

汽轮机轴封加热器换热性能计算

梁岩芳^{1,2}, 彭姝璇¹, 崔永军³, 罗建超³, 何垚年³, 白林超¹, 付经伦^{1,4,5*}

(1. 中科南京未来能源系统研究院, 江苏省南京市 210000; 2. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏省南京市 210023; 3. 华能北京热电有限责任公司, 北京市朝阳区 100023; 4. 中国科学院工程热物理研究所, 北京市海淀区 100190; 5. 中国科学院大学, 北京市海淀区 100000)

Calculation of Heat Transfer Performance of Steam Turbine Shaft Sealing Heater

LIANG Yanfang^{1,2}, PENG Shuxuan¹, CUI Yongjun³, LUO Jianchao³, HE Yaonian³, BAI Linchao¹, FU Jinglun^{1,4,5*}

(1. Nanjing Institute of Future Energy System, Nanjing 210000, Jiangsu Province, China; 2. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu Province, China; 3. Huaneng Beijing Thermal Power Co., Ltd., Chaoyang District, Beijing 100023, China; 4. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100000, China;)

摘要: 轴封加热器是汽轮机机组中的换热装置, 对轴封系统的工作性能有重要的影响。提出一种在已知参数较少的情况下, 通过迭代计算得出轴封加热器相关参数的计算方法, 并与 Aspen Plus 软件计算得到的轴封加热器基本换热参数进行对比验证, 误差在 0.4% 以内, 表明所提出的计算方法可靠性较高。以华能北京热电有限责任公司联合循环汽轮机实际应用为例, 使用该计算方法计算进口参数改变时的壳程出口液相、气相流量并建立进口参数波动与加热器换热参数间的关联模型, 验证了该方法的有效性。

关键词: 汽轮机; 轴封加热器; 进口参数; 迭代计算; 关联模型

ABSTRACT: The shaft seal heater is a heat exchange device in a steam turbine, which plays an important role to the performance of the shaft seal system. Based on limited data, a method for calculating the relevant parameters of the shaft seal heater was proposed by using an iterative algorithm. The algorithm was validated by comparing the calculated basic heat transfer parameters of the shaft seal heater with the results from Aspen Plus software. The discrepancy is within 0.4%, which validates the iterative algorithm presented in this paper. Taking the practical application of the combined cycle

steam turbine unit of Huaneng Beijing Thermal Power Co., Ltd. as an example, the liquid phase and gas phase flow at the outlet of the shell side, under the condition of inlet parameter change, were calculated by using this method. Moreover, the correlation model between the fluctuation of import parameters and the heat transfer parameters of the heater was established to verify the effectiveness of the method.

KEY WORDS: steam turbine; sealing heater; import parameters; iterative calculation; correlation model

0 引言

火电机组中, 轴封加热器是汽轮机轴封系统的重要设备, 通过主凝结水来冷却各段轴封和高、中压主汽调节阀阀杆抽出的蒸汽-空气混合物, 回收轴封溢流汽流中的热量, 提高机组的经济性^[1]。一方面, 在当前“双碳”战略背景下, 为了保障可再生能源的使用, 火力机组发挥着灵活性调峰的作用^[2-5], 高、中压缸轴封等各处溢流量会随着工况变化发生显著的改变, 需要对轴封加热器性能进行快速评估与判断; 另一方面, 为了提高能源利用效率, 部分电厂对机组系统进行改造, 导致轴封加热器热端进口参数改变, 而其改变范围和程度将受限于现有设备能力。因此, 不论是灵活性运行还是系统改造, 都需要在工质参数发生变化时, 对轴封加热器性能进行准确和快速评估。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51776201); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(重大科技示范)(BE2022614)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51776201); Special Funds for Science and Technology Innovation of Carbon Peaking and Carbon Neutrality in Jiangsu Province (Major S&T Demonstration)(BE2022614).

