DONGFANG ELECTRIC REVIEW

公开 ISSN 1001-9006
发行 CN 51-1333/TM

第38卷第3期 (总第151期) 国内邮发代号：62-187
出版日期:2024年5月25日 国 内 定 价：8.00 元

东方电气评论 第三十八卷 第三期 二〇二四年五月

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM

3

2024

第38卷 总第151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
05>
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

3
2024
第38卷第3期 总第151期
（双月刊，1987年创刊）

東方電氣評論

目 次

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*b*A4*88*zh*p￥8.00*750*16*2024-03

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：张媛
英文编辑：李宏
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

DONGFANG ELECTRIC REVIEW

3
2024
2024-5-25 Vol.38 No.3
(Bimonthly, since 1987)

CONTENTS

Sponsor: Dongfang Electric Corporation
Chief Editor: HU Xiukui
Vice Chief Editors: DONG Na, TANG Jian
Executive Editor: ZHANG Yuan
English Editor: LI Hong
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.)

重力热管技术研究与应用概述

任鹏飞[1] 杨楠[2]

1.中国东方电气集团有限公司，成都 611731；2. 华北电力大学，北京 102206

摘要：重力热管是一种高效的传热元件，因其结构简单、等温性良好、换热性能优异、不含有能动部件等特点，被广泛应用于各个领域。本文全面总结讨论了重力热管的传热机制，包括膜状冷凝和努塞尔理论、降膜蒸发和降膜沸腾等机理，并对相关的理论模型进行了讨论分析，给出了比较合适可靠的理论模型选择建议。此外还介绍了重力热管在工程领域的应用现状，指出了重力热管技术应用所面临的问题和发展方向。

关键词：重力热管；相变；降膜蒸发/沸腾；应用

中图分类号：TK172.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）03-0001-06

Overview of Two-phase Closed Thermosyphons Technology Research and Application

REN Pengfei[1], *YANG Nan*[2]

(1.Dongfang Electric Corporation,611731,Chengdu, China；2. North China Electric Power University, 102206, Beijing, China)

Abstract:Two-phase Closed Thermosyphons is a highly efficient heat exchange element, which was widely used in various fields due to its simple structure, good isothermal performance, excellent heat transfer performance, and no active components. The theoretical mechanisms of heat transfer in two-phase closed thermosyphons was comprehensively summarized and discussed, including film condensation and Nusselt theory, falling film evaporation, and falling film boiling. Relevant theoretical models are discussed and analyzed, and suitable and reliable suggestions for selecting theoretical models are provided. In addition, the current application status of two-phase closed thermosyphons in the engineering field was introduced, and the problems and development directions faced by the application of two-phase closed thermosyphons technology were pointed out.

Key words: two-phase closed thermosyphons; phase change; falling film evaporation/boiling; application

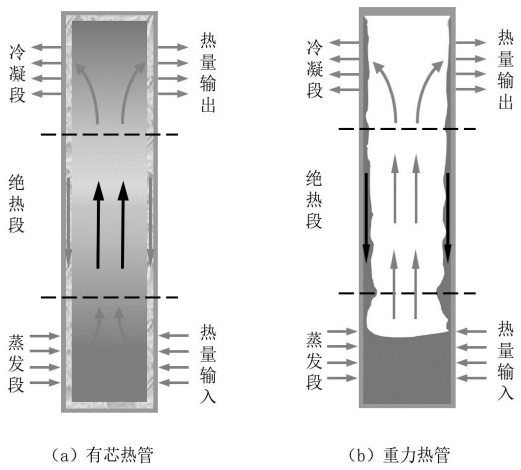
热管（Heat Pipe, HP）是一种通过工质相变潜热进行热量传递的换热元件，可以在很小的温度梯度下传递大量的热量，具有高可靠性、可重复性、寿命长、等温性优良等优点。[1]

热管一般由管壳、多孔吸液芯、端盖等组成，典型结构如图 1(a)所示。热管在轴向上划分为蒸发段、绝热段和冷凝段三个部分。其工作原理如下：当热量从蒸发段输入时，蒸发段的液体吸收热量温度上升，并在气液交界面发生相变变为蒸汽。蒸汽在压差的作用下向冷凝段高速流动，将热量带到冷凝段并导出，蒸汽冷凝为液体。液体在重力（重力热管）、毛细力（有芯热管）等驱动力作用下回流到蒸发段，并开始下一次工质循环。

重力热管又称两相闭式热虹吸管，其结构简单，没有吸液芯，其结构如图 1(b)所示。重力热管具有易于制造、工作状态稳定、维护方便等优点，在工程中得到了广泛的应用，是太阳能利用、暖通、制冷等领域最有效的技术之一。[2]

收稿日期：2023-12-21

作者简介：任鹏飞（1988－），男，2014 年毕业于中国科学院工程热物理研究所工程热物理专业，硕士研究生，工程师。现就职于中国东方电气集团有限公司，主要从事工程管理和应用类研究工作



（a）有芯热管　　（b）重力热管

图 1　有心热管和重力热管示意图

1　重力热管中的传热机制

当工质受热超过其饱和温度时，在工质内部和表面将发生剧烈的相变。相变分为蒸发和沸腾，在重力热管中，主要考虑池沸腾和降膜蒸发/沸腾。

外部输入热量通过蒸发段的内管壁传递给工质流体，在蒸发段底部液池内的液体开始蒸发。蒸汽在管道内向上流动到冷凝段，在冷凝段内管壁上发生膜状冷凝。由于液膜厚度较薄，液膜几乎不会对蒸汽腔内的蒸汽流动产生影响。

在低蒸汽流速的条件下，冷凝液在重力作用下向下流动，液膜的厚度随着向下流动不断增加。随着蒸汽流速的增加，液膜与蒸汽之间的相互作用越来越强，直到到达临界情况，这将导致传热极限，称为携带极限。为了更好的揭示重力热管的内部传热机理，图 2 给出了重力热管热阻传热分析图。

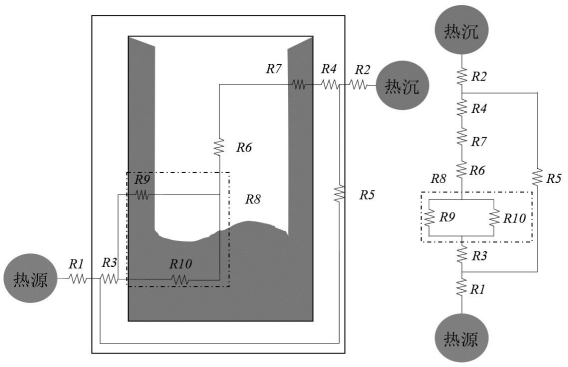


图 2　重力热管热阻

重力热管的传热量由式（1）给出：

$$q_{tot}=\Delta T/R_{hp} \quad (1)$$

其中ΔT是热源与散热器之间的温差；R_{hp}是热管的总热阻。可使用图中所示热阻法获得热管的总热阻：

$$R_{hp}=R1+R2+\left[\frac{1}{R5}+\frac{1}{(R3+R6+R7+R8+R4)}\right]^{-1} \quad (2)$$

各部分热阻值的计算表达式和含义如表 1 所示：

表 1　重力热管各部分热阻值

热阻	公式	含义
蒸发段/冷凝段外部热阻	$R1=1/(h_{o,e}A_{o,e})$ $R2=1/(h_{o,c}A_{o,c})$	h_o是外部换热系数 A_o是外部区域与蒸发段/冷凝段的接触面积
蒸发段/冷凝段热管壁径向热阻	$R3=ln(D_o/D)/(2\pi L_e k_w)$ $R4=ln(D_o/D)/(2\pi L_c k_w)$	D_o是热管外径；D是热管内径；L_e为蒸发段长度 k_w是热管壁有效导热系数；L_c为冷凝段长度
热管壁轴向热阻	$R5=(0.5L_e+L_a+0.5L_c)/(A_x k_w)$	A_x是热管壁横截面面积；L_a为绝热段长度
蒸汽热阻	$R6=T_v(P_{v,e}-P_{v,c})/\rho_v h_{fg} q$	T_v是蒸汽温度；P_v蒸汽压力；q热通量；ρ_v蒸汽密度；h_{fg}汽化潜热
冷凝热阻	$R7=1/\pi D h_c L_c$	h_c是冷凝换热系数；L是冷凝段长度
蒸发热阻	$R8=R9\times R10/(R9+R10)$	$R9$是降膜蒸发/沸腾热阻；$R10$是池沸腾热阻
降膜沸腾热阻	$R9=1/h_{fb,e}A_{fb,e}$	$h_{fb,e}$降膜沸腾换热系数；$A_{fb,e}$蒸发段降膜沸腾区域面积
池沸腾热阻	$R10=1/h_{pb,e}A_{pb,e}$	$h_{pb,e}$是池沸腾换热系数；$A_{pb,e}$蒸发段池沸腾区域面积

注：*a*:adiabatic, 绝热；*c*:cold, 冷凝；*e*:evaporate, 蒸发；*fb*: film boiling, 降膜沸腾；*pb*: pool boiling, 池沸腾；*o*:out, 外部；*v*:vapor, 蒸汽；*w*:wall, 管壁

2　冷凝传热

当蒸汽与低于蒸汽饱和温度的热管冷壁面接触时，就会发生冷凝，并释放相变潜热变成液态。在这个传热过程中，可将热管壁视为垂直平板，垂直平板上的冷凝传热可使用努塞尔膜状冷凝理论[3]

进行分析。

在冷凝段顶端开始冷凝时，逐渐形成向下流动的液膜，冷凝发生在气液交界面，所以液膜厚度随向下流动的距离而增加。常用的 Nusselt 层流膜状冷凝传热系数如式（3）：

$$h_{\mathrm{Nu}}=0.943\left\{\frac{\rho_{\mathrm{l}}\left(\rho_{\mathrm{l}}-\rho_{\mathrm{v}}\right)h_{\mathrm{fg}}gk_{\mathrm{l}}^{3}}{\mu_{\mathrm{l}}L_{\mathrm{c}}\left(T_{\mathrm{sat}}-T_{\mathrm{w}}\right)}\right\}^{1/4} \tag{3}$$

其中ρ_{l}是液体密度；g 是重力加速度；k_{l}是液体导热系数；μ_{l}是液体的动力粘度；T_{sat} 是液体饱和温度；T_{w} 是冷凝段壁面温度。

研究人员发现，实验中的冷凝传热系数比预测的要高 15 %~20 %。分析发现，当热管冷凝段长度很长时，液膜流动过程将由层流转变为湍流，因此观察到的冷凝传热系数提高 15 %~20 %。Rohsenow[4]等针对冷凝水潜在的过冷度或液膜的非线性温度分布，提出了对汽化潜热进行校正，修改了努塞尔系数，并用水的实验数据进行测试，证明了湍流的存在导致平均膜厚度降低，热阻减小。表 2 总结了文献中的膜状冷凝传热系数：

表 2　膜状冷凝传热系数

作者	时间	关联式
Nusselt	1916	$h_{\mathrm{Nu}}=0.943\left\{\frac{\rho_{\mathrm{l}}\left(\rho_{\mathrm{l}}-\rho_{\mathrm{v}}\right)h_{\mathrm{fg}}gk_{\mathrm{l}}^{3}}{\mu_{\mathrm{l}}L_{\mathrm{c}}\left(T_{\mathrm{sat}}-T_{\mathrm{w}}\right)}\right\}^{(1/4)}$
Rohsenow	1985	$h_{\mathrm{c}}=1.509h_{\mathrm{Nu}}(\frac{P_{\mathrm{v}}}{P_{\mathrm{crit}}})^{0.14}$
Hussein	2001	$h_{\mathrm{c}}=h_{\mathrm{Nu}}(\frac{L_{\mathrm{c}}}{d_{\mathrm{i}}})^{\frac{1}{4}(\cos(\beta))^{0.358}}\left[0.997-0.334\left(\cos\left(\beta\right)\right)^{0.108}\right]$
Hashimoto	2002	$h_{\mathrm{c}}=h_{\mathrm{Nu}}0.85Re_{\mathrm{f}}^{0.1}exp\left(-0.000\ 067\frac{\rho_{\mathrm{l}}}{\rho_{\mathrm{v}}}-0.6\right)$

Hussein 等[5]提出了在重力热管倾斜状态下冷凝段内部层流膜状冷凝传热的二维稳态理论分析解，传热系数与大范围倾角条件下的实验结果非常吻合。Hashimoto 等[6]针对重力热管的夹带效应进行了实验研究。当发生流体夹带时，冷凝传热值小于努塞尔理论计算值。他们提出在较低热通量和液膜厚度较小的情况下，夹带量随密度比（$\rho_{\mathrm{l}}/\rho_{\mathrm{v}}$）增加而增加。

3　蒸发传热

3.1 降膜蒸发

在热管充液率＜100 %的情况下，当降膜到达蒸发段时会直接与热管的热壁面接触。在这个阶段，热源只对流体的温度造成影响，对流体的流动状态几乎没有影响，液膜厚度仍随着向下流动而不断增加，并与向上流动的蒸汽相互作用。当液体处于过冷状态时，此时液体只升温不蒸发。当液体处于饱和状态，则在气 - 液交界面处开始蒸发。

在降膜蒸发中，传热系数通常以无量纲的形式给出：

$$h^{*}=\frac{hl_{0}}{k_{\mathrm{l}}} \tag{4}$$

其中 h 是液膜传热系数；l_0 是黏性特征尺度。

$$l_{0}=\left(\frac{\mu_{\mathrm{l}}^{2}}{\rho_{\mathrm{l}}^{2}g}\right)^{1/3} \tag{5}$$

根据 Nusselt 层流模型和降膜厚度关系式，层流降膜的传热系数可写成液体热导率与降膜厚度比值的形式：

$$h=\frac{k_{\mathrm{l}}}{\delta}=\left(\frac{4\rho_{\mathrm{l}}^{2}gk_{\mathrm{l}}^{3}}{3\mu_{\mathrm{l}}^{2}}\right)^{1/3}Re_{\mathrm{f}}^{1/3} \tag{6}$$

将式（5）（6）带入式（4）中：

$$h^{*}=1.100\ 6Re_{\mathrm{f}}^{-1/3} \tag{7}$$

基于以上研究成果，其他研究人员也进行了相关的研究，成果如表 3 所示：

表 3　降膜蒸发无量纲传热系数

作者	时间	适用范围	关联式
Nusselt	1916	$Re_f \leqslant 20\text{-}30$	$h^* = \left(\frac{4}{3}\right)^{1/3} Re_f^{-1/3}$
Chun	1971	$Re_f \leqslant 2.44Ka^{-1/11}$	$h^* = 0.606\left(\frac{Re_f}{4}\right)^{-1/3}$
		$2.44Ka^{-1/11} \leqslant Re_f \leqslant 5\,800Pr_l^{-1.06}$	$h^* = 0.606\left(\frac{Re_f}{4}\right)^{-0.22}$
		$5\,800Pr_l^{-1.06} \leqslant Re_f$	$h^* = 3.8\times10^{-3} Re_f^{0.4} Pr_l^{0.65}$
Mudawwar	1986	$2\,000 \leqslant Re_f \leqslant 20\,000$	$h^* = 4.2\times10^{-2} Re_f^{0.17} Pr_l^{0.53}$
Shmerler	1988	$4\,990 \leqslant Re_f \leqslant 37\,620$ $1.75 \leqslant Pr_l \leqslant 5.42$	$h^* = 3.8\times10^{-3} Re_f^{0.35} Pr_l^{0.95}$

对于重力热管内的降膜蒸发，可使用上表所述的关联式计算无量纲传热系数。同时应当注意到 Nusselt 理论仅适用于严格的层流流动，一旦流动状态发生变化，实际传热系数将偏离预估。Chun[7]的关联式适用于较为广泛的雷诺数范围，但并不适用于 $Re_f > 10\,000$ 的情况。对于高湍流液膜（$Re_f > 10\,000$），可优先使用 Mudawwar[8]和 Shmerler[9]的关联式。

3.2 降膜沸腾

在热管充液率＜100 %的条件下，液膜直接与热壁面接触。当液膜处于饱和状态时，气 - 液界面处开始蒸发，如果蒸发段的热通量比较高，则液膜内可能会发生沸腾。

在降膜沸腾中，气泡首先通过异质成核在热壁面形成，热管壁表面微空腔中的气泡核开始在空腔内生长。为了估算气泡从空腔中生长所需的壁面过热度，可使用式（8）计算：

$$T_w - T_{sat} = \frac{2T_{sat}^2 R_{in}\sigma}{r_{cav}P} \tag{8}$$

其中 R_{in} 是热管内壁半径；σ是液体表面张力；$r_{cav}=9.906\times10^{-6}$m 是空腔半径；$P$ 为内部压力。要使气泡持续存在，气泡半径应大于气泡临界半径：

$$R_{crit}=2\sigma T_{sat}\nu_v/(h_{fg}\Delta T) \tag{9}$$

其中，ν_v 是蒸汽的运动粘度（$m^2\cdot s^{-1}$）。当气泡直径大于液膜本身厚度时会从其成核位点分离。

在降膜沸腾中，由于降膜的作用气泡离开热表面向下运动时仍会继续生长。降膜沸腾中的气泡形成和脱离可分为三个阶段：等待阶段（热边界层重整时气泡没有明显增长），解除束缚阶段（直到气泡脱离）和自由生长阶段（气泡在向下游流动时不断增长）。降膜中气泡的生长模型如图 3 所示。

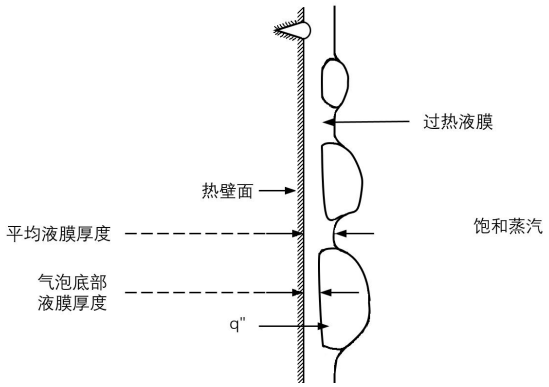


图 3　降膜沸腾气泡生长模型

由于气泡底部液膜厚度低于平均膜厚度，热阻减小，传热效果增强，气泡生长变快。气泡的下降速度略高于气泡底部液膜的速度，因此气泡底部不断接触到新的过热液体，这也增强了气泡的生长。在气泡初始增长阶段后的短时间内，气泡的半径与时间的平方根成正比。气泡的主要生长发生在脱离热表面后，气泡在降膜的夹带下不断生长直到破裂。气泡破裂产生的小液滴会撞击相邻的气泡，从而产生连锁反应。随着热通量的增加，气泡形成速率增加，破裂前气泡直径减小，气泡破裂前行进的距离

缩短。如果连锁反应过于剧烈，则可能出现蒸汽夹带液滴甚至击穿降膜的情况。

Fujita[10]等研究表明在较低的热通量下，液膜中的气泡形成受限，降膜沸腾传热系数接近降膜蒸发，传热系数取决于降膜内的雷诺数。在较高流速的条件下，剧烈沸腾和气泡破裂使得降膜沸腾与降膜雷诺数不再相关。根据不同的文献研究建议使用下表4的关联式计算降膜沸腾的传热系数。

表4　降膜沸腾无量纲传热系数

作者	年份	适用范围（$0.3\times10^5\leqslant q\leqslant0.7\times10^5\,W\cdot m^{-2}$）	关联式
Kopchikov	1969	雷诺数不相关、高热通量	$h^*=0.1\left(\frac{k_l h_{fg}\rho_v}{\sigma T_{sat}}q\right)\frac{1}{k_l}\left(\frac{\mu_l^2}{\rho_l^2 g}\right)^{1/3}$
Fujita	1978	$1\,000\leqslant Re_f\leqslant3\,200$	$h^*=0.90Re_f^{-0.22}$
		$3\,200\leqslant Re_f$	$h^*=6\times10^{-3}Re_f^{0.4}$
		雷诺数不相关、$2\times10^5\,W\cdot m^{-2}\leqslant q$	$h^*=1.24q^{0.741}\frac{1}{k_l}\left(\frac{\mu_l^2}{\rho_l^2 g}\right)^{\frac{1}{3}}$

对于低热通量，当沸腾比较温和的时候，传热仍取决于液膜的雷诺数，可以使用降膜蒸发来接近降膜沸腾，Fujita提出的改进降膜蒸发传热系数可以取得较好的预估结果。对于沸腾比较剧烈且传热不再依赖雷诺数的高热通量，建议使用Fujita的计算模型。Kopchikov[11]的模型可以准确的描述降膜沸腾，但在更大应用范围内仍需进一步验证。

4　重力热管的应用

重力热管因其结构简单、导热性高、等温性良好等特点被广泛应用于工程领域的各个行业。

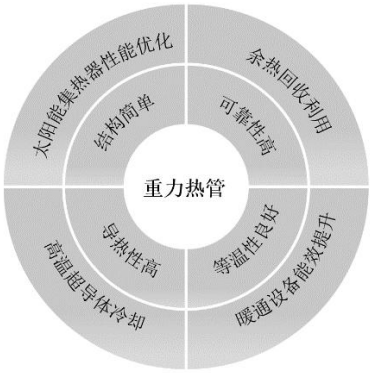


图4　重力热管特点及应用

在太阳能应用领域，重力热管被用来改善太阳能集热器的温度分布均匀性，提高系统装置的运行效率。Wei等[12]采用大型集成重力热管代替单独并排重力热管来改进太阳能集热器的结构。使用乙醇作为工作流体，充液率为50 %。实验结果表明，集热器的最高效率约为66 %。Hussein等[13]通过实验研究了热管横截面几何形状和充液率对热管工作性能的影响。结果表明，在低填充率下，椭圆形横截面比圆形横截面具有更好的性能。Lee等[14]制造了一个用于冷却高温超导体的重力热管，研究了充液率对其性能的影响。在输入热通量较高的情况下，当充液率从60 %增加到80 %时，蒸发段温度升高。

在暖通、制冷领域中，空调系统用于调节建筑物内部的湿度和温度，调节湿度对于维持建筑物内人员的健康状态至关重要。热管被动冷却技术可有效降低湿热条件下的热负荷。Meyer等[15]对小型干燥器的重力热管热交换器进行了试验研究。试验发现安装重力热管后，干燥器的总功耗降低了约30 %。Byrne等[16]提出了一种可同时加热和制冷住宅建筑的重力热管空气源热泵。该热泵使用R-407c作为工质，空气作为加热或制冷模式的平衡源。研究结果显示，与标准可逆热泵相比，该热泵的年性能提高了17 %。Firouzfar等[17]使用甲醇-银纳米流体作为工质，对重力热管换热器进行了实验研究。实验发现使用该系统的空调可以节省约9~32 %的冷却费用，以及18~100 %的再热费用。Meena等[18]研究了在不同温度范围内（60~80 ℃），使用水和水-Cu纳米流体（50 %充液率）作为工质的重力热管换热器。他们发现，使用纳米流体的系统效率在80 ℃时的最大值可达40 %（比水高10 %）。

5　结语

本文介绍了重力热管的运行原理，从热阻法的角度介绍了热管的主要传热机制。为了准确对热管的传热机制进行分析，介绍了冷凝和降膜蒸发/沸腾

相关的理论模型，并对降膜传热的理论模型进行了介绍，全面解释和讨论了膜状冷凝、努塞尔理论、降膜蒸发、汽泡生长模型、降膜沸腾等机制。最后对重力热管在太阳能利用、暖通、制冷等领域的应用进行了介绍。

重力热管的应用与研究仍然存在一些挑战。如最佳充液率的选择，充液率对热管性能的影响机理仍不明确。在高充液率下，需要更多的实验数据和数值分析来研究重力热管的最佳充液率。对于低充液率，仍然需要进行实验研究以提高对重力热管工作极限的理论认识。其他问题包括不凝气体对热管传热性能的影响规律仍然没有研究清楚，放置倾角对热管的影响仍然众说纷纭，纳米流体的使用提高了重力热管的性能，但传热增强的机理仍不清楚。

参考文献：

[1] 屠传经，谢国兴. 热管发展简史[J]. 能源工程, 1984(4):60-61

[2] 庄骏，张红. 热管技术及其工程应用[M]. 北京：化学工业出版社, 2000:5-13

[3] Nusselt W. The condensation of steam on cooled surfaces[J]. Z. Ver. Dtsch. Ing, 60(1916) :541-546

[4] Rohsenow W M, Harnett J P, Ganic E N. Handbook of heat transfer fundamentals[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill; 1985

[5] Hussein HMS, Mohamad MA, El-Asfouri AS. Theoretical analysis of laminarfilm condensation heat transfer inside inclined wickless heat pipes flat-plate solar collector[J]. Renew Energy 2001, 23:525-535

[6] Hashimoto H, Kaminaga F. Heat transfer characteristics in a condenser of closed two-phase thermosyphon: effect of entrainment on heat transfer deterioration[J]. Heat Transf-Asian Res, 2002, 31(3): 212-225

[7] Chun K R , Seban R A .Heat Transfer to Evaporating Liquid Films[J].Journal of Heat Transfer, 1971, 93(4):391-396

[8] Mudawwar I A , El-Masri M A .Momentum and heat transfer across freely-falling turbulent liquid films[J].International Journal of Multiphase Flow, 1986, 12(5):771-790

[9] Shmerler J A , Mudawwar I .Local heat transfer coefficient in wavy free-falling turbulent liquid films undergoing uniform sensible heating[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1988, 31(1):67-77

[10] Fujita T, Ueda T. Heat transfer to falling liquid films and film breakdown — II: Saturated liquid films with nucleate boiling[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1978, 21 (2): 109-118

[11] Kopchikov I A , Voronin G I , Kolach T A ,et al.Liquid boiling in a thin film[J].International Journal of Heat & Mass Transfer, 1969, 12(7):791-796

[12] Wei L , Yuan D , Tang D ,et al. A study on a flat-plate type of solar heat collector with an integrated heat pipe[J].Solar Energy, 2013, 97:19-25

[13] Hussein H M S , El-Ghetany H H , Nada S A .Performance of wickless heat pipe flat plate solar collectors having different pipes cross sections geometries and filling ratios[J].Energy Conversion & Management, 2006, 47(11/12):1539-1549

[14] Lee J , Ko J , Kim Y ,et al.Experimental study on the double-evaporator thermosiphon for cooling HTS (high temperature superconductor) system[J].Cryogenics, 2009, 49(8): 390-397

[15] Meyer A, Dobson R T R T .A heat pipe heat recovery heat exchanger for a mini-drier[J].Journal of Energy in Southern Africa, 2017, 17(1):50-57

[16] Byrne P, Miriel J , Lenat Y .Experimental study of an air-source heat pump for simultaneous heating and cooling-Part 2: Dynamic behaviour and two-phase thermosiphon defrosting technique[J]. Applied Energy, 2011, 88(9):3072-3078

[17] Firouzfar E, Soltanieh M , Noie S H ,et al.Energy saving in HVAC systems using nanofluid[J].Applied Thermal Engineering, 2011, 31(8-9):1543-1545

[18] Meena P, Tammasaeng P , Kanphirom J ,et al.Enhancement of the performance heat transfer of a thermosyphon with fin and without fin heat exchangers using Cu-nanofluid as working fluids[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 23(4):331-340

水冷质子交换膜燃料电池控温系统建模与仿真分析

余漆[1,2] 唐刚[1,2] 练勇[1,2] 廖柯伊[1,2]

1.东方电气（成都）氢燃料电池科技有限公司，成都 611731；2.长寿命燃料电池四川省重点实验室，成都 611731

摘要：本文对水冷质子交换膜燃料电池进行了分阶段控温建模。在冷液-热液混合控温阶段，通过反馈线性化方法解决了系统的非线性特性。仿真结果表明，采用反馈线性化方法后，再结合 PID 控制就能够实现良好的控温效果。在散热风扇控温阶段，采用基于 Lyapunov 稳定性理论的模型参考自适应控制设计方法，设计了模型跟随控制器及其对应的自适应控制律。仿真结果表明，在燃料电池系统载荷变化、水泵转速变化和工作环境温度变化等情况下，仍可实现控温目标的一致跟随。

关键词：质子交换膜燃料电池；温度控制；反馈线性化；Lyapunov 稳定性理论；模型参考自适应控制

中图分类号：TM911.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）03-0007-08

Modeling and Simulation Analysis of a Water-cooled Proton Exchange Membrane Fuel Cell Temperature Control System

YU Qi[1, 2], *TANG Gang*[1,2], *LIAN Yong*[1,2], *LIAO Keyi*[1,2]

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

2. Long-Life Fuel Cell Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

Abstract: This article presents a staged temperature control modeling of water-cooled proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). In the temperature control stage of cold coolant and hot coolant mixture, the nonlinear characteristics of the system were solved through feedback linearization control method. The simulation results show that using feedback linearization method combined with PID control can achieve good temperature control effect. In the temperature control stage of the cooling fan, a model reference adaptive control design method based on Lyapunov stability theory was adopted to design a model following controller and its corresponding adaptive control law. The simulation results indicate that consistent tracking of control objectives can still be achieved under conditions such as changes in fuel cell system load, pump speed, and working environment temperature.

Key words: PEMFC; temperature control; feedback linearization; lyapunov stability theory; MRAC

质子交换膜燃料电池（以下简称燃料电池）系统是将燃料（氢气）的化学能直接转换为电能和热能的装置，不涉及氢气和氧气的燃烧过程，能量转换效率高，清洁无污染，在交通、工业和发电等领域获得了广泛的示范应用。燃料电池系统的工作温度会影响电堆内的湿度，电堆的湿度变化又会引起催化剂活性、膜电导率和扩散系数等的变化，进而影响电堆的性能、稳定性和寿命等[1]，因此，燃料电池系统的温度控制非常重要。对于水冷燃料电池系统，可使用板式换热器并通过调节外部冷却水流量来控制电堆运行温度，也可使用散热器并通过控制散热风扇转速、电子节温器开度来控制电堆温度。对于后者，散热器又存在迎风布置和非迎风布置两种情况[2-5]。在迎风布置时，车辆运行速度结合

收稿日期：2023-10-18

基金项目：国家重点研发计划：《燃料电池系统集成技术及热电联供系统开发》；课题编号：2021YFB4001704。

作者简介：余漆（1991－），男，2017 年毕业于哈尔滨工业大学控制科学与工程专业，工学硕士，工程师。现在东方电气（成都）氢燃料电池有限公司主要从事控制系统研发工作。

散热风扇的运行可使与散热器对流换热的空气流量达到饱和[4]，此时散热器出口冷却液温度几乎等于环境温度，故可以采用节温器开度闭环控制与散热风扇开环控制（几个档位）相结合的方式进行控温。若在散热器非迎风布置时仍采用上述控温方式，显然需要散热风扇高速运行，由此造成能耗过高。本文将对散热器非迎风布置的燃料电池系统进行控温建模、算法设计和仿真研究。

对于散热器非迎风布置的水冷燃料电池，对控温而言，是一个载荷时变、惯性大、参数不确定且多参数相互耦合变化的系统。一方面其散热需求受燃料电池系统发电功率（加减载）的直接影响，另一方面系统散热能力受环境温度、水泵转速、散热器内冷却液流量、换热空气流量等影响[6]。采用线性定常系统控制算法如传统 PID 等，难以取得好的控温效果，例如会出现响应慢、波动大、散热耗能高等现象。为此，古靖等[2]设计了基于预测的智能 PID 控制算法，采用简化的热管理子系统模型预测电堆温度变化趋势并进行提前控制，减小了超调量，取得了较好的控制效果（±0.5℃）。Yasemin Saygili 等[7]基于时间加权误差绝对值积分（IATE）最小准则，采用一个开/关和标准的 PID 控制器，在可接受的温度跟踪误差内，实现了最小的寄生损耗。李文浩等[8] 提出了基于电堆功率、电堆进出入口冷却液温差、冷却液流量等多参数跟随的温度控制方案，有效的降低了燃料电池系统动态加减载过程中电堆温度波动、提高了系统的响应速度。Huang 等[9]在对燃料电池温度控制系统进行建模的基础上，设计了一种自适应控制器，并采用 Barrier-Lyapunov 理论证明了系统在约束条件下的稳定性。赵洪波等[10]采用神经网络自抗扰控制方法实现了燃料电池工作温度的良好的控制，减小了超调量和调节时间。对于燃料电池温度控制系统，基于不同的需求或目标，上述研究人员采用了不同的建模和控制算法，或实现了超调量减小、响应速度提高，或实现了寄生功耗降低等。但燃料电池系统在不同的工作环境下，其温度控制效果一致性的研究少。此外，除极少数专利[11-12]外，鲜有文献涉及在冷液-热液混合阶段下（定义见本文章节 1）燃料电池的温度控制。

本文建立了燃料电池系统的分阶段控温模型。对冷液-热液混合阶段的建模和控制算法设计解决了系统的非线性特性，对散热风扇控温阶段的建模和控制算法设计解决了多参量时变对控温的影响，保证各参数变化下控温效果的一致性。

1 控温系统建模

水冷燃料电池热管理系统主要包括 PTC 加热器、球阀型电子节温器（以下简称节温器）、冷却水泵、散热器及其风扇、电堆、管路及温度传感器等，如图 1 所示。

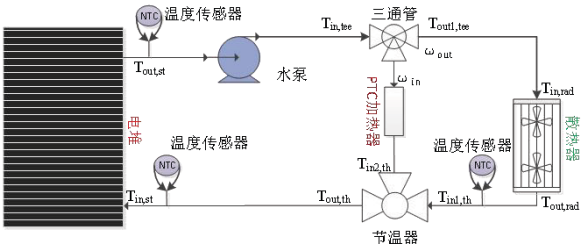


图 1 燃料电池热管理系统组成示意图

在散热器非迎风布置时，图 1 所示的燃料电池系统运行大致可以分为三个阶段。在第一阶段，燃料电池系统冷态下刚刚启动，所有冷却液温度等于环境温度，为了快速升温需将节温器调节至小循环（即冷却液流经 PTC 而不流经散热器），通过燃料电池运行时的废热和 PTC 加热器（可选）共同加热小循环流路的冷却液，直至冷却液升温到建议运行温度附近，该阶段称为热机阶段。在热机阶段结束后，进入第二阶段，此时关闭 PTC 加热，然后控制节温器开度，局部打开大循环流路（冷却液经散热器），此时散热器及大循环管路的冷却液温度近似于环境温度。随着节温器的逐步打开和燃料电池的继续运行，一方面大循环流路的低温冷却液与小循环流路的高温冷却液相互混合，同时伴随着燃料电池的废热对冷却液持续加热。这一阶段通过调节节温器的开度进行控温，此时可称为冷液-热液混合阶段。随着继续运行，伴随着燃料电池的加热，大小循环流路的冷却液温度基本相等，无法再通过控制节温器开度来控温，此后一方面需将节温器调至完全大循环（伴随着小循环几乎全部关闭），另一方面需通过运行散热风扇来控温，此时即为第三阶段，称为散热风扇控温阶段。由于第一阶段温度控制简单，本文对燃料电池的控温建模、算法设计与仿真分析着力于第二阶段和第三阶段。

1.1 冷液-热液混合

忽略冷却液在管路中的散热和冷却液流经三通管、节温器和散热器的时间，并假设散热器位于三通管和节温器的中间位置，冷却液通过节温器后完全混合均匀，则有

$$\begin{cases} T_{\mathrm{in,st}}(t)=T_{\mathrm{out,th}}(t-t_3) \\ T_{\mathrm{out,th}}(t)=\dfrac{T_{\mathrm{in2,th}}(t)\omega_{\mathrm{in}}(t)+T_{\mathrm{in1,th}}(t)\omega_{\mathrm{out}}(t)}{\omega_{\mathrm{in}}(t)+\omega_{\mathrm{out}}(t)} \\ T_{\mathrm{in2,th}}(t)=T_{\mathrm{out2,tee}}(t-t_2)=T_{\mathrm{in,tee}}(t-t_2) \\ T_{\mathrm{in1,th}}(t)=T_{\mathrm{out,rad}}(t-\dfrac{t_2}{2}) \\ T_{\mathrm{in,rad}}(t)=T_{\mathrm{out1,tee}}(t-\dfrac{t_2}{2})=T_{\mathrm{in,tee}}(t-\dfrac{t_2}{2}) \\ T_{\mathrm{in,tee}}(t)=T_{\mathrm{out,st}}(t-t_1) \end{cases} \tag{1}$$

式（1）中 $T_{\mathrm{in,st}}$、$T_{\mathrm{out,st}}$、$T_{\mathrm{in,rad}}$，$T_{\mathrm{out,rad}}$ 分别表示电堆入口、电堆出口、散热器入口，散热器出口的冷却液温度；$T_{\mathrm{out,th}}$、$T_{\mathrm{in2,th}}$，$T_{\mathrm{in1,th}}$ 分别表示节温器出口、入口 2（小循环，经 PTC），入口 1（大循环，经散热器）的冷却液温度；$T_{\mathrm{in,tee}}$、$T_{\mathrm{out2,tee}}$，$T_{\mathrm{out1,tee}}$ 分别表示三通管入口、出口 2（小循环，经 PTC）、出口 1（大循环，经散热器）的冷却液温度；ω_{out}，ω_{in} 分别表示大小循环冷却液流量大小；t_1 表示冷却液从电堆出口流到三通管入口的时间；t_2 表示冷却液从三通管出口流动到节温器入口的时间；t_3 表示冷却液从节温器出口流到电堆入口的时间

1.2 大循环冷却液温升

在燃料电池大小循环流路的冷却液混合阶段，随着燃料电池的运行，大循环冷却液的温度会逐渐上升。假设在大循环散热器出口处，经三通管流入大循环的冷却液与大循环管路中所有的冷却液已经混合均匀，则在Δt 时间内，由热量守恒有

$$\begin{aligned} &T_{\mathrm{out1,tee}}(t-\Delta t)\omega_{\mathrm{out}}(t)\Delta t c_{\mathrm{p,c}}-T_{\mathrm{out,rad}}(t-\Delta t)\omega_{\mathrm{out}}(t)\Delta t c_{\mathrm{p,c}} \\ &=[T_{\mathrm{out,rad}}(t)-T_{\mathrm{out,rad}}(t)(t-\Delta t)]\cdot M_{\mathrm{c}}c_{\mathrm{p,c}} \end{aligned} \tag{2}$$

式（2）中，$c_{\mathrm{p,c}}$ 为冷却液比热容；M_{c} 为大循环管路（三通管出口 1 到节温器入口 1）中冷却液的质量。结合式（1），并令Δt 趋于 0 有

$$\dot{T}_{\mathrm{out,rad}}(t)=\frac{(T_{\mathrm{out,st}}(t-t_1)-T_{\mathrm{out,rad}}(t))\omega_{\mathrm{out}}(t)}{M_{\mathrm{c}}} \tag{3}$$

1.3 散热器的换热

由热力学相关定理可知，热能流过物体的速度与物体两端的温差成正比，与热阻成反比，即

$$q=\frac{1}{R}\left(T_1-T_2\right) \tag{4}$$

式（4）中，q 是热能流速，R 为热阻。

热能流速对物体温度的影响为

$$\dot{T}=\frac{1}{C}q \tag{5}$$

式（5）中，C 为热容。

对于散热器，流入换热器的净热流速，就是由冷却液流入换热器的热流速与流出换热器的空气获得的热流量之差，由式（4）和式（5）可得散热器中冷却液温度的变化为

$$\begin{aligned} &C_{\mathrm{c}}^{\mathrm{rad}}\dot{T}_{\mathrm{out,rad}}(t)=\omega_{\mathrm{out}}(t)c_{\mathrm{p,c}}\left(T_{\mathrm{in,rad}}(t)-T_{\mathrm{out,rad}}(t)\right) \\ &-\frac{1}{R(t)}\left(T_{\mathrm{out,rad}}(t)-T_{\mathrm{out,air}}(t)\right) \end{aligned} \tag{6}$$

式（6）中，$\omega_{\mathrm{out}}(t)$表示流经散热器的冷却液流量，由于此时节温器已完全调至大循环，显然此时 $\omega_{\mathrm{out}}(t)=\omega_{\mathrm{c}}(t)$。$C_{\mathrm{c}}^{\mathrm{rad}}$表示在散热器中的冷却液的热容，$R(t)$表示冷却液到空气的热阻，$T_{\mathrm{out,air}}(t)$表示散热器出口空气温度。此处我们用 $T_{\mathrm{out,rad}}(t)$和 $T_{\mathrm{out,air}}(t)$分别代替了散热器中冷却液和空气的温度空间分布。

同样的，流过换热器的空气温度变化为

$$\begin{aligned} &C_{\mathrm{air}}^{\mathrm{rad}}\dot{T}_{\mathrm{out,air}}(t)=\omega_{\mathrm{air}}(t)c_{\mathrm{p,air}}\left(T_{\mathrm{atm}}(t)-T_{\mathrm{out,air}}(t)\right) \\ &+\frac{1}{R(t)}\left(T_{\mathrm{out,rad}}(t)-T_{\mathrm{out,air}}(t)\right) \end{aligned} \tag{7}$$

1.4 电堆热交换

由式（5）可知，在进行热交换的电堆，其温度的变化可以表示为

$$C_{\mathrm{st}}\dot{T}_{\mathrm{st}}(t)=q_{\mathrm{heat}}^{\mathrm{st\_react}}(t)-q_{\mathrm{heat}}^{\mathrm{st\_cov}}(t) \tag{8}$$

式（8）中，C_{st} 为电堆的热容，$q_{\mathrm{heat}}^{\mathrm{st\_react}}(t)$ 和 $q_{\mathrm{heat}}^{\mathrm{st\_cov}}(t)$ 分别为电堆产热功率和散热功率（热能流速）。类似的，电堆出口冷却液温度为

$$C_{\mathrm{c}}^{\mathrm{st}}\dot{T}_{\mathrm{out,st}}(t)=q_{\mathrm{heat}}^{\mathrm{cool}}(t)-\omega_{\mathrm{c}}(t)c_{\mathrm{p,c}}\left(T_{\mathrm{out,st}}(t)-T_{\mathrm{in,st}}(t)\right) \tag{9}$$

式（9）中，$C_{\mathrm{c}}^{\mathrm{st}}$ 为电堆内冷却液的热容，$\omega_{\mathrm{c}}(t)$ 表示流过电流的冷却液流量大小，$q_{\mathrm{heat}}^{\mathrm{cool}}(t)$ 表示流过电流的冷却液流量大小，$q_{\mathrm{heat}}^{\mathrm{cool}}(t)$表示电堆处冷却液的散热功率。

电堆产生的热功率 $q_{\mathrm{heat}}^{\mathrm{st\_react}}(t)$ 等于电堆发生电化学反应产生的废热功率，电堆发电过程中产生的水经过冷却液冷却之后几乎全部为液态水，则电堆发电过程中产生的热功率可以近似表示为

$$q_{\mathrm{heat}}^{\mathrm{st\_react}}(t)=N_{\mathrm{cell}}I_{\mathrm{st}}(t)[1.25-V_{\mathrm{st}}(t)/N_{\mathrm{cell}}] \tag{10}$$

式（10）中，$V_{st}(t)$为电堆输出电压；$I_{st}(t)$为电堆输出电流；N_{cell}为电堆单电池节数，1.25 为燃料电池电化学反应物为液态水时的理论单电池电压。

电堆散热功率包含冷却液带走的热功率、电堆与其结构件间的热传导及自然对流的散热功率和电堆向空气热辐射的散热功率。由于冷却水带走的热功率远大于热传导和热辐射，故后两者可忽略，可认为电堆散热功率等于冷却液散热功率，即$q_{heat}^{st_cov}(t)=q_{heat}^{cool}(t)$。由于电堆内部的温度不方便测量，我们用电堆冷却液出口的温度近似电堆的温度[2]，由于燃料电池系统工作时，电堆温度相对恒定，故可以假设$q_{heat}^{st_react}(t)=q_{heat}^{st_cov}(t)$，则式（9）可以写为

$$C_c^{st}\dot{T}_{out,st}(t)=q_{heat}^{st\_react}(t)-\omega_c(t)c_{p,c}\left(T_{out,st}(t)-T_{in,st}(t)\right) \tag{11}$$

1.5 冷液-热液混合阶段的控温模型

对于此阶段，为简化模型，令 $u_1(t)=\omega_{out}(t)/\omega_c(t)$，$a(t)=\omega_c(t)/M_c$，$\beta(t)=C_{st}/(\omega_c(t)c_{p,c})$，并取 $x_1(t)=T_{out,rad}(t)$，$x_2(t)=T_{out,st}(t)$，$y(t)=x_2(t)$，则根据 1.1 节、1.2 节和 1.4 节的建模，由式（1）、式（3）和式（11）有

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1(t)\\ \dot{x}_2(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{q_{heat}^{st\_react}(t)}{C_{st}}+\dfrac{1}{\beta(t)}\left[x_2(t\text{-}t_1\text{-}t_2\text{-}t_3)-x_2(t)\right]\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\alpha(t)[x_2(t-t_1)-x_1(t)]\\ -\dfrac{1}{\beta(t)}[x_2(t\text{-}t_1\text{-}t_2\text{-}t_3)-x_1(t\text{-}\dfrac{t_2}{2}\text{-}t_3)]\end{bmatrix}u_1(t) \tag{12}$$

