

凝汽器管束区流场的数值模拟与结构优化

江金鱼¹,陈晨¹,李亮²,陈子龙¹,黄磊¹

(1.湖北理工学院 机电工程学院,湖北 黄石 435003;2.浙江海利普电子科技有限公司,浙江 嘉兴 314300)

摘要:以某 600 MW 汽轮机发电机组所配套的凝汽器管束结构为例,基于多孔介质模型的 CFD 方法,对该凝汽器管束区域流场进行了数值模拟.针对该管束结构,通过调节管束排空气通道倾斜角度宽度、壳侧壁面尺寸以及管束位置的方法,对凝汽器内部流场进行改进.结果表明,整体管束优化后的结构能够有效减小涡流范围,并缓解管束主凝结区空气聚集现象,相比整体管束改进前的管束主凝结区的最大空气体积分数降低了 39.7%.

关键词:凝汽器;涡流;空气体积分数

中图分类号:TM621

文献标志码:A

凝汽器内管束排布结构的合理性决定了凝汽器运行的稳定性和换热效率^[1-2].不合理的管束结构会导致管束主凝结区的空气聚集,恶化凝汽器汽侧换热,同时也会产生汽流激振的风险^[3-6].由于核电冷凝器的巨大尺寸和多达数万根的钛管,很难通过模型或物理实验来研究冷凝器中蒸汽的流动和冷凝传热规律.目前唯一可用的研究方法是采用数值模拟来研究凝汽器的内部流动和换热特性.为了对管束区域进行数值模拟,汪国山^[7]提出了基于多孔介质的二维数值计算模型,并对国内外各种类型的冷凝器进行了传热模拟.张莉等^[8]采用 Fluent 商用计算软件平台,提出了与凝汽器实际运行情况相符的数值计算方法.本文以某 600 MW 汽轮机发电机组所配套的凝汽器管束结构为例,采用基于多孔介质模型的 CFD(Computational Fluid Dynamics)方法^[9],对该凝汽器管束区域流场进行了数值模拟,通过模拟结果提出了对应的管束结构改进方案.

1 凝汽器管束结构

图 1(a)是某 600 MW 汽轮机发电机组所配套的凝汽器管板画线简图.该管束主凝结区较宽,空冷区在这种管束的下部约二分之一的位置,由挡板与主凝结区隔开.在主凝结区,在其靠近主蒸汽通道的外围管束中预留了宽度为一排管束的微蒸汽通道,意图使蒸汽沿着这些微通道深入主凝结区内部.在空冷区的上方的管束内直通蒸汽通道的上方设置了一块挡汽板,以防止蒸汽直冲到空冷区,主要计算参数(凝汽器进汽量:11.69 kg/s;进口蒸汽压力:4 900 Pa;进口蒸汽干度:0.898 8;冷却水流量:51 000 t/h;冷却水初温:21.8 °C;冷却管管径尺寸:Ø19/18 mm;冷却管有效长度:8 930 mm;管材:Ti.).图 1(a-d)则是根据计算流场区域,在 ANSYS Workbench 软件中对计算域网格划分结果,整个区域采用以四边形为主导的网格划分方法,可以发现,划分后的入口附近和抽气口附近的网格线垂直方向接近流体运动轨迹,这样在计算过程中具有更好的收敛性.

2 物理数学模型与数值研究

2.1 物理数学模型

蒸汽与漏入的空气组成蒸汽空气混合物在流经由钛管组成的管束区时,与管侧冷却水发生热交换而凝结

收稿日期:2022-11-17;修回日期:2023-02-23.

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(10920026);校级科学研究计划项目(21xjz03Y);校级理工科思政类项目(2022C01).

作者简介(通信作者):江金鱼(1983-)女,安徽池州人,湖北理工学院副教授,研究方向为流体运动分析,E-mail:201063@hbpu.edu.cn.

放热,因此该流动为多组分介质并伴随相变和传热传质的物理现象.在进行数值仿真研究时,参照文献[7, 10]的方法及假设条件,采用具有分布阻力与分布质量汇的多孔介质物理模型来模拟在凝汽器管束区的流动与凝结换热过程.该数学模型可写为如下通用表达式:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\beta \rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta \rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi}, \quad (1)$$

式中, β 为体积多孔率,其表达式如式(2), ρ 为蒸汽空气混合物的密度, u 、 v 分别表示蒸汽空气混合物沿 x 、 y 轴的速度, Γ_{ϕ} 和 S_{ϕ} 分别是与 ϕ 变量相对应的扩散系数和源项,上述通用方程可根据变量 ϕ 的定义来表示不同的通用方程,其中涉及的湍流黏度、凝结率、汽流与管侧冷却水之间的总热阻以及分布阻力的计算方法参照文献[7]中的表达式,这里不再赘述.