轴封加热器多为表面式管壳换热器，针对管壳式换热器内换热性能的计算分析方法多采用三维数值计算方法，目前主要的数值模拟建模形式有多孔介质模型、实体模型、周期性单元流道模型。有学者^[6-7]提出应用相关软件进行模拟计算，把壳程作为主要研究对象，采用多孔介质的方式处理数据，以此开启了应用数值模拟方法对换热器工作状态模拟推演的大门。我国学者针对螺旋槽纹管的数值模拟研究是在1995年由北京化工大学张政和张建文^[8]发起的，他们将三维复杂流动和传热问题转化为了二维问题。崔海亭等^[9]在不同计算参数组合下螺旋管的最佳曲率比的研究基础上，采用螺旋坐标变换法，利用CFD软件数值模拟得到了螺旋槽纹管内的流动和换热情况，进一步说明了螺旋坐标变换法的合理性，计算结果也表明利用有限差分法分析螺旋槽纹管这种具有复杂边界形状的壁区不够精确，应该采用有限元法、有限分析法等。刘超^[10]采用数值模拟的方法得到了相关几何参数对螺旋槽纹管换热性能的影响，得出螺旋升角和螺旋头数对螺旋槽纹管换热性能的影响较小的结论。王定标等^[11-12]利用HEFLOW软件模拟研究了折流杆结构换热器的壳程流场分布和折流杆各项参数对换热器传热性能的影响，分析了壳程流体在雷诺数低于2 300时的流动和传热的特性。古新等^[13]提出管壳式换热器周期性全界面计算模型，为再现和模拟管壳式换热器壳程的真实流动状况，以及分析各种构件对壳程流体流动和传热性能的影响提供了良好的辅助手段。吴昊朋^[14]通过ANSYS NX8.5建立了全流路管壳式换热器流动和传热模型，并利用ANSYS Fluent对模型进行数值模拟，得出传热性能。邓斌等^[15]综合应用体积多孔度、表面渗透度和分布阻力方法建立了适用于准连续介质的N-S修正控制方程，用改进的 $k-\varepsilon$ 模型考虑管束对湍流的产生和耗散的影响，用壁面函数法处理壳壁和折流板的壁面效应，对管壳式换热器的壳侧湍流流动与换热进行了三维数值模拟。吴金星等^[16]提出一种新的“单元流道”模型，利用该模型研究杆支撑换热器壳侧的流动和换热性能，利用CFD软件模拟分析改变流体的流速、流向对壳程的影

响，发现可以通过改变流体参数提高换热等。张亮等^[17]采用数值模拟的方法研究波纹管换热器的换热性能，发现波壁管换热器较传统直壁管换热器的换热效率大幅提高。王争等^[18]基于Fluent对不同结构下管壳式换热器进气管组件的结构进行模拟，然后分别对产生的温度场、速度场等进行分析，研究不同换热器进气管组件的结构对管壳式换热器换热性能的影响。何超等^[19]利用CFD软件对管壳式换热器壳程流体及相变传热进行了三维数值模拟研究，发现低流速区域传热性能差，冷凝现象明显。

现有的轴封加热器换热性能求解多是借助于三维CFD仿真软件，针对轴封加热器的详细几何结构进行建模和数值求解。这种方法虽然能获得加热器内部流动和换热细节，但对计算资源和时间要求较高，且实际情况下较难获取加热器结构特征，无法实现对其性能的快速评估与分析。因此，本文根据热平衡原理，提出了一种快速计算方法，可在已知参数较少的条件下，实现对换热器性能及热端参数的推算。

1 计算方法及流程

管壳式换热器结构示意图如图1所示，其中冷却水由管程流过，蒸汽与空气混合物由壳程进口流入，在加热器内流过换热管冷却后，从壳程出口流出。通常加热器换热面积、平均换热系数由产品制造厂商提供。为评估不确定因素导致壳程参数变化引起的轴封加热器出口参数改变，本文提出了一种计算方法，计算流程如图2所示。计算过程中已知参数为壳程压力、进口温度、蒸汽质量分数、管程压力、流量、管程进口温度、