1.6 散热风扇控温阶段

对于散热风扇控温阶段，由于C_{air}^{rad}相对于C_c^{rad}很小，则忽略在散热器中空气温度变化引起的热量变化，并令$\Delta_{air}(t)=T_{out,air}(t)-T_{atm}(t)$，则根据式（7）有

$$T_{out,air}(t)=-R(t)\omega_{air}(t)c_{p,air}\Delta_{air}(t)+T_{out,rad}(t) \tag{13}$$

由于电堆是一个大惯性系统，故忽略管道传输延时，即令 $T_{in,rad}(t)=T_{out,st}(t)$，$T_{in,st}(t)=T_{out,rad}(t)$。将式（13）代入式（6），并对式（6）和式（11）分别取拉式变换，将变换后的式（6）代入变换后的式（11）得

$$s\left[C_c^{st}C_c^{rad}s+\omega_c c_{p,c}\left(C_c^{st}+C_c^{rad}\right)\right]T_{st,out}(s)=\left(C_c^{rad}s+\omega_c c_{p,c}\right)q_{heat}^{st\_reat}-\omega_c c_{p,c}c_{p,air}\Delta_{air}w_{air}(s) \tag{14}$$

2 控制算法设计

2.1 冷液-热液混合阶段的控温算法设计

由冷液-热液混合阶段方程式（12）可知，在此阶段系统的动态特性是非线性的。根据系统动态方程式（12）的特点，我们采用反馈线性化方法进行控制算法设计

2.1.1 反馈线性化方法及其标准型

反馈线性化的核心思想是通过反馈（类似坐标变换）将非线性系统转换为一个（部分或全部）线性系统，从而可以使用线性系统的算法设计方法。反馈线性化方法可以应用于被称为相伴形式或者能控标准型非线性系统中。

定义 1：如果一个非线性系统的动态过程可以表示为

$$x^{(n)}=f(x)+b(x)u \tag{15}$$

式（15）中，u 是标量控制输入，x 是控制输出。$\boldsymbol{x}=\left[x,\dot{x},\ldots,x^{(n-1)}\right]^T$为状态向量，$f(x)$和 $b(x)$为状态的非线性函数，则称此非线性系统有相伴形式或者称此非线性系统为能控标准型非线性系统[13]。

对于可以表示为能控标准型的非线性系统，可以通过控制输入变换（假设 b 非零）

$$u=\frac{1}{b}[v-f] \tag{16}$$

消去非线性部分，得到一个简单的单输入-单输出的线性系统

$$x^{(n)}=v$$

由此可以采用各种线性系统的设计方法。

2.1.2 基于反馈线性化方法设计控制律

观察式（12）的形式可以发现，其形式虽与能控标准型非线性系统有差别，但很类似。我们令

$$u_1(t)=\frac{\dfrac{q_{heat}^{st\_react}(t)}{C_{st}}-v(t)}{\dfrac{1}{\beta(t)}[x_2(t\text{-}t_1\text{-}t_2\text{-}t_3)-x_1(t\text{-}\dfrac{t_2}{2}\text{-}t_3)]} \tag{17}$$

则

$$\dot{x}_2(t)=v+\frac{1}{\beta(t)}\left[x_2(t\text{-}t_1\text{-}t_2\text{-}t_3)-x_2(t)\right] \tag{18}$$

由冷液-热液混合阶段的定义可知，在此阶段$x_2(t\text{-}t_1\text{-}t_2\text{-}t_3)-x_1(t\text{-}\frac{t_2}{2}\text{-}t_3)>0$。由于控制目标为电堆出口冷却液温度，故此处不再关注 $x_1(t)$的变化情况，此外，若在此阶段控制目标是保持电堆出口冷却液温度稳定，则在时间 $t_1+t_2+t_3$ 段内电堆出口冷却液温度变化不大，可认为 $x_2(t\text{-}t_1\text{-}t_2\text{-}t_3)\approx x_2(t)$，则式（18）表达式可写为

$$\dot{x}_2(t) = v \tag{19}$$

显然我们得到了类似能控标准型非线性系统反馈线性化之后的线性系统。假设控制误差表示为

$$x_{2e}(t) = x_{2d}(t) - x_2(t) \tag{20}$$

式（20）中，$x_{2d}(t)$表示控制目标温度，假设控制目标温度保持恒定，则

$$\dot{x}_{2e}(t) = -\dot{x}_2(t) \tag{21}$$

结合式（19）和式（20）有

$$\dot{x}_{2e}(t) = -v \tag{22}$$

可以选择控制律

$$v = kx_{2e}(t) \tag{23}$$

式（23）中 $k>0$,则误差方程可表示为

$$\dot{x}_{2e}(t) + kx_{2e}(t) = 0$$

当 $k>0$ 时，误差方程的所有根均严格落在左半复平面内，系统指数稳定，即 $x_{2e}(t) \to 0$ 。

除上述进行稳定性分析选择的控制律外，从式（19）可知，反馈线性化后的系统是一个纯积分环节，也可以采用 PD 或 PID 控制方式。

2.2 散热风扇控温阶段的控制算法设计

由 1.6 节得到的散热风扇控温阶段的动态方程式（14）可知，使用散热风扇控制电堆温度时，风扇控制与水泵转速（冷却液循环流量）控制存在耦合，且系统动态特性随着散热器出入口空气温差的变化而变化，而该温差值与控制目标温度、环境温度及冷却液与空气流量的相对大小和对流情况等有关[6]。此阶段系统的参数不确定性、时变特性和工作环境温度变化特性等均是自适应控制被控对象的典型特点[14]，故此，结合此阶段燃料电池系统控温需求，我们采用模型参考自适应控制（Model Reference Adaptive Control, MRAC）设计方法进行此阶段控制算法设计。

2.2.1 模型参考自适应控制

模型参考自适应控制是自适应控制中的一种，其核心思想是根据设计需求，选择一个参考模型作为目标，并设计一个控制参数可调的模型跟随控制器，使系统响应跟随参考模型，根据系统跟随参考模型的广义误差和系统自身状态对可调控制参数进行自动调整。上述模型跟随控制器及其可调控制参数自动调整律设计方法主要有局部参数最优化（MIT 自适应控制律）、Lyapunov 稳定性理论和 Popov 超稳定性理论等，典型的模型参考自适应控制系统的框图如图 2 所示。根据系统动态方程的特点和各模型参考自适应控制算法的特性，我们选择基于 Lyapunov 稳定性理论设计此阶段的模型参考自适应控制算法。

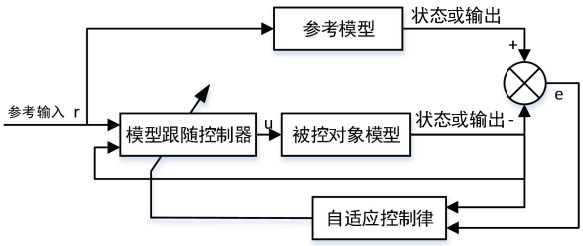


图 2　典型模型参考自适应控制框图

2.2.2 基于 Lyapunov 稳定性理论的 MRAC 系统设计

我们忽略 $q_{heat}^{st\_reat}$ 动态变化（微分项）对系统动态特性的影响，对式（14） 进行拉式反变换，并取 $u_2(t)= - \omega_{air}(t)$，则式（14）可以写为如下形式

$$\ddot{T}_{out,st}(t) + a\dot{T}_{out,st}(t) = b\left[u_2(t) + k_q q_{heat}^{st\_reat}(t)\right] \tag{24}$$

式（24）中

$$\begin{cases} a = \dfrac{\omega_c c_{p,c}\left(C_c^{st} + C_c^{rad}\right)}{C_c^{st} C_c^{rad}} \\ b = \dfrac{\omega_c c_{p,c} c_{p,air}}{C_c^{st} C_c^{rad}} \Delta_{air} \\ k_q = \dfrac{1}{c_{p,air}\Delta_{air}} \end{cases} \tag{25}$$

取 $x_1(t) = T_{out,st}(t), x_2(t) = \dot{T}_{out,st}(t)$，则系统的状态方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}} = A\boldsymbol{x} + B\left[u_2 + k_q q_{heat}^{st\_reat}\right] \tag{26}$$

式（26）中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}, \boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

假设参考模型为

$$\dot{\boldsymbol{x}}_m = A_m \boldsymbol{x}_m + B_m r \tag{27}$$

式（27）中

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_{m0} & -a_{m1} \end{bmatrix}, B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ b_m \end{bmatrix}$$

由于 A 和 A_m 结构不相同，如果采用基于状态方程设计的典型模型跟随控制器结构，即：

$$u_2(t)=k_x(t)x(t)+k_r(t)r(t) \tag{28}$$

式（28）中，$k_x(t)=[k_{x1} \quad k_{x2}]$，最终得到的闭环控制器不满足埃尔次贝格（Erzberger）条件[14]，将导致解不存在，所以不能采用这一典型模型跟随控制器结构。故此，本文根据系统动态方程的特点，重新设计了模型跟随控制器结构，即：

$$u_2(t)=k_p\left(r(t)-x_1(t)\right)-k_x x_2(t)+k_f q_{heat}^{st\_react}(t) \tag{29}$$

该控制器的设计思路是：模型跟随控制器设计的目标为跟随参考模型，即模型跟随控制器设计之后必须要能够改变系统动态方程中与参考模型动态方程中对应位置的系数。上述参考模型、模型跟随控制器和其对应的自适应控制律组成的模型参考自适应控制系统如图 3 所示。

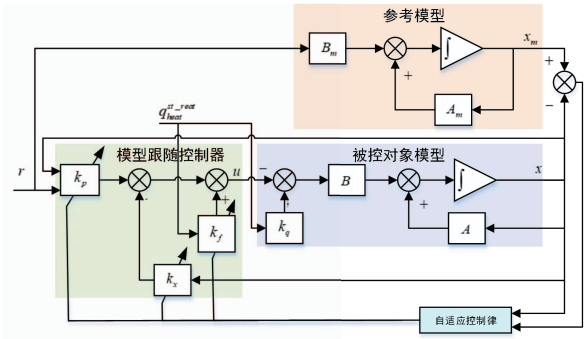


图 3　基于 Lyapunov 稳定性理论设计的 MRAC 系统框图

将模型跟随控制器式（29）代入系统动态方程式（26），得闭环系统的状态方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}}=A_c\boldsymbol{x}+B_c\left[r+\frac{k_q+k_f}{k_p}q_{heat}^{st\_reat}\right] \tag{30}$$

式（30）中

$$A_c=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -bk_p & -(a+bk_x)\end{bmatrix},B_c=\begin{bmatrix}0\\ bk_p\end{bmatrix}$$

定义广义误差向量

$$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{x}_m-\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}e_1(t)\\ e_2(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_{m1}(t)-x_1(t)\\ x_{m2}(t)-x_2(t)\end{bmatrix} \tag{31}$$

关于误差向量式（31）求导，并结合式（27）和式（30），则有

$$\dot{\boldsymbol{e}}(t)=A_m\boldsymbol{e}(t)+\begin{bmatrix}0 & 0\\ -b\tilde{k}_p & -b\tilde{k}_x\end{bmatrix}\boldsymbol{x}(t)+\begin{bmatrix}0\\ b\tilde{k}_p r+b\tilde{k}_f q_{heat}^{st\_reat}\end{bmatrix} \tag{32}$$

式（32）中

$$\begin{cases}\tilde{k}_x=k_x^*-k_x\\ \tilde{k}_p=k_p^*-k_p\\ \tilde{k}_f=k_f^*-k_f\end{cases} \tag{33}$$

根据 Laypunov 稳定性定理，我们选择 Laypunov 函数

$$V\left(e,\tilde{k}_x,\tilde{k}_p,\tilde{k}_f\right)=e^TPe+\frac{\tilde{k}_x^2}{\gamma_x}+\frac{\tilde{k}_p^2}{\gamma_p}+\frac{\tilde{k}_f^2}{\gamma_f} \tag{34}$$

式（34）中，γ_x、γ_p 和 γ_f 为 k_x、k_p 和 k_f 的自适应速率，P 是正定对称矩阵。将上述 Lyapunov 函数式（34）对时间求导有

$$\begin{aligned}\dot{V}\left(e,\tilde{k}_x,\tilde{k}_p,\tilde{k}_f\right)=&e^T\left(PA_m+A_m^TP\right)e+\\ &2\left(-k\left(p_{12}e_1+p_{22}e_2\right)x_2(t)+\frac{\dot{\tilde{k}}_x}{\gamma_x}\right)\tilde{k}_x+\\ &2\left(k\left(-x_1(t)+r(t)\right)\left(p_{12}e_1+p_{22}e_2\right)+\frac{\dot{\tilde{k}}_p}{\gamma_p}\right)\tilde{k}_p+\\ &2\left(kq_{heat}^{st\_react}\left(p_{12}e_1+p_{22}e_2\right)+\frac{\dot{\tilde{k}}_f}{\gamma_f}\right)\tilde{k}_f\end{aligned} \tag{35}$$

根据 Lyapunov 稳定性理论，为使广义误差全局渐进收敛，$\dot{V}$ 需为负定，选取对称正定矩阵 Q，并使 $PA+A^TP=-Q$，同时令式（35）第二、三、四项恒为零，并结合式（33）可得自适应控制律：

$$\begin{cases}k_x=-\int_0^t\gamma_x k\left(p_{12}e_1+p_{22}e_2\right)x_2(t)dt\\ +k_x(0)\\ k_p=\int_0^t\gamma_p k\left(-x_1(t)+r(t)\right)\left(p_{12}e_1+p_{22}e_2\right)dt\\ +k_p(0)\\ k_f=\int_0^t\gamma_f kq_{heat}^{st\_react}\left(p_{12}e_1+p_{22}e_2\right)dt\\ +k_f(0)\end{cases} \tag{36}$$

3　控制系统仿真

3.1　冷液-热液混合阶段控制算法仿真验证

选型某型燃料电池系统的参数，如表 1 所示。由于电堆的比热容不方便测量，表 1 中电堆的比热容采用某型石墨板的比热容进行近似。

表 1　冷液-热液混合阶段系统参数表

参数名称	值
电堆比热容	0.71 kJ/(kg·K)
冷却液比热容	3.6 kJ/(kg·K)
冷却液密度	1.078 6 mg/cm^3
电堆质量	150 kg
大循环冷却液体积	10 L
冷却液总流量	100 L/min

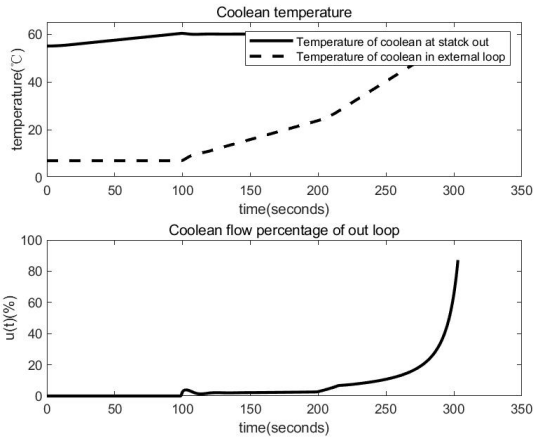


图 4　温度控制效果及冷却液流量百分比图

为更好的观察系统的动态变化过程，同时缩短仿真时间，假设控制目标温度为 60 ℃，初始小循环冷却液温度为 55 ℃，大循环冷却液初始温度 7℃。根据前面建立的被控对象模型和设计的控制算法，在 MATLAB/Simulink 中建立仿真模型，并调试好相关控制参数，仿真结果如图 4 所示。可以看到控制算法仿真结果良好，在仿真过程中（200 s 时）改变燃料电池系统的输出功率，控制算法能够很好的跟随响应，系统输出功率变化对系统控温效果影响很小。

由于建模和系统参数获取误差，实际被控对象特性与仿真建模对象的特性存在一定差异，为验证控制算法的有效性，同时分析各系统参数对温度控制的影响特性，我们改变系统中某些参数或引入计算误差等，系统仿真效果如图 5~6 所示。

从图 5 中可以看到，系统输出功率增大，除温度超调量存在一定程度的增大外，控温效果无其他明显变化，电堆发热功率计算误差对控温无明显影响。从图 6 可以看到，控制算法可以很好的适应环境温度变化和控制目标温度的变化，表现出良好的适应性。

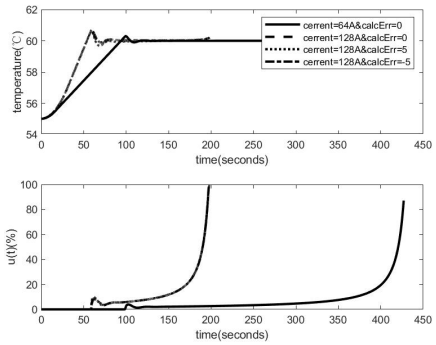


图 5　发电功率和发热功率计算误差对控温效果的影响图

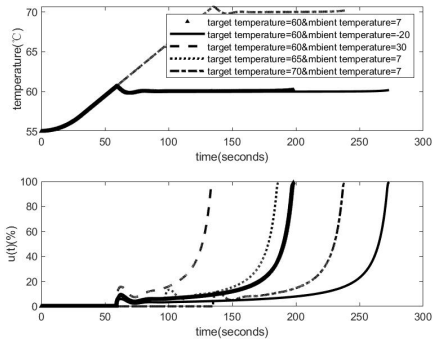


图 6　控制目标温度和环境温度对控温效果的影响图

3.2 散热风扇控温阶段控制算法仿真验证

选型某型燃料电池系统的参数，如表 2 所示。

表 2　散热风扇控温阶段系统参数表

参数名称	值
空气定压比热容	1.005 kJ/(kg·℃)
纯水定压比热容	4.2 kJ/(kg·℃)
单个散热器腔体体积	8.5 L
冷却液（纯水）密度	1 000 kg/m^3
电堆腔体体积	2.48 L

表 3　参数 a 在不同的启动风扇个数 n 下的值

n	2	4	6
a	1.121 2	1.072 0	1.057 1

表 4　参数 b 在不同散热器出入口空气温差Δ_{air}和启动风扇个数 n 下的值

n \ Δ_{air}	30℃	50℃	70℃
2	0.327 4	0.545 7	0.764 0
4	0.185 1	0.308 5	0.431 8
6	0.141 9	0.236 5	0.331 1

表 5　参数 kq 在不同的散热器出入口空气温差△$_{air}$下的值

Δ_{air}	30℃	50℃	70℃
kq	0.033 2	0.019 9	0.014 2

对于不同的发电功率，我们启动不同的散热风扇个数，以保证散热风扇的可调性和提高散热风扇的效率，降低散热能耗。在分析散热器出入口空气温差变化对系统动态特性影响时，我们假设冷却液流量ω_c=2.5 kg/s 不变。在不同的散热器出入口空气温差下，系统参数 a 几乎保持不变，系统参数 a 在不同的启动风扇个数下的值如表 3 所示。系统参数 b 在不同的散热器出入口空气温差和启动风扇个数下的值如表 4 所示。系统参数 kq 在不同的启动风扇个数下保持不变，在不同的散热器出入口空气温差下的值如表 5 所示。(此处仅以启动风扇个数为 2、4、6 为例)。

分析冷却液流量变化对系统控温影响。我们假设在整个冷却液流量变化过程中，冷却液与空气能够进行充分热交换，即冷却液流量不影响散热器出入口空气温差。从式（25）可知，冷却液流量对系统参数 a 和 b 具有相同的影响。此外，从表 3 和表 4 可知，风扇个数对系统参数 a 变化影响不大，但对系统参数 b 有较大影响，散热器出入口空气温差对系统参数 b 和 kq 都有较大影响。

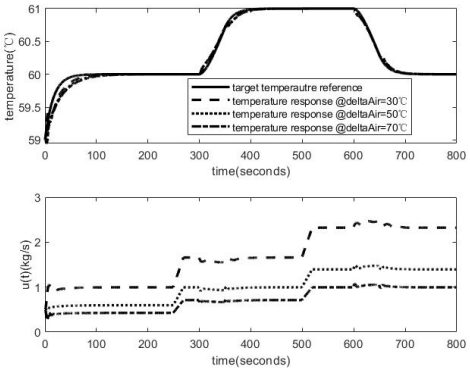


图 7　在不同的散热器出入口空气温差下 MRAC 系统控温效果图

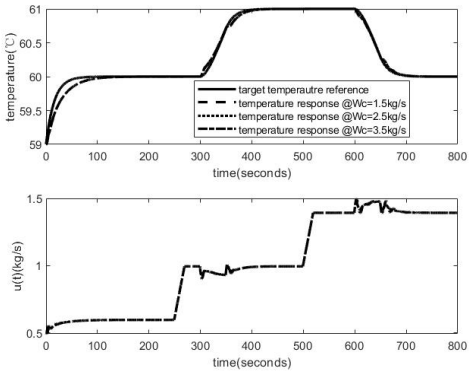


图 8　在不同的水泵转速下 MRAC 系统的控温效果图

根据前面建立的被控对象模型及其参数值，以及建立的控制算法，在 MATLAB/Simulink 中建立了仿真模型，并假设初始燃料电池系统产热功率为 30 kW，在仿真开始的 250 s 和 500 s，系统产热功率分别变为 50 kW 和 70 kW。根据燃料电池系统控温需求，允许控制系统上升时间较长，但期望没有超调量，并结合式（31）对参考模型参数选取的限制，我们取参数模型的参数为 a_{m1}=16，a_{m0}=b_m=1。为更好的观察系统的动态特性，我们假设控制目标温度为 60 ℃和 61 ℃，初始冷却液温度为 59 ℃。调试好自适应控制器参数，在水泵转速不变的情况下，改变空气温差，仿真结果如图 7 所示；在保持空气温差Δ_{air}=50 ℃不变，改变水泵转速时，仿真结果如图 8 所示。可以看到采用本文设计的模型参考自适应控制器，系统响应很好的跟随了参考模型，且在空气温差和水泵转速变化时，系统控温效果几乎不受影响。从自适应控制律式（36）可知，空气温差和水泵转速只是改变了控制系统的自适应速率。

4　结语

对散热器非迎风布置的水冷质子交换膜燃料电池系统，运行过程分为热机阶段、冷液-热液混合控温阶段和散热风扇控温阶段，本文对后两个阶段完成了控温系统建模、算法设计和仿真。对于冷液-热液混合阶段，采用反馈线性化方法解决非线性问题，仿真结果表明采用反馈线性化方法后，结合 PID 控制能够取得良好的控温效果。对于散热风扇控制阶段，本文基于 Lyapunov 稳定性理论的模型参考自适应控制方法，设计了模型参考自适应控制器和其对应的自适应控制律。仿真结果表明，该自适应控制器能够使系统响应很好地跟随参考模型，且在环境温度、载荷、水泵转速等多参数耦合变化时，仍实现了良好的一致控温效果，解决了系统多参数不确定和时变性影响下精准控温的难题。

参考文献：

[1] Zamel N, Li X. Non. isothermal multi-phase modeling of PEM fuel cell cathode[J]. International Journal of Energy Research, 2010, 34(7): 568-584

（下转第 18 页）

调频用锂离子电池倍率优化研究

朱睿　赖力*　候晓宝　廖小东　王晶

东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731

摘要：锂离子电池倍率性能是调频工况中的关键指标，基于结构及成型工艺的倍率优化是调频用电池技术发展方向。本文通过对铝箔、导电剂、负极以及SEI膜进行修饰或者优化，研究了不同工艺对倍率性能的影响。研究发现（1）涂层铝箔的膜片电阻和电池内阻均比常规铝箔低，有较好的倍率特性；（2）链状导电剂比点状导电剂的倍率特性总体上来说差异不大，但有轻微的趋势显示，链状导电剂优于点状导电剂；（3）油性负极因PVDF的微孔作用，在电池的首次效率不高的前提下，显示出了较好的倍率特性；（4）化成的SEI膜越薄，对倍率特性越有优势，但由于薄的SEI膜稳定性不足，导致循环性能较差。

关键词：锂离子电池工艺；倍率性能

中图分类号：TM912　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）03-0015-04

Study on Rate Optimization of Lithium Ion Battery for Frequency Modulation

ZHU Rui, LAI Li, HOU Xiaobao, LIAO Xiao Dong, WANG Jing*

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

Abstract：The rate performance of lithium-ion battery is the key index in frequency modulation working condition. The rate optimization based on structure and molding process is the development direction of frequency modulation battery technology. In this paper, the effects of different processes on the magnification properties were studied by modifying or optimizing aluminum foil, conductive agent, negative electrode and SEI film.Research findings (1) The membrane resistance and battery internal resistance of coated aluminum foil are lower than those of conventional aluminum foil, and have better magnification characteristics; (2) Generally speaking, there is little difference in the magnification characteristics between chain conductive agent and point conductive agent, but there is a slight trend that chain conductive agent is better than point conductive agent; (3) Due to the microporous effect of PVDF, the oily negative electrode shows good magnification characteristics on the premise of low initial efficiency of the battery; (4) The thinner the SEI film, the better the magnification characteristics. However, due to the insufficient stability of the thin SEI film, the cycle performance is poor.

Key words：lithium ion battery process; rate capability

随着新型电力系统建设以及能源结构转型，适应新能源波动性和间歇性发电特征的电化学储能日益受到重视，目前已经进入大规模工程化应用阶段。当前，应用于电力系统的电化学储能包括新能源场站配置调峰及平滑出力的能量型储能装备，时长多为2小时或者更长，以及在火电机组配置辅助调频的功率型储能装备，时长多为半小时或者1小时。随着新版《电力系统稳定导则》的实施，新能源场站也需要提供装机容量10 %的调节能力，调频用的功率型储能需求将大幅增加。然而，目前的锂

收稿日期：2023-12-25

作者简介：朱睿（1988－），男，2012年毕业于华中科技大学机械设计专业，工学硕士，高级工程师，现任职于东方研究院新电中心储能所，主要从事储能研究方向技术工作。

赖力（1986－），男，2015年毕业于电子科技大学微电子学与固体电子学专业，工学博士，高级工程师，现任职于东方研究院新电中心储能所，主要从事储能研究方向技术工作。

离子电池的倍率特性难以与一次调频、惯量支撑、阻尼控制等秒级或者分钟级时长对应，导致为满足调频功率要求不得不进行超配电池容量，严重影响经济性。调频用锂离子电池的倍率特性亟待优化。[1]

锂离子电池的倍率特性提升可以通过材料本体来实现，也可以优化电池制备工艺过程，新材料材料方法主要集中于更换倍率特性好的原材料，现有的工艺线可满足生产，但材料成本增加较多，且材料可靠性还需要进一步验证；通过优化电池制备工艺的方法不受材料源头的限制，从工艺线层面，对电池核心元器件工艺过程进行修饰或者改性，以及低内阻高导电材料选型，实现倍率的优化目标。

本文通过对比不同集流体、导电剂种类、负极体系、化成时间这四种不同的工艺过程，研究其对倍率特性的影响。

1 实验方法

实验所需物料及设备：

磷酸铁锂粉末（阴极活性物）、石墨粉（阳极活性物）、N-甲基吡咯烷酮（浆料溶剂）、super-p（导电剂）、电解液（自行配置）、电解质盐 LiPF6、隔膜、聚偏氟乙烯（阴极粘接剂）、羧甲基纤维素钠（阳极增稠剂）、SBR 溶液（阳极粘接剂）、铜箔（集流体）、铝箔（集流体）、真空双星行搅拌机、涂布机（深圳善营造）、电池测试仪。

实验流程：

（1）正负极浆料的制备。按磷酸铁锂：导电剂：PVDF=95 %∶2 %∶3 %的比例配制正极浆料，并涂覆在铝箔上；按负极活性物 super-p：（CMC+SBR）=95 %∶2 %∶3 %的比例配制水系负极浆料；按负极活性物：super-p：PVDF=95 %∶2 %∶3 %配制油系负极浆料，并涂覆在铜箔上。

（2）完成极片烘干，裁片，叠片或卷绕，注液等装配工序，制备成单体电芯，本文所制备的单体电芯包括软包，18 650，方形铝壳等，以下数据分析的小标题中对比实验所制备的单体电芯依次为 100 Ah 方形铝壳，10 Ah 软包，120 Ah 方形铝壳，1.2 Ah　18 650。

2 数据分析

2.1 常规铝箔与涂层铝箔对倍率性能的影响

常规铝箔为厚度为 16 um，涂层铝箔是在常规 16 um 铝箔的基础上，正反面均涂上导电涂层，单层导电涂层的厚度为 1 um，故涂层铝箔的厚度为 18 um，见图 1。前人对涂层铝箔也做过研究[2-5]，多数电池厂的磷酸铁锂电池在制备过程中，均会使用涂层铝箔来代替常规铝箔，如直接采购涂好的铝箔，会导致成本有较大提升，目前电池厂一般采用自己制备涂层浆料，再加工涂覆的方法来缓解成本的上升。在这里，我们采用某厂家涂覆好的涂层铝箔与常规铝箔进行倍率特性的对比。本组实验所制备单体电芯为 100 Ah 方形铝壳。

（a）　　(b)

图 1　涂层铝箔(a)与常规铝箔（b）

表 1　常规铝箔与涂层铝箔的膜片电阻和电池内阻的对比

组别	压力（T）	压强 (MPa)	膜片电阻（Ω）	电池内阻（mΩ）
常规铝箔	0.416	26.41	0.637	0.31
	0.418	26.59	0.643	0.30
	0.417	26.46	0.670	0.29
涂层铝箔	0.415	26.38	0.624	0.27
	0.418	26.59	0.552	0.25
	0.417	26.46	0.540	0.24
	0.416	26.40	0.499	0.26
	0.417	26.46	0.539	0.24

从表 1 中可看出，涂层铝箔的膜片电阻较常规铝箔低约 15 %，含涂层铝箔的电池内阻比常规铝箔的电池内阻低约 16 %。众所周知，电池内阻越大，电子在其中的传输阻力越大，根据欧姆定律，大电

流情况下的电压降越大，大电流下的倍率特性越差。此处进行的常规铝箔和涂层铝箔的性能对比，是在涂布面密度，电池设计容量，电解液种类及注液量等参数一致的情况下进行的。

2.2 不同正极导电剂对倍率性能的影响

磷酸铁锂由于其本身导电性较差，在浆料制备过程中导电剂就成了必不可少的一部分。[6-9]目前各大电池厂所使用的商品化的成熟导电剂包括特米高的 SP，日本昭和的 VGCF，以及德方纳米的 CNT 浆料等。这些导电剂的作用是在内部形成有效的导电网络，可以加快电子的移动速度，SP 是点状导电剂，在浆料制备过程中分散比较容易；VGCF 和 CNT 是线状导电剂，在浆料制备过程中易团聚，分散时间较长，故某些厂家出售已配置好的导电浆料用来代替原始粉末，可以缩短浆料配置时间，提高电池生产效率，且线状导电剂，导电效果好于点状导电剂。此处实验按磷酸铁锂：导电剂：PVDF=95 %∶2 %∶3 %的比例配制正极浆料，并涂覆在铝箔上，导电剂分为三个组别，分别为 SP，VGCF，CNT 浆料，其中 CNT 浆料为某厂家配置好的，直接采购。本组实验所制备单体电芯为 10 Ah 软包。

表 2　不同正极导电剂在 1C、5C、7C 倍率下的容量百分比

组别	1C 容量百分比	5C 容量百分比	7C 容量百分比
SP	100 %	75.2 %	61.8 %
VGCF	100 %	77.3 %	62.4 %
CNT 浆料	100 %	76.1 %	64.3 %

从数据看出，三种导电剂在 5C 和 7C 的容量差异均在 1 %以内，有细微差异，虽无明显差异，但从变化趋势能看出，线状的导电剂确有好的导电环境。

2.3 油性负极与水性负极对倍率性能的影响

油性负极是负极采用 PVDF 作为粘接剂的负极工艺，水性负极是负极采用 SBR 作为粘接剂的负极工艺。PVDF 是链状粘接剂，且含微孔；SBR 是点状粘接剂[10-12]。本组实验所制备单体电芯为 120 Ah 方形铝壳。

表 3　油性负极与水性负极制备出的单体电池基础数据的对比

组别	容量 (Ah)	首次效率	内阻（mΩ）	3C 容量百分比
油性负极	117.3	85 %	0.28	82.5 %
水性负极	119.1	87 %	0.27	75.3 %

油性负极的首次效率比水性负极低，原因是 PVDF 的微孔引起，锂离子充电嵌入负极的过程中，有少部分锂离子进入了 PVDF 微孔，在放电的时候这部分锂离子无法脱出，导致了不可逆的容量损失。但从 3C 的放电容量百分比可看出，油性负极比水性负极高出约 7%的容量，显示出链状粘接剂良好的大倍率优势。

2.4 化成时间对倍率性能的影响

化成是锂离子电池工艺中必不可少的环节[13-15]，也是锂离子电池形成 SEI 膜的过程，化成工艺和化成时间决定了 SEI 膜的厚度以及致密度，磷酸铁锂的化成流程一般为小电流充电，充电时间越长，形成的 SEI 膜越厚，越致密。此处的化成所用充电电流为 0.01C，化成时间分两个组别，1 组为 4 小时，2 组为 8 小时。本组实验所制备单体电芯为 1.2Ah　18 650。

表 4　两种不同化成组别 3C 放电容量和循环次数的对比

组别	化成电流	化成时间	3C 放电容量百分比	循环次数（容量百分比达到初始容量 80%）
1	0.01C	4 小时	67.1%	2 215
2	0.01C	8 小时	51.9%	2 632

化成时间 8 小时的比 4 小时的倍率特性好得多，其原因为 SEI 膜越厚，锂离子传输的阻碍越大，越不利于大电流放电。但 SEI 膜越厚，对电池循环更有利，因为随着电池循环次数逐渐增多，负极侧的 SEI 膜先衰减，再者到负极膜片脱落，SEI 膜越厚，负极支撑的时间越长，越有利于长循环。所谓鱼和熊掌不可兼得，倍率特性好的电池，循环不一定好，在电池设计和工艺制备过程中，一定要综合考虑使用场景和客户需求。

3 结果与讨论

本文通过对比四种不同的工艺，对倍率性能的影响做了研究。研究发现：（1）在其他条件一致的情况下，涂层铝箔因膜片与集流体之间良好的接触，所以膜片电阻和电池内阻均比常规铝箔低，有较好的倍率特性，而且涂层铝箔的材料和工艺成本不高，已成为电池厂家的通用技术手段。（2）链状导电剂与点状导电剂的倍率特性差异不大，但有轻微的趋势显示，链状导电剂优于点状导电剂，鉴于此由于链状导电剂的成本较高，且难分散，导致目前主流电池厂商所用的导电剂仍然是点状的 SP。（3）油性负极因 PVDF 的微孔作用，在电池首次效率不高的前提下，显示出了较好的倍率特性，因油性负极的制备工艺需要 NMP 作溶剂，涂布机需要配置回收系统，加大了设备成本，经济性较差。（4）化成的 SEI 膜越薄，对倍率特性越有优势，但由于薄的 SEI 膜稳定性不足，导致循环性能较差。综上所述，对锂离子电池而言，需要在满足客户的要求下，综合考虑各个电性能之间的平衡。

参考文献：

[1] 郑建华. 储能行业战略研究[J]. 机械制造, 2018, 56（10）:1-8

[2] 钟泽钦, 孔令涌, 黄少真, 等. 超导电碳基涂层铝箔制备及对高能量磷酸铁锂电池的影响[J]. 化工新型材料，2020, 48(1): 189-192

[3] 陆卫忠, 廖小珍, 朱广焱. 导电涂层铝箔对 LiFePO4 电池性能影响研究[J]. 电源技术, 2016, 40(7): 1347-1349

[4] 贾亚峰, 尚玉明, 王莉, 等. 锂离子电池集流体功能化改性研究进展[J]. 新材料产业, 2016 (7): 35-40

[5] 陆卫忠. 提升磷酸铁锂电池高倍率性能的研究[D]. 上海交通大学，硕士学位论文, 2017

[6] 梅铭, 黄金, 向黔新, 等. 碳纳米管导电剂在锂离子电池中的应用研究[J]. 广东化工, 2022,49 (6) :52-54+25

[7] 苏国士, 梁阚, 李九虎, 等. 石墨烯/碳纳米管复合导电剂制备[J]. 炭素技术, 2022,41(1):23-27+40

[8] 雷晓旭, 秦海青, 刘文平, 等. 不同导电剂对硅碳复合负极性能的影响[J]. 超硬材料工程, 2021,33(2):28-31

[9] 刘露, 戴永年, 姚耀春. 导电剂对锂离子电池性能的影响[J]. 材料导报, 2007 (Suppl1):267-269

[10] 廖小东，黄菊，王荣贵，等. 锂离子电池油性阳极性能研究[J]. 电源技术, 2015,39(4):729-731

[11] 高蕾, 程广玉, 顾洪汇, 等. 碳负极黏结剂对于动力锂离子电池性能的影响[J]. 储能科学与技术, 2019,8(1): 123-129

[12] 金明钢. 阴极导电剂含量对锂离子蓄电池性能的影响[J]. 电源技术, 2005(2):78-79+91

[13] 王猛, 安冉. 化成工艺对高功率型锂离子电池性能的影响[J]. 广东化工, 2021,48(16):89-91

[14] 杨涛, 马梦月, 刘文凤, 等. 化成工艺对高镍三元锂离子电池的性能影响[J]. 山东化工, 2020,49(11):9-10+13

[15] 武玉哲, 林彭桃君, 刘欣, 等. 锂离子动力锂电池化成工艺对电性能的影响[J]. 中国盐业, 2019(22):48-51

（上接第 14 页）

[2] 程珍, 陈科, 罗超. 基于模糊预测控制的燃料电池温度控制系统的研究[J]. 仪表技术, 2012(8), 1-4+8

[3] 谷靖, 卢兰光, 欧阳明高. 燃料电池系统热管理子系统建模与温度控制[J]. 清华大学学报（自然科学版）, 2007(11): 2036-2039

[4] Li G, Fu H, Madonski R, et al. Feed-forward offset-free model predictive temperature control for proton exchange membrane fuel cell: An experimental study[J]. ISA Transactions, 2022:(128) 159-170

[5] 裴尧旺, 陈凤祥, 胡哲, 等. 基于自适应 LQR 控制的质子交换膜燃料电池热管理系统温度控制[J]. 吉林大学学报（工学版）, 2022, 52(9):2014-2024

[6] 邬田华, 王晓墨, 徐国良, 等. 工程热力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016

[7] Yasemin Saygili, Inci Eroglu, Serkan Kincal. Model based temperature controller development for water cooled PEM fuel cell systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015(40): 615-622

[8] 李文浩, 方虹璋, 杜常清, 等. 氢燃料电池发动机热管理系统的控制方案研究[J]. 车用发动机,2022(1): 58-63

[9] Huang L, Chen J, Liu Z, et al. Adaptive thermal control for PEMFC systems with guaranteed performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(25): 11550-11558

[10] 赵洪波, 刘杰, 马彪, 等. 水冷 PEMFC 热管理系统控制策略及仿真研究[J]. 化工学报. 2020,71(5):2139-2150

[11] 田杰安, 刘军瑞, 霍茂森, 等. 一种燃料电池节温器控制系统[P]. 上海市: CN213692129U, 2021-07-13

[12] 韩竹, 李飞强, 赵兴旺, 等. 一种氢燃料电池液冷系统的节温器控制方法及装置[P].北京市:CN114695916B, 2023-06-16

[13] Jean-Jacques E. Slotine Weiping Li 著, 程代展等译, 应用非线性控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2006

[14] 蔡天佑, 岳恒. 自适应控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016

储能用汽轮发电机护环通风孔对其疲劳寿命影响的研究

蒲太平[1] 李积霞[1] 彭礼明[1] 娄彦涛[2] 马小婷[2]

1.东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000; 2.西安西电电力系统有限公司，陕西 西安 710075

摘要：通过在汽轮发电机转子护环上设置通风孔，可以显著改善转子端部的冷却条件，特别是发电机转子端部使用外部冷却型式，其线圈温度最高点处于转子端部的护环下。然而，在护环钻孔会导致护环在通风孔附近产生应力集中，尤其是在发电机需要频繁启动和停止的工况下（如空气储能发电应用中），可能会导致护环出现疲劳损伤的风险，故研究护环开孔对其疲劳寿命的影响至关重要。本研究遵循 ASME 设计规范的疲劳校核流程，运用有限元方法进行应力分析，并根据 ASME 设计规范的应力线性化、疲劳筛分程序及疲劳损伤计算理论对有限元计算结果进行处理和疲劳损伤计算，从而得到了护环开孔对其疲劳寿命的影响结果，通过优化设计，提出了改进护环疲劳寿命的方法。

关键词：汽轮发电机；频繁启停运行；护环；疲劳强度

中图分类号：TM311 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）03-0019-05

Impact Study of Vent Hole Design on Fatigue Life in Guard Rings of Frequently Starting-stopping Steam Turbine Generators

PU Taiping[1], *LI Jixia*[1], *PENG Liming*[1], *LOU Yantao*[2], *MA Xiaoting*[2]

(1.Dongfang Electric Machinery Co.,Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China; 2.Xi'an XD Power Systems Co.,Ltd., 710075, Xi'an, China)

Abstract: Implementing ventilation holes in the rotor guard ring of steam turbine generators significantly enhances the cooling conditions at the rotor end, especially for generators where the rotor end employs an external cooling style, and the highest temperature of the coil is located beneath the guard ring at the rotor end. However, drilling holes in the guard ring leads to stress concentration near these ventilation holes. This is particularly concerning for generators that require frequent starting and stopping, such as in peak shaving operations or in air energy storage power generation applications, as it may pose a risk of fatigue damage to the guard ring. Therefore, investigating the impact of these holes on the fatigue life of the guard ring is of paramount importance. This study follows the fatigue verification process outlined in the ASME design standards,employing finite element methods for stress analysis.It further applies ASME's standards for stress linearization,fatigue screening procedures,and fatigue damage calculation theory to process the finite element analysis results. This approach yields insights into the impact of the drilled holes on the guard ring's fatigue life. Through optimized design, the study proposes methods to improve the fatigue life of the guard ring.

