，CR=0.018＜0.1，满足一致性要求，数据有效。

以问卷数值为基础，根据以上步骤，继续计算各准则层下方案层权重数值,由于篇幅限制，各方案

层相对于准则层计算结果整理如下表 7。

表 7　方案层计算结果汇总

	V_{A1}	V_{A2}	V_{A3}	V_{A4}
R1	0.516 8	0.050 4	0.274 3	0.158 3
R2	0.282 6	0.075 9	0.489 5	0.151 8
R3	0.080 9	0.287 9	0.476 4	0.154 6
R4	0.229 8	0.105 5	0.600 7	0.063 8
R5	0.078 9	0.140 4	0.280 9	0.499 5

将上表各任务权重与判断矩阵 R 中计算得出的风险权重 VR 相乘，并将乘法得数对应相加，即可得到工作任务的综合风险权重，从而找出进度风险权重最大的工作任务（表 8）。

表 8　各工作任务的综合风险权重

	A_1	A_2	A_3	A_4
C	0.233 2	0.154 7	0.452 6	0.159 1

通过以上计算，确定了在 W 抽水蓄能项目预埋产品交付过程中，各工作任务对产品交付进度的风险性影响权重值，排在首位的是生产制造、其次是技术准备、采购，最后是包装物流。问卷整理得到各工作环节发生延迟风险的概率数据如表 9 所示。

表 9　折中原则取值表

任务编号	最大值	最小值	乐观系数
A1	60	30	α =0.75
A2	75	50	
A3	85	60	
A4	40	20	

各工作任务延迟的风险概率 P 加权平均值如下表 10：

表 10　风险延迟概率计算结果

	A_1	A_2	A_3	A_4
P	52.5	68.75	78.75	35

结合上述计算结果，代入式（5）计算可以得出：

表 11 工作任务进度风险度计算结果

	A_1	A_2	A_3	A_4
D	12.24	10.63	35.64	5.56

W 抽水项目预埋产品交付进度整体风险度 *D* 为以上结果之和 64.09，说明按照业主新提出的需求时间交货实现可能性较高，项目进度风险处于可控范围内。但项目执行过程中应对 *D* 值较高的工作环节，以及识别到的该工作环节可能的风险事件予以合理的措施应对，以进一步降低风险。通过以上计算，对预埋产品整体风险度产生的量化评价，也可以纳入风险管理数据库，用于后续项目之间的横向比较。

4　结语

2006 年国务院国资委发布了《中央企业全面管理指引》，自此之后，企业经营管理者对风险管理给予了越来越高的重视，管理手段与措施也向着更加科学、全面的方向发展。

本文通过 WBS-RBS 风险识别与 AHP 层次分析法相结合，对 A 公司 W 抽水蓄能项目预埋产品交付进度风险度进行了量化评估，既有助于提高项目决策的合理化、科学化，提升管理效率和效益；同时，也是对抽水蓄能产品交付进度风险量化管理新思路、新途径的有益探索。

参考文献：

[1] 中国水力发电工程学会抽水蓄能行业分会（CPSA）《抽水蓄能产业发展报告 2021》[R]，2021, 2.4:15

[2] 孙嘉天，吴景泰. WBS-RBS 方法在海外工程项目风险辨识中的应用[J]. 郑州大学学报, 2009, 26(2): 66

[3] Armand Vallin Feigenbaum. Total Quality Control [M]. 2th. edition, 1961:69

《东方电气评论》征稿须知

《东方电气评论》是由中国东方电气集团有限公司、四川省动力工程学会联合主办的电站装备制造领域科技期刊，国内外公开发行双月刊，国内统一连续出版物号 CN51-1333/TM，国际标准连续出版物号 ISSN1001-9006。

《东方电气评论》综合介绍我国电站装备制造领域的科技研发成果及先进制造技术，主要栏目有基础研究、火力发电、核能发电、水力发电、风力发电、光伏发电、工程技术、项目管理等。

《东方电气评论》为学术性刊物，欢迎评论性文章，少量接受综述类文章。来稿必须未公开发表过，且创新性强、观点明确、数据可靠。文稿格式请参照《学术论文编写规则》(GB/T7713.2—2022)和 GB7714《文后参考文献著录规则》的较新版本；量和单位必须符合国家标准和国际标准。

稿件内容请勿涉及国家秘密和单位秘密，保密审查手续按作者所在单位的相关规定办理，必要时提供“不涉及保密，可以公开发表”的单位证明原件。投稿格式要求如下：

1、**投稿方式：**请使用电子文档投稿。电子文档的格式为 WPS 或 Word 文件。投稿时请提供通信作者或第一作者的电话号码、电子信箱和详细准确的邮送地址。

2、**论文内容结构包括：**论文题名（20 字内），作者姓名，作者单位（单位及部门名称、地址及邮编），摘要（200 字内），关键词（3~8 个），正文（图、表应在正文中明确引用位置出现）参考文献。

3、**英文项目：**题名、摘要、关键词、作者姓名及其单位与通信信息几部分，除中文外，须译成英文一并提供。

4、**插图与表格都应有图（表）序与图（表）题。**刊出后的图片均为灰度图片，请作者确保能准确反映需表达的全部信息，画面清晰，大小适宜。图中字符一般用 6 号宋体字，表格应做成三线表。

5、**文中符号：**外文字母、符号必须分清大小写、正斜体，上下角标，数码符号等其位置高低应区别明显，容易混淆的外文字母，请在第一次出现时注明文种或含义。

6、**论文作者署名**应遵守学术规范。

7、**作者简介：**包括姓名、出生年、性别、职称和职务、何时何地取得何校何专业学位（最高学历），曾获得过的重大成果或奖励，现在从事的专业工作。

8、**参考文献：**只列出已公开出版并在文中直接引用的主要文献，序号按文中出现的先后顺序编排。

9、**著作权声明：**本刊已被《中文科技期刊数据库（全文版）》《中国核心期刊（遴选）数据库》《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库收录，有关作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付，如作者不同意被收录，请在来稿时向本刊说明。

10、**版面费：**本刊未收取发表版面费。论文一经录用，编辑部酌付稿酬并赠送当期杂志每个作者 2 本。

11、**邮箱投稿：**dfdqpl@dongfang.com；投稿地址：成都市高新西区西芯大道 18 号，邮编：611731