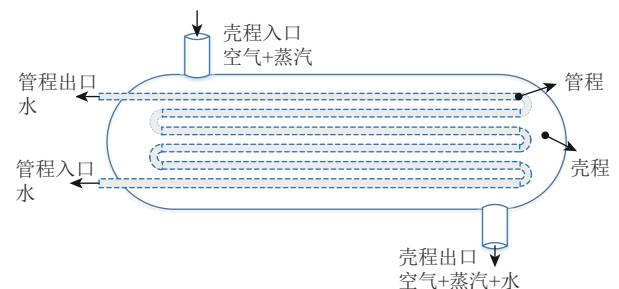


图1 管壳式换热器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of shell and tube heat exchanger

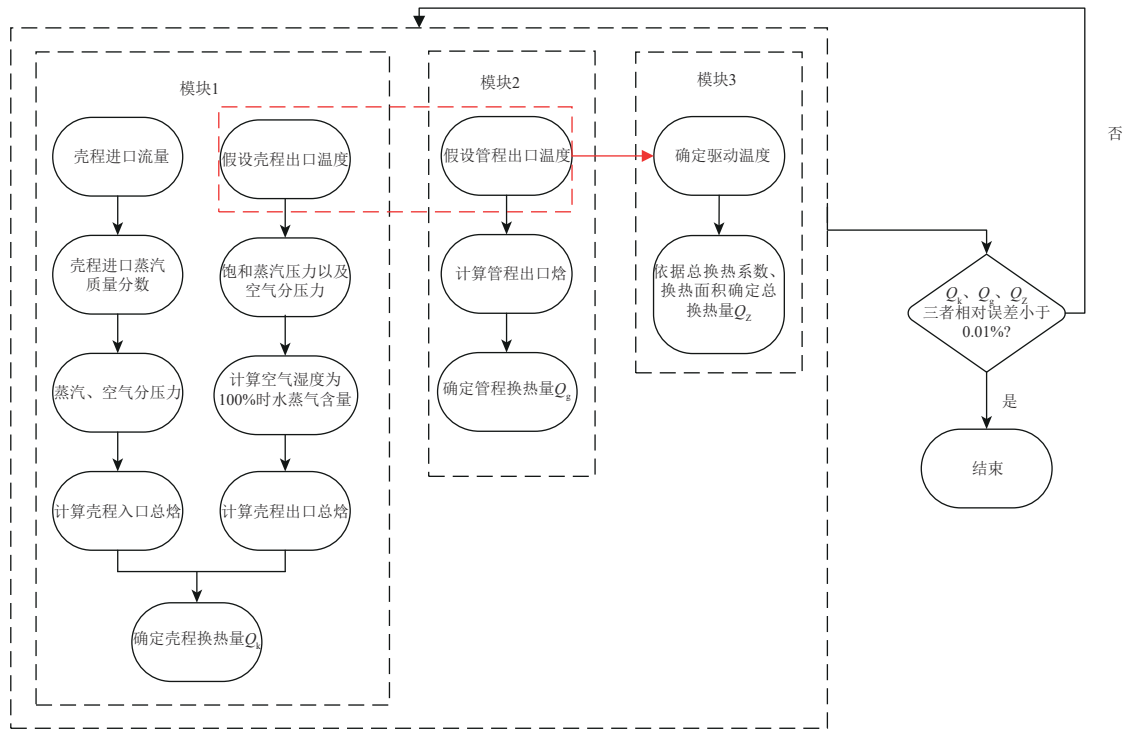


图2 进口参数改变后的轴加计算流程图

Fig. 2 Flow chart of shaft addition calculation after the change of inlet parameters

壳程流量、换热器换热面积及总换热系数。本计算方法通过已知参数与假定的壳程和管程的出口温度，利用工质总焓变化计算出壳程换热量、管程换热量，对应图2中的模块1、模块2；同时，利用总换热系数计算换热器总换热量，对应图2中的模块3。当模块1, 2, 3计算的换热量差值小于0.01%时，计算完成；否则，调整假定的壳程和管程出口温度，重新计算。