$$\beta = 1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{d}{P} \right)^2. \quad (2)$$

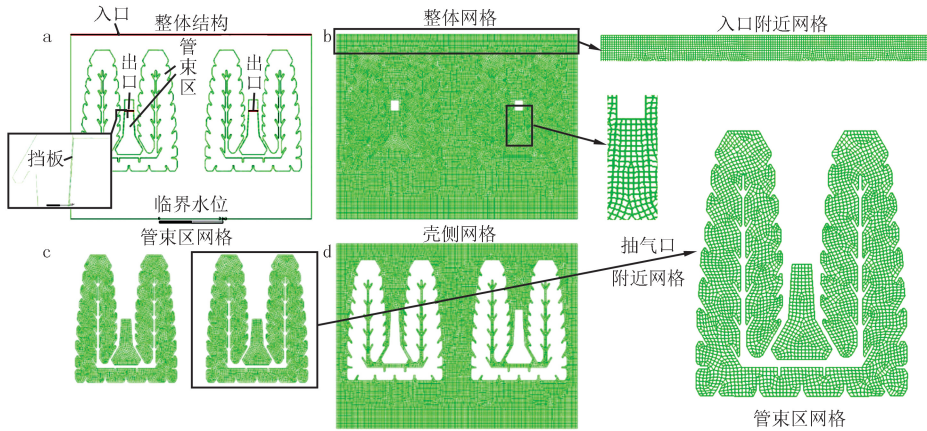


图1 凝汽器管束结构及计算域网格划分结果

Fig.1 Structure of condenser tube bundle and grid division results of calculation domain

2.2 实验凝汽器模拟验证

上述数学模型在 Fluent 计算平台中实现,其中蒸汽空气混合物参数采用 UDF (User Defined Function) 自定义参数输入并随计算迭代过程不断更新^[11].蒸汽在管束区的凝结量和分布阻力采用 UDF 自定义源项和 UDF 动量方程源项进行编辑,在湍流模型的计算中,采用 UDF 对管束区湍流黏度进行设置,整体计算流程如图 2 所示.

通过对“实验凝汽器”的案例进行建模、调试与仿真^[7],如图 3 所示,管束布置在凝汽器中间,在管束外的上、下侧各有一个蒸汽通道,抽气口布置在管束中心靠右的位置,其中冷却水管束成三角形排列,该实验能够测量出该凝汽器内部的凝结量分布情况.针对该凝汽器的实验数据,利用 FLUENT 软件对该实验凝汽器进行模拟仿真,通过对比测量得到的实验数据,对数学模型以及编写的 UDF 进行调试,从而保证该仿真模型的准确性.

图 4 为管束区传热系数分布.由于是单流程布置,冷却水初温相同,因此管束区传热系数和热负荷的分布规律基本相同.由图 4 可看出,与速率的分布类似热负荷和传热系数最小的区域也是在管束的上部区域.

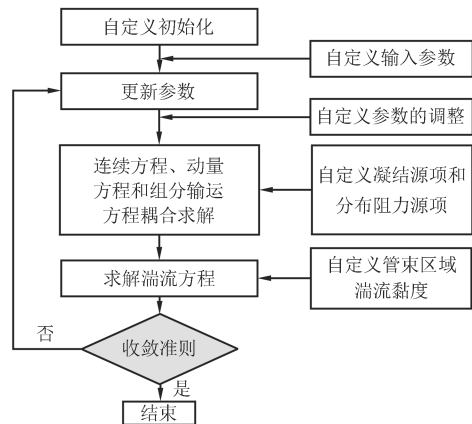


图2 计算流程

Fig.2 Calculation process

由于凝结水的向下溢流作用使气流下行比上行的阻力要小,因此上部通道中的蒸汽在管束的右上角比较容易转向下行,从而在其左侧形成一个漩涡,成为热负荷最小的区域.仿真求解的热负荷极低值点和实验凝结率最小的位置非常接近^[7],从而验证了该求解方法的准确性.