Key words: turbine generator; frequent start stop operation; retaining ring; fatigue strength calculation

转子护环是汽轮发电机的关键受力部件，对机组的安全可靠运行起到至关重要的作用，其刚性和疲劳寿命是转子设计的核心考虑因素。[1-2]对于用于储能发电等需要频繁启停的汽轮发电机组，抗疲劳特性的设计尤为重要。在这类发电机的护环设计中，确保其能够承受重复的应力变化和延长其使用寿命，成为设计过程中的一个主要焦点。对于中小型空冷汽轮发电机，为简化转子线圈加工工艺，其端

收稿日期：2024-01-15

基金项目：项目名称：国家重点研发计划项目“10MW 级磁悬浮飞轮储能关键技术”；项目编号：2023YFB2406300。

作者简介：蒲太平（1982－），男，硕士研究生，高级工程师，现在东方电气集团东方电机有限公司，主要从事汽轮发电机设计工作。

部多采用外冷型式，这就导致转子线圈端部成为整个线圈温升最高部位，为加强端部线圈的冷却效果，在护环上开设通风孔是一种简单有效的手段。但护环开孔后，护环的最大应力将出现在通风孔边缘位置，在发电机频繁启停运行时，这些位置的交变应力将对护环疲劳寿命产生较大影响。

在发电机刚强度计算方面，目前国内已有多项研究成果。王庭山[3]采用平面有限元分析方法计算了大型空冷 180 MW 汽轮发电机转子护环的应力，提出了合理选择护环与转子间过盈量的有效方法。应用 Neuber 方法计算转子护环的低周疲劳寿命。柳菲[4]等采用三维有限元方法，并以 185 MW/60 Hz 汽轮发电机为例，针对转子护环及中心环的应力进行有限元分析计算，分析了护环的疲劳寿命。但这些研究均未考虑护环开通风孔后的情况。

本文遵循 ASME 设计标准中的疲劳设计程序[5-6]，采用有限元方法进行应力计算。以一款 30 MW 级别的汽轮发电机转子护环作为分析对象，详细探讨了在护环中开孔前后的应力分布变化，及对护环疲劳寿命的影响，并进行基于疲劳寿命为目标的优化改进设计，为其他类似结构的汽轮发电机转子护环的疲劳校核提供了重要的参考依据。

1 ASME 设计规范疲劳强度计算流程及护环疲劳计算参数

1.1 ASME 设计规范疲劳强度计算流程

ASME 设计规范对受力部件的各种强度计算流程及评判标准都做详细规定，对于零件的疲劳强度分析可归纳为以下步骤进行[7-8]：

第一，使用有限元方法对结构进行应力分析，分别计算不同工况下分析对象的应力分布情况，并找到应力变化最大位置。

第二，提取应力最大位置的各应力分量，并对其进行线性化处理得到一次薄膜应力（P_m 或 P_L）、一次弯曲应力（P_b）、二次应力（Q）及峰值应力（F），根据这些应力进行静强度校核，并作疲劳免除筛分。

第三，如果满足筛分条件，则免除疲劳寿命计算，如不满足，则必须进行疲劳寿命计算，计算步骤为：

（1）求各应力分量之和（$P_m(P_L)+P_b+Q+F$），同时计算这些量在不同载荷下的变化范围。

（2）对于塑性材料，使用 Mises 准则对这些应力分量的变化范围进行等效应力处理，从而得到各分量应力变化范围的等效应力变化范围。

（3）使用 ASME 设计规范公式，计算应力变化幅值，对于不同计算模型及应力范围取相应的系数对幅值进行修正。

（4）使用 ASME 设计规范的设计疲劳曲线，计算应力幅值变化最大点的疲劳寿命。

（5）根据使用要求条件计算损伤率，并对结果进行评判。

1.2 护环材料 ASME 设计规范疲劳强度计算参数

由 ASME 设计规范[5]，转子齿端部的设计疲劳寿命为：

$$N=10^X \tag{1}$$

其中：

$$X=\frac{C_1+C_3Y+C_5Y^2+C_7Y^3+C_9Y^4+C_{11}Y^5}{1+C_2Y+C_4Y^2+C_6Y^3+C_8Y^4+C_{10}Y^5}$$

$$Y=\left(\frac{S_a}{C_{us}}\right)\cdot\left(\frac{E_{FC}}{E_T}\right)$$

C_{us}=6.894 757，E_{FC}=195 000 MPa

公式中系数 C_x 见表 1：

表 1 系数 C_x 值

系数	系数值
C_1	1.608 291E+01
C_2	-4.113 828E-02
C_3	-1.023 740E+00
C_4	3.544 068E-05
C_5	2.896 256E-02
C_6	1.826 072E-04
C_7	3.863 423E-04
C_8, C_9, C_{10}, C_{11}	0

2 护环材料及应力计算模型

汽轮发电机转子护环在停机状态下受到转轴端部及中心环的支撑作用，在启机时受到自身离心力及端部线圈等结构的离心力共同作用。可见，该处受力过程复杂，需建立准确的三维有限元模型才能得到较为精确的应力应变计算结果。

2.1 转子装配端部有限元计算模型

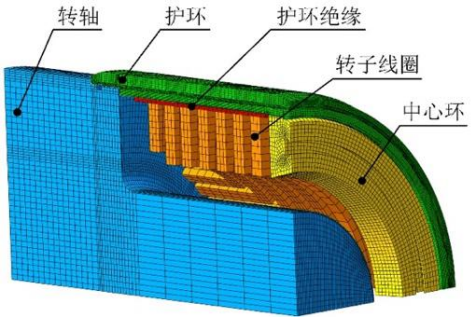


图 1　转子装配端部有限元计算模型

汽轮发电机转子装配端部主要由以下几个零件组成：1.转轴；2.护环；3.护环绝缘；4. 转子线圈；5.中心环等，详见图 1。

有限元网格模型采用六面体网格，各零件之间设置接触关系，整个计算模型设置周期对称边界条件。

2.2 转子装配端部各零件材料属性

计算模型各零件材料属性见表 2 所示：

表 2　零件材料属性

	弹性模量 E_T（MPa）	密度(t/mm^3)
护环	206 000	7.85E-9
端部槽楔	116 000	7.50E-9
转轴	206 000	7.85E-9
中心环	206 000	7.85E-9
转子铜线	120 000	8.90E-9
护环绝缘	22 000	1.90E-9

根据 ASME 规范要求计算护环材料的力学属性见表 3。

表 3　护环的力学属性（50Mn18Cr4WN）

	符号	参数值
径向屈服限	S_y（MPa）	≥785
径向抗拉限	S_T（MPa）	≥885
许用应力	S（MPa）	S=min(ST/2.4, S_y/1.5)=368.8
局部薄膜应力和局部薄膜应力加弯曲应力限值	S_{PL}（MPa）	S_{PL}=max(1.5S, S_y)=785
一次应力加二次应力限值	S_{PS}（MPa）	S_{PS} =max(3S, 2S_y)= 1 570

2.3 护环材料疲劳筛分

ASME 设计规范为节约设计时间，提供了处于循环载荷条件下零件疲劳分析的筛分方法，满足下式可不进行精确的疲劳寿命分析：

$$N_{\Delta FP} \leqslant N(C_1 S) \qquad (2)$$

式（2）中：$N_{\Delta FP}$ 为设计循环次数，机组按寿命 30 年计算得到，其值为 10 950 次；C_1 为疲劳筛分方法 B 的系数，这里取值为 3；S 为许用应力。

根据 ASME 设计疲劳曲线，$N(C_1S)$的计算值为 917 次，可见此时转子载荷工况不满足 ASME 疲劳筛分条件，需进行详细的疲劳寿命计算。

2.4 应力计算分析步骤

整个计算分析过程分两步进行：

第一步：护环热套后的应力计算；

第二步：整个模型受到 3 000 r/min 的离心力作用后的应力计算。

护环的应力交变幅值由以上两步计算结果的差值得到。

3　有限元计算结果后处理及疲劳强度计算

3.1 护环开孔前应力计算结果

通过有限元计算可得护环的应力分布如图 2 所示：

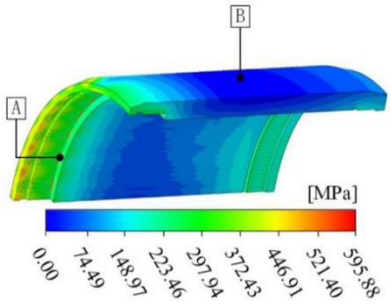


图 2　开孔前护环应力分布

由计算结果可见，当护环热套后，护环的收缩力作用在其与转子端部和中心环的搭接面上，会在护环和转轴搭接面的过渡圆角处（A 点）产生较大的弯曲应力。在整个转子装配受到离心力的作用后，护环中间位置（B 点）受到铜线等结构件的离心力作用，将产生交变应力。

通过有限元后处理可得计算点的应力变化范围见表 4：

表 4　各计算点的应力变化范围　　MPa

	$\Delta\sigma_{11}$	$\Delta\sigma_{22}$	$\Delta\sigma_{33}$	$\Delta\sigma_{12}$	$\Delta\sigma_{13}$	$\Delta\sigma_{23}$	ΔS_p
A 点	232.7	196.8	509.2	-32.0	-197.6	-210.4	583.7
B 点	153.9	139.0	97.2	-147.5	-0.0	0.4	260.5

表中：

$$\Delta S_p=\frac{1}{\sqrt{2}}\left[(\Delta\sigma_{11}-\Delta\sigma_{22})^2+(\Delta\sigma_{11}-\Delta\sigma_{33})^2+(\Delta\sigma_{22}-\Delta\sigma_{33})^2+6\left(\Delta\sigma_{12}^2+\Delta\sigma_{13}^2+\Delta\sigma_{23}^2\right)\right]^{0.5} \quad (3)$$

其中：$\Delta\sigma_{ij}$为各应力分量的变化范围，由第一分析步和第二分析步各应力分量计算结果的差值得到。

以ΔS_p最大的 A 点计算转子齿端部的疲劳寿命，此点的应力幅为：

$$S_{alt}=\frac{K_f K_e \Delta S_p}{2}=291.85\ \text{MPa} \quad (4)$$

其中：K_f为疲劳强度减弱系数，由于本文模型已考虑局部缺口的影响，故本文 K_f取 1；K_e为疲劳罚系数，由于 B 点一次加二次当量应力并未超过 SPS 限值，故本文 K_e取 1。

由 ASME 疲劳计算公式可得护环的疲劳寿命为：

$$N=10^x=14\ 478\ \text{次}$$

由此，可得发电机以每天启停方式运行 30 年，其护环的损伤率为：

$$D_f=\frac{n}{N}=0.76$$

其中：n 按机组每天启停 1 次，机组寿命 30 年计算得到，其值为 10 950。

可见此时护环的疲劳寿命满足 ASME 设计规范 $D_f\leqslant 1$ 的要求。

3.2 护环开孔后应力计算结果

当在护环上开孔后，护环的应力分布云图如图 3 所示：

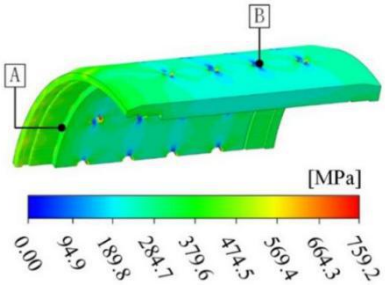


图 3　护环开孔后护环应力分布

其中护环开通风孔位置（B 点）的应力分布如图 4 所示：

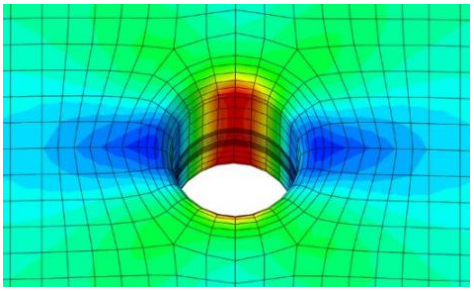


图 4　护环通风孔位置应力分布

由此可见，护环开设通风孔后，护环的最大应力出现在通风孔位置，随着发电机的启停机，该应力将发生交替变化，从而导致疲劳问题。

通过有限元后处理可得，A、B 两点的应力变化情况见表 5。

表 5　各计算点的应力变化范围　　MPa

	$\Delta\sigma_{11}$	$\Delta\sigma_{22}$	$\Delta\sigma_{33}$	$\Delta\sigma_{12}$	$\Delta\sigma_{13}$	$\Delta\sigma_{23}$	ΔS_p
A 点	183.8	211.5	578.7	-67.2	-168.8	-154.6	562.6
B 点	587.5	323.4	43.8	-340.9	6.0	5.2	755.4

以ΔS_p最大的 B 点计算转子齿端部的疲劳寿命，此点的应力幅为：

$$S_{alt}=\frac{K_f K_e \Delta S_p}{2}=377.7\ \text{MPa}$$

由 ASME 疲劳计算公式可得护环的疲劳寿命为：

$$N=10^x=7\ 572\ \text{次}$$

由此，可得发电机以每天启停 1 次方式运行 30 年，如果护环开通风孔，其护环的损伤率为：

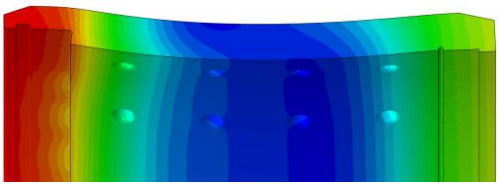
$$D_f=\frac{n}{N}=1.45$$

可见，此时护环疲劳寿命已不满足 ASME 设计规范 $D_f\leqslant 1$ 的要求。

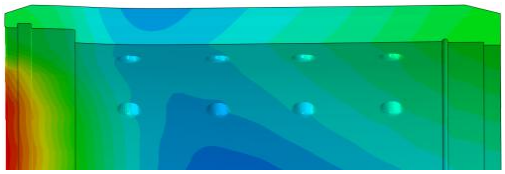
4　护环抗疲劳优化设计

4.1 护环开孔后疲劳寿命降低原因分析

由护环在启停机过程中的变形（图 5，图示变形量放大 30 倍）可见，护环两端在停机时由于受到转轴和中心环的热套支撑作用，变形较大，而中间位置无支撑力作用，故变形较小。当发电机运行时，护环中间位置受自身离心力及端部铜线离心力共同作用，其变形量与端部基本一致。



（a）护环在停机时的变形



（b）护环在启机时的变形

图 5　护环在启停机过程中的变形情况

在以上变形过程中，护环通风孔位置产生了较大的交变应力幅，因而疲劳寿命降低。

4.2 护环开孔优化设计

可通过以下措施来降低护环开孔位置的交变应力幅。

措施一：

减少线圈端部结构尺寸 A、B（图 6）来达到降低护环在启停机过程中的变形量作用，其原因为：

（1）线圈端部结构尺寸 A、B 减少，护环长度 C 将减少，护环热套后端部位置变形相对中间位置将减少。

（2）线圈端部的悬伸长度减少，其离心力将减少，启机后护环中间位置的变形量将减少。

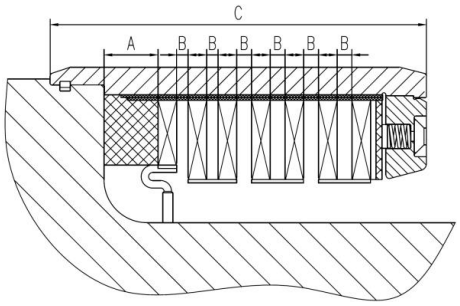


图 6　转子线圈端部结构

措施二：

通过减少护环开孔数量及风孔直径以达到增加护环刚度的目的，护环刚度增加，其在发电机启停过程中变形也将减少。

4.3 优化设计后的护环疲劳强度

通过有限元计算，优化后的护环的应力分布见图 7 所示：

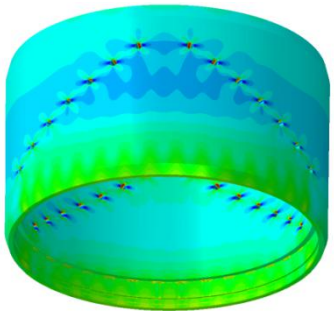


图 7 优化后的护环的应力分布

表 6　风孔边缘的应力变化范围　　MPa

	$\Delta\sigma_{11}$	$\Delta\sigma_{22}$	$\Delta\sigma_{33}$	$\Delta\sigma_{12}$	$\Delta\sigma_{13}$	$\Delta\sigma_{23}$	ΔS_p
风孔边缘	265.0	430.2	51.4	-302.8	-26.4	-11.0	621.1

可得护环的疲劳寿命为：

$$N=10^x=12\ 280\ 次$$

其护环的损伤率为：

$$D_f=\frac{n}{N}=0.89$$

可见，经优化设计后的护环疲劳寿命已满足 ASME 设计规范 $D_f \leqslant 1$ 的要求。

5　结语

本研究深入探讨了汽轮发电机护环开孔后的应力分布和疲劳寿命变化，明确了护环设计和加工质量对其疲劳性能的重要影响。通过合理配置通风孔的位置与大小、优化结构设计和改进加工工艺，有效增强了护环的疲劳耐受力，具体结论包括：

（1）护环开设通风孔后，最大交变应力位置由护环和转轴搭接面的过渡圆角处转移到开设通风孔位置，且交变应力幅值也产生了较大增加，导致疲劳寿命减少。

（2）转子线圈端部间隙是影响护环在启停过程中疲劳寿命的关键因素。

（3）在发电机护环设计时应合理选取通风孔位置、数量、直径大小、风孔边缘倒角大小，尽量降低风孔边缘交变应力幅值，以提高其疲劳寿命。

（4）风孔在加工过程中应严格控制其工艺过程，避免出现挖刀以及接刀痕等问题，同时应尽量提高加工表面粗糙度，从而提高其零件表面质量。

（下转第 39 页）

空化条件下泵快速启动过程的等效电路模拟

马艳梅　张洪

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：空化可能导致水力系统中出现压力振荡以及弥合水锤等问题，对水力系统形成安全隐患。传统的水柱分离模型基于一元理论，无法准确预测泵等水力机械的空化过程及其对系统的影响，而一维管路系统与三维流场的耦合计算方法计算工程量巨大且稳定性不高，因此寻找一种快速、简易、稳定良好的水力系统空化模拟方法很有必要。基于等效电路法，使用MATLAB/SIMULINK 仿真模拟软件对水力元件及空泡建模，并利用三维稳态空化流动计算获得空化特性参数，模拟3 种典型工况下水泵开阀启动的过渡过程，分析水力参数动态特性及空化特性，并与实验数据以及一维管路系统与三维空化流场耦合计算结果进行对比。结果表明，该方法可以比较准确地预测水泵快速启动过程中泵内空化体积、泵进出口压力及流量的变化过程，且所需计算时间短，计算稳定性好。

关键词：空化；水泵；开阀启动；过渡过程；等效电路

中图分类号：TK730.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）03-0024-07

The Simulation of Cavitation Pump Quick Start Process by Equivalent Circuit

MA Yanmei, ZHANG Hong

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

Abstract：Solving cavitation problems by the Method of Characteristic and 1D/3D coupling method is time-consuming and not stably enough. So it's necessary to find a new method of cavitation simulation with high efficiency and stability, simultaneously ensure the accuracy requirements. At present, the circuit calculation method is nearly perfect, which can save time and resources. This simulation bases on the equivalent circuit method with simulation software called MATLAB/SIMULINK. The cavitation component was introduced first. Then, the pump starting process were simulated by equivalent circuit method. This method was proved precisely through comparing the results of experiment and 1D/3D coupling method. In addition, this method has certainly engineering significance with high efficiency and good stability. However, the equivalent circuit method must be used in conjunction with CFD calculation for pump characteristics. there are also some difficulties to be studied and improved, such as the selection of characteristic curve.

Key words：cavitation; pump; start up; transient; equivalent circuit method

虽然在离心泵的设计和选型等阶段会对泵的空化性能提出适当的要求以保证运行过程中泵具有足够的空化余量，但是在泵启动等瞬变过程中，泵前压力可能会降到临界空化压力以下，导致泵进口出现空化。特别是对航空航天等领域内用泵，要求泵的启动速度很快，泵前压力降幅很大，因此可能出现带空化的泵启动过程。而空化的发生反过来会导致压力波传播速度的变化，从而影响水泵和管路系统的瞬变特性，甚至引起强烈的流动不稳定等现象，引发振动和噪声。因此，预测带空化的泵快速启动过程及水力系统水动力学特性具有非常重要的意义。

比较常见的水力系统分析方法为一维特征线法，如郭文成[1]、杨建东等[2]对压力管道考虑了惯

收稿日期：2023-12-22

作者简介：马艳梅（1994－），女，2018 年毕业于中国农业大学水利工程专业，硕士研究生，工程师，现在东方电机有限公司研发中心从事水轮机过渡过程研究相关工作

性及调速器特性，揭示了其对稳定界面的影响；白绵绵[3]、毕慧丽[4]等使用 Flowmaster 计算软件研究了空气阀、空气罐对水锤保护的影响；Kameswara 等[5]开发了 HYTRAN 软件计算水泵甩负荷等过渡过程。特征线法有大量的工程应用实例，理论已趋于成熟。对空化问题，一维特征线法一般采用水柱分离模型。液柱分离虽然针对管道模型来说精度较高，但对于水泵内部流态对空化特性的影响考虑不多，即没有将空化特性嵌入到水泵、水轮机等元件中。

近年来随着 CFD 技术的进步，很多学者尝试使用三维 CFD 计算方法模拟空化过程。三维 CFD 方法功能全面，适用性强，且具有可视化界面便于理解，但计算量大，计算时间长，而且机组转速动态变化，目前用于水力机械求解的商业软件却只能计算恒定转速条件下的流动。[6]为了结合一维与三维方法的优势，越来越多的学者开始研究一维特征线法与三维 CFD 方法耦合的模型，如张晓曦等[7-8]提出了对接耦合和部分重叠耦合两种一维三维数据传递方法，计算验证了耦合计算的高精度，并用此方法计算了某水电站飞逸过渡过程，分析了尾水管压力脉动特性与涡带特性，计算结果与模型试验结果吻合较好。Helmrich 等[9]提出只对尾水管部分进行三维计算，对机组部分进行曲线插值得到流量及水头，其他部分用一维特征线法计算的方法，并计算验证了其可行性。但耦合方法计算工程量巨大，耗时很长，且计算的鲁棒性差。

洛桑 EPFL 实验室众多学者利用等效电路法，采用以电容模拟空化柔性、复杂的互感现象模拟质量流增益系数的方法建立了空泡模型并开发了 SIMSEN 计算软件。起初 Nicolet 等[10-11]将该软件应用于水轮机尾水管空化相关的管路系统压力脉动分析中。之后 Nicolet、Alligne、Yan 等[12-14]将水力元件与电动机、调速器等电力元件结合，模拟了混流式水泵水轮机满载尾水涡带，并与试验结果及 CFD 计算结果对比得到了一致性。Favrel 等[15]也验证了水轮机部分荷载下的尾水涡带。Mössinger 等[16]耦合一维等效电路法与三维 CFD 方法计算了混流式水轮机的尾水涡带。

国内也有一些等效电路法的研究，但是对空化的考虑甚少。因此研究一种可以达到耦合方法计算精度、能与电力系统配合良好且保证计算效率的一维方法有很大的意义。

本文基于 SIMULINK 的等效电路法，将空化模拟成一个可嵌入水泵中的模块，可以表达出水泵内部流态对空化的影响。此外，SIMULINK 具有可视化建模界面及动态监测功能，对模拟仿真带来了一定的便利，且计算时间大大减少，可以进一步将水力系统、机械系统、电气系统进行联合研究。

1 模型建立

1.1 水力系统简介

受轴向力作用的两端铰支欧拉梁见图 1，本文参考 Duplaa 等[17]的模型试验，试验台如图 1 所示。为了使该系统适应不同的初始条件，该试验台分为两套系统：双罐连接和单罐连接。其中双罐连接进出口各连接一个压力罐，由于两罐的压差可以使系统产生不同的初始流量；单罐连接进出口连接同一个压力罐，系统初始流量为零。Duplaa 在这组实验中选择的是单罐连接，通过改变压力罐压力值来调节稳定工况的流量。

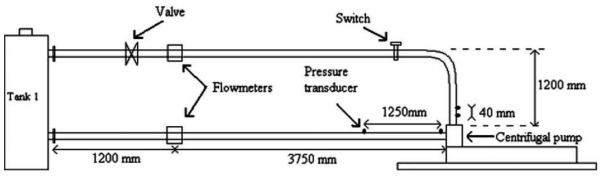


图 1 Duplaa 模型试验台

1.2 管阀的等效元件

将系统中的管道考虑为弹性管。由于系统管路较短，波速设为定值 1 000 m/s。参考试验台管道长度及 CFL 条件，对管道不进行分段计算。泵前及泵后管路在电路中等价为一个电容、一个电阻和一个电感。根据中心差分，将串联着的电阻和电感分成两部分，在中间节点处并联电容。由于水泵启动受电机控制，故阀门保持在打开状态，以损失的形式存在。在电路中等价为一个损失系数一定的可变电阻 $R(Q)$。

1.3 泵的等效元件

水泵特性依赖于其自身的特性曲线，在电路中等价为体现流道内水惯性的电感、小流量区的电阻及体现水泵特性的受控电压源。其中电感的大小与

流道长度有关，电阻只存在于小流量工作点，受控电压源 $Wh(\theta(Q,N))$与流量、转速有关，采用 Suter 曲线输入。无空化工况中的特性曲线如图 2 所示。

当空化严重时，泵的能量性能会受到影响，在装置空化系数小于临界值后，泵的扬程和效率会急剧降低。同时泵的快速启动过程中泵的转速是变化的，因此，理论上泵的扬程为 H=f（ψ, δ, σ），其中 Ψ为扬程系数，δ为流量系数，σ为空化系数。

考虑不同空化系数下水泵特性曲线的差异，参考图 3 中随着空化系数、流量系数变化的扬程系数 CFD 计算结果[18]，对 Wh 特性曲线水泵区($\theta\in[\pi,1.5\pi]$)进行修正，如图 4 所示。

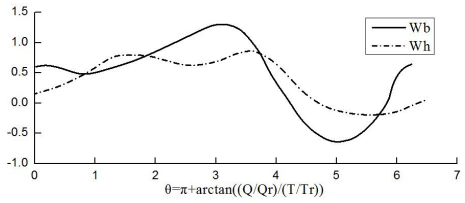


图 2　无空化特性曲线

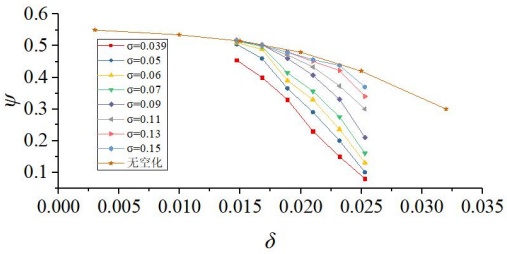


图 3　CFD 计算水泵特性曲线

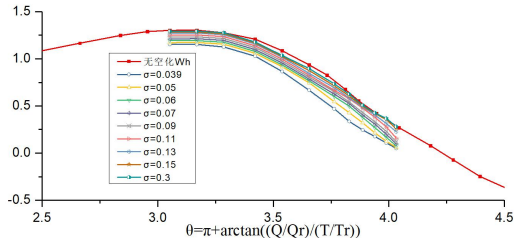


图 4　带空化 Wh 特性曲线

1.4 空化区的等效元件

Brennen[19]于 1973 年提出分析水泵空化稳定性的两个参数：空化柔性 C 及质量流量增益系数 x。即认为空化体积是进口压力和进口流量的函数 $V(Q_1,h_s)$，空化体积变化率可写为：

$$\frac{dV}{dt}=\frac{\partial V}{\partial h}\cdot\frac{dh_s}{dt}+\frac{\partial V}{\partial Q_1}\cdot\frac{dQ_1}{dt} \qquad (1)$$

定义空化柔性 $C=-\partial V/\partial h_s$，质量流量增益系数 $x=-\partial V/\partial Q_1$，根据一维连续性方程：

$$-\frac{dV}{dt}=C\cdot\frac{dh}{dt}+\chi\cdot\frac{dQ}{dt}=Q_v=Q_1-Q_2 \qquad (2)$$

将式(2)转化为等效电路图如图 5 所示。其中空化柔性用电容模拟。由于启动过程由转速变化带来的流量变化很大，空化对流量变化造成的波动很小，流量增益的影响可忽略，故暂不考虑流量增益，使用空化柔性描述空化特性。空化柔性考虑汽相与液相流动的共同流动，用等效柔性 C_{equ} 表示：

$$C_{\mathrm{equ}}=\left(1-f_{\mathrm{vapor}}\right)C_{\mathrm{liquid}}+C_{\mathrm{vapor}} \qquad (3)$$

$$f_{\mathrm{vapor}}=\frac{V_{\mathrm{vapor}}}{V} \qquad (4)$$

$$C_{\mathrm{liquid}}=\frac{ga\cdot l}{a^2} \qquad (5)$$

$$C_{\mathrm{vapor}}=-\rho g\frac{\partial V_{\mathrm{vapor}}}{\partial P_s} \qquad (6)$$

式中 f_{vapor} 表示气体体积分数，用式(4)计算，C_{liquid} 表示液相柔性，用式(5)计算，C_{vapor} 表示气相柔性，用式(6)计算。V_{vapor} 表示空化体积，由 CFD 计算得到的 V_{vapor} -σ曲线（图 6）差分得到，σ为空化系数，由水泵进口压力计算得到。l 表示水泵等效流道的长度，V 表示水泵的等效体积，V=0.006 97 m^3。对于特性曲线的插值，内插选择三次样条插值，外插选择线性插值。

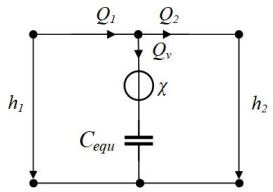


图 5　空泡模型等效电路图

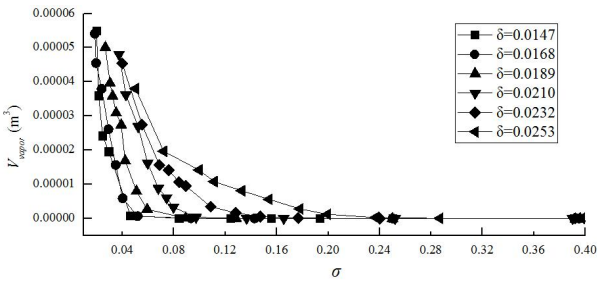


图 6　CFD 计算不同流量下的空化体积随空化系数变化曲线[18]

1.5 计算工况

本文模拟了泵的快速启动过程，该水泵启动过程中转速变化规律如图 7 所示，稳定时最大转速达到 3 000 r/min。所有计算结果均分别与 Duplaa 实验结果与一维与三维耦合方法计算得到的结果[18]进行比较。对于转速的输入，由于传统特征线法的线性化模型，需将转速线性化输入，而等效电路法完全按照实验条件输入非线性转速。选择计算时间步长为 0.001 s，算法选择定步长隐式外推法，外推法定为 4 阶，牛顿迭代 3 步。计算选择 4 个工况，一个无空化工况及按三个典型带空化工况（1.1Q_0, 0.9Q_0, 0.7Q_0），计算结果分别如图 8、9、10、11 所示，具体工况参数如表 1 所示。

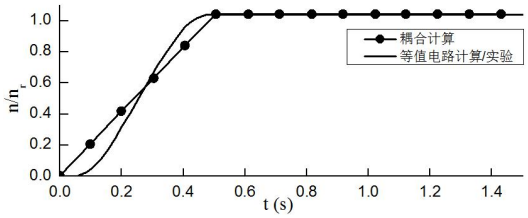


图 7　转速变化规律

表 1　工况参数

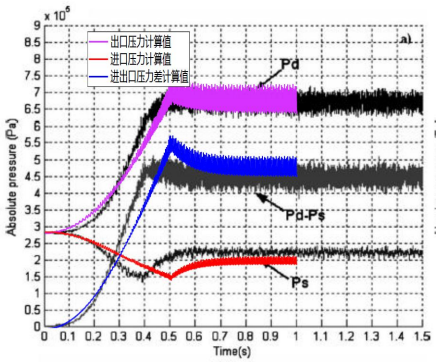
工　况	流量(Q/Q_r)	压力罐压力/(m)	图　号
case 1	1	28.6	图8
case 2	1.1	14.5	图9
case 3	0.9	9.5	图10
case 4	0.7	9	图11

2　数值计算结果与分析

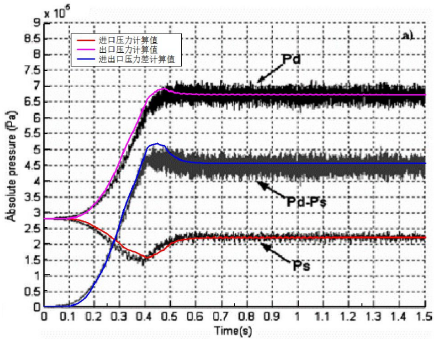
利用上述方法对表 1 中三个典型的带空化工况和一个无空化工况进行了计算，并将计算结果与实验结果以及课题组前期所做的一维管路系统与三维空化流场耦合计算结果[18]进行了比较。限于篇幅，本文不再对耦合计算的具体方法进行介绍。耦合计算所需时间很长，每个工况在（8 核 16 线程）的工作站计算大约需要连续 2 个月以上的时间，且由于计算过程不稳定，case 2 的耦合计算结果无效而无法比较。利用本文所采用的方法，每个工况的计算时间为 5 分钟。每个稳定的空化流场计算工况所需时间约为 2 小时，为了获得全面的特性曲线，大约需要计算 80 个工况。因此采用本方法对三个典型工况平均时间为 3 天，且计算工况越多，平均时间越少；而耦合计算计算工况越多，所用时间越多。

2.1 无空化工况计算结果

无空化计算结果如图 8 所示，图 8(a)为耦合计算压力特性，图 8(b)为等效电路计算压力特性。水泵在 0.45 s 内启动，随着转速增大，流量增大，水泵压力及扬程增大，管路损失也随之增大，泵前压力逐渐降低。0.4 s 时，水泵扬程上升至冲击扬程，泵前压力到达最低值，随后泵后压力至最大值。之后随着水泵运行逐渐恢复稳定，扬程降低少许至稳定。由图 8 可以看出耦合计算结果及等效电路计算结果均与实验结果符合良好，耦合计算较实验有 0.1 s 的滞后，等效电路计算稳定性较好。



(a)　耦合计算压力特性



(b)　等效电路计算压力特性

图 8　Case1 无空化计算结果

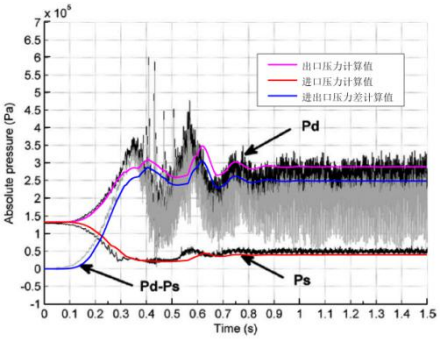
注：图中被比较的底图为 Duplaa 实验结果[17]，Figure 10

2.2 空化工况计算结果

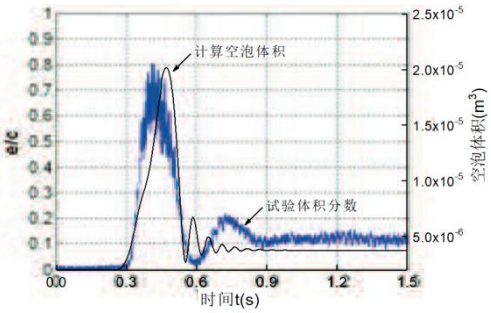
如图 9 所示为大流量工况下的空化特性，在启动结束后可以明显的观测到出口压力的低频脉动，这意味着启动后的短时间内存在空化引起的振荡现象，扬程出现短暂的波动，进口压力和空化体积也可以观测到小振幅的振荡。由于所预测的泵前压力降低比实测有所延迟，该工况下 0.35 s 时出现空泡，空化体积开始增大，水头开始降低；0.45 s 时

空化体积升到最大，水头降到阶段最低；之后空泡溃灭，空化体积开始减小，水头开始上升；0.55 s 时空化体积又升高，水头又出现了第二次降低。之后随着空泡体积的振荡水头也振荡。水头经历了两次明显降低。

可以看出等效电路计算结果与实验值符合良好，基本规律反映一致，计算结果稍有偏差。等效电路计算中由于 V_{vapor} - σ曲线在小流量处特性的缺失启动初存在很小的空泡，0.45 s 时空化系数很小，由于该曲线在小空化系数处特性的缺失导致插值误差计算压力没有达到实验值。由于插值误差 0.55 s 后的压力振荡振幅计算值与实验值也存在偏差。



(a) 等效电路压力特性

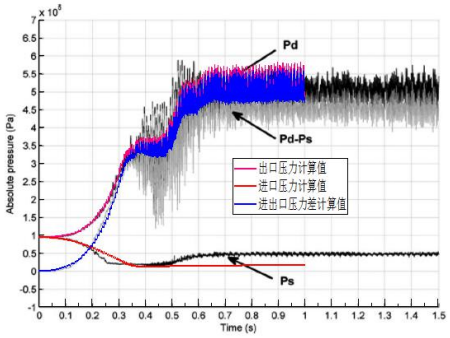


(b) 等效电路空泡体积特性

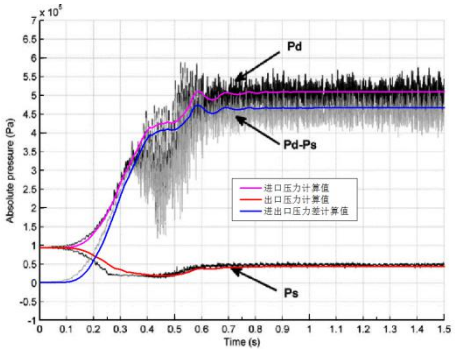
图 9 Case2 带空化计算结果

注：图中被比较的底图为 Duplaa 实验结果[17]，Figure 17

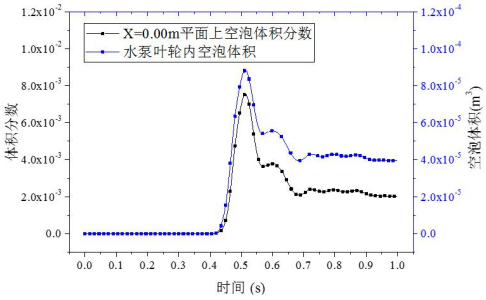
如图 10 所示为中等流量工况下的空化特性，实际应用中大多数工况都与此工况相似。与无空化工况相比，进口压力在启动的最快过程中（0.25 s～0.45 s）基本保持不变，幅值比无空化过程略高，空化发生在进口管或水泵进口处。由于泵内发生空化，导致水泵水头降低，出口压力在启动末期有明显的降低。case 3 也出现了压力两次降低的现象，但降低幅度没有 case 2 大，由于启动末空泡体积减小为零，压力不再振荡。该工况下 0.3 s 时出现空泡，空化体积开始增大，水头开始降低；0.45 s 时空化体积升到最大，水头降到阶段最低，空泡体积最大值较 case 2 略低，水头降低幅度也较小；之后空泡开始溃灭，空化体积开始减小，水头开始上升；0.6 s 后空泡完全溃灭，水头升至最大值。水头经历了一次明显降低。



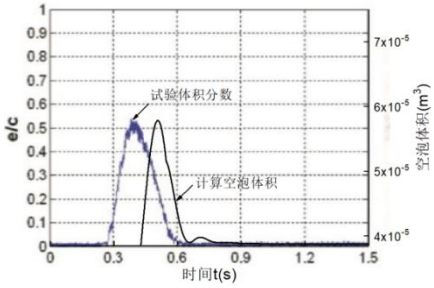
(a) 耦合计算压力特性



(b) 等效电路压力特性



(c) 耦合计算空泡体积特性

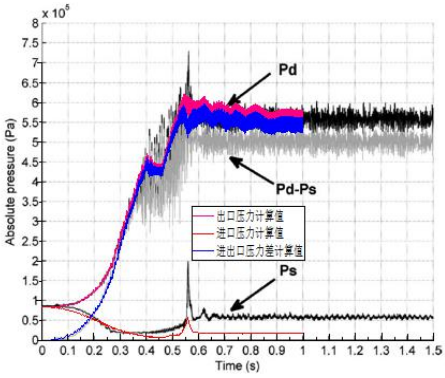


(d) 等效电路空泡体积特性

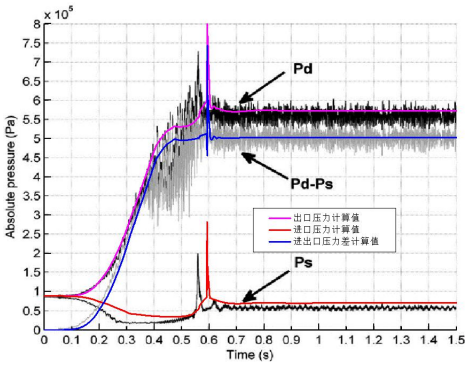
图 10 Case3 带空化计算结果

注：图中被比较的底图为 Duplaa 实验结果[17]，Figure 15

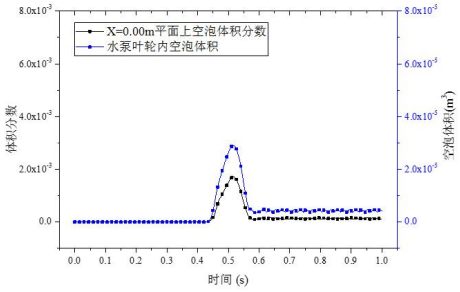
可以看出等效电路计算结果与实验值符合良好，基本规律反映一致，计算结果稍有偏差。由于空化体积曲线在小流量、小空化系数处特性的缺失，小流量、小空化系数下计算误差较大。耦合计算中对出口压力和水头符合较好，但进口压力稳定值在降低后未回升。



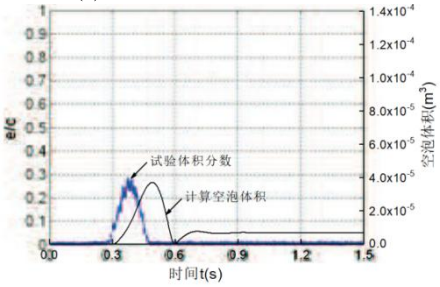
(a) 耦合计算压力特性



(b) 等效电路压力特性



(c) 耦合计算空泡体积特性



(d) 等效电路空泡体积特性

图 11 Case3 带空化计算结果

注：图中被比较的底图为 Duplaa 实验结果[17]，Figure 18

如图 11 所示为小流量工况下的空化特性，进口压力在启动末端存在一个峰值，尽管出口压力在同一时刻也存在峰值，但是由于压力脉动振幅的影响并不明显，此时进口管发生水锤。该工况下 0.3 s 时出现空泡，空化体积开始增大，水头开始降低；0.45 s 时空化体积升到最大，水头降到阶段最低，空泡体积最大值比 case 3 更低，水头降低幅度也更小；之后空泡开始溃灭，空化体积开始减小，水头开始上升；0.5 s 后空泡完全溃灭，水头升至最大值。较 case 2、case 3 来说，case 4 空化区域较小，空泡存在时间较短，水头经历了一次明显降低，一个明显峰值。

可以看出等效电路计算结果与实验值符合良好，基本规律反映一致，计算结果稍有偏差。由于 V_{vapor} - σ曲线的误差，空泡体积计算略滞后，导致压力、水头的降低及峰值的出现也略滞后。在启动初期耦合计算结果与实验结果符合较好，但启动末期耦合计算进口压力稳定值在降低后未回升至实验值，等效电路计算结果更相符。

3 结语

本文采用 MATLAB/SIMULINK 数值模拟软件，基于等效电路法对水力元件建模，将空泡用空化柔性与质量流量增益系数表示并视为电路元件，仿真模拟了 Duplaa 实验中的水泵开阀启动带空化及无空化的过程。在空化模拟中得到了水泵启动过程中三种不同类型的不稳定流动。在高流量的工况（case 2）中，水泵出口处的压力信号出现了大规模的低频振荡；而在流量较低时（case 4），在启动过程中只有一个大幅度的压力下降。在适当的空化系数，较小的流量下（case 3），也能发现水锤现象。使用物理分析来解释启动过程中水泵压头的变化：一般情况下较低的流量总是对应着较弱的空化状态，流量的增加会触发更严重空化的条件，从而导致水泵压头的降低。同时，小流量往往对应着水锤现象的发生，这导致了水泵或进口管道压力的突然振荡。此外，空化体积的大小与空化的程度完全对应，对空化现象的分析应结合空化体积的变化。使用基于等效电

路法的 SIMULINK 数值模拟计算结果表明：

（1）使用等效电路法计算与模型试验及一维 flowmaster 和三维 CFD 耦合计算结果均具有较好的一致性。

（2）无空化的计算结果表明，只要有充足的特性参数输入，等效电路法可以达到三维耦合计算的精度，甚至更高的精度。有空化的计算结果表明，由于小流量、小空化系数下的空化体积随空化系数、流量变化的曲线缺失，计算过程中对未知参数采用线性插值，插值带来的误差对计算结果影响很大，是计算结果与实验结果偏差的主要原因。

（3）等效电路计算可以达到一维特征线法与三维 CFD 耦合计算方法的精度，且避免了耦合计算的线性输入误差以及计算滞后偏差。且相较于耦合计算，等效电路法具有更好的稳定性。

（4）等效电路法的使用需配合三维准静态 CFD 计算对水泵参数的计算。空化柔性、质量流量增益系数依赖于空化体积随空化系数、流量变化的特性曲线；水泵的 Suter 特性曲线依赖于水泵压力随流量、空化系数变化的特性曲线。而这些曲线均需要通过三维恒定工况下的非定常 CFD 计算得到。

（5）电路的计算机计算方法已趋于成熟，使用等效电路法节省时间，节约资源，在实际工程应用中具有很大的优势。

参考文献：

[1] 郭文成, 杨建东, 陈一明, 等. 考虑压力管道水流惯性和调速器特性的调压室临界稳定断面研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3):171-178

[2] 杨建东, 赵琨, 李玲, 等. 浅析俄罗斯萨扬-舒申斯克水电站7号和9号机组事故原因[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4):226-234

[3] 王福军, 白绵绵, 肖若富. Flowmaster 在泵站过渡过程分析中的应用[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(2):144-148

[4] 刘竹青, 毕慧丽, 王福军. 空气阀在有压输水管路中的水锤防护作用[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(4):333-337

[5] Rao C V K, Eswaran K. Pressure transients in incompressible fluid pipeline networks[J]. Nuclear Engineering & Design, 1999, 188(1):1-11

[6] 尹俊连, 王德忠, 王乐勤,等. 水泵水轮机流动 CFD 模拟的研究进展[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6):233-238+243

[7] Zhang, X X, Cheng, Y G. Simulation of hydraulic transients in hydropower systems using the 1-D-3-D coupling approach[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(4):595-604

[8] Zhang, X X, Cheng, Y G, Yang J D, et al. Simulation of the load rejection transient process of a Francis turbine by using a 1-D-3-D coupling approach[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(5):715-724

[9] Ruprecht A, Helmrich T. Simulation of the Water Hammer in a Hydro Power Plant Caused by Draft Tube Surge[C]// Asme/jsme 2003, Joint Fluids Summer Engineering Conference. 2003:2811-2816

[10] Nicolet C. Hydroacoustic modelling and numerical simulation of unsteady operation of hydroelectric systems[J]. Epfl, 2007

[11] Nicolet C, Avellan F, Allenbach P, et al. New Tool for the Simulation of Transient Phenomena in Francis Turbine Power Plants[J]. With Cap, 2002, 10(2):58-62

[12] Alligné S, Nicolet C, Ruchonnet N, et al. Numerical Simulation of Nonlinear Self Oscillations of a Full Load Vortex Rope[J]. Protein Science, 2009, 23(2):123-144

[13] Alligné S, Maruzewski P, Dinh T, et al. Prediction of a Francis turbine prototype full load instability from investigations on the reduced scale model[C]// OAI, 2010:793-798

[14] Yan J, Koutnik J, Seidel U, et al. Compressible simulation of rotor-stator interaction in pump-turbines[C]// Turbomachinery Society of Japan, Korean Fluid Machinery Association, Chinese Society of Engineering Thermophysics, IAHR, 2010:012008

[15] Favrel A, Landry C, Müller A, et al. Experimental identification and study of hydraulic resonance test rig with Francis turbine operating at partial load[C]// 2012:2064

[16] Mössinger P, Conrad P, Jung A. Transient two-phase CFD simulation of overload pressure pulsation in a prototype sized Francis turbine considering the waterway dynamics[C]// 2014:032033

[17] Duplaa S, Coutier-Delgosha O, Dazin A, et al. Experimental Study of a Cavitating Centrifugal Pump During Fast Startups[J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(2):365-368

[18] 孟龙. 空化对离心泵启动过程的影响分析[D]. 中国农业大学, 2016

[19] Brennen C, Acosta A J. Theoretical, quasi-static analysis of cavitation compliance in turbopumps[J]. 1973, 10(3):175-180

风电机组叶片无损检测技术综述

张策　王立闻　蒋恩超　曾涛　彭凡

东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731

摘要：随着风力发电技术的不断发展，风电机组叶片趋于大型化，风电机组叶片健康检测与故障诊断对提升风电机组可靠性、设备人员安全性和电力系统稳定性具有重要意义。针对目前多数风电场采用的望远镜观察和人工吊篮/蜘蛛人检查的巡检方式存在安全性差、检测效率低等问题，很多学者对采用机器代替人工的叶片无损检测技术展开研究，本文综述了基于声学、光学、热力学的无损检测技术的研究现状和工作原理，并说明其能够检测的缺陷类型和使用条件。

关键词：风电机组叶片；健康检测；故障诊断；无损检测

中图分类号：TM315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）03-0031-04

Summary of Non-destructive Testing Technology of Wind Turbine Blades

ZHANG Ce, WANG Liwen, JIANG Enchao, ZENG Tao, PENG Fan

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

Abstract: With the continuous development of wind power technology, the blades of wind turbine tend to be large-scale, and the blade health detection and fault diagnosis of the blades of the wind turbine are of great significance to improving the reliability of wind turbine, the safety of equipment personnel, and the stability of the power system. In response to the current telescope observation of most wind farms and the inspection method of artificially hanging basket/Spider-Man inspection, there are problems such as poor safety and low detection efficiency. The research status and working principles of acoustic, optical, and thermodynamics, and explains the types and use conditions that can be detected.