计算流程中的模块1根据式(1)、(2)确定进口空气和蒸汽分压力，并计算壳程入口总焓值 $H_{k,in}$ 。进口蒸汽、空气分压力计算公式^[6]分别为：

$$p_{v,in} = \frac{P_k}{\frac{m_{air,in}}{m_{v,in}} \frac{M_v}{M_{air}} + 1} \quad (1)$$

$$p_{air,in} = P_k - p_{v,in} \quad (2)$$

式中： $p_{v,in}$ 为进口蒸汽压力，Pa； p_k 为壳程压力，Pa； $p_{air,in}$ 为进口空气压力，Pa； M_v 为蒸汽的相对分子质量； M_{air} 为空气的相对分子质量； $m_{air,in}$ 为进口空气的质量流量，kg/h； $m_{v,in}$ 为进口蒸汽的质量流量，kg/h。

进口混合物总焓值 $H_{k,in}$ 计算公式^[20]为

$$H_{k,in} = h_{air,in} m_{air,in} + h_{v,in} m_{v,in} \quad (3)$$

式中： $h_{air,in}$ 为进口空气的比焓，J/kg； $h_{v,in}$ 为进口蒸汽的比焓，J/kg。

再根据出口温度查表获得对应的饱和压力，由式(4)计算相对湿度为100%时，蒸汽的质量流量和壳程出口总焓值 $H_{k,out}$ 。

相对湿度为100%时，出口蒸汽质量流量计算公式^[20]为

$$m_{v,out} = \frac{m_{air} p_{v,out} M_v}{(p_k - p_{v,out}) M_{air}} \quad (4)$$

式中： $m_{v,out}$ 为出口蒸汽质量流量，kg/h； m_{air} 为空气的质量流量，kg/h； $p_{v,out}$ 为出口蒸汽的分压力，Pa。

壳程出口混合物总焓值 $H_{k,out}$ 计算公式^[20]为

$$H_{k,out} = h_{air,out} m_{air} + h_{w,out} (m_{v,in} - m_{v,out}) + h_{v,out} m_{v,out} \quad (5)$$

式中： $h_{air,out}$ 为出口空气的比焓，J/kg； $h_{w,out}$ 为出口液态水的比焓，J/kg； $h_{v,out}$ 为出口的水蒸汽的比焓，J/kg。根据壳程出口温度及混合物分压力，查表确定空气、水蒸汽和水的比焓。

最后根据式(1)计算出壳程换热量 Q_k 。模块2根据式(6)计算管程换热量 Q_g 。模块3根据式(7)–(10)确定轴封加热器换热量 Q_z 。

换热量计算公式^[20]为

$$Q = m(h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) = H_{\text{out}} - H_{\text{in}} \quad (6)$$

式中: Q 为换热量, J/h; m 为质量流量, kg/h; h_{out} 为出口比焓, J/kg; h_{in} 为进口比焓, J/kg; H_{out} 为出口总焓, J/h; H_{in} 为进口总焓, J/h。

轴封加热器的换热量 Q_z ^[21] 公式为

$$Q_z = KA\Delta t\varphi \quad (7)$$

式中: K 为换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; A 为换热面积, m^2 ; φ 为温差修正系数; Δt 为对数平均温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

实际应用时管壳式换热器的内部流场比较复杂, 所以可以通过温差修正系数 φ ^[21] 计算平均温差。 φ 的值取决于无量纲参数 R 和 P ^[21]。

$$R = \frac{t_{k,\text{in}} - t_{k,\text{out}}}{t_{g,\text{out}} - t_{g,\text{in}}} \quad (8)$$

$$P = \frac{t_{g,\text{out}} - t_{g,\text{in}}}{t_{k,\text{in}} - t_{g,\text{in}}} \quad (9)$$

$$\varphi = \frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \frac{\ln \frac{1 - P}{1 - PR}}{\ln \frac{2 - P(1 + R - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - P(1 + R + \sqrt{R^2 + 1})}} \quad (10)$$