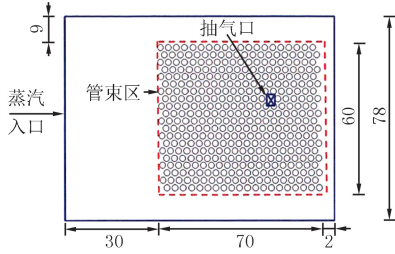


图3 实验凝汽器几何模型

Fig.3 Geometric model of experimental condenser

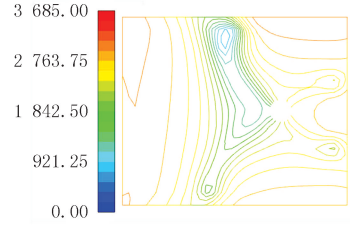


图4 传热系数分布 $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$

Fig.4 Distribution of heat transfer coefficient

2.3 数值研究

图 5 为对该凝汽器运行时内部流场的二维仿真结果,如图 5(a-d)所示分别为流速云图、压差云图、空气体积分数云图及速度矢量图,图 6 为管束区空气体积分数等值线图.分析速度云图和矢量图可以发现,速度最大值区域主要分布于管束通道,达到 96.84 m/s.其中两列管束间的通道底部附近与临界水位之间存在严重涡流现象.如图 6(b)所示,计算域最低和最大压差分别为 -335.77 Pa 至 72.44 Pa,位于出口和管束顶部.分析图 6(c)可以发现,管束主凝结区内部存在空气聚集区,空气体积分数最大值达 0.103 0(如图 6 等值线所示),该现象将会影响管束的换热效果,也会提升该区域钛管产生汽流激振的风险.

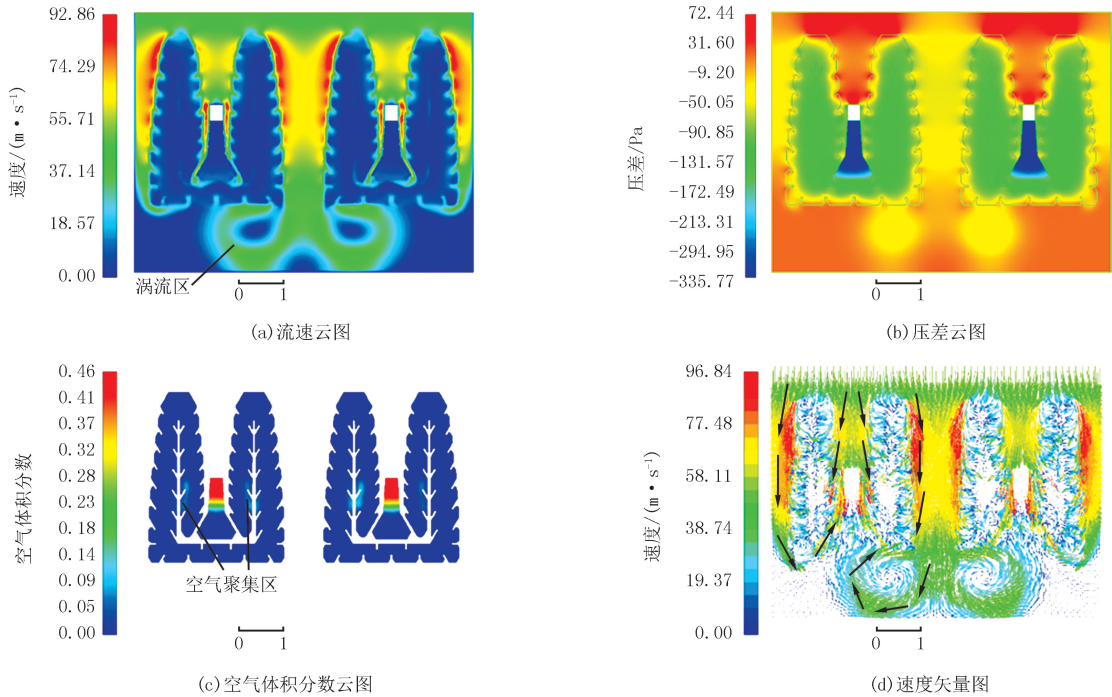


图5 内部流场的二维仿真结果

Fig.5 2D simulation results of internal flow field

3 管束结构的优化

3.1 单个管束优化

根据上述计算结果所发现的管束缺陷,对该管束结构进行改进,首先提取单个管束进行独立分析,并在

仿真过程中对入口蒸汽空气混合物流量减半.如图 7 为单个管束划线简图与计算域网格划分结果,图 8(a-d)所示分别为单个管束条件下流速云图、压差云图、空气体积分数云图及速度矢量图.分析图 8(a)和图 8(d)可以发现,由于采用了单个管束,并未发生明显的涡流现象.如图 8(b)所示,计算域最低和最大压差分别为 -220.7 Pa 至 47.5 Pa ,位于出口和管束顶部.由于该单列管束结构和图 6 中管束结构一致,主凝结区内靠近空冷区一侧仍出现空气聚集区,该区域空气体积分数最大值为 $0.110\ 0$.