Key words: wind turbine blades; health testing; fault diagnosis; non-destructive testing

风能是绿色的可再生能源，有良好的发展前景。Wood Mackenzie 风电研究团队发布的研究报告《2022 年全球风电整机企业市场份额排名》中显示，2022 年，受供应链中断、地缘政治的紧张局势、通货膨胀压力和项目执行延迟等因素影响，风电整机企业面临的盈利难题进一步加剧。在全球新增风电装机容量连续两年达到创纪录的 100+GW 之后，2022 年新增风电装机容量回落至 92.8 GW，同比降低 11.5 %。尽管面临多重压力，全球范围内仍有四家整机企业在当年实现了两位数 GW 级装机量。随着装机容量的不断提升，风电场运行维护的压力也逐渐加大，寻找适合不同机组部件的检测方法成为了当前亟需解决的问题。[1-2]

叶片是风电机组的重要组成部分，一般由玻璃纤维、碳纤维、树脂等材料制成，因其制造工艺的复杂性，在成型过程中难免会出现缺陷；另外，由于工作环境的恶劣性与工况的复杂多变性，在运行过程中也会出现不同程度的损伤。传统的叶片检查方式一般有两种：①外部望远镜观测。此方法优点在于设备简单、成本低，缺点是存在无法记录数据、难以 100%全覆盖等问题，此外，根据维修部门的反馈，望远镜观察的结果和实际损伤情况往往相差很大；②人工吊篮/蜘蛛人检查。此方法存在巡检效率低下，人员劳动强度大、风险大，作业窗口受风速影响较大等缺点，一般情况下，待检机组停机时间为 4~8 小时。根据两种人工检查方式的特点，风

收稿日期：2023-11-22

作者简介：张策（1997—），男，2022 年毕业于华北电力大学学校可再生能源与清洁能源专业，硕士研究生，助理工程师。现任东方电气集团科学技术研究院有限公司，主要从事人工智能、故障诊断研究方向。

电场一般采用两种方法相结合的办法，先使用望远镜初步筛查，如发现待确认情况再停机采用人工吊篮/蜘蛛人的方式细致检查，从而避免风电机组长时间的停机，影响风电场的经济效益。

两种传统的人工检查方式均存在严重依赖检查人员的经验、体力、关注度等个体差异的问题。尤其是目前风电机组向高塔筒长叶片方向发展，人工检查的时间成本和人力成本不断增加。随着高精度仪器的不断发展以及人工智能技术的改革创新，众多学者针对风机叶片缺陷的无损检测技术的研究越发深厚，目前主流的无损检测技术可以根据采集的信号种类分为声、光、热 3 类。每类检测技术都具有各自技术优势和使用局限性，本文将简单介绍叶片常见的损伤或缺陷并分别详细介绍 3 类检测技术的原理以及目前比较成熟的技术分支。

1 风电机组叶片的损伤和缺陷分析

风电机组叶片产生损伤或缺陷的原因是多方面的，主要容易出现在叶片生产制造、运输安装以及运行服役三个阶段中：

（1）叶片生产制造过程中会出现的主要问题是材料内部缺陷，包括有孔隙、分层和夹杂等。孔隙缺陷主要是由于树脂与纤维浸润不良，空气排挤不完全等因素造成；分层缺陷主要是因为树脂用量不够、二次成形、粘合剂脱胶等；夹杂缺陷主要是由于加工过程中混入杂物、异物等。[3]

（2）运输安装过程中会出现的主要问题是叶片外部损伤，包括挤压变形、表面磨损等。产生的主要原因是叶片本身尺寸和自重较大并且具有的弹性有限，容易产生不可逆的变形。

（3）运行服役过程中也会因外部环境等客观因素出现不同程度的损伤，包括有表面腐蚀、裂纹和老化等。腐蚀主要是由于风电机组大多在环境恶劣地区，受到风沙、雨水、盐雾等天气的长时间侵蚀；裂纹主要是由于外力冲击（如冰雹、鸟类撞击等）和疲劳累积；机组老化主要是由于气温骤变、雷击等。

2 无损检测技术的比较与分析

2.1 基于声学的风电叶片无损检测技术

主要通过采集声学信号并分析其特征，对叶片损伤或缺陷进行检测。目前较为成熟的技术分支是采用超声波检测技术和声发射检测技术。

2.1.1 超声波检测技术

超声波检测技术能检测叶片复合材料的孔隙、气泡、裂纹、夹杂等缺陷，依据检测结果可以进一步判断材料的疏密、纤维屈曲、弹性模量、厚度等特性和几何形状等方面的变化。[4]中国科学院工程热物理研究所以超声检测图像作为分类对象，结合机器学习算法构建图像损伤分类识别模型，提高了检测效率，解决了其依赖现场环境、检测效率低的问题。[5]超声检测技术具有灵敏度高，可精确确定损伤或缺陷的位置与分布的优点，但也存在对不同类型的缺陷要更换不同规格的探头等缺点。

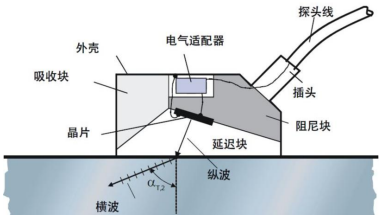


图 1 超声波检测技术示意图

2.1.2 声发射检测技术

声发射检测技术可对裂纹的萌生和扩展进行动态监测，即检测损伤或缺陷出现时的声音信号，实时评估缺陷的危害程度，预防意外事故的发生[6]。在检测过程中，接收的信号是缺陷在应力作用下自发产生的，因此该方法无法对已经产生的损伤或缺陷进行检测，同时在实际应用中，由于声发射对环境因素十分敏感，因此对监测系统会造成干扰，影响检测的准确性，所以很难对缺陷进行定量分析，但是能够提供缺陷在应力作用下的动态信息，对于寿命评估有一定的优势，可对叶片进行安全评价。[3]

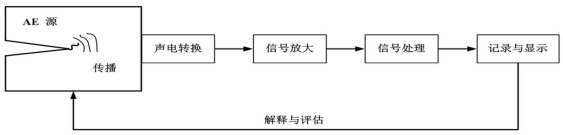


图 2 声发射技术示意图

2.1.3 新型声学检测技术

新型声学检测技术是直接采集、分析叶片本身旋转时发出的声音，判断叶片是否存在损伤或缺陷。当叶片存在损伤或缺陷时，采集到的声音信号与正常状态下的声音信号不同，通过信号特征反映损伤或缺陷的严重程度，针对诊断结果提前处理风电机组叶片。该技术优点在于可以通过一台信号采集设备检测三个叶片状态，节约检测成本；缺点是目前技术仅能检测叶片是否存在损伤或缺陷，但无法确定具体损伤类别。

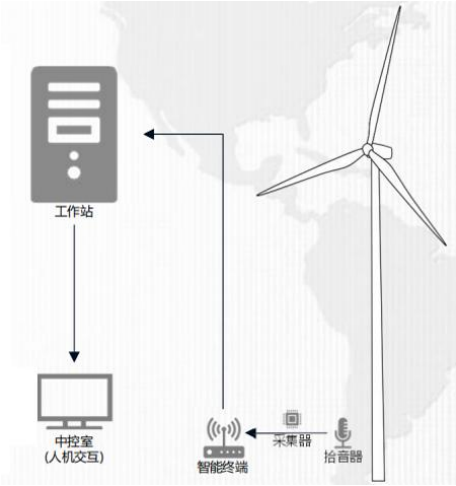


图 3　新型声学检测技术流程图

2.2 基于光学的风电叶片无损检测技术

主要通过采集光学信号并分析其特征，对叶片损伤或缺陷进行检测。目前较为成熟的技术分支是可见光检测技术和光纤传感器检测技术。

2.2.1 可见光检测技术

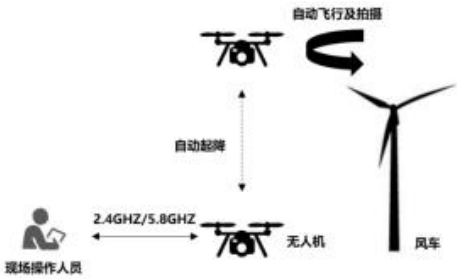


图 4　无人机巡检技术流程图

可见光检测技术是通过高清摄像头等拍摄工具拍摄叶片图像，并采用人工智能、深度学习等技术识别和诊断叶片损伤或缺陷。高清摄像机搭载无人机的组合检测技术是当前可见光检测技术的热门，无人机代替人工可以增加巡检效率，降低巡检风险，结合边缘计算技术也可以实现实时诊断。无人机巡检技术目前的缺点是仍无法完全摆脱飞手，实现全自动巡检，同时由于风电机组叶片叶尖转速过大，在机组运行时无人机无法靠近拍摄，巡检时需要先停机。

2.2.2 光纤传感器检测技术

光纤加速度传感器主要基于干涉仪原理，使用光纤对振动信号进行传输。常见的干涉型加速度传感器有顺变柱体型、膜片型和光纤光栅型等，顺变柱体型加速度传感器通常采用橡胶换能器可实现较高的加速度灵敏度，但是由于橡胶材料易老化、不耐高温从而限制了其实际应用。[7]光纤光栅加速度传感器是近年快速发展的一种光纤加速度传感器，它体积小、灵敏度可调。在风机叶片的关键位置埋入光纤传感器阵列，探测其在加工、成型及服役的动态过程中内部应力、应变的变化，并对外力、疲劳等引起的变形、裂纹进行实时监测，可实现对风机叶片的状态监测与损伤评估。[3]

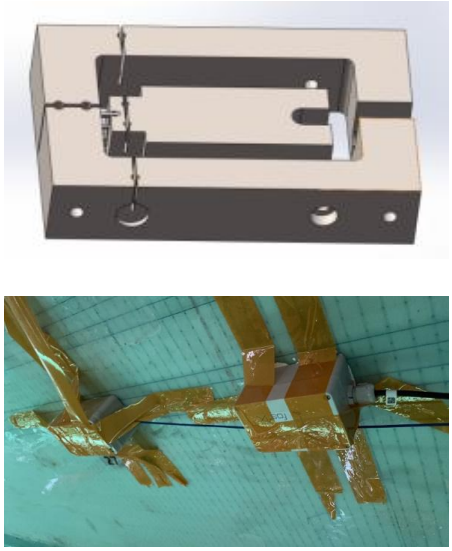


图 5　光纤传感器技术示意图

2.3 基于热力学的风电叶片无损检测技术

目前较为成熟的技术分支是红外热成像检测技术，将物体发出的不可见红外能量转化成可见的热图像，进而分析叶片是否存在缺陷或损伤。[8-9]国内不少研究和文献的调研说明，红外热成像检测技术能够检测出玻璃纤维制叶片的几种典型缺陷。经过比较 ANSYS 软件和理论计算结果，分析得到当叶片内部缺陷尺寸越大、深度越浅，越容易被热

成像技术检测到。同时冷却过程中形成的表面温差随缺陷深度的变化而变化，可以作为红外热成像技术检测叶片缺陷的有力依据。[10-11]红外热成像检测技术是一种比较适用于风电叶片的无损检测方法，尤为适用于常见的分层和渗胶类型的缺陷。

红外热成像技术优点在于在检测时无需与被检测物体接触，在较远距离既可以完成检测任务，更加适用于检测身处恶劣环境、运维人员不易到达的风电机组。其缺点在于可能会受到风电机组高度的限制，在现场检测中有一定的局限性。

2.4 无损检测技术对比

不同无损检测技术优缺点鲜明，具体如表 1 所示。在实际工程应用中可以有效的结合多种技术对风电机组叶片从生产制造、运输安装、运行维护全过程进行检测，更有效的减少叶片的安全隐患，并为后续风电机组叶片全生命周期的缺陷分析提供各阶段的数据支持。

表 1　无损检测技术对比分析表

技术名称	优点	缺点
超声波检测技术	灵敏度高，能精准定位缺陷	识别缺陷采用的多种探头，成本高
声发射检测技术	及时性强，可提前预防叶片破坏	抗干扰能力差，易受到环境干扰
新型声学检测技术	设备简单，检测成本低	无法精确确定缺陷类型及位置
可见光检测技术	可实现整机巡检，巡检效率高	缺陷识别的准确率取决于数据量
光纤传感器检测技术	检测精度高	光线探头易损坏
红外热成像检测技术	检测距离远，无需接触叶片	检测精度会随着高度逐渐降低

3 结语

通过比较传统人工检测技术和基于声学、光学和热力学的风电机组叶片无损检测技术可知，无损检测方法除了提高巡检的安全性和效率以外，还有助于收集、整理和积累叶片缺陷和损伤数据库。当数据积累到一定程度时，可以结合机器学习或深度学习算法搭建快速叶片缺陷快速诊断模型，及时检测叶片状态，保证风电机组安全稳定运行。

参考文献：

[1] 闵兵, 王梦川, 傅小荣, 等. 海上风电是风电产业未来的发展方向: 全球及中国海上风电发展现状与趋势[J]. 国际石油经济, 2016,24(4):29-36

[2] 陈雪峰, 郭艳婕, 许才彬, 等. 风电装备故障诊断与健康监测研究综述[J]. 中国机械工程, 2020,31(2):175-189

[3] 刘双, 胡斌, 贺铸, 等. 风机叶片缺陷的无损检测方法比较与评价[J]. 无损检测, 2015, 37(3):47-51

[4] 郁青, 何春霞. 无损检测技术在复合材料检测中的应用[J]. 工程与试验, 2009, 49(2) : 24-29

[5] 李苏威, 石可重, 张明明. 一种风力机叶片超声无损检测方法[P]. 北京市：CN111122705B. 2023-01-03

[6] 周伟, 张宏波, 马力辉, 等. 风电叶片复合材料结构缺陷无损检测研究进展[J]. 塑料科技, 2010, 38(12) : 84-86

[7] 杨昌, 周宏朴, 张敏, 等. 新型簧片式光纤加速度传感器研究[J]. 光电子. 激光, 2013,24(2):209-214

[8] 琦格琦. 基于红外热成像技术的风力机叶片涂层损伤监测的研究[D]. 内蒙古农业大学, 2020

[9] 王健, 张永, 高靖, 等. 基于红外热成像技术的风力机叶片检测综述[J]. 内蒙古农业大学学报（自然科学版）, 2021, 42(3): 115-120

[10] 严天鹏, 肖劲松. 大型风力机叶片的红外成像无损检测技术研究[C]//中国太阳能学会 21 世纪太阳能新技术: 2003 年中国太阳能学会学术年会论文集. 上少交通大学出版社. 2003:4

[11] 肖劲松, 严天鹏. 风力机叶片的红外热成像无损检测的数值研究[J]. 北京工业大学学报, 2006 (1):48-52+66

核岛主设备经验反馈落地难原因分析及解决方案探索

徐　庆

中国核动力研究设计院，成都 610213

摘要：经验反馈是核电厂建设过程中一种重要的项目管理知识，核电厂各参建单位开展了形式多样的经验反馈活动并取得了不错的结果，但部分问题后续仍在重复发生。本文通过对中国核动力研究设计院设备采购部在核岛主设备采购项目管理过程中经验反馈活动开展情况及实施效果情况进行了研究，分析了经验反馈“落地难”的根本原因，并提出了相应的解决方案。期望通过对解决方案的跟踪验证，证明根本原因的分析是正确的、解决方案是有效的，也为后续经验反馈活动的持续有效开展提供一些思路。

关键词：核电设备；经验反馈；落地难

中图分类号：TM623　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）03-0035-05

Analysis of the Reasons for Difficulity in Implementing Experience Feedback and Exploration of Solutions on Nuclear Power Equipment

XU Qing

(Nuclear Power Institute of China, 610213, Chengdu, China)

Abstract: Experience feedback is an important project management knowledge in the construction process of nuclear power plants. The participating units of the nuclear power plant have carried out various forms of experience feedback activities and achieved good results, But some of the problems continue to occur repeatedly. This article studies the implementation and effectiveness of experience feedback activities in the management process of nuclear power equipment procurement projects by the Nuclear Power Equipment Integration Procurement Department of NPIC. It analyzes the root cause of the difficulty in implementing experience feedback and proposes corresponding solutions. I hope to track and verify the solution, prove that the root cause analysis is correct and the solution is effective, and provide some ideas for the continuous and effective implementation of subsequent experience feedback activities.

Key words: nuclear power equipment; experience feedback; implementation

经验反馈是指对已发生质量问题的过程、原因、纠正和预防措施等有关信息进行收集、分析、总结和应用，采取措施进行提前预防以防止共性质量问题的重复发生或降低质量问题造成的影响，从而达到节约成本（时间、资金）的目的。从上述定义中可以分析出，要实现经验反馈目的，关键是纠正措施有效，即要切实落地。

中国核动力研究设计院设备采购部（以下简称“采购部”）是进行核电厂核岛一回路主设备采购管理的专业团队，拥有丰富的核岛一回路主设备采购管理经验。核岛主设备采购管理的主要特点是设备安全（质量保证）等级高、监管力度大、制造工艺复杂、采购周期长、合同金额大，且核岛主设备的质量是保证核电厂安全的最重要因素之一，不容有

收稿日期：2023-10-23

作者简介：徐庆（1982－），男，2002 年毕业于西南科技大学机械设计制造及其自动化专业，本科，工程师。现在中国核动力研究设计院主要从事核电站核岛一回路主设备集成采购项目管理工作。

失。为提高采购工作效率、少走弯路、避免重复犯同样错误，采购部在成立之初即引入了经验反馈这一先进的项目管理方法，经过 10 余年的开展，采购部经验反馈活动取得了不错的成果。但在活动中发现，部分问题仍有重复发生，说明经验反馈还有进一步的提升空间。因此，本文针对经验反馈落地效果难的根本原因进行了仔细分析，以制定出积极有效的改进措施。

1 经验反馈未落地的根本原因分析

采购部在 2010 年 12 月 6 日首次发布了《经验反馈管理》的程序文件，规定了以“经验反馈信息单”为主的经验反馈信息收集方式。截止至 2021 年 12 月 31 日，共收集到了 245 份内外部的经验反馈案例。本文主要针对该 245 份内外部的经验反馈案例，从不同方面进行分析，以寻找经验反馈未落地的根本原因并探索制定相应的对策，从而达到节约成本（时间、资金）的最终目的。

1.1 经验反馈案例数量信息分析

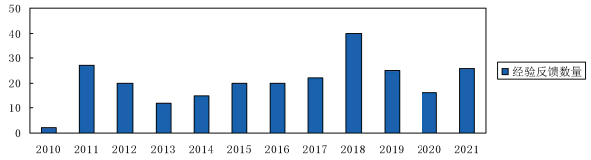


图 1　历年经验反馈案例数量

从采购部 2010 年 12 月 27 日产生的第 1 份经验反馈案例，到 2021 年 11 月 23 日产生的 2021 年最后 1 份经验反馈案例，11 年的时间里，共产生了 245 份经验反馈案例，平均每年产生 22 份案例，历年经验反馈案例数量的具体分布情况详见图 1。2018 年以前的 7 年时间里只有 2 年的经验反馈案例达到或超过平均值，占比为 28 %，2018 年以后的 4 年里有 3 年的经验反馈案例达到或超过平均值，占比为 75 %。2018 年经验反馈案例数量激增的原因是采购部制定经验反馈激励政策并开展了经验反馈评优活动，经验反馈案例数量是评选的重要因素之一，说明适当的激励有利于经验反馈工作的积极开展。但近年来经验反馈案例数量持续居高不下，也表明了经验反馈的落地效果不好。我们继续对上述经验反馈案例进行详细的分析。

1.2 经验反馈案例类型信息分析

采购部 245 份经验反馈案例中：来自外部的经验反馈案例共 15 份，占比为 6 %；良好的经验反馈案例 25 份，占比 10 %；项目管理经验反馈案例 192 份，占比 79 %；非项目管理（采购部内部安全等经验反馈案例）经验反馈案例 13 份，占比 5 %，具体详见图 2。结合本文的研究目的，去除外部、良好及非项目管理的经验反馈案例，继续对 192 份项目管理经验反馈案例这一核心数据进行进一步的分析。

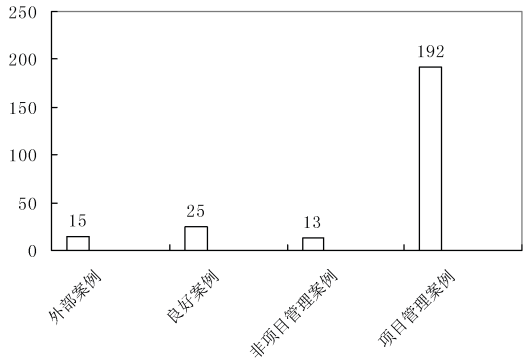


图 2　经验反馈案例分类一

按照核电厂核岛主设备项目采购管理流程，将项目采购管理分为：合同签订、项目执行、验收交付三个主要阶段，具体见图 3。从图 3 中的数据可以看出，项目执行阶段经验反馈案例数量最多，占比达 65.7 %，其次是验收交付阶段经验反馈案例数量占比为 28.6 %，合同签订阶段经验反馈案例数量占比仅为 5.7 %。项目执行及验收交付阶段的经验反馈案例合计占比达 94.3 %，是问题产生的高发阶段，一方面与核岛主设备项目管理流程的周期及工作量相符合，另一方面说明制定的纠正措施效果不落地。那么，这些问题是否是重复发生的呢？

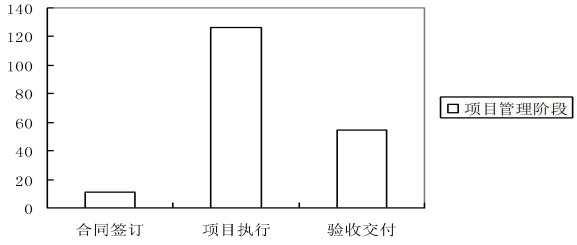


图 3　经验反馈案例分类二

1.3 经验反馈案例产生原因分析

将 192 份项目管理经验反馈案例按照产生的原因归纳分为：未按程序/要求执行、分供方管理、项目执行过程管控不力、开工检查不合、验收/运输/包装问题以及处理不及时 6 个方面，具体见图 4。从图 4 可以看出，未按程序/要求执行、项目执行过程管控不利、验收/运输/包装问题以及处理不及时合计占比高达 94 %，是项目管理经验反馈案例产生的最主要原因，具体见图 5。

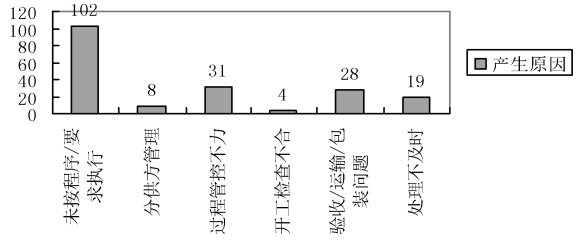


图 4　经验反馈案例产生原因分析

同时，根据项目管理经验反馈案例发生的时间，未按程序/要求执行、验收/运输/包装问题等主要原因产生的案例的时间分布贯穿了整个统计周期，说明相同原因导致的类似问题仍在重复发生，制定的纠正和预防措施未真正落地，并未达到经验反馈活动开展的目的。

1.4 经验反馈未落地根本原因分析

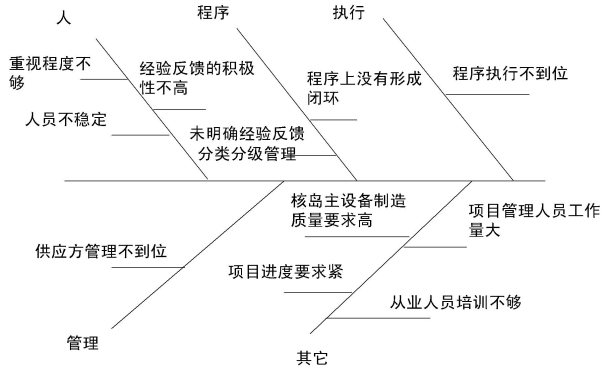


图 5　经验反馈无法切实落地原因分析鱼骨图

其实，对于经验反馈工作无法切实落地，未达到预期的效果和目的的问题，采购部早在 2015 年就已发现。为解决该问题，专门成立了 QC 活动小组，以“切实提升经验反馈的有效性”为课题，开展了相关质量改进活动。QC 小组分析了采购部核电设备采购管理中重复发生的案例，采用因果法从人、程序、执行、管理及其他因素方面进行了原因分析，具体见图 1。

通过原因分析，QC 小组确定了影响经验反馈落地的 4 个要因：人、程序、执行及管理，并逐一制定了详细的对策以解决经验反馈落地效果不好的问题。但从 2015 年以后产生的经验反馈案例来看，相同原因导致的类似问题仍在重复发生且占比合计仍高达 92 %，这说明 QC 小组未找到经验反馈落地难的根本原因，所以后期按照原因分析制定的纠正措施实施的效果并不好。那么，经验反馈不能切实落地的根本原因到底是什么呢？下面，我们来看一个案例，或许能从中找到一些启发。

前期，采购部在进行设备制造开工先决条件检查时，经常出现问题，如供应方准备的资料不齐全、检查人员检查的内容漏项、不具备制造开工条件等，不仅给采购部造成了人力、物力及财力的巨大浪费，还对设备的制造进度造成了一定的不利影响。针对该问题，采购部后续制定了有效的纠正措施，并在《开工会管理》程序文件中增加了《设备制造开工会先决条件检查表》（表 1），详细地明确了开工检查时需检查的内容及检查要求。后续再进行开工检查时直接使用该检查表对相关要素进行逐一检查，基本未再发生前期的问题，该类经验反馈案例占比只有 2 %，持续时间最短，证明了后续采取的纠正措施有效落地，达到了经验反馈开展的效果与目的。

表 1　设备制造开工会先决条件检查表

项目名称		设备名称		
供应商		检查日期		
项目	检查内容	检查要求	检查情况记录	判定
工厂资质	设备设计、制造许可证	制造厂提供资质证书，查有效时间。		

续表

人员资质	无损检验，焊工，热处理，物理化学试验，计量等	制造厂提供人员名单，提供各类人员资质证书，查服务单位及服务时间是否有效。
	组织机构、人员培训	制造厂提供项目组织机构图表、人员名单。培训计划及培训记录。
质保体系	质保大纲、管理程序	制造厂提供质保大纲，查审批批准手续及版本，培训记录。提供项目的专用程序及其清单、ADL 文件。
	质量计划	制造厂提供质量计划及清单，查审核批准手续及版本。
	上报 NNSA 文件检查	项目质保大纲和程序清单、质量计划、技术规格书、分包项目清单。
	内部质保监查	随机抽查监查记录。
	外部质保监查	抽查主要分供方的监查记录。
生产设备	焊接、机加工、热处理、装配等设备	制造厂提供主要设备清单、台帐，现场查完好情况及标识。
检验设备	无损检验、物理化学试验、尺寸测量等设备	制造厂提供设备清单及标定证书，按照清单核对设备型号，查有效时间，注意标定单位的资质。
进厂材料验收	/	制造厂提供合格证等质量证明文件，查复验相关记录及验收结果，查原材料入厂管理。
现场环境	/	现场标识清楚、醒目、环境清洁。
制造、工艺文件检查	/	制造图纸、技术规格书及相关标准清单。制造工艺方案。提供工艺程序文件及清单，按制造流程图，提供制造大纲和各工序操作规程，查编审批记录。
其他	补充特殊要求	如：车间评定是否完成等。
检查结论		
	参加检查单位	
	检查人员（签字）	

根据上述对采购部的经验反馈案例分析的结果，以及后续有效落地的纠正措施的实施效果，可以得出采购部经验反馈工作无法切实落地的根本原因为：经验反馈案例制定/采取的纠正措施未与采购部的工作内容/流程相结合，即未形成采购部“特色”的经验反馈工作。

所以，采购部的经验反馈工作要切实落地，必须形成采购部“特色”的经验反馈工作：一是坚持经验反馈的基本原则和目的；二是经验反馈工作要结合采购部的工作内容和管理流程来开展，要与采购部的工作相契合；三是要随着相关变化而改进，持续发展。

2 解决方案探索

根据经验反馈工作无法切实落地的根本原因，结合采购部工作内容和管理流程，本文探索出了以下两种解决方案。

一种是如《设备制造开工会先决条件检查表》一样建立可视化、明确化的工作表 ，将问题纠正措施在程序中明确，并随工作内容或程序的变化而变化。但这种方案适合于单一的问题且可快速实施，缺点是不适合于复杂的有相互关联的问题。

第二种是结合中核集团“精细化管理”的管理要求，按照核电厂核岛一回路各主设备采购流程及

主要制造工艺流程，结合各阶段采购管理的具体要求，建立核电厂核岛一回路各主设备“特色”的管理流程（图 6），并将前期经验反馈案例的纠正措施落实到具体的采购管理流程之中。该方案预计可从根本上让经验反馈工作切实有效开展，避免类似问题重复发生，达到经验反馈工作开展的根本目的，但该方案建设要求高、成本高、周期长、管理难度高。

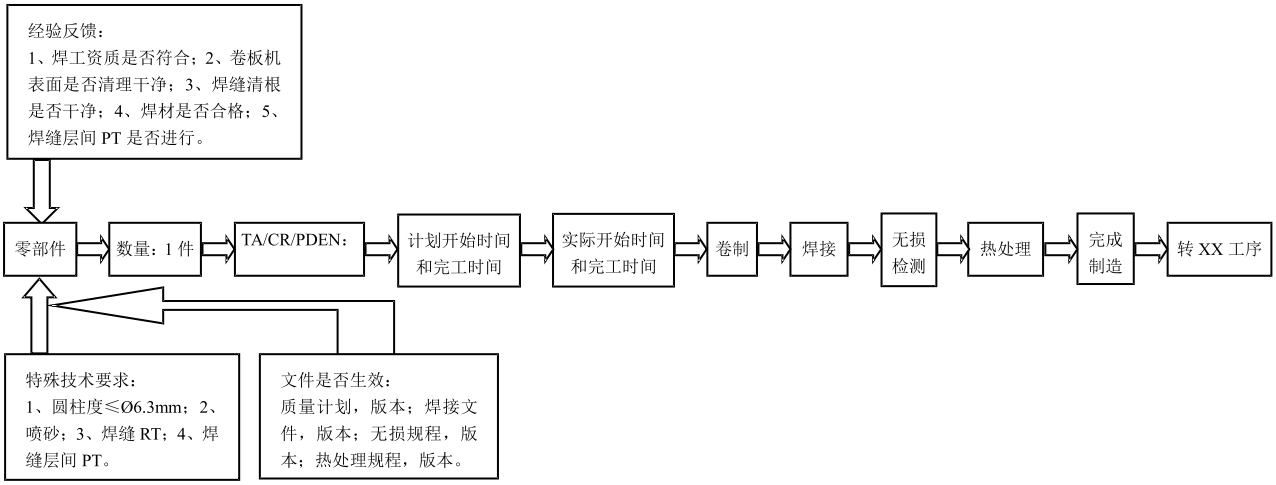


图 6　经验反馈嵌入核岛主设备采购管理流程图

上述两种解决方案各有优劣，但要从根本上推动经验反馈工作有效开展，本文推荐采取第二种解决方案。

3　结语

根据辩证唯物主义认识论的基本原理，经验反馈理论可以看作一种理论的科学认识，采购部开展的经验反馈工作是具体的实践，认识和实践之间是以实践为基础的辩证统一关系，是相互作用的、相互促进的。“知行合一，笃行致远”，所以，采购部开展的经验反馈工作未能切实落地的根本原因就是经验反馈工作的开展脱离了采购部核电核岛一回路主设备采购管理的工作实际，只有将认识和实践相结合，形成采购部“特色”的经验反馈工作，才能让经验反馈工作切实落地，从而实现经验反馈工作的根本目的。

（上接第 23 页）

参考文献：

[1] 熊东旭. 护环设计中的几个问题浅析[J]. 东方电机, 1999（2）: 28-32
[2] 杨昔科, 吴新亚, 姚金传. 大型汽轮发电机转子低周疲劳寿命分析[J]. 电机技术, 2015（3）: 5-7
[3] 王庭山. 空冷 180MW 发电机转子护环部分的强度及低周疲劳分析[J]. 上海大中型电机, 2006（4）: 7-13
[4] 柳菲, 兰波. 空冷 185MW60Hz 汽轮发电机护环及中心环有限元计算[J]. 上海大中型电机,2016（1）:1-4
[5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, An International Code, Section Ⅷ, Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 2-Alternative Rules[M].New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2015
[6] 沈鋆. ASME Ⅷ-2 中基于弹性总应力幅的疲劳评定方法进展[J]. 化工设备与管道, 2013, 50（6）: 15-18
[7] 蒲太平, 李积霞, 彭礼明. 基于 ASME 设计规范的汽轮发电机转子齿疲劳强度分析[J]. 大电机技术, 2018（4）: 27-31
[8] 谢素明, 周晓坤, 李向伟, 等. 基于美国 ASME 标准的重载货车车体焊缝疲劳寿命预测[J]. 计算力学学报, 2012, 29（1）: 129-134

大型核电汽轮机中间轴承箱可靠性设计

周赵伟　章艳　李继朝　伍文华　陈贝贝　刘晓燕

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：本文介绍了核电汽轮机中间轴承箱的总体结构，着重分析了核电汽轮机中间轴承箱的受力情况，通过有限元计算和电厂实测数据的分析，论证了核电汽轮机中间轴承箱的可靠性和安全性。

关键词：核电汽轮机；轴承箱；受力分析；可靠性

中图分类号：TM623　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）03-0040-03

Design on Reliability of Nuclear Turbine Intermediate Bearing Box

ZHOU Zhaowei, ZHANG Yan, LI Jichao, WU Wenhua, CHEN Beibei, LIU Xiaoyan

(Dong Fang Steam Turbine Corporation, 618000, Deyang , Sichuan, China)

Abstract:The paper introduced the whole structure of nuclear turbine intermediate bearing box and focused on force analysis for bearing box,by finite element calculation and analysis measured data of the power plant,proof the reliability and safety of turbine bearing box.

Key words: nuclear turbine; bearing box; force analysis; reliability

核电汽轮机中间轴承箱内部放置有中压支持轴承、低压支持轴承、推力支持轴承，起到固定汽轮机转子与静子之间相对位置的作用。[1]轴承箱内部布置的润滑油管和顶轴油管，用于输送润滑油和顶轴油，以便满足轴承润滑和减小转子低速旋转时摩擦力的需求。轴承箱整体结构如图 1 所示。

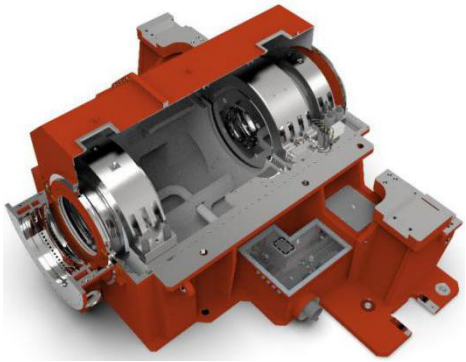


图 1　核电汽轮机中间轴承箱

核电汽轮机中间轴承箱尺寸大（长 4 120 mm×宽 6 740 mm×高 1 435 mm）、重量重达 57 吨，轴承箱结构复杂，汽轮机运行过程中，轴承箱同时承受着静载荷和动载荷，因此轴承箱必须有足够的强度和刚度[2]，同时其固有振动频率应避开 25 Hz 基频和倍频，以保证机组安全、可靠的运行。

1　核电汽轮机中间轴承箱受力分析

鉴于核电汽轮机中间轴承箱结构复杂，为论证核电汽轮机中间轴承箱的可靠性和安全性，有必要分析轴承箱的受力情况，具体如下：

1.1 转子重力载荷

由高中压转子、低压转子(包括动叶片)等转子部件的重量产生的力，主要作用于中压支持轴承座、低压支持轴承座。

按转子重心到支撑点的距离，根据力和力矩平衡原则，即可计算出支撑点处的重力载荷。

1.2 高中压汽缸重力载荷

由高中压汽缸(包括隔板、汽封体等部件)的重

收稿日期：2023-09-05

作者简介：周赵伟 (1989－)，男，2012 年毕业于大连理工大学涡轮机专业，本科，工程师。现任职东方汽轮机有限公司，主要从事汽轮机结构设计等方面的工作。

量产生的力，主要通过高中压汽缸中压侧左、右猫爪作用于轴承箱支撑位置。

按高中压汽缸重心到支撑点的距离，根据力和力矩平衡原则，即可计算出支撑点处的重力载荷。

1.3 扭转反力载荷

蒸汽作用在隔板上的反转力产生的载荷，主要通过高中压汽缸中压侧左、右猫爪作用于轴承箱支撑位置。

图 2 为扭转反力示意图。扭转反力的大小与汽缸功率有关，因转子输出的为额定力矩，故扭转反力表现为力偶的形式。具体按如式（1）计算：

$$F_r = 9550 \times \frac{P}{2 \times n \times L} \qquad (1)$$

式（1）中：

F_r—前(后)猫爪上的扭转反力，N；

P—汽缸功率，kW；

n—转子工作转速，r/min；

L—猫爪支点的横向距离，m。

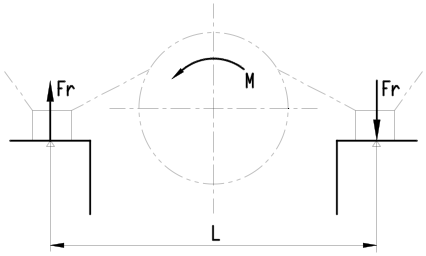


图 2　扭转反力示意图

1.4 转子不平衡载荷

转子剩余不平衡量旋转产生的离心力载荷，主要作用于支持轴承座。按如下式计算：

$$F = M \times \omega \times G \qquad (2)$$

式（2）中：

F—转子剩余不平衡量旋转产生的离心力载荷，N；

M—转子质量(支撑点处的重力载荷)，kg；

ω—转子工作转速下的角速度，rad/s；

G—转子平衡品质级别，mm/s；对于燃气轮机和汽轮机，G=2.5 mm/s。

1.5 摩擦力载荷

高中压汽缸受热膨胀或冷却收缩时，高中压汽缸中压侧左、右猫爪与轴承箱的支撑面相对滑动产生的力。

摩擦力大小为支撑点处的重力与扭转反力之和乘以摩擦系数，一般情况下摩擦系数取 0.3。

1.6 轴向推力载荷

蒸汽作用在转子上产生的轴向推力[3]，主要作用于推力轴承座。轴向推力载荷需分别考虑正常运行工况和极限运行工况(高中压阀全关或者中压阀全关)。

蒸汽作用在转子上产生的轴向推力根据蒸汽热力数据计算得到。

1.7 螺栓预紧力载荷

在地脚螺栓预紧过程中，预紧力作用下的地脚螺栓与轴承箱之间产生的沿地脚螺栓轴心方向的力。在满足轴承箱安装和紧固要求的前提下，确定地脚螺栓预紧载荷。一般螺栓预紧应力载荷取螺栓屈服应力的 0.5～0.6 倍。

1.8 地震载荷

地震工况下的加速度产生的载荷力，由相应设备重量引起。地震工况下的加速度一般根据电厂所在地的地质情况确定。

2 核电汽轮机中间轴承箱有限元分析

由于核电汽轮机中间轴承箱结构受力复杂，常规计算方法很难准确分析，故采用三维有限元方法进行分析计算。[4-5]

2.1 中间轴承箱有限元分析边界条件

轴承箱各计算工况下力的边界条件见表 1。

表 1　核电汽轮机中间轴承箱各计算工况下力的边界条件

序号	载荷类型	序号	载荷类型
①	高中压转子重力载荷(Z 向)	⑩	高中压汽缸左后猫爪摩擦力(X 向)
②	低压转子重力载荷(Z 向)	⑪	高中压汽缸右后猫爪摩擦力(Y 向)
③	高中压汽缸右后猫爪重力载荷(Z 向)	⑫	高中压汽缸左后猫爪摩擦力(Y 向)
④	高中压汽缸左后猫爪重力载荷(Z 向)	⑬	额定运行轴向推力(Y 向)
⑤	高中压汽缸右后猫爪扭转反力(Z 向)	⑭	极限运行轴向推力(Y 向)

续表

序号	载荷类型	序号	载荷类型
⑥	高中压汽缸左后猫爪扭转反力(Z 向)	⑮	地脚螺栓预紧力载荷(Z 向)
⑦	高中压转子不平衡量载荷(Z 向)	⑯	地震载荷(Z 向)
⑧	低压转子不平衡量载荷(Z 向)	⑰	地震载荷(X 向)
⑨	高中压汽缸右后猫爪摩擦力(X 向)	⑱	地震载荷(Y 向)
计算工况类型		力的边界条件	
工况 1：额定工况		①②③④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑮	
工况 2：极限工况		①②③④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑭⑮	
工况 3：额定工况+地震工况		①②③④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑮⑯⑰⑱	

2.2 中间轴承箱强度、变形计算结果

轴承箱强度、变形计算结果见图 3~5 以及表 2。

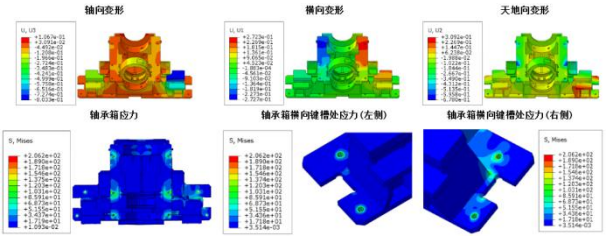


图 3　额定工况下轴承箱应力(MPa)和位移(mm)云图

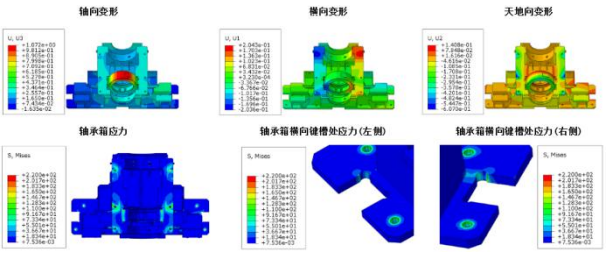


图 4　极限工况下轴承箱应力(MPa)和位移(mm)云图

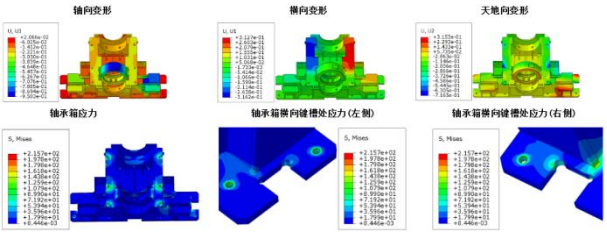


图 5　额定工况(考虑地震载荷)下轴承箱应力(MPa)和位移(mm)云图

由表 2 及计算云图可以看出：

在各运行工况下，轴承箱变形很小，整体应力水平较低，均小于材料对应温度下的屈服强度(265 MPa/40 ℃)。对于极限工况下，推力轴承座与轴承箱连接处应力水平较高的情况，因应力集中区域很小，能通过局部塑形应变使得该区域应力重新分配，从而降低应力值。因此轴承箱强度、变形满足设计要求。

根据刚体力学原理分析，在连接基础和轴承箱的地脚螺栓满足强度要求的前提下，无论汽缸处于受热膨胀还是冷却收缩状态，轴承箱在各载荷共同作用下，不会发生失稳现象。

表 2　核电汽轮机中间轴承箱在给定载荷下的变形和应力值

	额定工况	极限工况	额定工况+地震工况
轴向变形/mm	-0.80~0.11	-0.016～1.07	-0.95～0.02
横向变形/mm	-0.32～0.27	-0.20～0.20	-0.32～0.31
天地向变形/mm	-0.68～0.31	-0.61～0.14	-0.72～0.31
推力轴承座与箱体连接处应力/MPa（最大/平均）	67/45	284/220	212/170
左侧横向键槽圆角处应力/MPa（最大/平均）	35/17	40/32	37/25
右侧横向键槽圆角处应力/MPa（最大/平均）	58/45	68/60	65/52

2.3 中间轴承箱固有频率计算结果及现场实测数据

中间轴承箱固有频率计算结果及现场振动实测数据见表 3、表 4。

表 3　核电汽轮机中间轴承箱 1～8 阶固有频率计算结果

频率阶次	1	2	3	4	5	6	7	8
频率值/Hz	40.78	43.43	63.5	68.79	87.81	94.98	95.75	96.8

表 4　核电汽轮机中间轴承箱振动实测数据

项目名称	2#轴承处振幅/μm	3#轴承处振幅/μm
FQ5#机组	13.3	46.9

从表 3 计算结果可以看出：中间轴承箱与转子

（下转第 51 页）

直流式蒸汽发生器支撑板阻力性能试验研究

代文花[1] 武志广[2] 姜凤鸣[1] 樊俊[1] 王博[1]

1.东方电气股份有限公司，成都 611731；2.中国原子能科学研究院，北京 100000

摘要：本文采用试验方法研究了某直流式蒸汽发生器支撑板的阻力特性。通过相似与模化采用约为原型 1/2 直径的试验体测得了支撑板在不同工况下的压损情况，拟合出支撑板局部阻力系数与雷诺数的经验关系式。本文得到的试验数据可为蒸汽发生器阻力计算方法提供验证，为蒸发器以及整个系统回路设计提供支撑。

关键词：蒸发器；支撑板；阻力特性；试验研究

中图分类号：TL353.13 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）03-0043-09

The Experimental Study of Resistance Performance for the DC-type Steam Generator Support Plate

DAI Wenhua[1], *WU Zhiguang*[2], *JIANG Fengming*[1], *FAN Jun*[1], *WANG Bo*[1]

(1. Dongfang Electric Co., Ltd., 611731, Chengdu, China; 2.China Institute of Atomic Energy, 100000, Beijing, China)

Abstract: In this paper, the resistance characteristics of the support plate of a DC steam generator are studied by experimental methods. Through similarity and modelling, the pressure loss of the support plate under different working conditions was measured by using a test device with a diameter of about 1/2 of the prototype size, and the empirical relationship between the local resistance coefficient of the support plate and the Reynolds number was fitted. The test data obtained in this paper can provide verification for the resistance calculation method of the steam generator and support for the design of the evaporator and the entire system circuit.