式中: $t_{k,\text{in}}$ 为壳程进口温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{k,\text{out}}$ 为壳程出口温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{g,\text{in}}$ 为管程进口温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{g,\text{out}}$ 为管程出口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

本计算流程以求解壳程、管程的出口温度为例, 但不局限于此。当计算流程中存在 1 或 2 个未知参数, 且各模块未知参数小于 2 个时, 均可用本方法计算未知参数。

2 计算方法验证及应用

2.1 计算方法验证

为保证本文提出的计算方法准确可靠, 采用 Aspen Plus 软件对部分计算过程进行验证。Aspen Plus 软件仅可计算单一未知变量。计算验证中已知壳程进出口温度、管程进出口温度、壳程和管程压力及管程流量, 利用 Aspen Plus 软件可计算出壳程流量。对于验证条件, 仅利用本文计算方法中的模块 1、模块 2 即可求解, 计算过程中需假定壳程流量, 当模块 1、模块 2 所得到的换热量相对误差小于 0.01% 时, 求解结束。

采用本文计算方法中的模块 1 和模块 2 得到的壳

程进口流量与 Aspen Plus 模拟所得到的结果进行对比, 结果见图 3。结果表明, 在不同质量分数下, 本文计算方法得到的壳程流量误差在 0.4% 以内, 考虑计算所需要的各类查表数据的精确性等因素的影响, 模拟值与计算值在误差的允许范围内基本吻合, 即所提出的计算方法具有可行性。

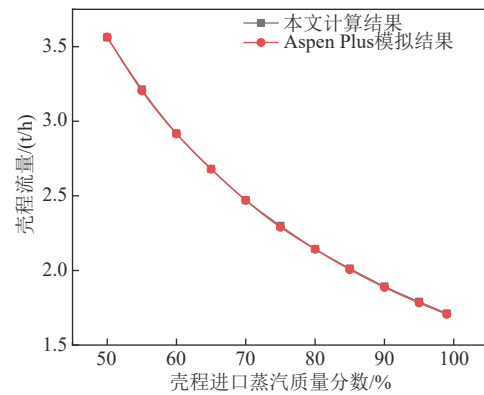


图3 总换热量一定, 壳程进口蒸汽质量分数不同时壳程流量变化

Fig. 3 Variation of shell process flow rate for different mass fractions of steam inlet to the shell process for a given total heat exchange

由图 3 可知, 根据计算结果得出在总换热量一定时, 随着壳程进口蒸汽质量分数增大, 壳程流量呈二次函数型变化。

2.2 计算方法应用

针对华能北京热电有限责任公司 F 级联合循环中的汽轮机在不同运行工况轴封溢流情况进行分析。原轴封系统如图 4 所示, 图中汽轮机低压缸和高中压缸的两端均布置轴封, 轴封多采用梳齿式高低齿结构, 轴封近大气段的腔室与轴封加热器相连, 轴封的平衡腔室和高压漏气段与轴封供汽母管相连。当机组启停机或低负荷运行时,

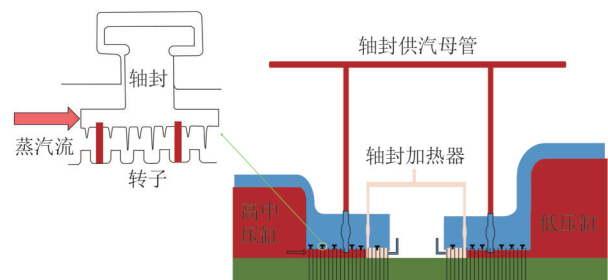


图4 轴封系统与轴封结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of shaft seal system and shaft seal structure

高中压缸轴封、低压缸两侧轴封均由轴封母管供汽。随着汽轮机负荷逐渐增加，高中压轴封漏汽逐渐增加，除满足高中压缸轴封及低压轴封密封需求外，多余蒸汽溢流至凝汽器。

电厂为回收高负荷运行时轴封溢流损失的热量，对轴封系统进行蒸汽溢流回收改造，即从轴封供汽母管引出一路至轴封加热器进汽管，如图5所示。

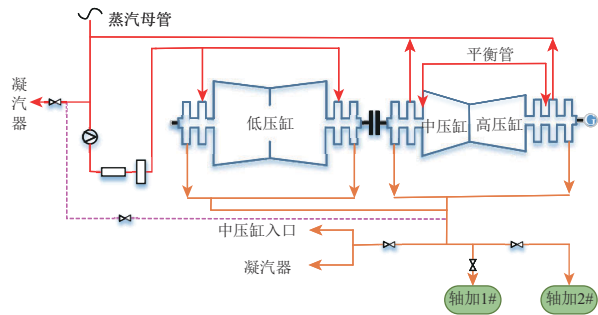


图5 轴封溢流改造示意图

Fig. 5 Diagram of shaft seal overflow transformation

以该电厂的二拖一满负荷夏季工况为例，由于改造后轴封加热器的壳程进口蒸汽质量分数、进口流量和进口温度均发生变化，采用本文提出的方法对该工况下轴封系统改造后的轴封加热器出口参数进行快速推算。计算得到不同壳程进口蒸汽质量分数下的壳程出口液相和气相流量，并进行多项式拟合，结果如图6、7所示。由图6、7可知，随着壳程进口蒸汽质量分数的增大，壳程

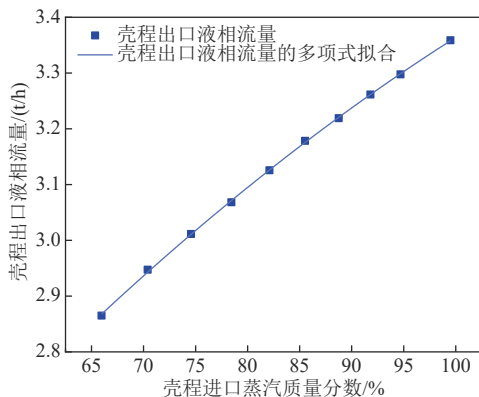


图6 进口参数改变，壳程进口蒸汽质量分数与壳程出口液相流量变化

Fig. 6 When the inlet parameters change, the mass fraction of inlet steam on the shell side and the liquid phase flow rate at the outlet of the shell side change

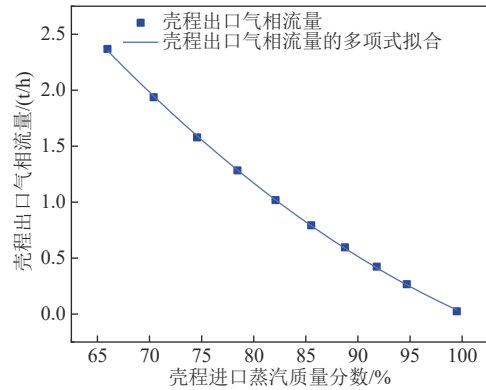


图7 进口参数改变，壳程进口蒸汽质量分数与壳程出口气相流量变化

Fig. 7 When the inlet parameters change, the mass fraction of inlet steam on the shell side and the gas phase flow rate at the outlet of the shell side change

出口的液相流量逐渐增大，气相流量则逐渐减少。通过拟合得到壳程进口蒸汽质量分数与壳程出口液相或气相流量的函数关系为

$$Y = B_0 + B_1 \times x + B_2 \times x^2 \quad (11)$$

式中： x 为壳程进口蒸汽质量分数；液相流量 $B_0 = 1.374\ 31 \pm 0.565\ 5$, $B_1 = 2.795\ 44 \pm 0.138\ 33$, $B_2 = -0.805\ 91 \pm 0.083\ 59$ ；气相流量 $B_0 = 12.041\ 99 \pm 0.238\ 91$, $B_1 = -19.842\ 94 \pm 0.584\ 44$, $B_2 = -7.816\ 31 \pm 0.353\ 16$ 。液相流量和气相流量对应的 R^2 分别为 0.999 73 和 0.999 78，可见拟合结果对数据的吻合程度很高，这便于快速对该电厂机组的变化情况进行评估。