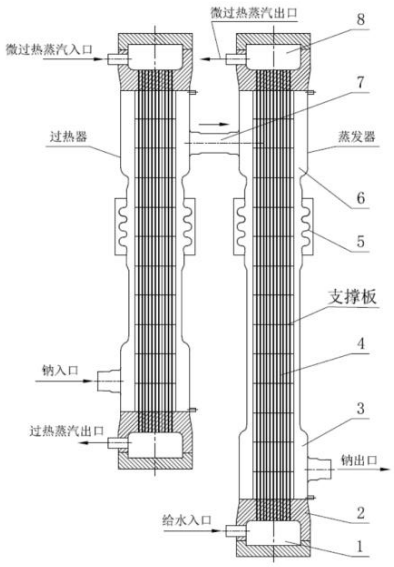
Key words: steam generator; support plate; resistance characteristics;experimental study

本文研究的蒸汽发生器为典型的直流式换热器，其结构形式如图 1 所示，主要由蒸发器和过热器组成。支撑板是蒸汽发生器的重要结构，关系到蒸汽发生器的换热效率，壳侧压降和抗结垢能力，尤其是用于抑制换热管流致振动的发生。[1-2]董其伍[3-4]、罗朝嘉[5]、孙凯丽[6]、姚瑶[7]、Ma[8]和 Maakoul[9]等采用三维数值分析软件开展了支撑板对壳程综合性能的影响，其中，Ma 和 Maakoul 还研究了不同结构形式的支撑板，宫本希[10]采用 LDV 试验与数值模拟结合的方法研究了支撑板增强换热的机制。

针对新研发的蒸汽发生器支撑板，一方面，支撑板数量多且截面比相对较大，是评估蒸汽发生器压损的最重要部分。另一方面，本文研究的蒸汽发生器支撑板的局部结构复杂，无完全适用的经验关系式。采用 CFD 理论方法进行分析时需要一定的试验数据作为验证和修正分析的依据。故有必要对直流式蒸汽发生器支撑板的阻力特性试验研究，为蒸汽发生器以及整个系统回路设计提供支撑。

收稿日期：2024-02-26

作者简介：代文花（1987－），女，2011 年毕业于西安交通大学能源动力系统及自动化专业，本科，工程师。现在东方电气股份有限公司核设备设计所，主要从事核设备设计研发工作。



1.下部腔室; 2.管板; 3.冷却剂出口腔; 4.管束; 5.热补偿装置; 6.冷却剂进口腔; 7.连接管; 8.蒸汽腔室

图 1 一种直流式蒸汽发生器结构示意图

1 试验方案及试验系统

1.1 试验方法

蒸汽发生器壳侧运行介质为高温液态金属，直接在原型参数下进行试验需要消耗大量的人力物力建设试验设施。考虑到试验的可行性与经济性，阻力性能试验按照流动相似原理采用冷态条件下的水代替原有热态金属进行模化试验；同时建立支撑板特征单元结构简化原型结构；不仅可以大大节省试验经费开支，还能够深入的研究流动现象的本质问题，为解决绝大多数实际问题提供技术支撑。

影响局部阻力的相似准则数为欧拉数：

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho u^2}$$

欧拉数的影响因素主要是几何结构，满足几何相似，即保证了欧拉数相似。

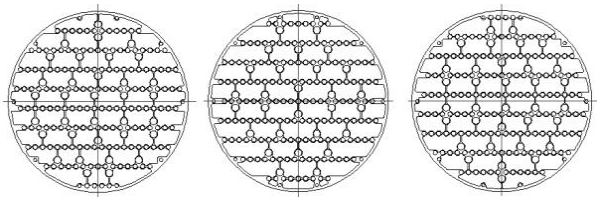
影响摩擦阻力的相似准则数为雷诺数：

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu}$$

蒸发器和过热器的支撑板具体结构见图 2、图 3，具体开孔截面比见表 1。可以看出：蒸发器和过热器各有两种不同的支撑板结构（支撑板 a 水平旋转 180°后与支撑板 c 相同，故归为支撑板 a/c 和支撑板 b 两种）。但两种支撑板结构的开孔截面比基本相同，因此蒸发器和过热器均只对一种支撑板结构开展试验研究即可。

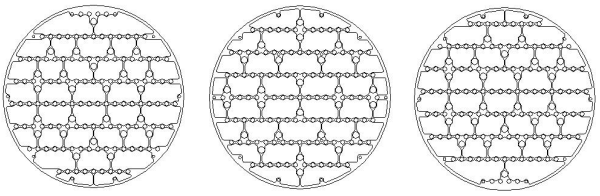
支撑板的阻力系数主要与面积比（支撑板流通面积/管束区流通面积）有关，与具体开孔结构的关系不大，考虑到试验的经济性，所设计的支撑板局部阻力试验体直径约为原型的 1/2，试验体支撑板结构是选取原型支撑板的局部并进行调整获得的，所设计的支撑板开孔率及厚度与原型基本相同，传热管外径与原型相同，尽量保证欧拉数相似。

以蒸发器支撑板结构 b 为例，表 2 列出了蒸发器支撑板局部阻力试验体与原型的相似准则数计算表，可以看出：在给定的流量下，原型与试验体进口处的雷诺数均已超过 105，流动达到自模化，满足雷诺数相似。



支撑板 a　　支撑板 b　　支撑板 c

图 2 蒸发器支撑板结构



支撑板 a　　支撑板 b　　支撑板 c

图 3 过热器支撑板结构

表 1 支撑板开孔截面比汇总

位置	面积比
蒸发器支撑板 a/c	0.547
蒸发器支撑板 b	0.552
过热器支撑板 a/c	0.626
过热器支撑板 b	0.630

表 2 蒸发器支撑板局部阻力试验相似准则数计算表

参数	单位	蒸发器支撑板 b	蒸发器支撑板试验体
介质	—	液态金属	水
流量	kg/s	372.0	219.2
流量	t/h	1339.2	789.1

（续表）

参数	单位	蒸发器支撑板 b	蒸发器支撑板试验体
温度	℃	467.00	50
密度	kg/m³	840.2	988.1
粘度	kg/(m.s)	2.57E-04	5.47E-04
筒内径	m	0.680	0.348
换热管外径	m	0.016	0.016
换热管数量	根	473	121
当量直径	m	0.041 4	0.039 5
截面积	m²	0.268 1	0.070 8
流速	m/s	1.65	3.13
雷诺数	—	2.23E+05	2.23E+05

以蒸发器支撑板结构 b 为原型，分别对原型支撑板及所设计的几种支撑板结构进行数值计算，并对不含支撑板结构的相同长度管束摩擦阻力进行计算。其中支撑板试验体的设计准则是保证面积比（支撑板流通面积/管束区流通面积）及厚度与原型相同，直径约为原型的 1/2，开孔方式与原型相似。

支撑板原型及所设计的支撑板试验体结构见图 4，其中试验体 1、2 为对称结构，试验体 3 为不对称结构；计算几何模型见图 5；支撑板的具体结构参数见表 3；数值计算参数见表 4。

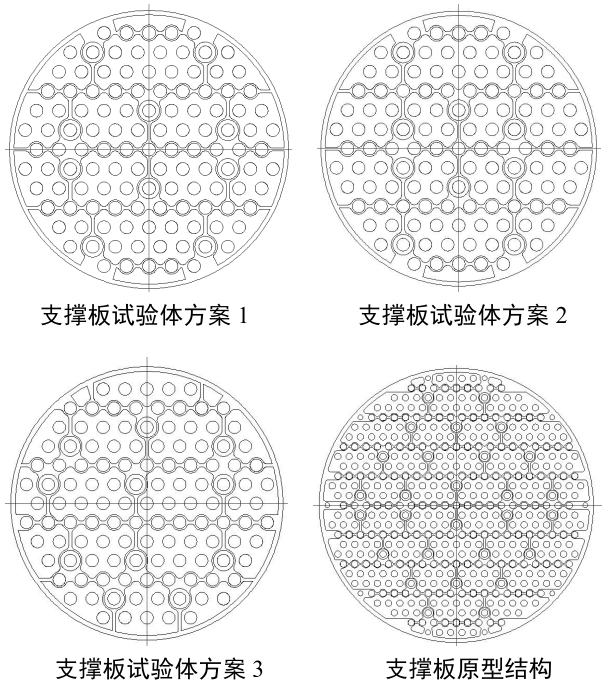


图 4　支撑板原型及试验体几何结构

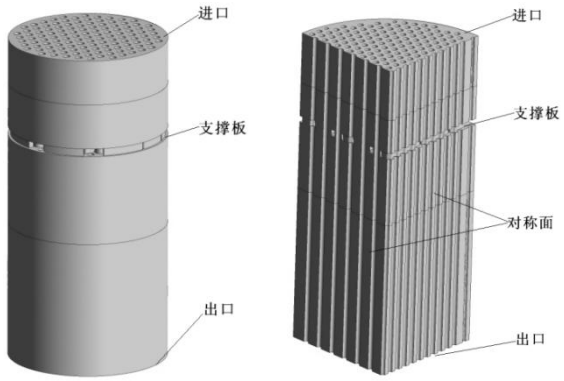


图 5　计算几何模型

表 3　支撑板结构参数

参数	单位	原型	结构 1	结构 2	结构 3
筒内径	m	0.680	0.347	0.347	0.348
管外径	m	0.016	0.016	0.016	0.016
传热管数量	—	473	121	121	121
面积比	—	0.746 0	0.746 4	0.746 4	0.746 3
当量直径	m	0.041 4	0.039 2	0.039 2	0.039 5

表 4　数值计算参数

参数	单位	原型	结构 1、2	结构 3
介质	—	液态金属	水	水
进口流量	kg/s	372	220.08	220.18
温度	℃	467	50	50
密度	kg/m³	840.2	988.1	988.1
动力粘度	kg/(m.s)	2.57E-04	5.47E-04	5.47E-04
进口速度	m/s	1.659	3.171	3.148
进口雷诺数	—	2.24E+05	2.24E+05	2.24E+05

表 5　支撑板局部阻力系数计算结果

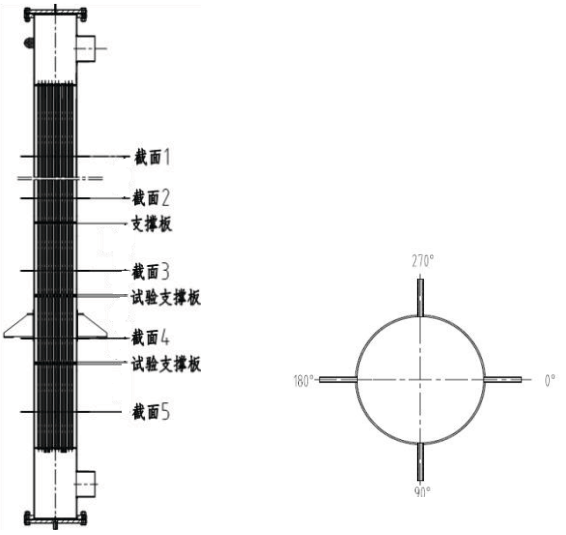
位置	阻力系数	与原型偏差
原型	0.726	—
支撑板 1	0.693	-4.5 %
支撑板 2	0.705	-2.9 %
支撑板 3	0.664	-7.1 %

表 5 给出了计算获得的不同支撑板结构的阻力系数，可以看出：支撑板试验体的阻力系数与原型的偏差在 8 %以内，即在保证面积比相同的条件下，适当缩小支撑板的规模、改变支撑板的开孔方式，对支撑板的局部阻力系数影响不大。在保证试验体与原型面积比基本相同的前提下，设计支撑板局部阻力试验体时可缩小支撑板的规模并适当改变支撑板的开孔方式。

1.2 试验设施及系统

1.2.1 试验体

本试验项目共有 2 个试验体：蒸发器支撑板局部阻力试验体、过热器支撑板局部阻力试验体。两个试验体相似，均如图 6（a）所示，各个测量截面上均有 4 个引压管,具体布置方位见图 6（b）。上述试验体均在直流式蒸汽发生器局部阻力试验系统上开展试验。



(a) 支撑板试验体　　(b) 测量截面中引压管所在位置

图 6 试验体示意图

1.2.2 试验系统

某直流式蒸汽发生器壳侧局部阻力试验系统流程如图 7 所示，由主循环泵、冷却器、流量测量管段、缓冲罐等设备和管道组成。系统基本流程为：循环水经循环泵打压进入试验回路，经过回路冷却器冷却后进入流量测量段测量流量，然后进入试验体，由试验体出口流出并经试验回路流至循环泵。试验过程中循环泵的流量根据工况要求进行调节。

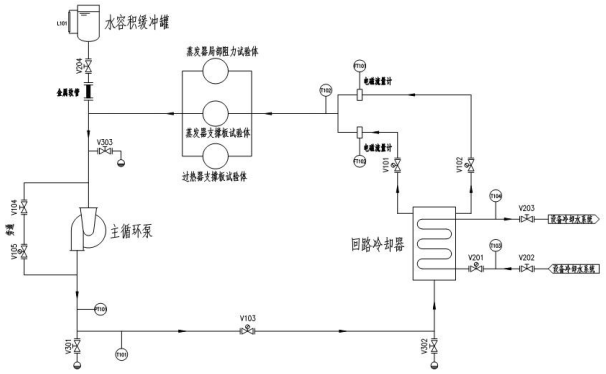


图 7　直流式蒸发器壳侧局部阻力试验系统图

1.2.3 测点布置

蒸发器支撑板局部阻力试验体的测点分布在图 6 所示的 5 个截面上，试验体压降测点编号为 P_{01}-P_{20}，试验体的测点组合见表 6。

表 6　蒸发器支撑板局部阻力试验测点

测点编号	引压管组合	引压管位置描述
DPB_1	P_{01}- P_{05}	管束摩擦压降 1（0° 位置）
DPB_2	P_{02}- P_{06}	管束摩擦压降 2（90° 位置）
DPB_3	P_{03}- P_{07}	管束摩擦压降 3（180° 位置）
DPB_4	P_{04}- P_{08}	管束摩擦压降 4（270° 位置）
DPB_5	P_{09}- P_{13}	第一块支撑板压降 1（0° 位置）
DPB_6	P_{10}- P_{14}	第一块支撑板压降 2（90° 位置）
DPB_7	P_{13}- P_{17}	第二块支撑板压降 1（0° 位置）
DPB_8	P_{14}- P_{18}	第二块支撑板压降 2（90° 位置）
DPB_9	P_{09}- P_{17}	支撑板总压降 1（0° 位置）
DPB_{10}	P_{10}- P_{18}	支撑板总压降 2（90° 位置）
DPB_{11}	P_{11}- P_{19}	支撑板总压降 3（180° 位置）
DPB_{12}	P_{12}- P_{20}	支撑板总压降 4（270° 位置）

过热器支撑板局部阻力试验体的测点分布在图 6 所示的 5 个截面上，试验体压降测点编号为 P_{01}-P_{20}，试验体的测点组合见表 7。

表 7　过热器支撑板局部阻力试验测点

测点编号	引压管组合	引压管位置描述
DPC_1	P_{01}- P_{05}	管束摩擦压降 1（0° 位置）
DPC_2	P_{02}- P_{06}	管束摩擦压降 2（90° 位置）
DPC_3	P_{03}- P_{07}	管束摩擦压降 3（135° 位置）
DPC_4	P_{04}- P_{08}	管束摩擦压降 4（225° 位置）
DPC_5	P_{09}- P_{13}	第一块支撑板压降 1（0° 位置）
DPC_6	P_{10}- P_{14}	第一块支撑板压降 2（90° 位置）
DPC_7	P_{13}- P_{17}	第二块支撑板压降 1（0° 位置）
DPC_8	P_{14}- P_{18}	第二块支撑板压降 2（90° 位置）
DPC_9	P_{09}- P_{17}	支撑板总压降 1（0° 位置）
DPC_{10}	P_{10}- P_{18}	支撑板总压降 2（90° 位置）
DPC_{11}	P_{11}- P_{19}	支撑板总压降 3（180° 位置）
DPC_{12}	P_{12}- P_{20}	支撑板总压降 4（270° 位置）

2　试验数据处理

试验测量的压降为支撑板压降与管束摩擦压降组成。

2.1 管束摩擦阻力系数计算

支撑板局部阻力试验体中的管束摩擦阻力系数f可由式（1）得出：

$$f=\frac{2\Delta P d_e}{\rho v^2 l} \quad (1)$$

式（1）中：

ΔP—压降，Pa；

v—流速，m/s；

ρ—流体的密度，kg/m^3；

l—流道的长度，m；

d_e—管束当量直径，m。

根据上述公式，在试验中需要测量得出压降ΔP、不同部位的流体流速v、介质温度T_f（查表获得流体密度），其中：

流道长度和当量直径由测压点位置及试验体具体结构所决定；

不同位置的压降ΔP由差压变送器测量获得；

试验过程中不涉及到换热，因此可认为整个系统中的流体温度一致，由热电偶测量获得；

不同位置的流体流速v按照由流量计测得的体积流量与不同部位的流通截面积计算获得。

2.2 支撑板局部阻力系数计算

以蒸发器支撑板局部阻力试验体为例，计算支撑板局部阻力系数。试验测得的蒸发器支撑板局部阻力试验体的两块支撑板总阻力为ΔP_3，根据测量结果换算得到的管束摩擦阻力为ΔP_4，则蒸发器两块支撑板的局部阻力为：

$$\Delta P=\Delta P_3-\Delta P_4 \quad (2)$$

单块支撑板局部阻力系数为：

$$\varepsilon=\frac{\Delta P}{\rho v_2^{\ 2}} \quad (3)$$

ΔP_3—蒸发器支撑板局部阻力试验体两块支撑板总压降，Pa；

ΔP_4—管束摩擦压降，Pa；

v_2—管束纵向冲刷流速，m/s；

ρ—流体密度，kg/m^3。

3 试验结果

3.1 蒸发器支撑板局部阻力试验结果

3.1.1 蒸发器支撑板试验体管束摩擦压降

不同工况下蒸发器支撑板试验体管束摩擦压降汇总见表 8，管束摩擦平均压降随流量变化曲线见图 8。可以看出，管束摩擦压降随着流量的增大而增大，不同测点位置测量得到的管束摩擦压降会有所不同。

按照第 2.1 节管束摩擦阻力系数的处理方法，对不同方位的摩擦压降取平均值进行管束摩擦阻力系数计算，图 9 给出了管束摩擦阻力系数随雷诺数的变化曲线，可以看出：管束摩擦阻力系数随着雷诺数的增加而逐渐稳定，额定工况下管束摩擦阻力系数为 0.015。经过数据处理后得到管束摩擦阻力系数与雷诺数的关系式为：

$$f=0.013+0.022e^{-\frac{\mathrm{Re}}{89483.1}} \quad (4)$$

（其中 $5.29\times10^4<\mathrm{Re}<2.72\times10^5$）。

表 8 不同工况下蒸发器支撑板试验体管束摩擦压降汇总

参数	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7
质量流量	t/h	897.2	801.7	642.3	478.9	317.2	204.4	158.4
温度	℃	55.5	51.8	48.3	52.2	49.7	45.9	38.50
管束摩擦压降 1	kPa	1.76	1.47	1.03	0.69	0.37	0.18	0.10
管束摩擦压降 2	kPa	1.37	1.14	0.83	0.53	0.28	0.15	0.11
管束摩擦压降 3	kPa	1.81	1.47	0.97	0.58	0.28	0.14	0.10
管束摩擦压降 4	kPa	2.21	1.86	1.29	0.78	0.38	0.18	0.12
管束摩擦平均压降	kPa	1.79	1.49	1.03	0.65	0.33	0.16	0.11
纵向冲刷雷诺数	—	2.72E+05	2.29E+05	1.73E+05	1.38E+05	8.77E+04	5.29E+04	3.58E+04
摩擦阻力系数	—	0.015	0.015	0.016	0.019	0.021	0.026	0.028

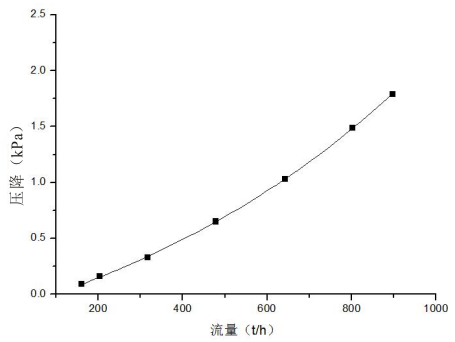


图 8　蒸发器支撑板试验体管束摩擦平均压降

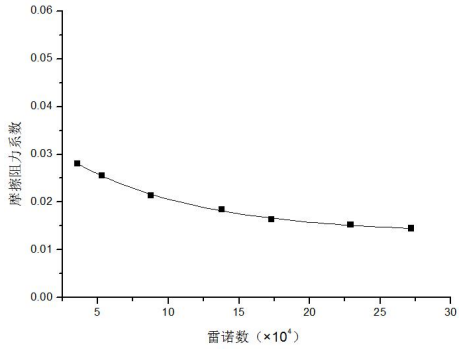


图 9　蒸发器支撑板试验体管束摩擦阻力系数随雷诺数变化曲线

3.1.2 试验体支撑板压降

不同工况下蒸发器支撑板局部阻力试验结果汇总见表 9，不同测点位置处两块支撑板的测量总压降随流量的变化曲线见图 10，按照第 2.2 节支撑板局部阻力系数的处理方法进行计算，去除摩擦阻力影响的蒸发器支撑板局部阻力系数汇总见表 10，蒸发器支撑板局部阻力系数随雷诺数的变化曲线见图 11。

表 9　不同工况下蒸发器支撑板局部阻力试验体压降汇总

参数	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7
质量流量	t/h	897.2	801.7	642.3	478.9	317.2	204.4	158.4
温度	℃	55.5	51.8	48.3	52.2	49.7	45.9	38.50
管束摩擦压降 1	kPa	1.76	1.47	1.03	0.69	0.37	0.18	0.10
管束摩擦压降 2	kPa	1.37	1.14	0.83	0.53	0.28	0.15	0.11
管束摩擦压降 3	kPa	1.81	1.47	0.97	0.58	0.28	0.14	0.10
管束摩擦压降 4	kPa	2.21	1.86	1.29	0.78	0.38	0.18	0.12
支撑板总压降 1	kPa	8.19	6.69	4.32	2.52	1.19	0.54	0.34
支撑板总压降 2	kPa	8.00	6.40	4.26	2.52	1.18	0.54	0.32
支撑板总压降 3	kPa	8.00	6.48	4.33	2.50	1.18	0.56	0.34
支撑板总压降 4	kPa	8.13	6.46	4.34	2.55	1.18	0.53	0.32

表 10　蒸发器支撑板局部阻力系数汇总

参数	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7
流量	t/h	897.2	801.7	642.3	478.9	317.2	204.4	158.4
温度	℃	55.5	51.8	48.3	52.2	49.7	45.9	38.50
纵向冲刷雷诺数	—	2.72E+05	2.29E+05	1.73E+05	1.38E+05	8.77E+04	5.29E+04	3.58E+04
支撑板局部阻力系数	—	0.448	0.446	0.450	0.454	0.461	0.482	0.455

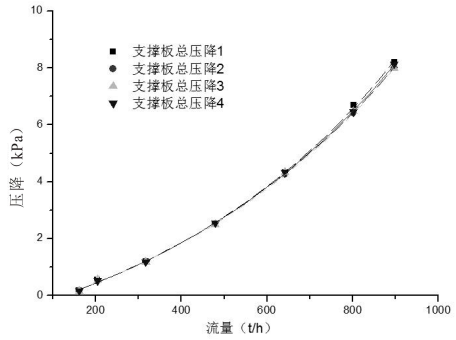


图 10　蒸发器支撑板测量总压降随流量变化曲线

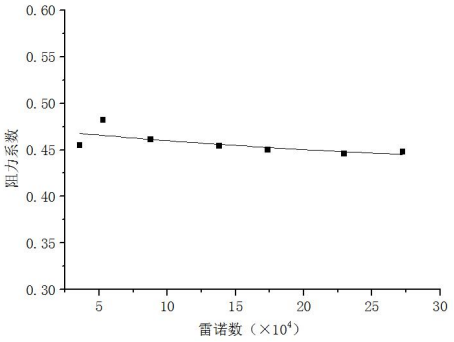


图 11 蒸发器支撑板局部阻力系数随雷诺数变化曲线

可以看出：蒸发器支撑板局部阻力系数随着雷诺数的增加逐渐降低，并最终达到稳定，额定工况下直流式蒸发器单块支撑板的局部阻力系数为0.448。经过数据处理后得到蒸发器支撑板局部阻力系数与雷诺数的关系为：

$$\varepsilon = 0.448 + 0.119e^{-\frac{\mathrm{Re}}{42405.7}} \tag{5}$$

（其中 $5.29\times10^4<\mathrm{Re}<2.72\times10^5$）。

3.2 过热器支撑板局部阻力试验结果

3.2.1 过热器支撑板试验体管束摩擦压降

不同工况下过热器支撑板试验体管束摩擦压降汇总见表11，管束摩擦平均压降随流量变化曲线见图12。可以看出，管束摩擦压降随着流量的增大而增大，不同测点位置测量得到的管束摩擦压降会有所不同。

按照第2.1节管束摩擦阻力系数的处理方法，对不同方位的摩擦压降取平均值进行阻力系数计算，图13给出了管束摩擦阻力系数随雷诺数的变化曲线，可以看出：管束摩擦阻力系数随着雷诺数的增加而逐渐稳定，额定工况下过热器管束摩擦阻力系数为0.014，与蒸发器管束的摩擦阻力系数差别不大。

经过数据处理后得到管束摩擦阻力系数与雷诺数的关系式为：

$$f = 0.013 + 0.008e^{-\frac{\mathrm{Re}}{231221.9}} \tag{6}$$

（其中 $5.51\times10^4<\mathrm{Re}<3.71\times10^5$）。

表11　不同工况下过热器支撑板试验体管束摩擦压降汇总

参数	单位	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6	工况7
质量流量	t/h	900.5	705.8	567.9	424.2	274.9	155.7	121.0
温度	℃	54.5	50.8	51.2	49.5	48.3	45.4	38.2
管束摩擦压降1	kPa	0.48	0.55	0.44	0.27	0.11	0.05	0.04
管束摩擦压降2	kPa	1.45	1.10	0.88	0.53	0.21	0.09	0.05
管束摩擦压降3	kPa	0.37	0.41	0.36	0.16	0.01	0	0.00
管束摩擦压降4	kPa	1.34	0.4	0.15	0.07	0.05	0.02	0.01
管束摩擦平均压降	kPa	0.910	0.615	0.458	0.258	0.095	0.040	0.025
纵向冲刷	—	3.71E+05	2.74E+05	2.22E+05	1.61E+05	1.02E+05	5.51E+04	3.75E+04
摩擦阻力系数	—	0.014	0.015	0.018	0.018	0.016	0.021	0.021

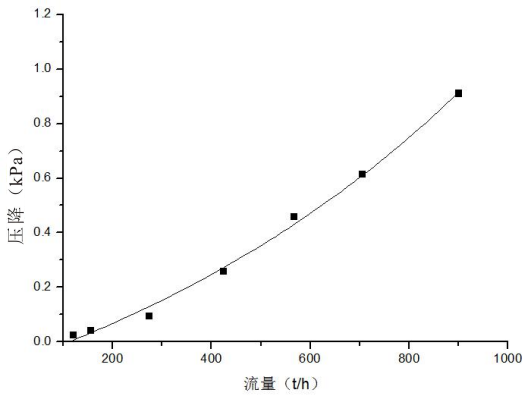


图12　过热器支撑板试验体管束摩擦平均压降随流量变化曲线

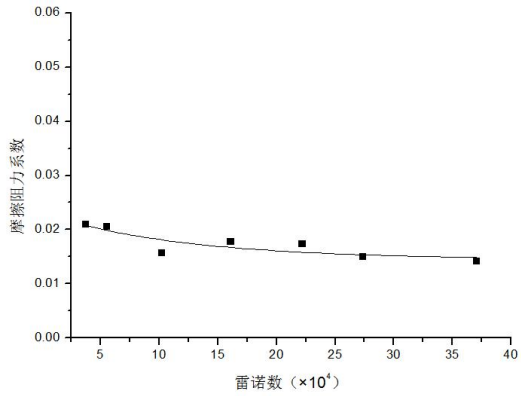


图13　过热器支撑板试验体管束摩擦阻力系数随雷诺数变化曲线

3.2.2 试验体支撑板局部阻力系数

不同工况下过热器支撑板局部阻力试验结果汇总见表12，不同测点位置处两块支撑板的测量总压降随流量的变化曲线见图14，按照第2.2节支撑板局部阻力系数的处理方法进行计算，去除摩擦阻力影响的过热器支撑板局部阻力系数汇总见表13，过热器支撑板局部阻力系数随雷诺数的变化曲线见图15。

表 12　不同工况下过热器支撑板试验体压降汇总

	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7
质量流量	t/h	900.5	705.8	567.9	424.2	274.9	155.7	121.0
温度	℃	54.5	50.8	51.2	49.5	48.3	45.4	38.2
管束摩擦压降 1	kPa	0.48	0.55	0.44	0.27	0.11	0.05	0.04
管束摩擦压降 2	kPa	1.45	1.10	0.88	0.53	0.21	0.09	0.05
管束摩擦压降 3	kPa	0.37	0.41	0.36	0.16	0.01	0	0.00
管束摩擦压降 4	kPa	1.34	0.4	0.15	0.07	0.05	0.02	0.01
支撑板总压降 1	kPa	4.97	3.28	2.23	1.31	0.54	0.23	0.15
支撑板总压降 2	kPa	4.77	3.02	2.1	1.24	0.54	0.22	0.13
支撑板总压降 3	kPa	4.57	3.1	2.13	1.26	0.52	0.22	0.15
支撑板总压降 4	kPa	4.63	3.02	2.12	1.28	0.59	0.21	0.17

表 13　过热器支撑板局部阻力系数汇总

参数	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7
流量	t/h	900.5	705.8	567.9	424.2	274.9	155.7	121.0
温度	℃	54.5	50.8	51.2	49.5	48.3	45.4	38.2
纵向冲刷雷诺数	—	3.71E+05	2.74E+05	2.22E+05	1.61E+05	1.02E+05	5.51E+04	3.75E+04
支撑板局部阻力系数	—	0.314	0.331	0.337	0.370	0.411	0.504	0.594

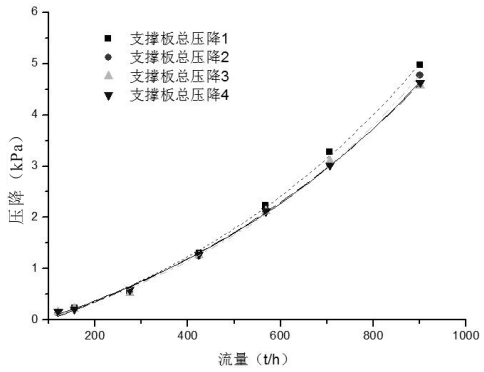


图 14　过热器支撑板总压降随流量的变化曲线

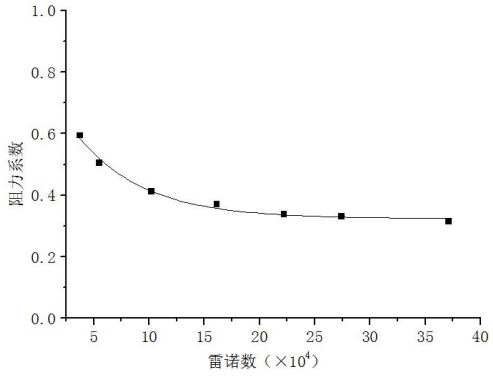


图 15　过热器支撑板阻力系数随雷诺数的变化曲线

可以看出：由于流场的影响，管束摩擦压降不同测点之间的偏差较大，而支撑板总压降不同测点之间的偏差较小。过热器支撑板局部阻力系数随着雷诺数的增加逐渐降低，并最终达到稳定，额定工况下过热器单块支撑板的局部阻力系数为 0.314。经过数据处理后得到过热器支撑板局部阻力系数与雷诺数的关系式为：

$$\varepsilon = 0.315 + 0.374e^{-\frac{\mathrm{Re}}{79332.2}} \tag{7}$$

（其中 $5.51\times10^4<\mathrm{Re}<3.71\times10^5$）。

4　结语

通过试验测得的不同工况下的压降数据，得出了蒸发器支撑板和过热器支撑板的阻力系数与雷诺数的经验关系式，主要结论为：

（1）管束摩擦压降和支撑板总压降均随着流量的增大而增大，管束摩擦阻力系数和支撑板局部阻力系数均随着雷诺数的增加而逐渐降低，并最终达到稳定。

（2）蒸发器支撑板管束摩擦阻力系数与雷诺数的关系式为：

$$f = 0.013 + 0.022e^{-\frac{\mathrm{Re}}{89483.1}} \tag{8}$$

（其中 $5.29\times10^4<\mathrm{Re}<2.72\times10^5$）。

蒸发器支撑板局部阻力系数与雷诺数的关系为：

$$\varepsilon = 0.448 + 0.119e^{-\frac{\mathrm{Re}}{42405.7}} \quad (9)$$

（其中 $5.29\times10^4<\mathrm{Re}<2.72\times10^5$）。

（3）过热器支撑板管束摩擦阻力系数与雷诺数的关系式为：

$$f = 0.013 + 0.008e^{-\frac{\mathrm{Re}}{231221.9}} \quad (10)$$

（其中 $5.51\times10^4<\mathrm{Re}<3.71\times10^5$）。

过热器支撑板局部阻力系数与雷诺数的关系式为：

$$\varepsilon = 0.315 + 0.374e^{-\frac{\mathrm{Re}}{79332.2}} \quad (11)$$

（其中 $5.51\times10^4<\mathrm{Re}<3.71\times10^5$）。

本文得到的试验数据可为直流式蒸汽发生器阻力计算程序或方法提供检验和修正分析依据，为蒸发器以及整个系统回路设计提供支撑。

参考文献：

[1] 郭震, 郎红方, 周帼彦, 等. 三叶孔板换热器壳程传热与压降[J]. 化工学报, 2014,65(10):3811-3819

[2] 古新, 潘国华, 刘敏珊, 等. 基于遗传算法的三叶孔板换热器优化设计[J]. 压力容器, 2013,30(7):12-17

[3] 董其伍, 白彩鹏, 刘敏珊, 等. 三叶孔板换热器壳程流体流动和传热研究[J]. 工程热物理学报, 2013,34(1):115-117

[4] 董其伍, 杜庆飞, 刘敏珊, 等. 三叶孔板换热器壳程流体流动和传热特性数值研究[J]. 化工设备与管道, 2012,49(2):21-23+27

[5] 罗朝嘉, 韩东, 牟春燕, 等. 孔板结构对梅花形孔板换热器壳程传热影响的模拟研究[J]. 能源化工, 2016,37(1):55-59

[6] 孙凯丽, 黄美, 刘冉. 梅花孔板式换热器内流体流动与换热的研究[C]//北京力学会. 北京力学会第二十二届学术年会会议论文集, 2016

[7] 姚瑶, 韩东, 罗朝嘉, 等. 梅花形孔板换热器壳程流动与换热特性模拟[J]. 能源化工, 2017,38(1):85-90

[8] Ma L, Wang K, Liu M, et al. Numerical study on performances of shell-side in trefoil-hole and quatrefoil-hole baffle heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 1444-1455

[9] El Maakoul A, Laknizi A, Saadeddine S, et al. Numerical comparison of shell-side performance for shell and tube heat exchangers with trefoil-hole, helical and segmental baffles[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 175-185

[10] 宫本希, 王昊, 邢继远, 等. 四叶孔支撑板换热器壳程流态及其传热机制研究[J]. 西安交通大学学报, 2020,54(6):148-154

（上接第 42 页）

激励不会发生共振而导致响应过大,轴承箱固有频率满足设计要求。

采用该设计结构的中间轴承箱已完成机组投运，从表 4 现场投运机组的中间轴承箱振动数据来看，中间轴承箱振动幅值远低于设计规范值[6]，轴承箱性能指标优良。

3 结语

本文详细阐述了核电汽轮机中间轴承箱的受力情况，利用有限元校核了轴承箱强度、变形，分析结果满足设计要求，该核电汽轮机中间轴承箱的设计已得到运行业绩的验证。本文能为汽轮机轴承箱的设计起到积极的推进作用，为汽轮机设计人员提供了更多参考。

参考文献：

[1] 中国动力工程学会主编. 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

[2] 丁有宇. 汽轮机强度计算手册[M]. 北京：中国电力出版社，2010

[3] 卢平, 高宏喜. 东方自主核电汽轮机滑销系统分析[J]. 东方汽轮机, 2014,(2):5-10

[4] 彭国伟, 刘雄, 陈铁宁, 等. 1 000 MW 汽轮机中低压轴承箱稳定性以及强度分析[J]. 东方汽轮机, 2021(2):8-11+40

[5] 崔宏博. 中低压轴承箱的稳定性探讨[J]. 东方汽轮机, 1996(4):15-18

[6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 机械振动 恒态（刚性）转子平衡品质要求 第 1 部分：规范与平衡允差的检验: GB/T 9239.1-2006[S]. 2006

W 型火焰锅炉改烧烟煤对汽温参数影响试验研究

张苗[1] 杨凯*[2,3] 黄继忠[1] 陈灿[2,3] 杨泽勇[1] 张秀昌[2,3] 胡德浩[1]
冉燊铭[2,3] 宋捷[1] 陶永俊[1]

1.国能九江发电有限公司，江西 九江 332001；2.清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室，成都 611731；
3. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643001

摘要：对某进口 350 MW 亚临界 W 型火焰锅炉全烧烟煤改造后试验研究。通过试验研究掌握影响锅炉汽温参数主要因素。试验研究结果表明除了煤质对汽温参数有影响外，实际运行中降低一次风速、拱上风量、燃尽风率和增大乏气开度有利于维持汽温稳定，可为同类型锅炉设计运行提供参考。

关键词：W 型火焰锅炉；烟煤；汽温参数；外置分离式多通道煤粉浓缩 W 火焰燃烧系统

中图分类号：TM621.2；X701 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）03-0052-06

Experimental Study on the Influence of Bituminous Coal Combustion on Steam Temperature Parameters in a W-type Flame Boiler

ZHANG Miao[1], *YANG Kai**[2,3], *HUANG Jizhong*[1], *CHEN Can*[2,3], *YANG Zeyong*[1], *ZHANG Xiuchang*[2,3], *HU Dehao*[1], *RAN Shenming*[2,3],*SONG Jie*[1], *TAO Yongjun*[1]

(1.CHN Energy Jiujiang Power GENERATION Co., Ltd., 332001, Jiujiang, Jiangxi, China;
2. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;
3. Dongfang Boiler Co. Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: An imported 350 MW subcritical W-shaped flame boiler was retrofitted by burning bituminous coal. Master the main factors affecting boiler steam temperature parameters through experimental research. The test results show that in addition to the influence of coal quality on steam temperature parameters, reducing primary air speed, air volume on the arch, burnout air rate and increasing exhaust gas opening are conducive to maintaining steam temperature stability in actual operation, which can provide reference for the design and operation of the same type of boiler.