3 结论

通过理论计算，对运行条件波动时轴封加热性能进行研究，得出如下结论：

1) 提出了一种当壳程入口条件波动时快速评估轴封加热器换热性能的计算方法。使用 Aspen Plus 软件对文中提出的计算方法的模块1和模块2进行验证。对比验证的结果表明，考虑误差因素后，计算的结果具有可靠性。

2) 使用提出的计算方法计算壳程的进口参数发生改变后壳程出口的液相和气相流量。分析结果表明，随着壳程进口蒸汽质量分数增大，壳程出口液相流量增大，壳程出口气相流量减小。对所得数据进行拟合，得出进口参数改变的情况下，壳程进口蒸汽质量分数与壳程液相/气相的流量之

间的非线性关系, 便于对该电厂机组的轴封加热器能否正常工作进行快速评估。

参考文献

- [1] 唐肄敏. 关于轴封加热器水封缺水现象的思考[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2011(1): 20-21.
TANG Y M. Thoughts on water shortage in water seal of shaft seal heater[J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2011(1): 20-21.
- [2] 王志云, 赵玉柱, 王学栋, 等. 调峰机制下供热汽轮机中压调门调节特性试验研究[J]. 发电技术, 2022, 43(6): 970-976.
WANG Z Y, ZHAO Y Z, WANG X D, et al. Experimental study on regulation characteristics of intermediate pressure cylinder regulating valves of heat supply steam turbine under peak regulating mechanism [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6): 970-976.
- [3] 闫修峰, 宗珂, 何修年, 等. 1 000 MW 煤电机组调峰中汽温控制策略研究[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 518-522.
YAN X F, ZONG K, HE X N, et al. Research on steam temperature control strategy in peak regulation of 1 000 MW coal power unit[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 518-522.
- [4] 柴有国, 何晓燕, 苏永健, 等. 考虑安全环保及补偿的火电机组调峰经济性研究[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 199-205.
CAI Y G, HE X Y, SU Y J, et al. Economic research on peak shaving of thermal power units considering safety-environmental protection and compensation[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 199-205.
- [5] 刘嘉乐, 马素霞, 马红和, 等. 燃气机组热调峰性能及经济性分析[J]. 中国电力, 2021, 54(6): 104-110.
LIU J L, MA S X, MA H H, et al. Analysis on thermal peak shaving and economic performance of gas-fired unit[J]. Electric Power, 2021, 54(6): 104-110.
- [6] 王明军. 管壳式换热器的数值模拟与优化设计[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
WANG M J. Numerical simulation and optimal design of shell-and-tube heat exchanger[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [7] 张之东. 管壳式换热器内部三维流场数值模拟[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2012.
ZHANG Z D. Numerical simulation of three-dimensional flow field in shell-and-tube heat exchanger [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2012.
- [8] 张政, 张建文. 螺旋内槽管内的层流流动与传热的数值模拟[J]. 高校化学工程学报, 1995, 9(2): 125-132.
ZHANG Z, ZHANG J W. Numerical simulation of laminar fluid flow and heat transfer in spiral internally finned tube[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 1995, 9(2): 125-132.
- [9] 崔海亭, 赵欣. 螺旋槽纹管管内紊流流动与换热数值研究[J]. 河北科技大学学报, 2002, 23(4): 86-89.
CUI H T, ZHAO X. Research of numerical simulation of turbulent fluid flow and heat transfer in spirally fluted tubes[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2002, 23(4): 86-89.
- [10] 刘超. 螺旋槽纹管管内流动和换热性能的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
LIU C. Study on flow and heat transfer performance in spiral grooved tube[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015.
- [11] 王定标. 纵流壳程换热器数值模拟技术与应用[D]. 上海: 华东理工大学, 1999.
WANG D B. Numerical simulation technology and application of longitudinal flow shell-side heat exchanger [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 1999.
- [12] 王定标, 董其伍, 刘敏珊, 等. 纵流壳程换热器数值模拟的应用研究[J]. 郑州工业大学学报, 1999(2): 18-20.
WANG D B, DONG Q W, LIU M S, et al. Application study of numerical simulation for longitudinal flow of shell-side heat exchanger[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 1999 (2): 18-20.
- [13] 古新, 董其伍, 王珂. 基于三维实体模型的管壳式换热器壳程流场和温度场数值研究[J]. 压力容器, 2008, 25(5): 1-5.
GU X, DONG Q W, WANG K. Numerical study on flow field and temperature field in shellside of shell-and-tube heat exchanger based on 3-D solid model[J]. Pressure Vessel Technology, 2008, 25(5): 1-5.
- [14] 吴昊鹏. 管壳式换热器壳程流体流动与传热数值模拟研究[J]. 科技风, 2017(19): 120.
WU H P. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in shell side of shell-and-tube heat exchanger[J]. Technology Wind, 2017(19): 120.
- [15] 邓斌, 陶文铨. 管壳式换热器壳侧湍流流动与换热的三维数值模拟[J]. 化工学报, 2004, 55(7): 1053-