Key words: W-shaped flame boiler; bituminous coal;steam temperature parameters; DBC-MCCS

W 型火焰锅炉主要是国内电厂为适应无烟煤的燃烧而引进的一种炉型。[1]根据燃用无烟煤不同，W 型火焰锅炉炉膛四周敷设适量的卫燃带，用以提高火焰温度和燃尽度。由于炉膛温度水平高，运行中通常存在炉膛结焦严重，NO_X 高等问题。[2]为了推动能源行业结构优化升级，进一步提升煤电机组清洁高效灵活性水平，促进电力行业清洁低碳转型，助力全国碳达峰、碳中和目标如期实现[3]，越来越多的非坑口 W 型火焰锅炉机组需要掺烧甚至全烧烟煤以满足改造需求。燃料特性发生变化后，需要对燃烧系统、卫燃带进行适应性改造，还要考虑蒸发受热面和过热受热面的合理匹配以保证锅炉蒸

收稿日期：2023-11-14

作者简介：张苗（1972－），男，本科学历，热能动力工程专业，工程师，就职于国能九江发电有限公司，从事发电企业锅炉运行检修技术管理工作。

杨凯（1975－），男，高级工程师，就职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司技术创新中心，从事于锅炉试验研究、锅炉性能分析等工作。邮箱：yangk1220@aliyun.com

汽参数达到额定值。本文以某 350 MW 进口 W 型火焰锅炉为对象，通过燃烧调整开展了全烧烟煤改造后的汽温特性试验研究，可为同类型锅炉改造或调试提供参考。

1 研究对象

某电厂三期工程装机容量 2×350 MW，采用进口 W 型火焰锅炉。设计燃料为无烟煤，改造燃料为神华烟煤。原燃烧器为双旋风煤粉浓缩型燃烧器，改造采用东方锅炉针对W型火焰锅炉开发的外置分离式多通道煤粉浓缩 W 火焰燃烧系统（DBC-MCCS）。

1.1 原锅炉简介

1.1.1 锅炉型式

锅炉为美国 Foster-Wheeler 公司生产的双拱形单炉膛、W 型火焰燃烧方式、一次中间再热、平衡通风、固态排渣、亚临界参数、自然循环汽包炉。炉膛宽度 24 765 mm，上、下炉膛深度分别为 7 810.5 mm，13 916.5 mm，下炉膛前后墙高度 8 356 mm。

1.1.2 锅炉设计参数

表 1 锅炉设计主要参数

序号	项　目	单位	BMCR	TRL
1	机组电功率	MW	384	350
2	主蒸汽流量	t/h	1 170.4	1 040.1
3	过热器出口汽压	MPa	17.26	17.14
4	过热器出口温度	℃	541	541
5	再热器入口流量	t/h	973.5	872.5
6	再热器出口流量	t/h	973.5	872.5
7	再热器进口汽温	℃	330.0	318.8
8	再热器出口汽温	℃	541	541
9	再热器出口汽压	MPa	3.78	3.39

1.2 改造设计概况

1.2.1 改造设计煤质资料

本次改造煤质主要以神华烟煤为主，干燥无灰基挥发分约 36 %左右；贫瘦煤为潞安煤。改造燃料 1：燃 100 %神华烟煤为（准混+石炭）；改造燃料 2：80 %神华烟煤+20 %的贫煤进行校核。

表 2 锅炉改造燃料特性

	项目	符号	单位	原设计煤	改造准混	改造石炭	改造潞安煤	改造混煤
工业分析	收到基水分	Mar	%	6.44	11.40	10.40	7.63	10.65
	挥发份	Vdaf	%	10.7	37.71	38.94	13.41	32.85
	收到基灰分	Aar	%	20.10	20.90	21.00	21.97	21.11
	干燥基水分	Mad	%	4.78	3.77	3.41	0.78	3.17
	低位发热量	Qnet.ar	kJ/kg	24 849	20 240	20 710	25 025	21 020
	可磨性系数	HGI	-	70.5	58	60	77	
元素分析	收到基碳	Car	%	66.10	53.03	52.33	64.14	55.25
	收到基氢	Har	%	2.94	3.28	3.25	2.95	3.21
	收到基氧	Oar	%	3.13	9.92	10.98	1.03	8.34
	收到基氮	Nar	%	0.94	0.97	0.84	2	0.98
	收到基硫	Sar	%	0.35	0.50	1.20	0.28	0.46
灰熔点	变形温度	DT	℃	1 320	1 450	1 440	1 320	
	软化温度	ST	℃	>1 500	1 500	1 500	1 500	
	流动温度	FT	℃	>1 500	1 500	1 500	1 500	

由表 2 可知，改造设计煤由无烟煤变为烟煤。干燥无灰基挥发分达 37.71 %，相比无烟煤着火温度低，燃尽性更好。因此改造中需要去除原炉膛卫燃带，避免因炉膛温度高而引起结焦。但是 W 型火焰锅炉燃烧路径长，而烟煤着火迅速，热量释放快，有可能水冷壁吸热量过多，蒸发受热面和过热受热面不匹配造成汽温无法达到设计值，因此还需要结合烟煤燃烧特性敷设一定卫燃带，减少水冷壁

的吸热量，最终实现汽水参数达到设计值。

1.2.2 制粉系统改造

锅炉原制粉系统配置 4 台 FW 公司制造的正压直吹式 D-11D 型双进双出式钢球磨煤机。改造更换为磨制烟煤性能更好的中速磨煤机、正压直吹制粉燃烧系统。每台磨煤机引出 6 根煤粉管道与燃烧器配接。

1.2.3 燃烧器改造

采用双拱炉膛、内外浓淡偏差燃烧、分级配风来组织“W”火焰燃烧，通过多通道式直流煤粉燃烧器技术和炉内空气分级燃烧技术，以保证在燃用改造设计煤及试验煤的条件下，煤粉气流能及时着火、燃烧稳定、燃烧完全，降低 NO_X 生成，并控制炉膛出口烟气温度、流量分配均匀。图 1 是燃烧系统配风示意图。表 3 是燃烧系统各风门作用及控制方式。

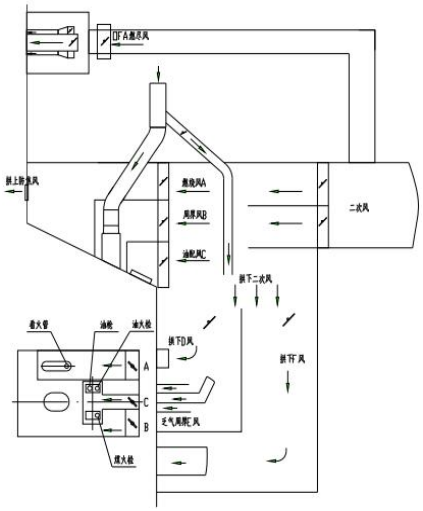


图 1　燃烧器配风示意图

表 3　燃烧系统各风门作用及控制方式

位置	风门	作用	控制方式
拱上	A	燃烧用风，随负荷变动	电动
	B	燃烧器周界风，燃烧优化调整后一般不动	手动
	C	油配风	电动
拱下	D	燃烧用风，燃烧优化调整后一般不动	手动
	E	乏气周界风，燃烧优化调整后一般不动	手动
	F	燃烧用风，燃烧优化调整后一般不动	手动
	乏气	调整火焰中心，增强煤种适应性	电动
燃尽风	OFA	降低锅炉NO_X排放，随负荷变动	总风门电动，就地小风门手动

1.2.4 卫燃带改造布置

结合改造设计煤，综合考虑实际运行对各种烟煤的适应性，敷设卫燃带主要在三个区域，两个低温区域和一个高温区域。高温区域在炉拱位置，低温区域在上炉膛大屏位置以及下炉膛侧墙位置。总共敷设近 200 m^2。

2　影响汽温参数因素试验研究及结果分析

锅炉改造后整体运行良好。通过入炉煤配比、燃烧器一次风速调整、二次风合理配风，使运行中有一定减温水量，锅炉汽水参数稳定。现有煤质下炉膛几乎不结焦，为今后掺烧经济煤种留有足够空间。

2.1 燃烧煤质对汽温参数的影响

亚临界 W 火焰锅炉一般炉膛结焦严重，过热器减温水量大，即使煤质变化较大，也不会对汽温有大的影响。本次改造后过热器仅有少量减温水，煤质的变动对汽温参数有一定影响。表 4 是改造后电厂燃用的两种入炉煤燃料特性。

表 4　锅炉实际运行燃料特性

项目	符号	单位	准混	石炭
收到基水分	M_{ar}	%	10.1	7.9
挥发份	V_{daf}	%	36.12	39.07
收到基灰分	A_{ar}	%	20.57	26.53
干燥基水分	M_{ad}	%	1.82	1.68
低位发热量	$Q_{net.ar}$	kJ/kg	20 700	20 220
可磨性系数	HGI	-	71	67
收到基碳	C_{ar}	%	53.98	50.04
收到基氢	H_{ar}	%	3.26	3.25
收到基氧	O_{ar}	%	10.66	9.87

（续表）

项目	符号	单位	准混	石炭
收到基氮	N_{ar}	%	0.99	0.95
收到基硫	S_{ar}	%	0.39	0.76
变形温度	DT	℃	>1 500	>1 500
软化温度	ST	℃	>1 500	>1 500
流动温度	FT	℃	>1 500	>1 500

表 4 可知，两种入炉煤和改造设计煤基本一致。表 4 中准混和石炭相比较，热值较高，水分高，灰分低。日常运行两种煤一般是准混和石炭按 4:1，1:1 进行配比。当准混和石炭 4:1 进行配比时，日常运行会出现过热器减温水量少、主再汽温不足的现象。随着石炭比例升高，准混和石炭按 1:1 进行配比时，过热器减温水量有所增加，主再汽温更容易维持稳定。图 2 和图 3 是采用不同准混和石炭比例下日常减温水量变化。

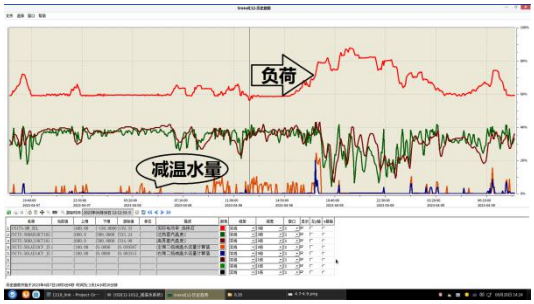


图 2　准混：石炭=4:1

图 3　准混：石炭=1:1

图 2、图 3 可知，随着石炭比例升高过热器减温水量有较明显增加。主要原因是石炭相对于准混热值低，石炭比例高，相同负荷下燃料量增加，总烟气量增加，对流换热增加。燃料的热值降低，炉膛理论燃烧温度降低，燃烧器区域温度水平降低，单位辐射热量降低。对流换热的增加以及辐射换热的降低，使过热器减温水量增加，主再汽温更稳定。

2.2 一次风速对汽温参数的影响

原双进双出钢球磨煤机制粉系统风煤比一般是一定的。而中速磨比较难控制风煤比，运行中主要考虑安全性。运行上为了不堵磨或不堵粉管，入磨风量控制一般比设计偏大。DBC-MCCS 阻力小，风速过大造成煤粉下冲动能强，火焰中心降低，水冷壁吸热量大。在过热器减温水量较小情况下，就容易造成主再汽温波动过大。因此需要将一次风速控制在合理区间。表 5 是不同风速下主再汽温以及减温水量。

表 5　不同风速下汽水参数

项目	单位	工况一	工况二
负荷	MW	175	175
主汽温	℃	536	539
主汽流量	t/h	617	641
主汽压力	MPa	13.12	12.95
减温水量	t/h	2.2	12.2
再热汽温	℃	530.7	532
运行氧量	%	4.4	4.3
磨煤机	\	ACD	ABC
入磨风压	kPa	6/6.6/7.3	5.9/5.3/5.8
粉管风速	m/s	23.5/24.2/26.3	20.6/21.5/23.1

注：风量测量装置有误差，采用入磨风压分析；粉管风速为每台磨六根粉管平均风速

由表 5 可知，工况二粉管风速控制更合理，相对于工况一煤粉下冲动能低，燃烧火焰中心高，下炉膛水冷壁吸热量更小，最终主汽温达到设计值，并具有一定减温水量。而工况一虽然主汽温已达到设计值，但几乎没有减温水量，容易受到其他因素干扰造成汽温波动。因此日常运行应控制一次风速在合理区间。

2.3 燃烧系统配风对汽温参数的影响

表 3 列出了燃烧系统各风门作用和控制方式。运行中主要是电动控制风门对汽温可能有影响。电动风门控制中 C 风主要是油配风，日常保持一定冷却风即可。主要分析 A 风、燃尽风对汽温的影响。

2.3.1 A 风对汽温参数的影响

A 风是主要燃烧配风。在负荷稳定下进行 A 风试验，观察蒸汽参数变化。图 4 稳定负荷 230 MW、其他条件不变情况下 A 风挡板由 45 %关至 40 %，观察过热器减温水量的变化。很明显关小后减温水

量有明显增加，汽温特性更平稳。主要原因是关小A风，使拱下D、F风速增加，对一次风气流有拖粉的效果。A风减小也减小对一次风“引射”作用，使烟煤的迅速着火，提高火焰中心，减少水冷壁吸热量。A风所占燃烧总风量大，不宜关的过小。A风门开度日常保持30 %~45 %，随负荷变化。

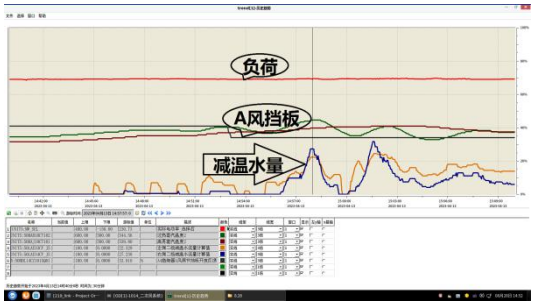


图4　A风变化对减温水量的影响

2.3.2 燃尽风对汽温参数的影响

燃尽风主要作用是降低锅炉NO_X排放。实际运行减温水量少，因此要关注燃尽风量变化是否对蒸汽参数有影响。表6是340 MW负荷其他条件相同情况下，燃尽风开度30 %和45 %各级受热面汽温参数的变化。

表6　不同燃尽风开度下汽温参数

项目	单位	燃尽风开度30 %	燃尽风开度45 %
负荷	MW	340	340
燃尽风率	%	8.3	12.4
运行氧量	%	1.7	1.8
主汽温	℃	539	535.5
主汽流量	t/h	1 113	1 116
主汽压力	MPa	16.71	16.26
低过出口汽温	℃	413.3	401.6
屏过出口汽温	℃	456.6	446.2
过热器一级减温水量	t/h	8.3	2.2
过热器二级减温水量	t/h	15.4	0
再热器入口汽温	℃	314.2	312.4
再热器出口汽温	℃	538.2	538

表6可知，燃尽风开度30 %和45 %比较，燃尽风开度小，过热器具有一定减温水量，汽温参数更稳定，不易受其他因素干扰造成汽温参数波动大。经过分析主要原因是燃尽风与剩余未燃尽煤粉燃烧，未参与燃烧的燃尽风与热烟气混合后降低了烟气温度，使后续烟气经过受热面吸热比例降低。通过其他中高负荷段试验，燃尽风开度在50 %以内对汽温影响较小。一般负荷50 %~100 %BRL，燃尽风建议开度在25 %~50 %区间。尽管汽温限制了燃尽风开度，但是当前燃尽风量仍能满足锅炉NO_X排放设计要求。

2.4 乏气对汽温参数的影响

2.4.1 乏气冷态试验结果分析

乏气是DBC-MCCS的重要调整手段之一，采用电动控制，可手动上下摆动。图5是燃烧系统中其中一个燃烧器冷态试验下改变乏气开度，燃烧器喷口风速和乏气风速之间的关系。图中可知，乏气在50 %~100 %区间风速变化较大。

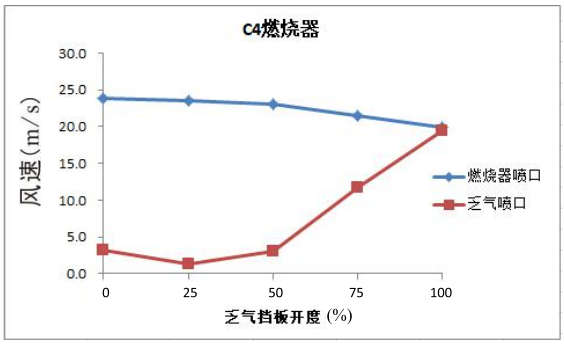


图5　燃烧器和乏气喷口风速关系

乏气喷口布置在拱下D风和F风之间，对燃烧器喷口煤粉气流下冲施加一个切向力，减缓煤粉气流下冲。乏气风速越高，对煤粉气流的作用力越大。图6是冷态试验乏气全开下烟花示踪试验。图中可知，乏气喷口位置对下冲气流作用明显。

图6　烟花示踪试验

2.4.2 热态试验下乏气对汽温参数的影响

改造后锅炉在设计煤运行下乏气处于全开状态。

根据冷态试验结果分析，燃烧器喷口煤粉气流下冲最弱，乏气对煤粉气流作用最强。在 333 MW 负荷稳定工况下关小乏气至 70 %，观察汽温参数变化。试验结果可知关小乏气后主再汽温降低明显。表 7 是乏气降低前后主要汽温参数的变化。

表 7 乏气不同开度下主要汽温参数变化

项目	单位	乏气开度 100 %	乏气开度 70 %
电负荷	MW	333	333
主汽流量	t/h	1 098	1 104
主汽压力	MPa	15.79	16.09
主汽温度	℃	540	532
低过出口汽温	℃	425.3	417
屏过出口汽温	℃	455.6	446.7
过热器一级减温水量	t/h	12.7	8.1
过热器二级减温水量	t/h	5	0
再热器入口汽温	℃	319.5	315.2
再热器出口汽温	℃	540	531

当乏气由 100 %关至 70 %后，10 分钟内主再汽温最高降低约 10 ℃。分析整个过程参数的变化，当乏气关至 70 %后，燃烧器喷口风速变大，乏气喷口风速降低明显（图 5），对燃烧器煤粉气流作用减少，煤粉气流下冲动能变强，煤粉燃烧路径变长，热量释放充分，水冷壁吸热量增加，使饱和蒸汽量增加，从而降低低温过热器出口汽温以及其他过热器出口汽温。水冷壁吸热量增加也降低了烟气温度，减少过热受热面吸热量。图 7 是乏气变化前后各级受热面吸热量的变化。图中可知，乏气关至 70 %后，水冷壁吸热量增加明显，而低温过热器、屏式过热器及高温过热器吸热量均减少。

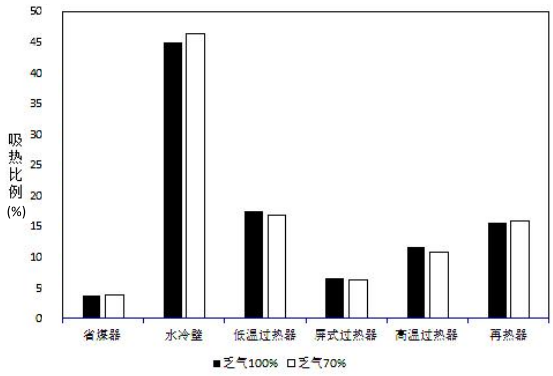


图 7 乏气变化对各级受热面吸热量的影响

由以上乏气试验可知，在当前运行煤质下，乏气开度需保持全开，更有利于保证主要汽温参数在设计范围内。如今后掺烧结焦性强的烟煤造成减温水量大可以通过关小乏气来调整减温水量，避免运行中过大减温水量对机组安全性、经济性造成影响。

3 性能考核试验结果

该 W 型火焰锅炉在燃烧优化调整后进行了性能考核试验，所有性能指标均达到性能保证值（参考国能九江发电有限公司 5 号锅炉全燃神华煤种综合改造后性能试验报告），见表 8。

表 8 性能考核试验数据

项目	性能保证值	考核值 50 %BRL	考核值 75 %BRL	考核值 100 %BRL
锅炉热效率	≥93 %	93.26	93.52	94.21
飞灰可燃物	≤2 %	0.65	1.44	1.12
大渣可燃物	≤3 %	0.84	0.14	0.01
CO	≤125 mg/m^3	61	15	123
NO_X	＜360 mg/Nm^3	342	263	271

4 结语

本项目是首台进口 W 型火焰锅炉综合改造以适应全烧烟煤项目，解决了炉膛结焦严重、减温水量大问题，汽温参数运行稳定，锅炉安全运行得到保障，锅炉主要性能指标均达到保证值。

通过燃烧调整试验了解影响汽温参数的因素，掌握了调整汽温参数的调整方法，结果表明降低一次风速、拱上风量、燃尽风率和增大乏气开度有利于维持汽温稳定。

参考文献：

[1] 黄新元. 电站锅炉运行与燃烧调整[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.8

[2] 哈尔滨普华煤燃烧技术开发中心. 大型煤粉锅炉燃烧设备性能设计方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.8

[3] 国家发展改革委. 国家能源局.关于开展全国煤电机组改造升级的通知[Z]. 北京: 发改运行[2021]1519 号

一种降低燃气轮机试验平台启动系统功率的方法

黎汝坚　程国强　秦重阳

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

摘 要：采用轴流压气机作为负载单元的燃气轮机试验平台，启动系统-负载-燃气轮机之间采用柔性联轴器联接。启动阶段，随着机组转速的提高，轴流压气机的功耗逐渐增大。文章通过对比升速阶段燃气轮机常规启动、变工况启动两种方式对启动系统的功率需求，得出大幅降低启动功率的方式，为以后燃气轮机带负荷试验平台设计提供了参考和经验。

关键词：燃气轮机试验平台；轴流压气机；启动系统；功率

中图分类号：TK 477　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-9006（2024）03-0058-03

A Method for Reducing the Power of Starting System on Gas Turbine Test Bed

LI Rujian, CHENG Guoqiang, QIN Chongyang

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

Abstract: In a gas turbine test bed with axial compressor as load unit, the starting system, load unit and gas turbine are connected by flexible couplings. In the starting stage, with the increasing of the unit speed, the power consumption of axial compressor increases gradually. By comparing the power requirements of the starting system between conventional starting and variable starting, the paper finds a way to greatly reduce the starting power, which provides reference and experience for the design of the gas turbine test bed with load in the future.

Key words: gas turbine test bed; axial compressor; starting system; power

常规的电站燃气轮机机组通过启动系统将机组带到点火转速，燃气轮机点火、升速至额定转速后，才开始带负荷运行。近年来，静态变频启动装置（SFC）在燃气轮机电站得到广泛应用，国内众多学者对SFC系统从各方面进行了研究与介绍。[1-4]

然而，针对燃气轮机整机试验平台启动系统的研究鲜有见到。本文对采用轴流压气机作为负载单元的燃气轮机带负荷试验平台的启动系统功率进行研究，提出一种在机组升速阶段，由燃气轮机和启动系统共同承担轴流压气机功耗的启动方式，可以较大程度降低启动系统的输出功率，降低系统的建造成本。

1　试验台布局

某燃气轮机试验平台采用轴流压气机作为负载单元，此负载单元安装在启动系统与燃气轮机之间，轴系布置示意图见图1。启动系统、轴流压气机、燃气轮机之间采用柔性联轴器联接，启动系统输出轴与轴流压气机、燃气轮机保持相同转速。

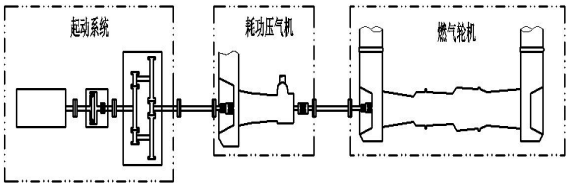


图1　轴系布置图

收稿日期：2024-01-18

作者简介：黎汝坚（1982－），男，2004年毕业于西安理工大学机械设计及其自动化专业，学士，高级工程师。现任东方电气集团东方汽轮机有限公司，主要从事燃气轮机辅助系统集成设计工作。

2 轴流压气机启动工况功率

采用轴流压气机作为燃气轮机负载，应满足以下两个条件：

（1）达到额定转速后，轴流压气机的耗功能够满足燃气轮机最大出力；

（2）从零转速到额定转速的升速过程中，轴流压气机所需耗功要尽可能低，以使得启动系统功率最小。

为满足条件 1，该燃气轮机试验平台采用与燃气轮机压气机一样的轴流压气机，在额定转速下，其最大耗功可达燃气轮机出力的 1.3 倍。为满足条件 2，负载轴流压气机在保持有一定的喘振裕度下，升速阶段沿高流量线运行，尽可能降低系统功耗[5-7]，运行曲线见图 2。根据轴流压气机的气动设计特性，升速阶段轴流压气机所需功率及扭矩曲线见图 3。

说明：文中的功率及扭矩数据以轴流压气机额定转速下的最小耗功定义为功率 100 %，以轴流压气机额定转速下的最小扭矩定义为扭矩 100 %。功率及扭矩数据中的“-”值表示通过外部系统吸取动力，“+”值表示对外部系统输出动力。

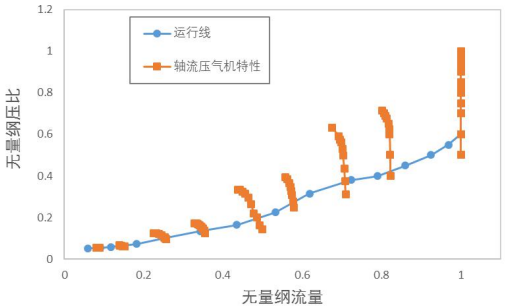


图 2 轴流压气机运行特性

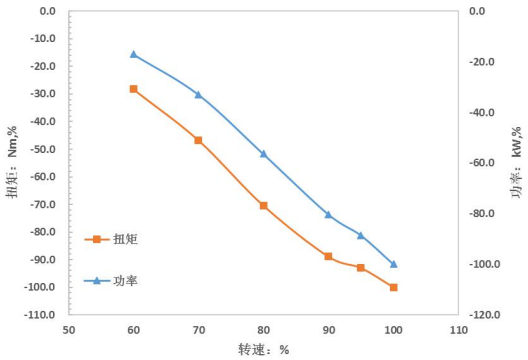


图 3 轴流压气机最小功率曲线

从图 3 可以看出，轴流压气机的耗功随着转速的升高逐步增大，在额定转速点的耗功最大。

3 燃气轮机常规启动工况功率

燃气轮机的启动必须要在外部启动机的帮助下完成。启动装置驱动燃气轮机的转子从盘车转速升到点火转速，此时燃气轮机透平所做的功还不能带动整个轴系转动，需要启动装置继续拖动转子升速，使燃气轮机达到并超过自持转速，当燃气轮机达到脱扣转速时，启动装置退出运行。此后，转子在燃气轮机透平多出的做功量的作用下升速到额定转速。[8]

整个启动过程中燃气轮机维持自身升速的扭矩需求，不对外输出功率。根据该型燃气轮机的气动设计特性，正常运行模式下，燃气轮机在升速阶段的功率及扭矩曲线见图 4。

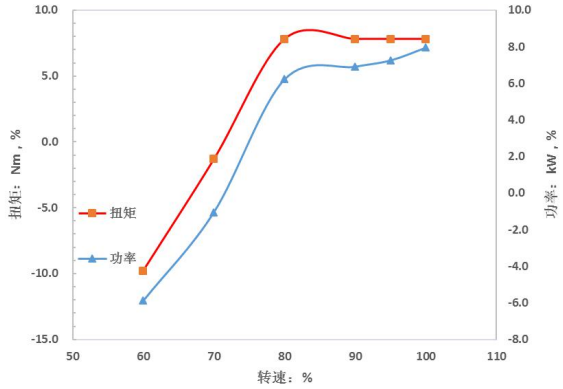


图 4 燃气轮机正常启动功率曲线

图 4 表明在常规启动模式下，燃气轮机在 70 %~80 %转速之间达到自持转速，此后可以保持输出一定扭矩，供机组加速到额定转速。

然而，燃气轮机在 80 %~100 %转速下输出的扭矩仅为轴流压气机全速空载下扭矩的 7.8 %。图 5 叠加了燃气轮机及轴流压气机启动工况性能数据，可以看出机组在额定转速下的功率需求最大，达到轴流压气机全速空载下扭矩的 92.2 %。

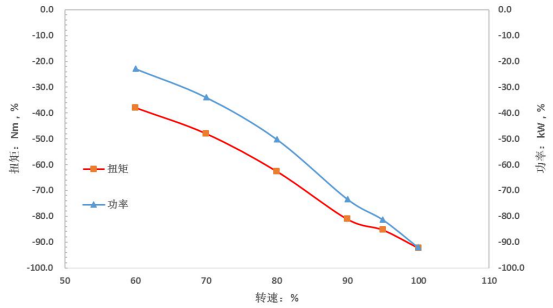


图 5 燃气轮机叠加轴流压气机正常启动功率曲线

由于负载轴流压气机在升速过程中的功耗为最小功率需求曲线，无法再降低，否则可能引起压气机的堵塞。因此，为了降低启动系统功率，则需要燃气轮机在升速阶段对外输出更大功率，通过启动系统和燃气轮机共同带动轴流压气机升速至额定转速。

4 燃气轮机变工况启动功率

燃气轮机变工况启动功率计算方法是：保证燃机压气机具有一定喘振裕度的条件下，给定不同转速下压气机的进气流量及压比，通过设计空燃比，计算燃料流量及透平入口温度，从而求得压气机、燃烧器、透平的稳定工作点下的燃气轮机出力。根据该型燃气轮机的气动特性，燃气轮机在变工况启动升速阶段能对外输出的功率及扭矩曲线见图 6。

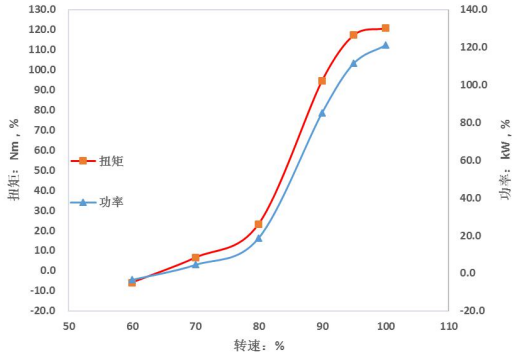


图 6 燃气轮机变工况启动功率曲线

从图 6 可以看出，通过调整燃气轮机的启动运行工作线，燃气轮机在 70 %转速后可对外部系统输出扭矩，而且转速越高，输出扭矩越大。

通过叠加燃气轮机变工况性能数据及轴流压气机启动工况性能数据，可以得出试验系统在启动阶段的性能曲线，如图 7 所示。

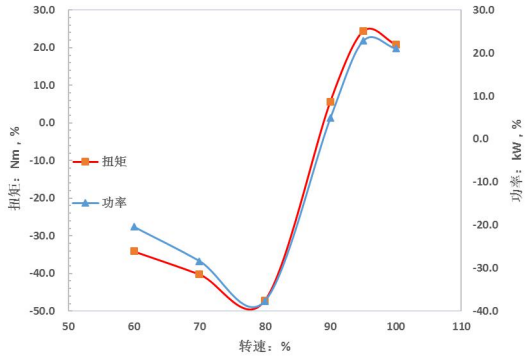


图 7 燃气轮机叠加轴流压气机变工况启动功率曲线

可以看出，试验系统随着转速升高，需要外部提供的扭矩逐步增大。所需扭矩在 80 %额定转速时达到峰值，为轴流压气机全速空载下扭矩的 47.2 %。

5 启动系统功率需求对比

将两种启动运行模式下启动系统最小输出功率及扭矩进行对比，如图 8、图 9 所示。

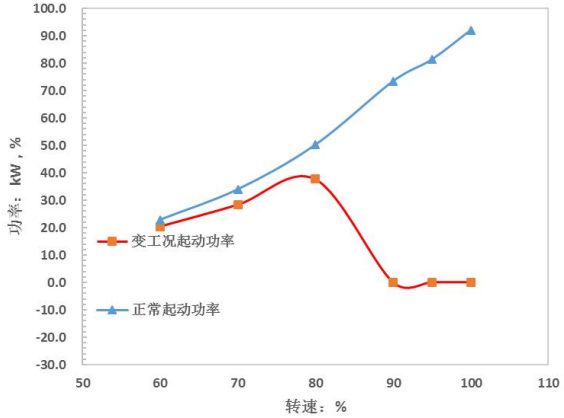


图 8 两种启动模式下启动系统功率需求对比曲线

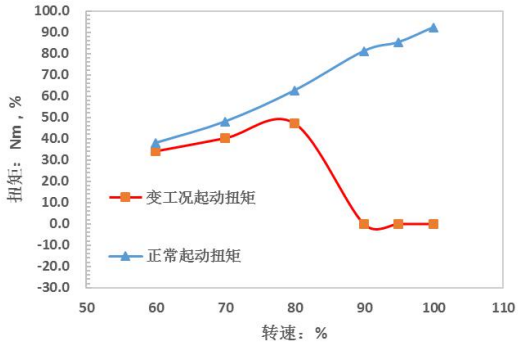


图 9 两种启动模式下启动系统扭矩需求对比曲线

可以看出，燃气轮机按常规启动运行模式，从零转速到额定转速的升速过程中，除维持机组所需功率扭矩，不对外输出功率扭矩。此种工作模式下，不考虑机组升速所需功率扭矩，需要启动系统在额定转速下输出的功率扭矩最大，达到轴流压气机全速空载下功率的 92 %，扭矩的 92.2 %。

通过改变燃气轮机的启动运行模式，在保证机组运行安全的前提下，在升速过程中尽可能提高燃气轮机的出力，通过启动系统和燃气轮机共同带动轴流压气机升速至额定转速。此种工作模式下，不考虑机组升速所需的功率扭矩，需要启动系统在

（下转第 66 页）

储能空气透平低压进气结构优化设计

白昆仑　平艳　杨长柱

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：本文对某储能空气透平低压进气结构进行了优化设计，包括在进气管道与进气腔室衔接处增加过渡倒圆、采用变截面腔室、腔室底部增加平直段和导流锥三种方式，数值分析结果显示：相对于原始方案，优化后进气结构内的局部流速明显降低，流线分布更加均匀，因此壁面熵显著减小，最终导致压损大幅降低，仅为原始方案的53.1%；此外，进气结构出口马赫数和气流角分布也更加均匀，导致首级叶片效率提升约3.3%；对比来看，增加过渡倒圆结构收益最大，采用变截面腔室、底部增加平直段和导流锥也有一定的收益。

关键词：进气结构；总压损失；效率；储能

中图分类号：TK02　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）03-0061-06

Optimal Design of Low Pressure Inlet Structure of Energy Storage Air Turbine

BAI Kunlun, PING Yan, YANG Changzhu

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

Abstract: This paper optimizes the low pressure inlet structure of a energy storage air turbine in three ways, which are adding a transition chamfering at the junction of the inlet pipe and the inlet chamber, using variable section chamber, adding straight section and diversion cone at the bottom. The numerical analysis results show that, compared with the original scheme, the local flow rate in the inlet structure decreases significantly, and the distribution of streamline becomes more uniform, which decrease the entropy near the wall and reduce the pressure loss finally. The pressure loss is only 53.1% of the original scheme. The Mach number and flow angle distribution at the outlet of the inlet structure become more uniform, which increase the efficiency of the first stage by 3.3%. By contrast, adding transitional chamfering structure has the greatest benefit, using variable section chamber, adding straight section and diversion cone also have some benefits.

Key words: inlet structure; total pressure loss; efficiency; energy storage

储能技术可以弥补传统电力系统缺少的“储放”功能，平衡电网负荷波动，为风电、光伏和生物质等新能源发电技术的开发消纳提供保障，助力实时平衡的“刚性”电力系统向灵活调节的“柔性”电力系统转变，是新型能源体系的重要组成部分。[1-2]

典型的储能方式有抽水蓄能、压缩空气储能、压缩 CO_2 储能、飞轮储能、氢气储能和化学电池储能等。[3]压缩空气储能是仅次于抽水蓄能的一种长时间、大容量储能技术，相对于抽水蓄能，压缩空气储能具有地理条件限制少、建设周期短等优势。[4]

早在20世纪，德国、美国和日本等国家已经开始研究压缩空气储能技术并建立示范电站，如1978年投运的德国 Huntorf 电站、1991年投运的美国 McIntosh 电站。[5-6]国内压缩空气储能技术在近年来飞速发展，各种功率等级的示范电站陆续实施或投运，如10 MW 甘肃定西和内蒙古乌兰察布电站、60 MW 江苏金坛和青海格尔木电站、300 MW 湖北应城和甘肃酒泉电站以及350 MW 山东泰安电站等。

收稿日期：2023-12-06

作者简介：白昆仑（1989－），男，2014年毕业于西安交通大学能源与动力工程学院动力工程专业，硕士，工程师。现就职于东方电气集团东方汽轮机有限公司产品研发中心，主要从事汽轮机设计工作。邮箱：345853731@qq.com

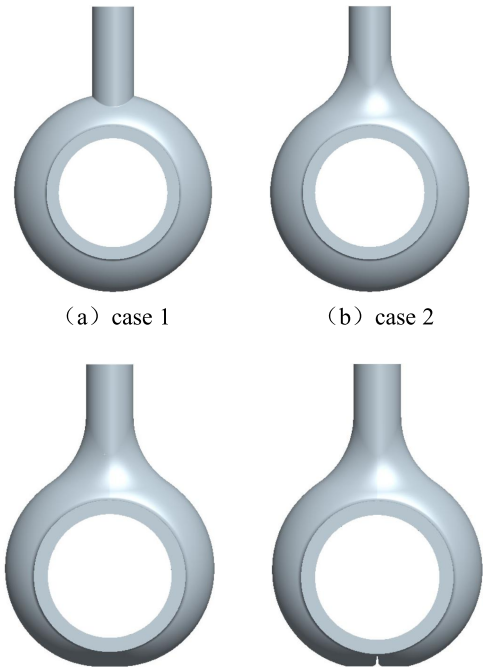
透平是压缩空气储能系统的核心部件之一。由于工质和参数不同，储能空气透平与常规火电、核电汽轮机差异较大。进气结构是储能空气透平的重要组成部分，对机组经济性具有重要影响。国内针对储能空气透平的研究集中在通流和轴系等方面[7-9]，专门针对进气结构的研究很少。

本文以某储能空气透平为研究对象，采用数值模拟方法，对比了四种不同低压进气结构的压损及其对首级叶片通流效率的影响，为储能空气透平设计提供有益参考。

1 进气结构

本文以某储能空气透平为研究对象，该机组为单轴、一次中间再热、高低压合缸的轴流式透平。受机组结构限制，低压缸采用单管上进气。

设计四种低压进气结构，如图 1 所示。case 1 为最简单的插管进气、等截面腔室结构。case 2 基于 case 1，在进气管道与进气腔室之间增加了大尺寸的过渡倒圆结构。case 3 基于 case 2，将进气腔室改为变截面设计，左右对称，截面积从顶部到底部逐渐减小。case 4 基于 case 3，在腔室底部增加了平直段和导流锥结构。



（a）case 1　（b）case 2

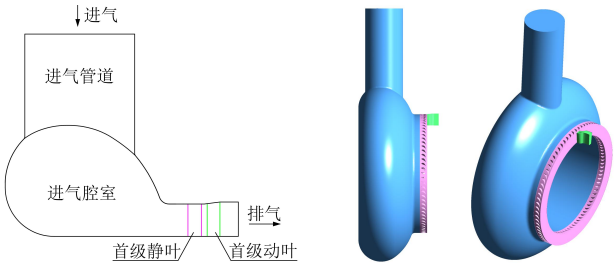
（c）case 3　（d）case 4

图 1　储能空气透平进气结构示意图

2 研究方法

2.1 计算模型

本文针对进气结构进行数值研究时，计算域包括进气管道、进气腔室、首级静叶和首级动叶，如图 2（a）所示。为反映进气腔室出口气流周向分布对通流的影响，首级静叶采用整圈结构。气流经过首级静叶后，周向已掺混均匀，因此，首级动叶采用单通道结构，如图 2（b）所示。

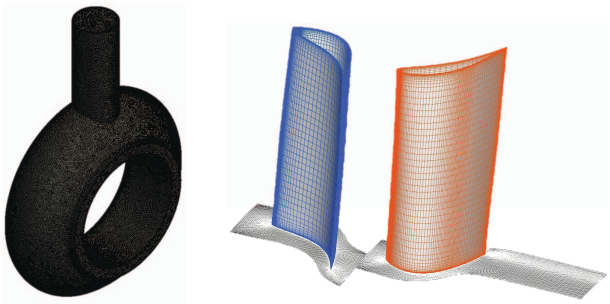


（a）二维视图　（b）三维视图

图 2　数值计算模型示意图

2.2 网格划分

进气结构形状不规则，为提高网格生成便利性，利用 ANSYS 中的 Mesh 模块绘制非结构化网格，如图 3（a）所示。首级叶片为传统的轴流叶轮结构，为提高网格质量、控制网格数量，利用 NUMECA 中的 AutoGrid 模块绘制结构化网格，如图 3（b）所示。



（a）进气结构　（b）首级叶片

图 3　数值计算网格示意图

2.3 数值方法

储能空气透平的工质为氮气、氧气和少量其他气体，占比分别为 78 %、21 %和 1 %。如图 5 所示，采用自主研发的基于双线性插值原理的混合工质生成程序，并用氩气替代少量其他气体，得到可供数值分析软件调用的空气物性参数文件。

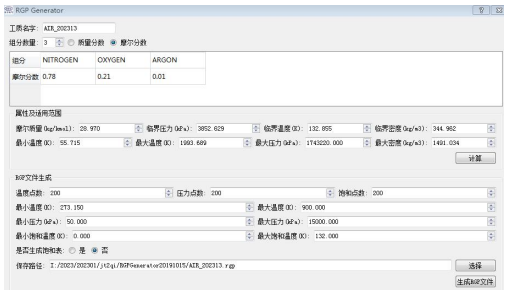


图 4　混合工质生成界面

基于 ANSYS 18.0 CFX 进行定常数值计算，湍流模型选用 SST，边界条件见表 1 所示。

表 1　数值计算进出口边界条件

位置	参数	单位	取值
进气管道入口	总压	MPa	1.22
	总温	℃	375.56
首级动叶出口	平均静压	MPa	0.22

2.4 评价指标

进气结构对储能空气透平的影响体现在进气结构损失和首级叶片性能两方面，通过进气结构总压损失系数和首级叶片静焓效率来评价进气结构的优劣。进气结构总压损失系数定义为：

$$\varphi = \frac{p_{in}^{*} - p_{out}^{*}}{p_{in}^{*}} \qquad (1)$$

首级叶片静焓效率定义为:

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \qquad (2)$$

式中：

φ为总压损失系数；

p_{in}^{*}为进气管道入口总压；

p_{out}^{*}为进气腔室出口总压；

η为首级叶片静焓效率；

h_1为首级静叶入口静焓；

h_2为首级动叶出口静焓；

h_{2s}为首级动叶出口等熵焓。

3　计算结果及分析

3.1 进气结构损失

如图 5 所示，为四种进气结构总压损失系数对比曲线。从 case 1 到 case 4，总压损失系数逐渐减小，且 case 1 的总压损失系数明显高于 case 2~case 4。case 2 的总压损失系数仅为 case 1 的 55 %，可见，在进气管道和进气腔室之间增加大尺寸过渡倒圆结构，能够显著降低进气结构损失。case 3 的总压损失系数是 case 2 的 97.8 %，case 4 的总压损失系数是 case 3 的 98.8 %，可见，进气腔室采用变截面设计、进气腔室底部增加直线段和导流锥仅能略微降低进气结构损失。

总体来看，通过增加过渡倒圆、采用变截面腔室、底部增加平直段和导流锥的综合措施，进气结构压损大幅降低，仅为原来的 53.1 %。

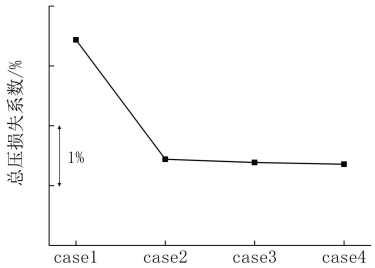


图 5　进气结构总压损失系数对比曲线

3.2 首级叶片性能

如图 6 所示，为四种进气结构下首级叶片静焓效率对比曲线。从 case 1 到 case 4，首级叶片效率逐渐提高。case 2 首级叶片效率较 case 1 高 2.5 %，case 3 首级叶片效率较 case 2 高 0.7 %，可见，在进气管道和进气腔室之间增加大尺寸过渡倒圆结构、进气腔室采用变截面设计能够明显提高首级叶片效率。case 4 首级叶片效率较 case 3 高 0.1 %，可见，进气腔室底部增加直线段和导流锥仅能略微提高首级叶片效率。

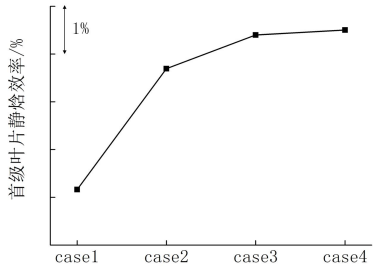


图 6　首级叶片静焓效率对比曲线

总体来看，通过增加过渡倒圆、采用变截面腔室、底部增加平直段和导流锥的综合措施，首级叶片效率明显提高约 3.3 %。

3.3 进气结构流场

3.3.1 进气结构熵分布

如图 7 所示，为四种进气结构壁面熵分布云图。

显然，case 1 壁面熵值明显高于 case 2~case 4，尤其是进气管道与进气腔室衔接处。case 3 相对于 case 2，进气腔室中下部熵略低一些。而 case 4 相对于 case 3，进气腔室底部低熵区域略有增加。

熵增的过程其实就是损失增加的过程，从 case 1 到 case 4，进气管道入口熵值相等，而进气结构壁面熵逐渐增大，因此进气结构压损逐渐增大。

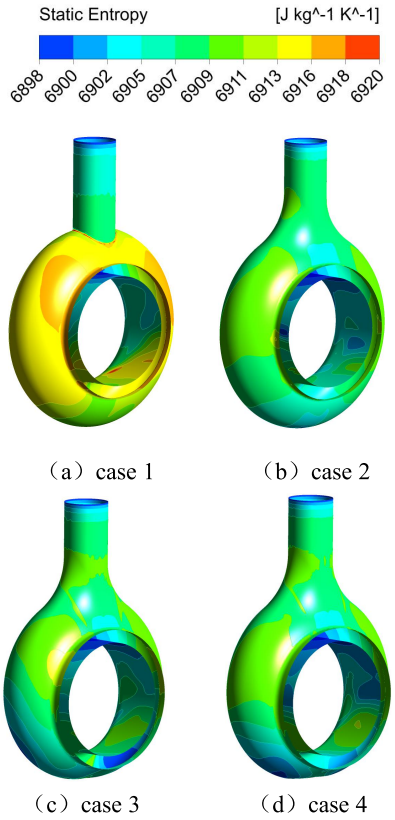


图 7　进气结构壁面熵分布图

3.3.2 进气结构流线分布

如图 8 所示，为四种进气结构内流线图。case 1 进气管道入口处流速低于 case 2~case 4，但在进气管道与进气腔室衔接处，case 1 局部流速较高，高速气流甚至直接冲击到进气腔室内壁面，导致上半内壁面附近流速较高。case 2~case 4 中，气流在进气管道与进气腔室衔接处的过渡倒圆内减速并向两侧流动，进而导致进气腔室上半内壁面附近的流速明显降低。case 2 进气腔室内部，气流周向分布很不均匀，左右对称性较差。case 3 相对于 case 2，进气腔室内部气流周向分布均匀性略有好转，但是底部气流仍明显偏向一侧。case 4 相对于 case 3，进气腔室内部气流周向分布更加均匀，尤其是底部因为导流锥将左右两侧气流分开，避免了气流对冲，左右对称性较好。

气流分布不均匀、局部高速气流和气流对冲等是造成熵增的主要原因，case 1 局部流速最高，从 case 2 到 case 4 气流周向分布均匀性越来越好，因此从 case 1 到 case 4，进气结构熵增逐渐减小。

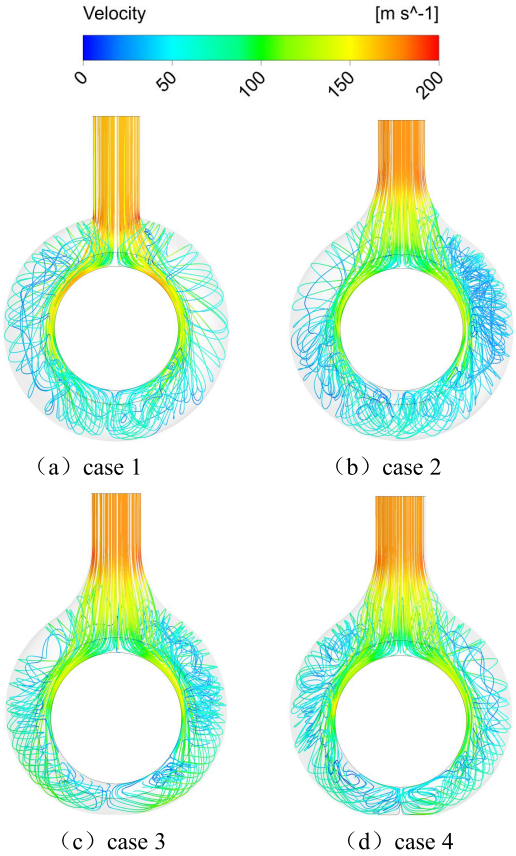
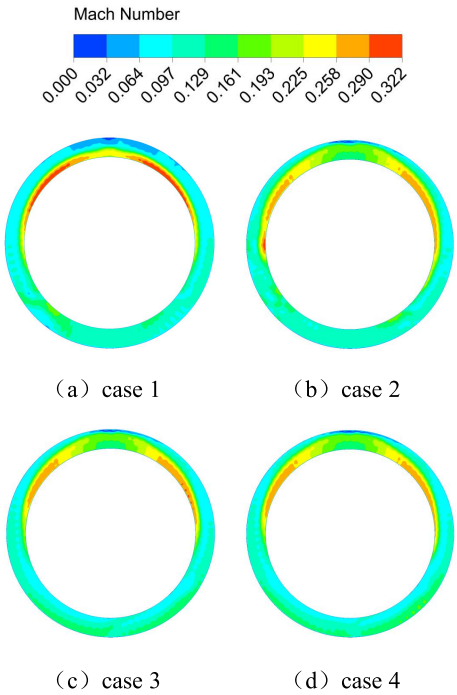


图 8　进气结构流线图

3.3.3 进气结构出口马赫数分布

如图 9 所示，为四种进气结构出口马赫数分布图。四种方案中，马赫数周向分布都表现出一定的不均匀性，尤其是上半部分，内表面存在明显的高马赫数区域，这是单管上进气结构的固有缺陷。case 1 进气结构出口局部马赫数最高，同时外表面还有明显的低马赫数区域，case 2~case 4 进气结构出口局部马赫数显著降低，同时外表面低马赫数区域也明显减小。从 case 2 到 case 4，局部马赫数略有降低，同时高马赫数区域也略有减小。

进气结构出口气流均匀性会严重影响首级叶片性能，从 case 1 到 case 4，进气腔室内的流场分布越来越均匀、局部流速逐渐降低，进而导致进气结构出口马赫数分布越来越均匀，首级叶片效率逐渐提高。

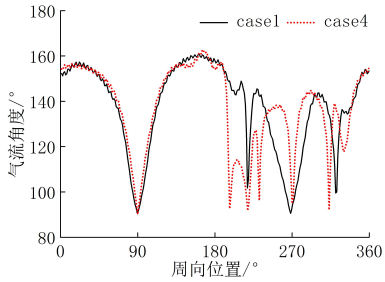


（a）case 1　（b）case 2

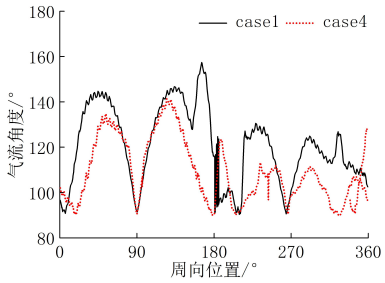
（c）case 3　（d）case 4

图 9　进气结构出口马赫数分布图

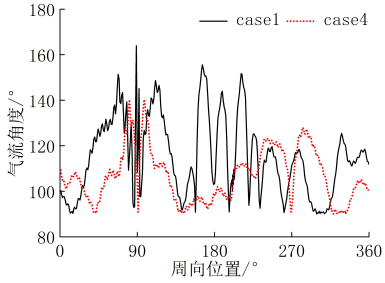
3.3.4 进气结构出口气流角



（a）10 %叶高处



（b）50 %叶高处



（c）90 %叶高处

图 10　进气结构出口气流角周向分布

如图 10 所示，为 case 1 和 case 4 进气结构出口不同叶高处气流角周向分布曲线。可见，case 1 和 case 4 出口气流角在周向分布都具有一定的波动，这也是单管进气结构的固有缺陷。10 %叶高处，case 1 与 case 4 出口气流角波动幅值接近，50 %和 90 %叶高处，case 4 出口气流角波动幅值明显低于 case 1。

case 2、case 3 与 case 4 差异较小，此处不再赘述。

进气结构出口气流角在周向分布的均匀性会严重影响下游首级静叶的攻角特性，进而影响叶片损失。case 4 出口气流角在周向的分布较 case 1 更均匀，是 case 4 首级叶片效率高于 case 1 的另一个原因。

3.4 机理分析

根据以上分析，总结进气结构对储能空气透平性能影响机理如图 11 所示。进气结构的差异，导致进气结构内流场分布不同，一方面影响了进气结构内的熵分布，进而改变进气结构压损，另一方面影响了进气结构出口气流均匀性，进而改变首级叶片性能。

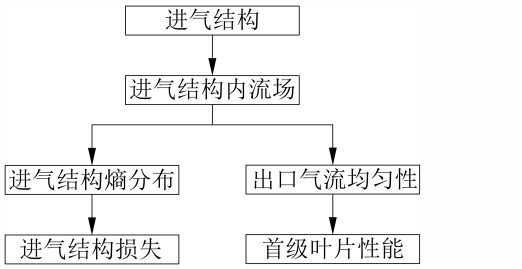


图 11　进气结构性能影响机理分析

4　结语

本文以某储能空气透平为研究对象，采用数值模拟方法，对比了四种低压进气结构对透平性能的影响，得到以下结论：

（1）case 4 相对于 case 1，进气结构压损大幅降低，仅为原来的 53.1 %，首级叶片效率提升约 3.3 %；

（2）从 case 1 到 case 4，进气结构内的局部流速逐渐降低，流线分布越来越均匀，因此壁面熵逐渐减小，最终导致压损逐渐降低；

（3）从 case 1 到 case 4，进气结构出口马赫数和气流角越来越均匀，导致首级叶片效率逐渐提高；

（4）综合来看，从 case 1 到 case 4，性能逐渐

提高，尤其是 case 2 的性能明显优于 case 1，即在进气管道与进气腔室衔接处增加过渡倒圆能够大幅提高进气结构性能，采用变截面腔室并在底部增加平直段和导流锥能够进一步提高进气结构性能。

参考文献：

[1] 王姝睿. 储能在区域电力系统中应用的经济性研究[D]. 中国科学院大学（中国科学院工程热物理研究所）, 2022

[2] 张文亮, 丘明, 米小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7):1-9

[3] 陈杰. 我国新能源储能技术创新能力提升研究[D]. 中南大学, 2014

[4] 丁捷. 电力储能经济性分析与综合评价方法研究[D]. 中国科学院大学（中国科学院工程热物理研究所）, 2020

[5] 王姝. 储能技术应用于电力系统时的协调控制研究[D]. 华中科技大学, 2016

[6] Eckroad S. EPRI-DOE handbook of energy storage for transmission and distribution applications[R]. Polyvinyl flouride, 2003

[7] 平艳, 江生科. 储能空气透平设计和混合工质物性研究[J]. 热力透平, 2022, 51(1):46-51

[8] 曹寒, 祁乃斌, 杨培平, 等. 盐穴空气储能透平机组轴系动力学分析[J]. 东方电气评论, 2022,36(4):26-29

[9] 赵先波, 覃小文, 曹寒, 等. 轴承参数对某压缩气体储能项目转子动特性的影响[J]. 东方汽轮机, 2022,167(3):29-33

（上接第 60 页）

80 %额定转速下输出的功率扭矩最大，为轴流压气机全速空载下功率的 40 %，扭矩的 47.2 %。

从以上对比可以看出，改变燃气轮机的启动运行模式后，所需要的启动系统功率扭矩相比常规启动运行模式有了大幅度的下降。假设正常启动模式下启动系统的电动机功率为 1 万千瓦，则变工况启动模式下启动系统的电动机功率只需 0.5 万千瓦即可满足启动需求。这将大幅降低启动系统的建造成本。

6 结语

本文对某燃气轮机试验平台在常规启动和变工况启动条件下启动系统的功率消耗进行对比研究，得出以下结论：

（1）在常规启动运行模式下，需要启动系统在额定转速下输出的功率扭矩最大；

（2）在变工况启动运行模式下，需要启动系统在 80 %额定转速下输出的功率扭矩最大；

（3）变工况启动运行模式下所需的启动系统功率扭矩相比常规启动运行模式有了大幅度的下降。可以明显地降低启动系统的建造成本。

上述变工况启动运行模式已经在该燃气轮机带负荷试验平台得到成功验证，可以为后续国内燃气轮机试验平台的设计提供一定的借鉴与参考。

参考文献：

[1] 赵昌宗. 燃气轮机的 SFC 启动[C]. 燃气轮机发电技术第 4 卷第 3、4 期.北京:中国电机工程学会, 2002:44-47

[2] 曹韦瑜. 静态变频启动装置在重型燃气轮机发电机组中的应用[J]. 自动化应用, 2020(10):45-47

[3] 丁飞宇, 吴昌兵, 向东, 等. 静态变频启动装置在 M701F4 燃气-蒸汽联合循环发电机组中的应用[C]. 中国电机工程学会电力建设专委会 2016 年年会论文集. 2016:1-5

[4] 王成龙. 静态变频启动装置在燃气电厂的应用[J]. 企业技术开发, 2013, 32(17):115-116

[5] 秦鹏译. 轴流压气机气动设计[M]. 国防工业出版社, 1975

[6] 舒士甄, 朱力, 柯玄龄, 等. 叶轮机械原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991

[7] 项效镕, 刘波, 陈云永, 等. 某重型燃气轮机 17 级轴流压气机特性预估计算研究[J]. 汽轮机技术, 2009, 51(1):29-32

[8] 陈开胜. 西门子 F 级燃气轮机热悬挂的分析与处理[J]. 燃气轮机技术, 2016, 29(3), 53-56

超临界汽水分离器切向孔及管接头焊接后机加造制工艺研究

刘虎锋　卢洪

东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643000

摘要：主要阐述了超临界汽水分离器切向孔及管接头焊接后机加造制工艺方法，并进行两种工艺方法的试验验证，摸索出了切向孔及管接头焊接后机加造制工艺方法并在生产中进行应用。

关键词：汽水分离器；切向孔

中图分类号：TM623　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）03-0067-03

Research on the Machining Process of the Tangential Hole and Pipe Joint of the Supercritical Steam Water Separator after Welding

LIU Hufeng, LU Hong

(Dongfang Boiler Co., Ltd., 643000, Zigong, Sichuan, China)

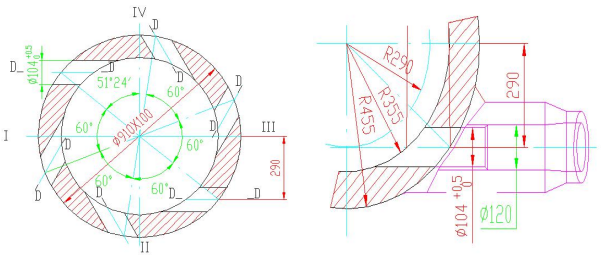
Abstract: This article mainly elaborates on the machining process methods for the tangential holes and pipe joints of supercritical steam water separators after welding, and conducts experimental verification of two process methods. The machining process methods for the tangential holes and pipe joints after welding have been explored and applied in production.

Key words: steam water separator; tangential hole

此前超临界汽水分离器切向孔的加工及切向管接头焊后镗焊根都是采用数控加工中心在外委厂家进行加工，加工要求高、难度大，制造成本高，加上来回运费使汽水分离器的制造成本更高。如果安排在厂里加工，可以大大降低制造成本，节省不必要的运输费用，同时可以缩短制造周期。我们进行了认真的研究分析并制定了两套加工方案，我们认为厂里完全有能力加工汽水分离器切向孔，因此我们对超临界汽水分离器切向孔加工进行厂里制造工艺试验。

1　汽水分离器结构

筒身及切向接头材质为 SA-182F12CL.2 汽水分离器，6 个切向孔平均颁布在圆周上（图 1~2），且第Ⅰ-Ⅳ象限切向孔精度要求为 51°24’对划线工的要求十分高。切向孔φ104 加工精度要求为 0 到 +0.5。切向接头采用镗焊根形式，衬环材质为 SA-335P12。



(a) 筒身主视图　　(b) B-B 旋转剖视图

图 1　汽水分离器结构图

收稿日期：2023-08-04

作者简介：刘虎锋（1980－），男，2004 年毕业于哈尔滨理工大学校机械设计制造及其自动化专业，本科，工程师。东方电气集团东方锅炉股份有限公司工艺研发部，主要从事锅炉、压力容器、产品工艺技术与研究及应用工作。

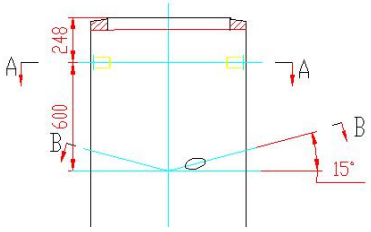


图 2　切向管接头结构图

2　厂内加工试验

2.1 试验方案

我们对超临界汽水分离器制造做了两套可行性工艺方案，对划线、钻孔等关键工序做了详细讲解，并制定了详细的加工工艺，同时到车间进行现场指导，及时解决车间出现的问题，以确保实验得以顺利进行。

2.1.1 **第一套方案**（利用现有工装、刀具进行试验）

（1）采用平台划筒身四相线，切向孔十字中心线、孔线,十字中心线打上洋冲眼。

（2）反复找正工件，在镗床上加工切向孔。先钻定位孔，然后镗平台，再钻孔；采用多次钻孔、扩孔、镗孔后加工到图纸要求尺寸。

2.1.2 **第二套方案**（在分度盘装置，滚轮架等工装制造完成后采用此方案，适合批量生产）

（1）反复找正工件，将筒身放在镗床上划筒身四相线，利用分度工装划切向孔十字中心线、孔线，十字中心线打上样冲眼。

（2）反复找正工件，在镗床上加工切向孔。先钻定位孔，然后镗平台，再钻孔；镗平台，采用多次钻孔、扩孔、镗孔后加工到图纸要求尺寸。

注：加工切向孔新提的工装有

φ50，L 有效=360　TX6113C　锥度 7:24（方孔 16）；

φ60，L 有效=360　TX6113C　锥度 7:24（方孔 20）；

φ70，L 有效=930　T6213C　公制 80# 锲形等腰圆孔；

斜向孔加工平台能够在其上放置滚轮架、分度盘。具有划线、找正、搭压板的功能，承重 11 t。（在以上工装制造完成后，划线将更加精准且节约时间、加工切向孔的效率也会更高。）

由于厂里计划制造周期比较短，相关的工装还未能及时制造好。因此采用第 1 套加工方案进行实验。

2.2 工艺试验主要工序

2.2.1 划线工序

本实验采用第一套加工方案进行，在平台上进行划线工作，因划线平台较小，操作十分不便，操作人员先在筒身一端划过中心的两条母线，然后用行车起吊旋转 90°，仔细找正后，划出过中心的另外两条母线即筒身四相线，由于六个切向孔的精度要求比较高，操作人员先用分度圆规沿顺时针方向划出六个切向孔十字中心线，然后逆时针方向校正，最终确定六个切向孔十字中心线、孔线。由于目前没有分度盘装置，整个工作操作十分困难，大约需要 7~8 个小时。（在新增工装制造完成后操作更加方便，可大大节约划线工时）

2.2.2　镗切向孔工序

划线完成后在 TX6113 镗床上进行六个切向孔的加工，采用 V 形支座工装固定汽水分离器，并用紧固螺杆固定筒身，按设计图纸（图 3）将筒身调整 15°。

图 3　汽水分离器筒身水平方向旋转图

图 4　采用接长刀杆加工孔图

仔细找正切向孔中心后，先钻定位孔，然后刮φ25 平台，再钻孔φ20 通孔；刮φ36 台阶孔，刮φ50 台阶孔，再钻孔φ40 通孔，刮φ58 台阶孔，镗φ64 台阶孔，经多次镗孔后加工到图纸要求尺寸。由于切向孔比较深，用长刀杆固定在花盘上加工时出现

抖动现象，无法进行加工。后来采用接长的刀杆固定在主轴上加工孔，图 4。

图 5　切向孔加工完成

2.2.3 切向孔镗焊根工序

在切向管已装焊完成后，先在 TX6113 上进行镗焊根工作，由于没有专用刀杆，只能是利用现有刀杆安装在花盘上进行加工，加工时刀杆出现颤抖现象，刀片出现崩刃，刃磨后还是无法加工；见图 6。

图 6　现有刀杆加工图

后来利用新提专用刀杆（图 7）固定在主轴上在 T6213 镗床上进行镗焊根。

镗焊根时先用合金钢刀具进行加工，由于刀杆较长，加工时刀杆还是出现了一定的颤抖现象，刀片出现崩刃，修磨刀具后还是无法加工（图 8）；最初采用单边切削量为 2 mm，转速为 60 r/min，进给量为 0.18 mm，后来改用高速钢刀具加工，并且调整了相关参数，单边切削量改为 1.5 mm,转速变小改为 40 r/min,进给量为 0.18 mm.刀杆虽还是有轻微的颤抖现象但未崩刃，可以进行加工。最终采用高速钢刀具镗焊根，圆满完成功镗焊根实验（图 9）。

图 7　新增专用刀杆加工图

图 8　刀片出现崩刃，修磨刀具后加工图

图 9　高速钢刀具镗焊根加工完成图

3　试验结果及结论

经质检人员检查，切向管孔及切向管接头焊后镗焊根尺寸满足图纸要求，根据试验可见加工艺方案切实可行并在后续产品加工中进行了应用。

车间智慧安全 Web 三维可视化关键技术研究

张哲豪[1] 蒲晓珉[1] 边晓光[1] 王健[2]

1.东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731；2.东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643001

摘要：本文旨在探讨基于 Web 的车间智慧安全三维可视化关键技术和系统。首先，提出了系统总体设计方案及关键技术；然后针对生产车间三维可视化场景模型及材质构建、Web3D 实时渲染等场景构建技术进行了探讨，并对系统在不同平台的运行提出了优化方案；在真实呈现生产车间场景的前提下，基于对象池化、响应式原理等技术，提出了车间三维安全态势感知特效层关键技术，探讨了生命周期和对象优化；最后，开发、测试了原型系统，并进行了试点应用，该系统为企业提供一种先进而有效的生产车间智慧安全管理解决方案。

关键词：生产车间；三维可视化；Web3D 实时渲染；安全态势感知

中图分类号：TP309 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）03-0070-07

Research on Key Technologies of Web-based 3D Visualization for Smart Safety in Workshops

ZHANG Zhehao[1], *PU Xiaomin, BIAN Xiaoguang, WANG jian*[2]

(1. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, Sichuan, China; 2.Dongfang Electric group Dongfang Boiler Co. Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: This paper aims to explore the key technologies and systems for web-based workshop intelligent safety three-dimensional visualization. Firstly, a general design scheme and key technologies are proposed for the system. Then, discussions are conducted on the construction of three-dimensional visualization scene models and material, as well as web3D real-time rendering techniques for production workshops. Optimization strategies for running the system on different platforms are also presented. Under the premise of presenting real production workshop scenes, key technologies for workshop three-dimensional safety situational awareness effects layer are proposed based on techniques such as object pooling and responsive principles. The article explores lifecycle management and object optimization. Finally, a prototype system is developed and tested, pilot application of the system is conducted, which provides an advanced and effective smart safety management solution for enterprises' production workshops.

Key words: workshop; 3D visualization; web3D real-time rendering; security situation awareness

随着工业生产的不断发展，生产车间安全管理成为了一个至关重要的方面。[1]为了提高车间的安全性和管理效率，基于车间的智慧安全系统越来越受到关注。其中，基于 Web 的车间智慧安全三维可视化技术作为一种新兴的解决方案，为车间安全管理带来了全新的可能性。

传统的车间安全管理往往基于 2D 平面图或简单的数据报表，这种方式存在信息展示有限、操作员体验差等问题。[2]而车间智慧安全 Web 三维可视化技术通过将车间数据以三维虚拟场景的形式展现，实现了更直观、更全面的数据呈现和操作方式。

目前国内外学者对生产车间实时数据感知与

收稿日期：2023-10-30

基金项目：项目名称：生产车间安全风险智能识别解决方案研究；项目编号：SC0022100。

作者简介：张哲豪（1995—），男，2022 年毕业于中国矿业大学机械电子工程专业，工学硕士，助理工程师。现任东方电气集团科学技术研究院有限公司软件开发工程师，主要从事三维可视化方向研究与 VR、AR 软件开发工作。

监测、三维可视化和数字孪生等方面进行了大量研究。罗家文[3]结合物联网技术与虚拟现实技术，开发了数字化车间三维实时可视化监控系统；陈江等[4]基于 OPC UA 技术，实现了低延迟的生产线三维实时监控；赵浩然[5]等提出一种多层次的三维可视化监控模式和实时数据驱动的虚拟车间运行模式，实现了虚拟车间几何建模、车间实时数据管理、车间多层次三维可视化监控和车间状态看板构建方法。以上学者的研究均侧重于生产车间仿真与监控技术优化，没有加入车间智慧安全管理，且三维场景的呈现效果受不同平台的设备性能限制。

1 车间智慧安全 Web 三维可视化系统总体设计

生产车间全景三维可视化系统（下文简称系统）基于 Web3D 技术，以 JavaScript 三维图形库 Three.js 为基础开发，作为独立模块嵌入基于 VUE.js 3.0 框架的生产车间安全可视化监测预警平台中，进行生产车间网格模型的三维全景可视化渲染。[6]

该系统由生产车间场景层及安全态势感知特效层组成两个核心模块组成，如图 1 所示。

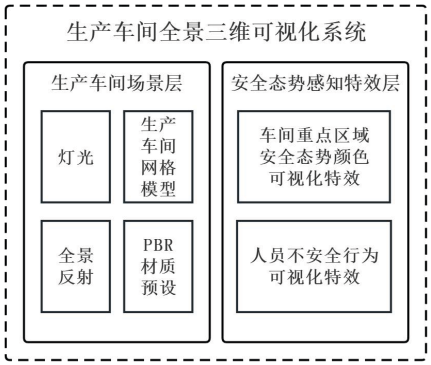


图 1 三维可视化方案总体设计

其中，生产车间场景层包含静态（Static）的美术资源，包括灯光、全景反射及带有多层次细节技术（Level of Detail，LOD）的生产车间网格三维模型及材质预设，在系统视口更新渲染时最先进行渲染计算；安全态势感知特效层分为车间重点区域安全态势颜色可视化特效模块和人员不安全行为可视化特效模块，以响应式设计原理为基础，动态控制行为事件效果对象的生命周期。该层在场景层后进行渲染，以保证渲染的特效不会被生产车间场景模型遮挡，即总是在三维可视化系统屏幕最前方渲染，便于用户对事件的知晓与处理。

该系统采用的主要关键技术及其优点在于：

（1）轻量化硬表面建模，场景和特效分离。通过采用轻量级的硬表面建模技术，可以更高效地构建场景和特效。同时，将场景和特效分离，可以实现更灵活的编辑和调整，提高开发效率；

（2）实时渲染与跨平台优化。该系统支持实时渲染，使得用户可以即时看到场景和特效的效果。此外，针对不同平台的优化设计，可以在多个设备上保持高性能和稳定性，提供一致的用户体验；

（3）响应式实时安全感知特效。安全特效采用响应式原理和对象池化技术，特效对象有独立的生命周期和缓冲区，在节省系统浏览器缓存的前提下，便于安全态势效果的实时感知与可视化渲染。

2 系统三维可视化场景层关键技术

生产车间场景层网格模型的构建，是保证基于 Web3D 的全景三维可视化系统运行流畅的前提下，合理利用跨平台设备有限的浏览器缓存资源、增强场景真实性的关键技术的关键流程之一。本章介绍该流程中的关键技术。

2.1 基于透视解算的场景轻量化网格模型构建技术

基于透视解算的网格模型构建技术是一种以现实三维场景多角度照片为基础，通过透视解算（Perspective Estimation）矫正网格模型构建视口，以次世代硬表面建模方法，快速构建场景轻量化模型的技术。该技术的主要流程如图 2 所示。

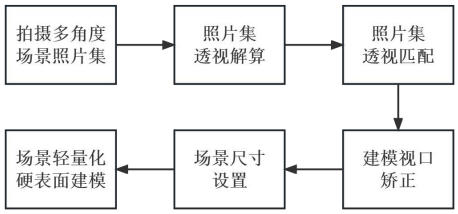


图 2 透视解算场景轻量化网格模型构建技术流程

以位于某车间第四跨的 TX6213A 专用镗床为例，该技术流程的详细叙述如下:

（1）拍摄多角度场景照片集。以多角度拍摄场景设备，获取该场景设备照片集；

（2）照片集透视解算。在 CG 建模软件中，根据单张照片拍摄角度采用一点透视或两点透视的

方法，以对照片集中的每一张照片以进行透视解算，根据照片参数解算摄影机相对位置、视场角等关键参数，如图 3 所示。

图 3　设备单幅照片的透视解算

（3）照片集透视匹配。创建虚拟场景，并建立单张照片的面片网格（Quad Mesh），然后按照步骤(2)解算得到的摄影机参数建立摄影机；

（4）建模视口矫正。对每个带有单张照片面片模型和对应摄影机的虚拟场景进行合并和调整，矫正网格模型构建视口，如图 4 所示；

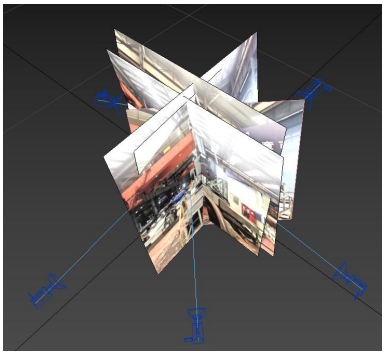


图 4　设备多图片透视矫正网格模型构建视口

（5）场景尺寸设置。根据真实场景设备基本参数调整虚拟场景单位和栅格尺寸；

（6）场景轻量化硬表面建模。通过切换不同摄影机，参照照片面片网格，使用基于标准基本体的硬表面建模方法对场景设备进行轻量化网格模型构建，构建完成的网格模型如图 5 所示。

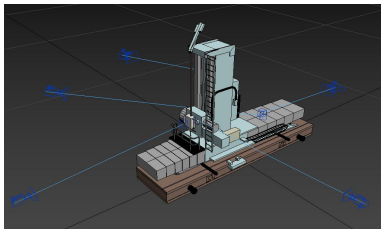
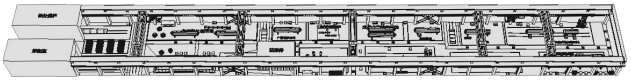
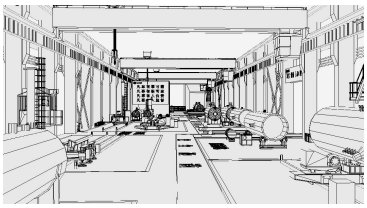


图 5　场景设备轻量化硬表面建模

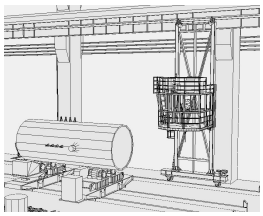
使用该技术构建的车间场景轻量化网格模型，其三角面数较传统的次世代细分三维网格模型来说，极大的降低了系统资源的使用，可满足基于 Web 端的跨平台三维可视化需求。采用该技术构建的某车间第四跨轻量化网格模型线图如图 6 所示，总三角面数为 16 万。



(a) 车间整体模型



(b) 第一人称视角



(c) 部分专用设备

图 6　生产车间网格模型线图

2.2 基于全景图的 Web 端实时渲染技术

Web 端实时渲染技术是保证生产车间虚拟场景渲染效果的关键技术之一。该技术分为材质预设技术和全景图间接光照技术两个部分。

材质预设（Material Instance）是一组预先配置完成的材质对象集合，在系统虚拟场景异步加载模型的时候，可快速应用到场景物体上，即生产车间虚拟场景中具有相同材质的物体共用一个材质对象，有效避免了材质对象的冗余，不占用浏览器额外缓存。车间虚拟场景的材质采用基于物理的着色（Physically-Based Shading，PBS）材质，以保证场景渲染光影的明亮和真实。

基于全景图的实时渲染技术利用现实世界中拍摄的高动态范围全景图像（High Dynamic Range Panorama）作为光照信息来模拟和渲染虚拟场景中的光照效果的技术，其宽高比为 1:2，考虑到 Web 端的跨平台性和兼容性，全景图采用低分辨率的 *.exr 图像保存，如图 7 所示。车间虚拟场景中使用天空盒（Skybox）贴图，其初始化过程为：首先预加载全景图（Panorama）,然后进行等距柱状投影[7]（Equirectangular Projection，ERP），将全景图转换为六面体（6-Sided）贴图，最后将六面体贴图对象作为属性赋给天空盒。采用三平面映射（Tri-Planar Mapping）的形式，根据车间虚拟场景网格模型所属材质参数，作为间接光照实时投射到物体表面，

并参与实时渲染着色计算。该技术可以增强渲染的真实感，并提供更逼真的光照效果，如图 8 所示。

图 7　用于车间虚拟场景渲染的全景图

图 8　车间虚拟场景 Web3D 实时渲染效果

2.3 Web3D 跨平台实时渲染技术

考虑到基于 Web3D 构建系统的便利性和跨平台的兼容性，3D 实时渲染技术主要采用基于物理的双向反射分布函数（Bidirectional Reflectance Distribution Function，BRDF）作为着色计算模型[8]，采用直接光照（Directional Lighting）作为虚拟场景的主光源，并动态调用不同精度等级的生产车间三维网格模型，降低设备的可视化渲染负担。系统分别为桌面端和移动端两个平台做了适配，采用不同的渲染方案以适配不同硬件平台的 3D 渲染能力，如图 9 所示。

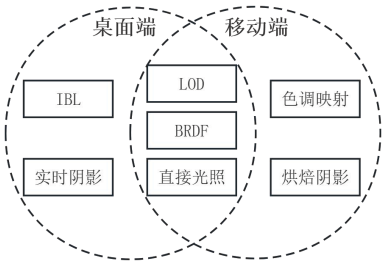


图 9　Web3D 跨平台渲染技术方案

在桌面端，本方案采用基于图像的光照（Image Based Lighting，IBL）技术计算场景全局间接光照[9]；采用基于深度的实时阴影（Depth-Based Realtime ShadowMap）计算场景的全局阴影，并采用高动态范围（High Dynamic Range，HDR）的线性颜色空间（Linear Color Space）输出场景渲染图像，增加车间虚拟场景的光影真实性。

在移动端，本方案采用预烘焙阴影（Pre-Baked Shadow）作为场景的全局阴影，并采用色调映射技术（Tone-Mapping）将输出渲染图像映射至低动态范围（Low Dynamic Range，LDR）的伽马颜色空间（Gamma Color Space），降低实时渲染压力，以适配移动端的 Web3D 渲染能力和屏幕输出效果。

3　系统三维安全态势感知特效层关键技术

车间场景特效层是智慧安全态势感知与可视化的重要表达方式之一。该层采用基于对象和事件的采响应式设计模式和基于特效的对象池化技术，以图形学渲染特效的方式进行可视化。该层使用重点区域安全态势颜色可视化技术和人员不安全行为可视化技术，实现基于车间监控系统数据的车间重点范围和人员不安全行为的实时感知和可视化。

3.1　车间重点区域安全态势颜色可视化技术

车间区域安全态势颜色可视化技术是安全态势可视化的关键技术之一。该技术旨在根据车间全连接监控系统数据，在车间虚拟场景上动态显示重点、高风险区域的安全态势。

车间重点区域安全态势颜色可视化预警颜色标准基于国家标准 GB/T 37230-2018《公共安全应急管理预警颜色指南》[10]，并在该标准的基础上增加了安全级别颜色，颜色、预警级别和颜色 RGB 值的对照表如表 1 所示。

表 1　车间重点区域安全态势预警颜色对照表

预警颜色	预警级别	颜色 RGB 值
绿色	安全	4 022 040
蓝色	IV 级预警（一般）	4 040 220
黄色	III 级预警（较重）	2 502 300
橙色	II 级预警（严重）	24 015 020
红色	I 级预警（特别严重）	2 204 040

该特效采用基于样条线挤出的单分段参数化标准长方体作为可视化渲染网格源模型（Extruded Mesh），光照模型采用基于半兰伯特（Half-Lambert）[11]的双面顶点着色（Double-Sided Vertex Shading），

其中顶点颜色作为透明度混合（Alpha Blending）通道输入，在完成光照计算后，在使用叠加混合（Addictive Blending）覆盖在车间场景渲染图上，即该特效在车间场景层后渲染。该特效不参与车间虚拟场景光照计算，即不受场景环境灯光影响（Unlit），车间重点区域安全态势颜色渲染效果如图 10 所示。

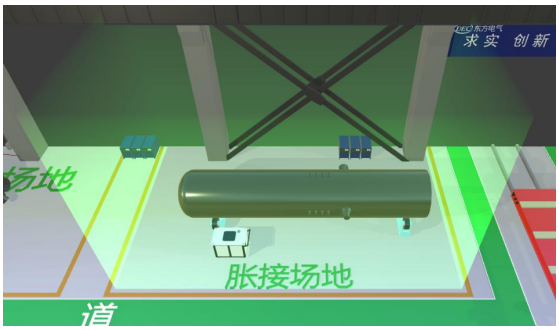


图 10　车间重点区域安全态势颜色渲染效果

该特效具有完整的生命周期流程。在基于 Vue.js 框架构建的网页端初始化加载阶段前（Before Mount）进行特效对象资源的加载[6]，在主线程中响应式地绑定事件，便于特效的实时数据更新，及时地展现车间重点区域的安全态势；在网页加载后（Mounted）调用后台线程，以异步的形式渲染特效对象的动态呼吸效果，特效颜色随框架主线程实时更新；在页面卸载前（Before Destroy）销毁后台渲染线程和特效对象，在页面卸载后（Destroyed）进行对象引用的销毁与浏览器内存的回收。上述流程如图 11 所示，其中红色箭头为特效对象在生命周期内使用的页面主线程，蓝色箭头为特效对象使用的后台线程。

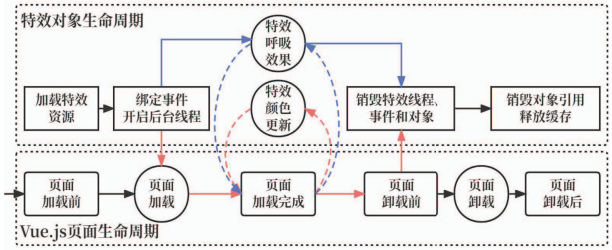


图 11　安全态势预警颜色特效对象生命周期

3.2　人员不安全行为可视化技术

人员不安全行为可视化技术旨在生产车间 3D 场景中显示从事不安全行为的人员位置、不安全行为类型和严重程度的视觉效果，该特效是生产车间三维可视化系统安全感知的重要组成部分之一，该特效采用基于对象池化技术（Object Pooling）的响应式设计模式，动态、合理地调用浏览器缓存进行渲染与展示，该特效悬浮于生产车间 3D 场景层之上，接入真实数据，可快速、准确的将车间内发生不安全行为的类型、位置和严重程度告知用户。

该特效对象基于面向摄影机的广告牌技术（Camera-Faced Billboarding），该技术采用精灵着色器（Sprite Shader）和叠加混合技术（Additive Blending），实现特效平面对象法线方向与摄影机观察方向的对准和随动功能，即使用 2D 平面对象网格（Quad Mesh）渲染出 3D 立体效果。该技术在更加节省浏览器资源的情况下，为用户提供了逼真和沉浸的体验，如图 12 所示。

图 12　人员不安全行为特效渲染效果

特效对象接入车间实时数据，具有完整的生命周期。首先，特效对象所属的材质和贴图资源在系统加载时完成预加载并缓存进入对象池。页面加载完成后，特效对象基于后端事件与报警，使用位置、事件类型、事件严重程度信息，调用对象池中的美术资源，对特效对象进行初始化，作为 3D 场景中的标志进行渲染，便于用户快速定位和处理车间内发生的人员不安全事件，实现生产车间安全态势的感知，在用户对不安全事件进行处理后，销毁特效对象，回收浏览器资源。在页面卸载时，清空对象池中所有数据，并销毁对象池。本段所述生命周期，如图 13 所示。

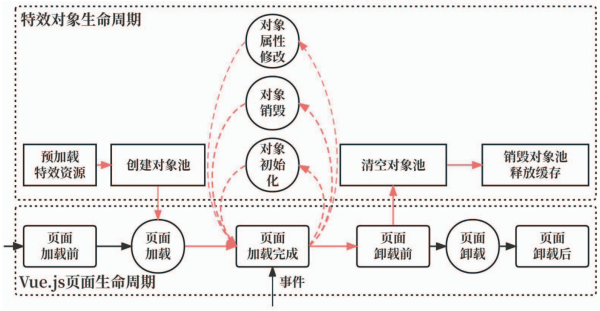


图 13　人员不安全行为特效生命周期

4 生产车间全景三维可视化系统的开发、测试与应用

在完成生产车间三维虚拟场景层的实时渲染和三维安全态势特效层的态势感知的基础上，采用基于 Javascript 语言的 Vue.js 网页框架对生产车间全景三维可视化系统进行开发[6]，使该系统具备良好的跨平台性，可运行在多平台的网页浏览器中。

4.1 生产车间全景三维可视化系统开发

为提高系统的运行流畅性和降低系统对于设备浏览器缓存的占用，严格控制生产车间场景对象的数量和对应材质的数量，本系统在生产车间场景定型后，进行模型合并批处理操作，即将具有相同材质、不参与关键帧动画和骨骼动画的网格模型元素进行附加与合并批处理（Batch），并作为静态对象载入。该操作可减少渲染调用次数（DrawCall Count）[12]，提高系统性能和稳定性。通过上述模型合并处理操作后，生产车间场景模型元素数量从 2723 个下降到 49 个，数量下降了 98.2%，大幅减少了系统初始化阶段所需时间，提高了系统 3D 场景的实时渲染流畅性。

4.2 生产车间全景三维可视化系统的跨平台测试

生产车间全景三维可视化系统开发完成后，需要对系统进行跨平台测试，以验证系统性能和功能是否符合要求。将系统资源文件和 Node 服务部署在接入 5G 高速局域网的服务器上，使用接入同一局域网的电脑和移动设备进入系统网页，如图 14 所示。

(a)电脑端浏览器　　(b)移动端浏览器

图 14　系统跨平台渲染优化与性能测试

经过多轮测试，生产车间全景三维可视化系统的各项指标均符合设计要求，性能稳定可靠。测试结果如下：所有功能均正常运行，无明显异常；系统画面和交互过程响应速度快，运行流畅，无明显卡顿现象；能够在不同平台下的中等配置硬件设备的条件下运行，无明显性能瓶颈问题。移动端平均加载时间稍长，但不影响系统平稳运行，测试结果如表 2 所示。

表 2　系统跨平台测试性能对照表

测试平台	渲染效果	平均加载时间,s	平均帧率,fps
电脑端浏览器	图 14(a)	1.81	163
移动端浏览器	图 14(b)	4.26	58

4.3 生产车间全景三维可视化系统的应用

用于生产车间安全管理的全景三维可视化系统已应用于某公司中，该系统在实际使用中具有较好的跨平台性，渲染画面真实感较传统 web3D 系统有较大的改善。该系统在某车间进行试点应用，实现了该车间第四跨的安全管理与感知，应用现场如图 15 所示。

图 15　系统系统应用

5 结语

本文通过对生产车间智慧安全 Web 三维可视化关键技术研究，完成了对生产车间全景可视化系统的总体设计、场景搭建、感知特效制作和系统开发、测试及应用。该系统在某车间进行了试点应用，实现了该车间第四跨的安全态势的实时感知和可视化，应用效果良好；通过灵活的场景搭建和感知特效制作，该系统能够以实时渲染的方式呈现各种安全指标、警报信息和预警提示，使用户能够及时采取相应的措施来确保生产环境的安全。

未来，将进一步完善该系统，不断优化和扩展其功能，以满足更广泛的应用需求。同时，将继续研究和探索生产车间智慧安全 Web 三维可视化关键技术，引入 WebGPU 技术、云渲染技术等前沿科

技，为工业领域的安全管理提供更先进、更高效的解决方案。

参考文献：

[1] 王卫东. 生产车间安全管理模式创建与运行思考[J]. 劳动保护, 2023(3):64-65

[2] 欧阳会东. 数字化车间虚拟现实可视化技术的研究与实现[D]. 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2020

[3] 罗家文. 数字化车间实时三维可视化监控关键技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2020

[4] 陈江, 吴海波, 张艺潇, 等. 面向数字孪生的车间运行三维实时监控系统[J]. 现代制造工程, 2023(4):21-32

[5] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1432-1443

[6] Uzayr B S. Conquering JavaScript: Three.js[M]. CRC Press: 2023-02-28

[7] Shu Z, Peng Z,Jiang G, et al. Fast intra partition and mode prediction for equirectangular projection 360 - degree video coding[J]. IET Image Processing, 2022, 17(2):558-569

[8] Akenine-Moller T, Haines E, Hoffman N. Real-time rendering[M]. Boca Raton: AK Peters/crc Press, 2019

[9] Imai F .Book reviews: High dynamic range imaging, acquisition, display, and image - based lighting[J]. Color Research & Application, 2007, 32(3):238-239

[10] GB/T 37230-2018, 公共安全 应急管理 预警颜色指南[S]

[11] 彭人杰, 段华琼. 基于unity实现的半兰伯特光照模型[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(14): 112-113+116

[12] 刘宗, 尤长虹, 王红兵, 等. 基于 Revit 和 Unity3D 的三维车间可视化研究[J]. 软件, 2023, 44(1): 119-122

“打造能源装备领域的新质生产力”专刊征稿启事

加快发展新质生产力，是新时代新征程解放和发展生产力的客观要求，是推动生产力迭代升级、实现现代化的必然选择。在能源领域发展新质生产力，本质上就是支撑清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型能源体系。通过发展能源领域的新质生产力，推动能源领域科技创新、数字转型、体制创新、国际合作，进而实现能源绿色低碳转型。

为此，《东方电气评论》特推出“打造能源装备领域的新质生产力”专题，以能源装备领域技术研究为载体，从实验、研发、制造、装配、运维等多维度系统性刊载技术和研究成果，推进具有中国特色的科技创新与新质生产力结合的创新理论方法、技术理论和实践应用研究，助力以科技创新加快形成新质生产力，扎实推进高水平科技自立自强和高质量发展。

一、征稿范围（包括但不限于）

1、结合实际应用案例，探讨新型电力系统在推动电力行业转型升级、培育新质生产力方面的作用。

2、新型电力系统关键核心技术的应用前景及其对电力行业高质量发展的贡献。

3、水电、火电、核能、燃气、风能、光能等能源装备在打造新质生产力的作用发挥。

4、能源领域风光氢储等战新产业及未来产业在打造新质生产力中的作用发挥。

5、如何通过推动绿色发展实现电力行业的高质量发展，包括节能减排、环境保护等方面的具体措施和成效。

6、如何以“大云物移智链”等现代信息技术为驱动，以数据为关键生产要素，深化数智赋能赋效，推进电力生产、客户服务、经营管理等数智化转型升级，激发新质生产力的潜能，推动电力行业的创新发展。

二、时间进度

专刊拟于 2024 年 6 月 30 日截稿，2024 年择期优先出版。

三、征稿要求

1、专刊只收录未公开发表的论文，拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。

2、按照《东方电气评论》论文格式要求使用 Word 或 WPS 软件排版。

3、请保留论文图片、曲线和表格原始文件，并在投稿时按规定提交。

4、论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

1、邮箱投稿：dfdqpl@dongfang.com（李老师）

2、咨询联系：028-87898263

结合知识图谱与大语言模型的风电装备智能问答系统

石致远[1,3] 张佳蕾[1] 孔志伟[1*] 伏洪兵[2] 徐海[2] 王淑营[3] 闫富乾[1] 王立闻[1] 凌乐[1]

1.东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731；2.东方电气集团东方电气风电股份有限公司，四川 德阳 618000；3.西南交通大学，成都 610031

摘要：本研究开发了一套专为风电业务人员设计的智能问答系统，该系统融合了结构化知识图谱和经过微调的先进大模型技术，提供高效且准确的信息检索服务，以促进决策效率的提升和企业效益的增长。在深度分析企业风电装备数据的基础上，本文首先采用本体建模、数据处理和知识融合等手段构建了一个风电装备领域知识图谱。随后，本研究采用 JointKG-Bert 模型对问题进行精确分类和实体识别，并将识别结果填充事先设定的知识库 Cypher 查询语句模板和大语言模型的 Prompt 模板，进而实现了知识库的问答与大模型的问答，构筑了一个高效的双轨问答机制。经专家评测表明，问答系统在处理领域问题时知识库问答准确率达到 88.7 %，经调整的大模型在处理领域问题和非领域问题的准确率分别达到 66.2 %和 91.25 %，满足了企业在风电装备信息检索方面的需求。本研究提出的问答系统显著提升了风电行业从业人员的信息获取效率，并为企业提供了一种创新的知识管理和应用解决方案。

关键词：风电装备；知识图谱智能问答；JointKG-Bert；大语言模型

中图分类号：F426.61 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）03-0077-08

An Intelligent Q&A System for Wind Turbine Equipment Combining Knowledge Graph and Large Language Model (LLM)

SHI Zhiyuan[1, 3], ZHANG Jialei[1], KONG Zhiwei[1], FU Hongbing[2], XU Hai[2], WANG Shuying[3], YAN Fuqian[1], WANG Liwen[1], LING Le[1]*

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

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

3.Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract: This study aims to develop an intelligent Q&A system designed for wind power business personnel, which incorporates structured knowledge graphs and fine-tuned advanced big model techniques, with the aim of providing efficient and accurate information retrieval services to facilitate decision-making efficiency and corporate benefit growth. Based on the in-depth analysis of enterprise wind power equipment data, this paper firstly constructs a knowledge graph in the field of wind power equipment by means of ontology modelling, data processing and knowledge fusion. Subsequently, this study adopts the JointKG-Bert model to accurately classify questions and identify entities, and fills the identification results with the pre-set Cypher query statement template of the knowledge base and the Prompt template of the big language model, which in turn realises the Q&A of the knowledge base and the Q&A of the big model, and constructs a highly efficient dual-track Q&A mechanism. The expert evaluation shows that the Q&A system achieves 88.7% accuracy of the knowledge base Q&A when dealing with domain questions, and the adjusted large model achieves

收稿日期：2024-02-20

作者简介：石致远（1989－），男，2016 年毕业于西南交通大学机械制造及其自动化专业，硕士研究生，工程博士在读，高级工程师。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司智能制造中心从事智能制造与数字孪生方面的研究工作。

孔志伟（1995－），男，2020 年毕业于东南大学动力工程及工程热物理专业，硕士研究生，工程师。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司智能制造中心从事人工智能与系统方面的研究工作。邮箱：kongzw8550@dongfang.com。

66.2% and 91.25 % accuracy when dealing with domain and non-domain questions, respectively, which meets the enterprise's needs for information retrieval of wind power equipment. The Q&A system proposed in this study significantly improves the information acquisition efficiency of wind power industry practitioners and provides an innovative knowledge management and application solution for enterprises.