- 1059.
- DENG B, TAO W Q. Three-dimensional numerical simulation of turbulent flow and heat transfer characteristics in shell side of shell-and-tube heat exchangers[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2004, 55(7): 1053-1059.
- [16] 吴金星, 魏新利, 董其伍, 等. 杆支撑换热器壳程的单元流道模型及流场分布[J]. 化工进展, 2007, 26(1): 69-72.
- WU J X, WEI X L, DONG Q W, et al. Unit duct model and flow field distribution in shell side of rod baffle heat exchanger[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26(1): 69-72.
- [17] 张亮, 原亚东, 孙志强, 等. 波纹管对管壳式换热器内流体传热及流动特性的影响[J]. 热能动力工程, 2019, 34(4): 73-78.
- ZHANG L, YUAN Y D, SUN Z Q, et al. Effects of corrugated tube on heat transfer and flow characteristics of fluid in shell heat exchanger[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(4): 73-78.
- [18] 王争, 董敏. 基于Fluent的管壳式换热器进气管组件结构优化数值模拟[J]. 现代信息技术, 2022(20): 111-115.
- WANG Z, DONG M. Numerical simulation of inlet pipe assembly structure optimization of shell and tube heat exchanger based on fluent[J]. Modern Information Technology, 2022(20): 111-115.
- [19] 何超, 瞿莹, 王华玲, 等. 管壳式换热器壳程流体流动与传热的数值模拟研究[J]. 装备制造技术, 2022(3): 43-45.
- HE C, QU Y, WANG H L, et al. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in shell side of shell-and-tube heat exchanger[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(3): 43-45.
- [20] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- SHEN W D, TONG J G. Engineering thermodynamics

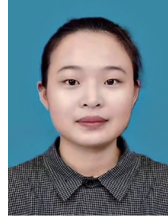
[M]. 5th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2016.

[21] 陶文铨. 传热学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2019.

TAO W Q. Heat transfer[M]. 5th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2019.

收稿日期: 2023-03-09。

作者简介:



梁岩芳

梁岩芳(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为传热与流体网络, 221912015@njnu.edu.cn;



彭姝璇

彭姝璇(1995), 女, 硕士, 研究方向为叶轮机械优化设计与流动分析, pengshuxuan@njiet.cn;



崔永军

崔永军(1977), 男, 高级工程师, 研究方向为燃气-蒸汽联合循环机组运维技术, 3862986@qq.com;



付经伦

付经伦(1979), 女, 博士, 研究员, 研究方向为叶轮机械透平强耦合研究及燃机数字化, 本文通信作者, fujl@iet.cn。

(责任编辑 辛培裕)