Key words: wind power equipment; knowledge graph intelligent Q&A; joint intent recognition; LLM

在当今时代，随着全球科技的迅速发展，传统能源的需求与环境问题均成为迫在眉睫的挑战，各国高度重视和积极发展可再生能源，确立新能源为未来发展的战略重点。[1]在众多可再生能源类型中，风能因其清洁无污染的特性成为全球能源结构调整的关键力量。[2]然而，风电装备特有的复杂性、大规模性和多层级性使得业务人员在获取相关知识时面临挑战。

问答系统被视为高效利用数据的新途径[3]，尤其是在过去五年间，以知识库为基础的问答系统研究成为专家研究的焦点。[4]这一研究通常涉及构建高质量的领域知识图谱，以此作为支撑，实现准确、详细的答案获取。但这种方法面临着知识图谱过度依赖专家输入、知识不完整和缺乏深度语言理解等诸多挑战。[5]与此同时，大语言模型如 OpenAI 发布的 ChatGPT3.5 在 2022 年底以其强大的自然语言处理能力引起了广泛关注。[6]大语言模型参数规模大，网络结构复杂，通过在设计的预训练任务下的大规模的无标注文本中学习自然语言的上下相关的意义和结构，因此可以捕捉到更丰富的语言特征，从而可以更好处理自然语言处理任务。它们能够理解和生成丰富、连贯的文本，但在实时性和事实性上仍有待提高，在精准问答场景中存在局限。[7]

因此，在构建风电行业的知识管理和决策支持系统时，结合知识图谱和大语言模型的应用可以弥补两者的缺点显得尤为关键，这不仅能够有效整合信息资源，还能利用先进的自然语言处理、大模型技术提供用户高效、准确的问答体验。随着人工智能技术的持续发展，这样的系统将在提升业务运营效率和可持续发展能力方面发挥越来越重要的作用。本文的主要工作与贡献归纳为：①风电产品知识图谱的构建，促进了风电领域知识的结构化管理；②将 Joint-KGBert 联合意图识别模型识别到的用户意图和实体同时填充 Cypher 查询模板和轻量大语言模型的 Prompt 模板，实现大语言模型与知识库双轨问答，提高了问答准确性和用户体验；③通过系统的实例验证，证明了智能问答系统在风电产品知识获取中的实用性和有效性。总体来看，本研究对于促进风电行业信息化和智能化水平有着重要的参考价值和现实意义。

1 相关工作

1.1 知识图谱问答

知识图谱这一概念由谷歌提出[8]，本质上是一种语义网络，其主要目标是用来描述真实世界中存在的各种实体和概念，以及他们之间的关系。[9]知识图谱将数据信息以实体、关系三元组的形式储存，在一定范围上调节了原有数据结构化存储的压力，提升了数据查询效率。

基于知识图谱的智能问答系统也称为知识库问答，目前基于知识图谱的问答系统采用的主要方法为模板匹配、语义解析和深度学习[10]，基于知识图谱的问答方法总结如表 1 所示，构建一般面向两种领域：通用领域知识图谱智能问答系统以及专业领域知识图谱智能问答系统。垂直领域的问答系统通常对知识的检索要求精度较高，故基于知识图谱的模板匹配方法采用的非常广泛。

表 1　知识图谱问答常用方法总结

方法	优点	缺点
模板匹配	准确、迅速	需要构造模板
基于知识图谱的语义解析	解释性强	数据要求较高、解析算法复杂
基于知识图谱的深度学习	不需要手工定义特征	趋于黑盒，缺乏可解释性

1.2 Joint-KGBert

口语理解(SLU)[11]是面向对话系统的关键组成部分。它通常包括意图识别[12]和槽位填充[13]两个子任务,但这两个任务并不是独立的，槽位填充通常高度依赖意图信息[14]。文献[15]提出一种基于知识嵌入

的 BERT 意图识别联合模型 JointKG-BERT。该模型通过联合训练的方式来同时进行问句分类和实体抽取任务的训练，并利用两个任务之间的强相关性来提高它们的效果。由四个关键部分组成：即知识图谱导入层、文本嵌入层、可视层以及 Transformer 层。知识图谱导入层主要负责将知识图谱与训练数据进行整合。它会在原始问句中将词语与知识图谱中的实体进行对齐，并将对应实体的本体标签插入到原始问句中，形成结合了本体标签的知识文本。接着，在知识文本的基础上添加本体间关系，形成知识文本图；知识文本会经过文本嵌入层将其转换成 Transformer 层可处理的向量表示。而知识文本图则会进入可视层，根据其中的知识信息生成包含实体关系的可视矩阵。

最后，知识文本向量表示和实体关系可视矩阵同时作为输入进入 Transformer 层。Transformer 层根据实体关系可视矩阵对知识文本的向量表示进行处理，并通过解码输出问句中所包含的实体和问句分类的结果。Joint-KGbert 模型的框架图如图 1 所示。

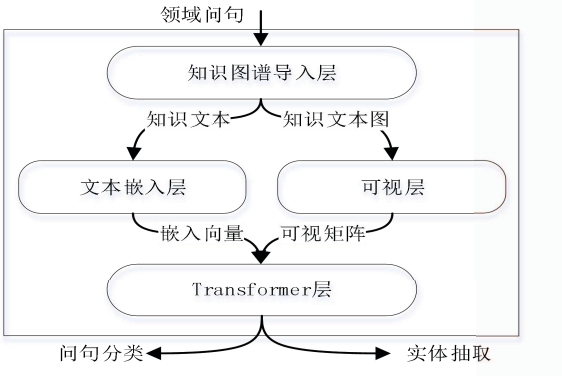


图 1　JointKG-BERT 模型框架图

1.3 大语言模型及微调

大语言模型指的是在海量文本语料上进行训练、包含至少数十亿级别参数的语言模型。[16]大语言模型在海量文本上训练，而直接将原始训练的模型应用于问答任务往往不尽人意并且传统的语言模型微调技术可能会导致模型出现灾难性遗忘的问题[17]，高效微调技术因此得到发展。主流的高效微调技术可以分为三大类：Adapter、Prefix Tuning 以及 LoRA。Adapter 类微调技术通过在预训练模型的各层之间插入了较小的神经网络模块，在进行下游任务的微调时，只需对这些模块参数进行训练便能实现高效微调的目标。Prefix Tuning 类技术通过在模型的输入和隐藏层中添加 k 个额外可训练的前缀标记并基于此进行微调，LoRA 类仅需学习小参数的矩阵来近似模型权重矩阵的参数更新。图 2 是三种高效微调策略的图析。[18]

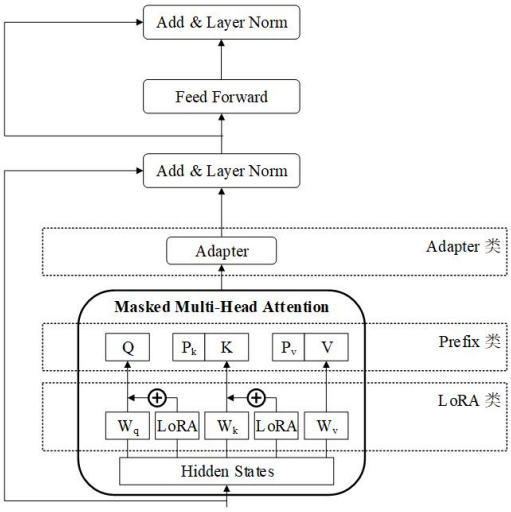


图 2　参数高效微调策略图析

2　风电装备知识图谱构建

风电装备知识图谱构建包括本体构建、知识抽取、知识融合、知识存储等流程。即先将复杂装备分为多个领域（制造域、运维域、设计域等），然后领域专家构建该领域的知识本体，再整理对应的数据集，从这些数据集中抽取知识，并将其按知识本体规范的形式组装成知识三元组存进 Neo4j 图形数据库，从而得到该领域的知识图谱，最后各领域的知识图谱进行融合，形成支撑最终问答的融合知识图谱。风电装备知识图谱构建的流程图如图 3 所示。

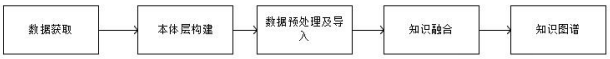


图 3　风电装备知识图谱构建流程图

2.1 数据获取

本文设计开发的问答系统是直接面向企业风电产品业务，故数据来源直接来源于企业实际的业务数据。数据按照领域来源可以分为制造域数据、运维域数据、设计域数据，质控域数据。风电产品各领域介绍及数据量展示如下表 2 所示。

表 2　风电产品各领域数据内容

领域	数据介绍	数据量/条
制造域	主要包含风电产品工艺、机型相关知识	1 615
运维域	主要包含项目的运维故障知识和故障处理知识	5 032
设计域	包含项目设计相关知识，如设计标准	2 210
质控域	包含项目零部件检验知识、不合格事件知识等	2 615

2.2 本体层构建

为确保知识图谱的有效应用，本文在构建风电行业知识图谱的过程中，着重考虑了本体的准确性和覆盖性。依据企业专家意见和业务数据特性，采用了本体构建工具对风电装备数据涉及的诸多领域（例如故障域、设计域、制造域）进行了详细建模。在构建本体时，根据知识性质进行了分类，具体包含事件概念类知识、元概念知识、实例概念类知识。事件概念类知识采用规范化节点来表达必须由多因素共同作用才能发生的事件，其节点设计为只含有指向性的入边；元概念知识基于通用的行业分类概念（如故障类型和产品机型），适用于少数实例下的查询，通常可以配合事件概念进行相关分布查询；实例概念类知识是对具体知识的抽象描述。在本体设计图中，以不同形状标识不同类型的节点：菱形代表实例概念、无填充圆形代表元概念、灰色填充圆形代表事件概念、矩形代表属性，故障领域的本体设计图如图 4 所示。

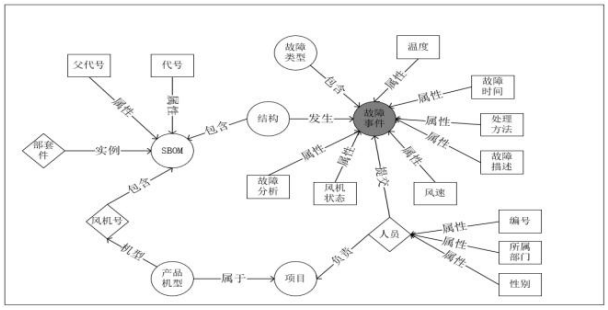


图 4　风电装备运维域-故障知识本体

2.3 数据处理与导入

设计各领域的本体之后，需要对数据按照本体进行组织，导入到知识图谱中形成具体的数据层。本系统设计的是本体设计完成之后系统自动形成 csv 模板，业务人员根据模板要求进行填充数据，并通过前端可视化按钮进行数据的上传，生成各领域的知识图谱。

2.4 知识融合

将各领域的数据进行融合可以形成丰富知识图谱的数据量。但各领域的数据库存在许多重复、异名同义的实体，如果直接融合，会导致知识图谱的冗余。为保证问答系统的准确性，本文先利用本体实体名称相似度融合本体层、然后再根据对应数据层的名称、属性、属性值等的相似度的计算融合数据层，将各领域的知识图谱进行了融合。融合后的效果如图 5 所示。

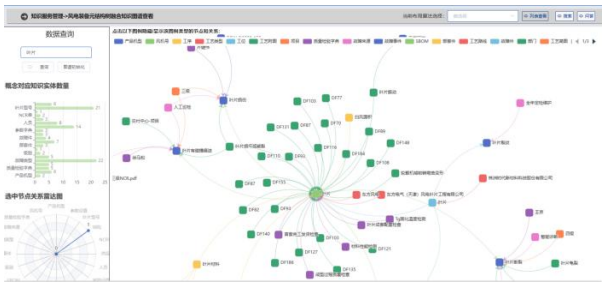


图 5　风电装备融合知识图谱

3　结合知识图谱与大语言模型的风电装备问答系统

本文设计的风电装备问答系统的整体工作流程如图 6 所述，系统首先利用 JointKG-BERT 处理提出的问题，识别出相关的实体和问题的类别。接着，系统采用双轨处理机制：一是根据问题类型，利用已识别的实体去填充预设的 Cypher 查询语句模板从而从知识库中获取信息；二是将同样的实体作为提示信息填入大语言模型的 Prompt 模板中，并输入到经过专业知识微调的轻量大语言模型以获取答案。系统随后进行比较和分析，对来自知识库查询和大模型推理的答案进行综合评估。如果知识库中存在相应答案，则系统将展示两者的答案；如果知识库中没有，那么将仅提供大模型所生成的答案，供风电行业从业人员参考。

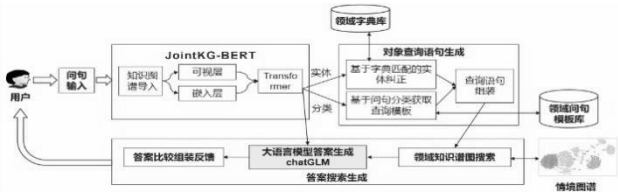


图 6　风电装备问答系统总体流程图

3.1 大模型微调

在进行大规模模型微调的过程中，核心任务涉及根据企业现有的计算能力和硬件资源仔细选择适宜的模型框架及微调策略。进一步，实际的企业数据集须转换成与所选微调技术相适应的格式。在确保数据兼容性的基础上，配置微调所用大规模模型的关键训练参数，例如采用混合精度训练、设定恰当的学习率等，以促进微调实验的顺利进行。上述过程简要描述如图 7 所示。

考虑到在参数规模不超过 10B 的基础模型竞争中，ChatGLM3-6B 模型显现出的优异性能，加之其部署的灵活性以及开源属性，本研究决定将其作为微调语言模型的基础。同时，由于 LoRA 微调技术的优势在于通过学习较小规模的参数矩阵来接近原始模型权重的更新，降低了微调过程中对于显存的需求，因此本文选用 LoRA 方法进行微调。LoRA 微调的数据集范例如图 8 所示。

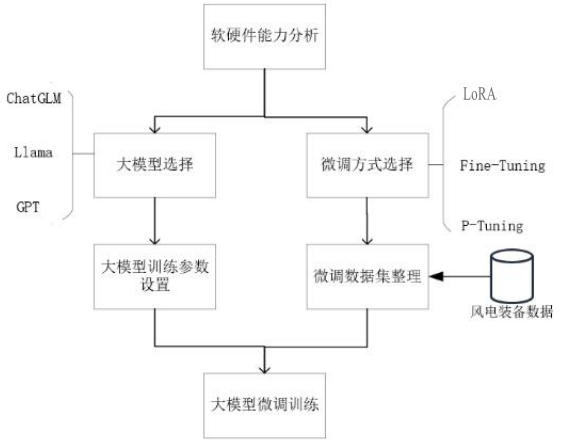


图 7　大模型微调简易步骤

{“context”:“Instruction:你是谁？”,“target”:“我是东方电气风电装备智能问答助手，采用基准模型 chatglm3-6b”，并进行了微调，欢迎向我提问。”}
{“context”:“Instruction:介绍一下你们公司？”,“target”:“东方电气有限公司成立于 1900 年。总部位于四川省成都市。他是中国东方电气集团有限公司控股的大型企业，该集团公司是自国务院国有资产监督管理委员会（国委会）监管的企业，并且是全球最大的发电设备制造和电站工程总承包集团之一。”}
{“context”:“Instruction:风电装备故障级别是怎么定义的？”,“target”:“共分为四级：一级，轻微故障：设备或系统的影响轻微，不影响正常运行。
二级：一般故障：设备或系统的影响较大，影响正常运行。三级：严重故障：设备或系统的影响非常大，影响正常运行，需要立即处理。
四级：特别严重故障：设备或系统的破坏性很大，可能导致人身伤害或重大财产损失。”}

图 8　风电装备大模型 LORA 微调数据集示例

3.2 问题分类与问答数据集整理

（1）问题分类

结合实际需求特点，我们首先是将问题按照知识库是否包含相关知识分为了领域问题和非领域问题。然后将实体按照其在本体或数据层中不同的定义又进行了细致的划分，表 3 是相关概念介绍。

基于定义好的相关概念，具体的抽象分类及示例如表 4 所示。

表 3　风电装备领域常见问题抽象分类

概念	介绍	示例
事件型概念实体	本体中的事件节点	图 4 中的故障事件、项目等
非事件型概念实体	本体中的非事件节点	图 4 中的人员、风机号等
元概念实体	本体中的元概念节点	图 4 中的故障类型、产品机型等
概念类型	本体中的节点	图 4 中的人员、项目、故障类型等
事件实体	本体中的事件节点对应的实例事件	如具体的故障事件：轮毂机械锁销弯曲变形等
非事件实体	本体中的非事件节点对应的实例	如具体的结构：叶片
相邻概念实体	某实体对应本体层中的相邻节点	如图 4 中故障事件的相邻概念实体为故障类型、人员、结构
相邻实例实体	某实体对应本体层中的相邻节点	故障事件的相邻实例实体为具体的故障类型实例：漏油；人员实例：小明；结构实例：叶片等

表 4　风电装备领域常见问题抽象分类

问题类别	意图
非事件实体信息查询	介绍一下知识库中叶片相关信息
事件实体信息查询	定检维护中出现的叶片故障有哪些
查询实体属性	设计域知识.owl 是什么级别的文件
依据概念类型进行统计	风电装备知识库中故障类型有哪些
查询实体之间的关联关系	一二系止挡与运营商需求的关系
事件及相关概念类型之间的统计分布	风电装备发生的故障事件的来源的分布
非领域问题	请给我介绍一下西南交通大学

（2）问题数据集整理

本文收集了行业常见的问题数据 4 200 条，并对其中问句进行 BIO 标注，实体进行标注分为若干类如非事件概念型实体、事件概念型实体，元概念型实体，结构实体等，并将问句整理成（问题,意图）的形式共同作为联合意图识别模型的输入，将数据集按照 8:1:1 的比例分为训练集、测试集、验证集。数据集示例如表 5 所示。

表 5 问答数据集示例

问题	意图
介绍一下叶片相关知识	查非事件实体信息
设计域知识.owl 是什么级别的文件?	查实体属性信息
一二系止挡与运营商需求的关系是什么	查实体间关系
故障类型有哪些	查非事件概念实体信息
故障事件有哪些	无条件的事件型概念实体查询
叶片的故障事件有哪些	单条件的事件型概念实体查询
极冰的叶片故障有哪些	多条件的事件型概念实体查询
知识库中故障事件来源分布情况？	查事件与相关概念实体的分布
4 车 3 轴叠形弹簧橡胶堆裂纹故障的相关信息	查事件实体信息

3.3 问题类型模板设计

用户输入问题，训练完成后模型将返回对应的实体集合及对应的意图分类，对于实体，先进行与知识库中的字典进行对齐。然后，针对每一类的查询意图，我们制定了对应的 Cypher 查询模板和大模型提示模板，用于实体填槽。表 6 展示了各问题类型对应的 Cypher 查询模板与大模型提示模板，特别地，这里的事件节点的组织形式以图 2 中的故障事件为例，设定拥有三个相邻节点。

表 6 问题类型模板

查询意图	cypher 查询模板	大语言模型提示模板
查非事件实体信息	Match (n {name: "非事件实体"}) RETURN n	Prompt:返回{{实体}}的相关信息
查实体属性信息	Match (n {name: "实体"}) RETURN n.”属性”	Prompt:返回{{实体}}的{{属性}}信息
查实体间关系	MATCH (n {name: "实体 1"})-[r]-(m {name: "实体 2"}) RETURN r	Prompt:返回{{实体 1}}与{{实体 2}}之间的关系
查非事件型概念实体信息	Match (n {types: "非事件型概念实体"}) RETURN n,count(n)	Prompt:返回{{非事件型概念实体}} 的个数以及介绍每一个{{非事件型概念实体}}实例
无条件的事件型概念实体查询	MATCH (n:相邻概念实体 1)-[]->(event:事件型概念实体) WITH id(event) AS eventId MATCH (m:相邻概念实体 2)-[]->(evt:事件型概念实体) WHERE id(evt) = eventId MATCH (p:相邻概念实体 3)-[]->(evt2:事件型概念实体) WHERE id(evt2) = eventId RETURN event, n, m, p	Prompt:返回{{事件型概念实体}}的个数以及介绍每一个{{事件型概念实体}}实例，介绍这些实例时要包括它的{{相邻概念实体 1}}、{{相邻概念实体 2}}、{{相邻概念实体 3}}的信息
单条件的事件型概念实体查询	MATCH (n {name: "相邻实例实体"})-[]->(event:事件型概念实体) WITH event, id(event) AS eventId MATCH (m:其余事件相邻概念实体 1)-[]->(evt:事件型概念实体) WHERE id(evt) = eventId MATCH (p:其余事件相邻概念实体 2)-[]->(evt2:事件型概念实体) WHERE id(evt2) = eventId RETURN event, eventId, m, p	Prompt:返回条件为{{相邻实例实体}}的{{事件型概念实体}}的实例，介绍这些实例时包括该它的{{相邻实例实体}}、{{其余事件相邻概念实体 1}}与{{其余事件相邻概念实体 2}}的信息
多条件的事件型概念实体查询	MATCH (n :{name:"相邻实例实体 1})-[]->(event:事件型概念实体) WITH event, id(event) AS eventId MATCH (m :{name:"相邻实例实体 2}) -[]->(evt:事件型概念实体) WHERE id(evt) = eventID，MATCH (p: 其余事件相邻概念实体)-[ ]->(evt2: 事件型概念实体) WHERE id(evt2) = eventID RETURN event,n,m,p	Prompt:返回条件为{{相邻实例实体 1}}、{{相邻实例实体 2}}的{{事件型概念实体}}的实例，介绍这些实例时包括该它的{{相邻实例实体 1}}、{相邻实例实体 2}}与{{其余事件相邻概念实体}}的信息
查事件的分布	MATCH (m :元概念实体})-[]-> (event:事件型概念实体)RETURN m.name, count(n) as count,collect(n) as nodes	Prompt:返回{{事件型概念实体}}在{{元概念实体}}的分布情况

续表

事件实体直接查询	MATCH (n :相邻概念实体1})-[]->(event:所属事件概念{name: "事件实例实体"})WITH event MATCH (m:相邻概念实体 2)-[]->(e:所属事件概念)WHERE e = event MATCH (p:相邻概念实体3)-[]->(e2:所属事件概念)WHERE e2 = event RETURN event, m, p,n	Prompt:返回{{事件实例实体}}以及它的{{相邻概念实体 1}}、{{相邻概念实体 2}}、{{相邻概念实体 3}}等信息

3.4 答案处理与返回

答案返回有两条路线：知识库问答返回答案和大模型问答返回答案。当知识库未能检索到相关知识时，页面只返回大模型响应的结果。当知识库检索到对应问题的答案时，我们对常见的几种返回形式进行了处理，使得返回的内容更能满足业务的要求。对于查询实体类，我们返回了该实体本身的属性以及关联属性名称；对于统计类查询，设计返回满足条件的个数以及对应实体名称，对于分布式问题，系统设计以图/表的形式展示相关内容的分布情况，并对涉及到的实体分别进行介绍。

4 实验验证

4.1 问答系统效果展示

本文面向风电装备领域开发了一种结合知识图谱和大模型的风电装备智能问答系统。系统采用B/S 架构，前端页面采用前端页面采用 vue3 框架，html，css 以及 jQuery 等技术，后台开发基于sprintBoot 框架，采用 Java 和 Python 进行开发,知识图谱的存储采用 Neo4j 图数据库，利用 redis 进行数据缓存，利用 FastDFS 技术进行文件存储、LoRA 微调进行大语言模型 ChatGLM3-6B 微调。问答系统界面如图所示；用户可以提问问题，当知识库检索到问题答案时，会同时返回知识库与大模型的效果，但问题超出知识库检索的范围时，只会返回大语言模型的效果。部分效果如图 9~12 所示。

本文针对风电装备领域开发的智能问答系统，融合了构建在结构化知识图谱和经过微调的大型语言模型。系统基于 B/S 架构设计，前端采用 vue3、HTML、CSS 以及 jQuery 技术构建用户界面，后端基于 Spring Boot 框架进行开发，选用 Java 和 Python 作为编程语言。系统使用 Neo4j 图数据库存储知识图谱，Redis 进行数据缓存和 FastDFS 技术管理文件存储，而大语言模型则通过 LoRA 微调技术对 ChatGLM3-6B 模型进行优化。此外，问答系统还部署了具备 48GB 显存的 NVIDIA-A40-48Q 来支撑模型的运算需求。问答系统的界面如下图 9~12 所示。

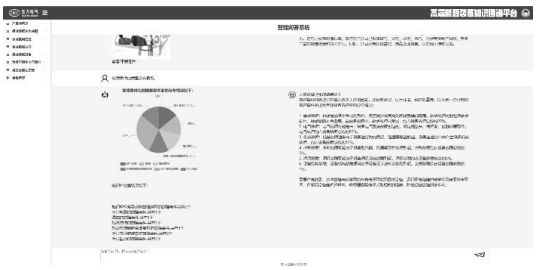


图 9　故障事件的类型分布

图 10　知识库未检索到时大模型响应的结果

图 11　实体相关信息查询结果返回

图 12　概念型实体查询

4.2 系统性能分析

为了评估风电装备问答系统的响应速度和准确性，在专家指导下，设计了 2 880 个问题做为问答系统的测试数据，其中领域问题 2 400 条，非领

域问题 480 条；对系统的答案进行评估，以验证问答系统的性能。问答系统测评结果如表 7 所示。

表 7 问答系统效果测试表

问题类	测试问句/条	知识库问答答案正确数/条	ChatGLM3-6B 回答正确数/条
非事件类实体信息查询	500	462	380
事件类实体信息查询	300	247	192
查询对象属性	600	538	395
依据对象类型进行统计	350	308	258
查询对象之间的关联关系	400	351	270
事件及相关概念之间的统计分布	250	222	121
非领域问题	480	-	438

通过表 7 可知，在专家指导的问题的测试下，关于领域问题，知识库问答的总体准确率达到了 88.7 %，能较好地回答风电装备相关的问题。经过微调后的大语言模型回答领域内的准确率为 66.2 %，具备一定了解领域问题的能力，回答非领域问题的正确率为 91.25 %，较好地弥补了知识图谱问答有局限性的问题。

5 结语

本文基于企业实际业务中产生的风电数据，分析其特点，经过本体建模、数据处理、知识融合、大模型微调等步骤，构建了风电装备知识图谱和微调后的大模型。基于此，进一步利用联合实体识别技术分析用户的意图、识别其中的实体，再将其匹配针对业务设计的知识库 Cypher 查询语句模板与大模型 Prompt 模板，构建了一个结合大模型与知识图谱的问答系统，实现了双轨问答。知识库问答在专家知识指导的测试下，对于领域问题的总体准确率达到 88.7 %，而经过微调的大语言模型在领域内问题的准确率为 66.2 %，在回答非领域问题时的正确率为 91.25 %。能满足企业的生产需求。

参考文献：

[1] Pan Y, Dong F. Dynamic evolutionand driving factors of new energy development: Fresh evidence from China[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 176

[2] Roga S, Bardhan S, Kumar Y,et al. Recent technology and challenges of wind energy generation: A review[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022.52:102239

[3] 魏鹏飞, 曾碧, 汪明慧, 等. 基于深度学习的口语理解联合建模算法综述[J]. 软件学报, 2022, 33(11):4192-4216

[4] 胡志强, 潘鑫瑜, 文思捷, 等. 结合多模态知识图谱与大语言模型的风机装配工艺问答系统[J]. 机械设计, 2023, 40(S2):20-26

[5] Yani M, Krisnadhi A A. Challenges, techniques, and trends of simpleknowledge graph question answering:A survey[J]. Information, 2021, 12(7):271

[6] 李实, 孙镇鹏. 联合多意图识别与语义槽填充的双向交互模型[J]. 计算机工程与应用. 2024, 60(5):130-138

[7] 王婷, 王娜, 崔运鹏, 等. 基于人工智能大模型技术的果蔬农技知识智能问答系统[J]. 智慧农业(中英文), 2023,5(4):105-116

[8] Singhal A. Introducing the knowledge graph:Things, not strings[EB/OL]. https://blog.google/products/search/introducingknowledge-graph-things-not/. (2012-05-16)[2023-02-22]

[9] 漆桂林, 高桓, 吴天星. 知识图谱研究进展[J]. 情报工程, 2017,3(1):4-25

[10] 闫悦, 郭晓然, 王铁君, 等. 问答系统研究综述[J]. 计算机系统应用, 2023,32(8):1-18

[11] 郑思露, 程春玲, 毛毅. 融合实体信息和时序特征的意图识别模型[J]. 计算机技术与发展, 2022,32(11):171-176

[12] 刘振元, 许明阳, 王承涛. 基于数据增强和字词融合特征的实体槽位识别[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(11): 101-106

[13] Goo C W, Gao G, Hsu Y K, et al. Slot-gated modeling for joint slot filling and intent prediction[C]//Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 2 (Short Papers). 2018: 753-757

[14] 郑佳明, 陈家宾, 胡杰鑫, 等. 基于大模型和知识图谱的标准领域融合应用方法研究[J]. 中国标准化, 2023(23):39-46

[15] 马自力, 王淑营, 张海柱, 等. 基于知识图谱的智能问答意图识别联合模型[J]. 计算机工程与应用, 2023,59(6):171-178

[16] Zhao W X, Zhou K, Li J, et al. A survey of large language models[J]. arXiv preprint arXiv:2303.18223, 2023

[17] Chen S, Hou Y, Cui Y, et al. Recall and learn: Fine-tuning deep pretrained language models with less forgetting[J]. arXiv preprint arXiv:2004.12651, 2020

[18] 文森, 钱力, 胡懋地, 等. 基于大语言模型的问答技术研究进展综述[J/OL]. 数据分析与知识发现, 1-17[2024-01-23] http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1478.G2.20231110.1612.002.html

等离子体气化熔融炉内衬设计简析

谢飞[1,2] 程虎[1,2] 林山虎[1,2]

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

摘要：等离子气化熔融技术是目前最先进最彻底的固体废物无害化处置技术，迄今都没有得到成功推广，内衬易损坏是限制原因之一。本文简要介绍了等离子气化熔融技术的特点、内衬保温材料选用要求。在此基础上，介绍了一种等离子体气化熔融炉内衬的结构。

关键词：固废处理；等离子体气化炉；内衬

中图分类号：X799 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）03-0085-04

Analysis of Insulation Lining of Plasma Gasification Melting Furnace

XIE Fei[1,2], *CHENG Hu*[1,2], *LIN Shanhu*[1,2]

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

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

Abstract: The plasma gasification melting technology is currently the most advanced and thorough harmless disposal technology for solid waste, and has not been successfully promoted so far. The easy damage of furnace lining is one of the limiting factors. This article briefly introduces the characteristics of plasma gasification melting technology and the selection requirements for furnace lining insulation materials. On this basis, the structure of a plasma gasification melting furnace lining is introduced.

Key words: solid waste treatment; plasma gasifier; lining refractories

固体废物是指在生产、生活和其他活动中产生的丧失原有利用价值或者虽未丧失利用价值但被抛弃或者放弃的固态、半固态和置于容器中的气态的物品、物质以及法律、行政法规规定纳入固体废物管理的物品、物质。我国把固体废物分成工业固体废物、生活垃圾、危险废物、建筑垃圾、农业固体废物等。在这些固体废物分类中，危险废物的污染极其严重。危险废物是指列入《国家危险废物名录》或根据国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的具有毒性、腐蚀性、易燃性、反应性或感染性等一种或几种危险特性的废弃物，包括固态、半固态和液态废弃物。目前列入《国家危险废物名录》（2016 版）的危险废物有 46 大类别 479 种，主要为工业和医疗单位产生的各种废弃物，其中医疗废物含有大量的细菌和传染性病毒，严重威胁环境安全。

当前我国国民经济发展迅速、城镇化水平持续提升，固体废物生成量也飞速增长。2021 年我国固废产生量为 42.5 亿吨，其中工业危险废弃物产生量为 8 805.6 万吨，生活垃圾清运量为 24 499 万吨，市政污泥产生量为 5 552 万吨，其他危险废弃物产生量为 7 809.1 万吨。[1]固体废物的无害化处理对于环保事业的发展具有重要意义。

目前，固体废物的处置方式根据其不同的理化性质主要是通过爆炸法、烧毁法、固化法、溶解法、化学分解法和填埋法等手段进行处理，其中以烧毁法处理居多。虽然固体废物烧毁法是大势所趋，但是焚烧也存在一些问题，焚烧产生大量的酸性气体

收稿日期：2023-05-29

作者简介：谢飞（1983－），男，2006 年毕业于重庆电力高等专科学校火电厂集控运行专业，大学专科，工程师。现在东方锅炉股份有限公司主要从事锅炉试验研究工作

和未完全燃烧的有机组分及炉渣，直接排放将造成二次污染。焚烧产生的灰渣富含有毒的化学物质，如重金属、多环芳烃 PAHs、二噁英类物质 PCDD/PCDFs，尤其是二噁英类物质是垃圾焚烧后的常见二次污染物。二噁英类物质毒性是砒霜的 900 多倍，危害极大。所以，固体废物的无害化处置，已成为城市环境安全的关键问题。

1 等离子气化熔融技术

相比传统焚烧技术，等离子气化熔融处置技术是一种兼具环境保护和经济效益的先进处理技术。该项技术是利用等离子体加热系统使惰性气体产生电离生成电弧，通过电弧生成高温气体使固体废弃物里面的有机物被分解为合成气体（即：H_2、CO、H_2O 等），该合成气体可以用来充当工业燃料或者化工生产原料；固体废弃物中的无机物则被高温熔融最终形成玻璃体炉渣，该玻璃体炉渣也可用于回收不同矿物质和制作相应的建筑材料。

等离子气化熔融处置技术处理固体废物具有完全性（即：熔渣密度大）、二次污染物排放低（主要为二噁英前驱物分解彻底）、热效率较其他处置技术高、处理后的废弃物不需要再次填埋等优点，被国际上公认为目前最先进最彻底的各类废弃物无害化处置技术，有固废终结者的美誉。

目前，国内采用等离子气化熔融技术处理固体废物的时机已经成熟，有少数工程案例已经开始实践，但迄今都没有得到成功推广，限制原因之一是等离子体气化熔融炉内衬易损坏。

2 等离子体气化熔融炉用耐火材料

在现有的等离子体气化熔融炉中，等离子炬对空气进行电离，在千分之一秒内温度可达 3 000 ℃~10 000 ℃，瞬间高温对耐火材料抗热应力损毁能力提出了苛刻要求，等离子炬工作过程中存在着强烈的热辐射，耐火材料表面将快速产生高温，造成极大的温度梯度与热应力。熔融反应发生在 1 600 ℃左右，在发生熔融的过程中，粘性低的液相熔渣，容易渗透和侵蚀内衬材料，当温度波动时，往往会造成耐火材料的剥落损毁。炉内气化的温度也在 1 200 ℃左右，气化后产生大量的水蒸气，水蒸气上浮会对上部内衬耐火材料产生严重腐蚀。

等离子体气化熔融炉 1 200 ℃~1 700 ℃的工作温度，最考验内衬材料层，既要满足耐高温还要同时满足抗侵蚀的条件。因此，内衬用耐火材料同时要具备以下特性[2]：①较高的高温强度和优良的耐磨性；②良好的热膨胀体积稳定性；③优良的温度急变抵抗性，以此来抵抗炉内温度的急速变化对材料的破坏；④良好的耐高温气体蠕变与抗侵蚀的性能；⑤优良的抗高温熔融渣的侵蚀性。

3 等离子体气化熔融炉内衬设计

以某等离子体气化熔融炉为例，其整体呈上下两段式缩小的炉膛结构，水平方向的截面呈圆形，上部为热解气化反应室，下部为灰渣熔融室。热解气化反应室从纵向上分为上部封头、中间筒体和底部锥口。灰渣熔融室分为上部筒体和底部封头，筒体上均匀布置有处于同一水平面的多个等离子体炬安装口。

由于是等离子炬加热，灰渣熔融室温度较高，加之熔渣的侵蚀，要保证长周期运行并达到 4 000 小时以上，用砖做衬里最有保证。考虑到经济性，按工况条件分区域采用相适应的内衬材料，来达到最佳性能要求。

等离子体气化熔融炉最大操作温度 1 600 ℃时外壁温度小于 150 ℃，兼顾向火面材料使用寿命，确定内衬总厚度 510 mm，内衬结构分 4 层，如图 1 所示。

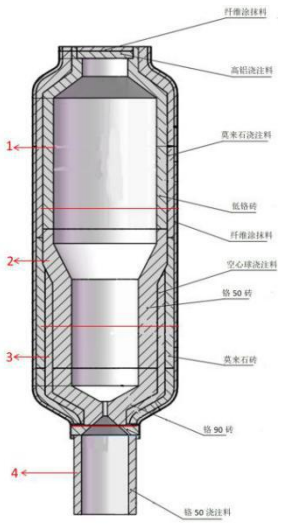


图 1 等离子体气化熔融炉内衬结构示意图

3.1 内衬结构

内衬结构从里到外依次为向火面、隔热层、保温层、缓冲层等4层，各层所用材料及功能，见表1。

表1 内衬结构及功能

序号	结构名称	衬里材料	功能
1	向火面	高铬砖/低铬砖	抗熔渣侵蚀，耐高温、高压气流和气流夹带的未反应物料及熔渣的冲刷
2	隔热层	空心球浇注料	在向火面整体厚度减薄时，充当安全衬里的作用，确保装置能在短期内继续运行，同时为绝热提供条件
3	保温层	莫来石浇注料	为绝热提供条件，以保证内衬温度稳定在设计范围内
4	缓冲层	纤维涂抹料	粘度大，耐热性能好、保温性强，具有良好的抗熔体和气体的侵蚀作用，使用时不开裂、不剥落，以保证保温层与壳体间受热膨胀的不均匀性。

3.2 各部位结构

按炉内温度将炉内衬分为4个区域，各区位置如图1所示，各区内衬结构见表2。

表2 炉内各区域内衬结构

部位号	结构位置	衬里材料名称
1	向火面	低铬砖
	保温层	莫来石浇注料
	缓冲层	纤维涂抹料
2	向火面	铬50砖
	隔热层	空心球浇注料
	保温层	莫来石轻质砖
	缓冲层	纤维涂抹料
3	向火面	铬90砖
	隔热层	空心球浇注料
	保温层	莫来石轻质砖
	缓冲层	纤维涂抹料
4	向火面	铬50浇注料
	保温层	莫来石浇注料
	缓冲层	纤维涂抹料

3.3 材料选型说明

针对各区域不同的使用条件，采用与工况条件相适应的内衬材料，材料选用说明见表3。

表3 内衬材料选用说明

序号	名称	材料特性
1	铬90砖/铬50砖	以氧化铬和氧化铝为主要原材料，或引入少量氧化锆，经高温烧制而成定形耐火制品。高铬砖具有优良的抗渣性能，较好的高温强度，热震稳定性好、高温体积稳定性好，在酸性熔渣、水蒸气的作用下能长期使用
2	低铬砖（铬刚玉砖）	以氧化铝粉为主要原料，适配氧化铬等，经高温熔炼而成。化学性质稳定对酸和碱均有良好的抵抗能力，具有优良的抗熔渣、气流及各种介质的侵蚀、冲刷特性，热震稳定性好，高温体积稳定性好，具有较好的高温强度。
3	氧化铝空心球浇注料	选用高纯氧化铝空心球原料生产，理化性能稳定，高温性能优良，耐压强度高，导热系数低，保温性能好，可在高温高压还原气氛下长期使用
4	莫来石浇注料	以优质多孔莫来石为骨料，与多种微粉、分散剂配合，经特殊工艺加工而成。具有热态强度高，耐化学腐蚀性强，吸水率低，施工性能好的特点，可在最高1 500 ℃的高温、腐蚀性气体或是溶液的环境中长期稳定运行
5	纤维涂抹料	用高铝纤维棉生产，耐高温、导热系数低，强度比纤维毡高又具有可压缩性，施工性好没有接缝。

3.4 各区温度

根据炉内温度及材料导热系数，分别计算不同环境温度下各区内衬结构的温度，结果如下：

表4 1区温度分布

序号	炉内温度	热面温度℃	隔热层温度℃	绝热层温度℃	设备外表面温度℃	环境温度
	℃	低铬砖λ=4.8W/m·K	莫来石浇注料λ=0.5W/m·K	纤维涂抹料λ=0.12W/m·K	Q345Rλ=50W/m·K	
1	1 300	1 238	857	150	149	最高温度37 ℃
2	1 300	1 238	854	143	142	平均温度25 ℃

表 5　2 区温度分布

序号	炉内温度℃	热面温度℃	隔热层温度℃		绝热层温度℃	设备外表面温度℃	环境温度
		铬 50 砖λ=4.5W/m·K	空心球浇注料 λ=0.9W/m·K	莫来石砖 λ=0.5W/m·K	纤维涂抹料 λ=0.12W/m·K	Q345Rλ=50W/m·K	
1	1 550	1 444	1 233	776	141	140	最高温度 37 ℃
2	1 550	1 444	1 230	772	134	133	平均温度 25 ℃

表 6　3 区温度分布

序号	炉内温度℃	热面温度℃	隔热层温度℃		绝热层温度℃	设备外表面温度℃	环境温度
		铬 90 砖 λ=4.4W/m·K	空心球浇注料 λ=0.9W/m·K	莫来石砖 λ=0.5W/m·K	纤维涂抹料 λ=0.12W/m·K	Q345Rλ=50W/m·K	
1	1 600	1 488	1 270	798	144	143	最高温度 37 ℃
2	1 600	1 488	1 268	794	136	135	平均温度 25 ℃

表 7　4 区温度分布

序号	炉内温度℃	热面温度℃	隔热层温度℃	绝热层温度℃	设备外表面温度℃	环境温度
		铬 50 浇注料λ=4.5W/m·K	莫来石浇注料λ=0.5W/m·K	纤维毯λ=0.12W/m·K	Q345Rλ=50W/m·K	
1	1 450	1 178	790	143	142	最高温度 37 ℃
2	1 450	1 178	787	136	135	平均温度 25 ℃

由上述数据可知，等离子体气化熔融炉各部位外壁温度均小于 150 ℃，内衬结构可满足气化炉的工作要求。

3.5 其他要求

（1）耐火材料由于受到温度变化和温度梯度的影响而产生热膨胀，内衬需要预留相应膨胀缝。内衬结构高度方向至少预留3处膨胀缝，径向方向预留3～5 mm膨胀缝。各个管口处下部也预留相应膨胀缝，防止由于内衬材料膨胀剪切测温管、测压管等插入设备。

（2）在进行筑炉施工前，要对炉体垂直度进行侧量，必须达到设计要求；对炉体上所有焊缝磨平，测量出炉体圆度。

（3）须将炉体内面的油污、铁锈、氧化皮等其他杂质清除干净。锚固件，支撑板表面涂防锈漆。若有特别要求，还应进行喷砂处理。

（4）耐火材料堆放现场时要准备防潮设施。

4　结语

等离子体气化熔融炉投用后运行良好，外表面未出现超温现象。但也存在一些问题：

（1）烘炉时间长，要消耗大量的烘炉燃气；

（2）含铬材料在高温氧化气氛条件下与碱反应生成有剧毒Cr^{6+}化合物[3]，容易致癌，并会对环境造成严重污染；

（3）向火面内衬材料选型单一，耐火材料的使用应根据炉内的工况条件，如炉型、气氛、温度、炉渣的成份等合理选择。比如：氧化气氛下可选择Al_2O_3-Cr_2O_3和MgO-Cr_2O_3；还原气氛下可以选择SiC和C-SiC。

参考文献：

[1] 智研咨询. 行业预览！2022 中国固废处理产量及固废处理主要企业经营现状分析[EB /OL]. http://baijiahao.baidu.com/s?id=1752258673842164813&wfr=spider&for=pc, 2022-12-15

[2] 陈定. 等离子体气化炉用 SiC 质耐火材料制备与性能研究[D]. 武汉科技大学, 2018

[3] 李楠, 顾华志, 赵惠忠. 耐火材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010:184-185