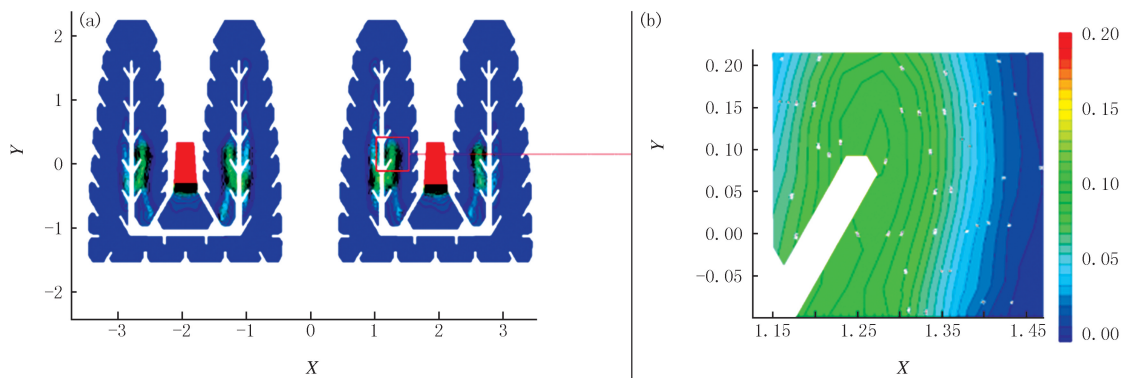


图6 管束区空气体积分数等值线

Fig.6 Air volume fraction contour in tube bundle area

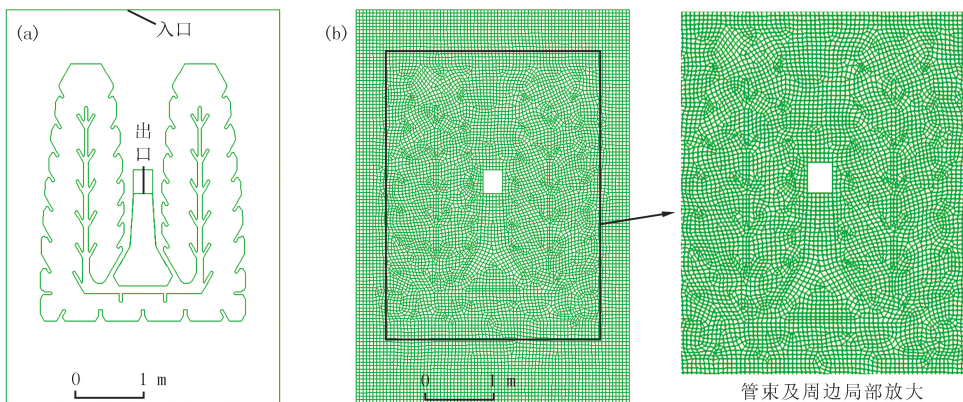


图7 单个管束条件计算域网格划分结果

Fig.7 Grid division results of calculation domain for single tube bundle condition

针对上述问题,先将主排空气通道向空冷区一侧倾斜,以减小空气聚集区流动阻力.通过对比仿真得出单个管束排空气通道倾 1° 及 3° 条件下主凝结区内空气体积分数最大值分别为 0.09 及 0.12 ,其中排空气通道倾斜 1° 时空气体积分数最大值相对较低,因此在此条件下将主排气通道加宽 $1/2$,以进一步减小蒸汽空气混合物流动阻力.

图 9 为单个管束排空气通道倾斜 1° 且加宽条件下的计算域网格划分结果.图 10 所示为对应空气体积分数等值线图,可以发现加宽后的空气体积分数等值线分布更加疏散且均匀,说明排气通道的加宽能够明显改善该类型管束主凝结区的空气聚集问题,改进后的单个管束结构的空气体积分数最大值降至 $0.041\ 4$.

3.2 整体管束优化

根据上述计算结果所发现的管束缺陷,对该管束结构进行改进,将上述优化后的单管束带入整体优化计算中.针对改进前速度场和矢量场分布,如图 5(a)和图 5(d)所示,管束区下方与水位之间还存在较大的涡流区,同时管束两侧通道过窄也会导致汽流不均匀.因此对壳体尺寸和管束区位置进行调整,将管束区与壳体壁面距离加宽 200 mm ,并使管束整体向水位方向下沉 200 mm (水平位置无变化).图 11 所示分别为整体管束优化后条件下的蒸汽流速云图、压差云图、空气体积分数云图及蒸汽速度矢量图.可以发现管束区与临界水位间涡流漩涡明显减小,且管束主凝结区内空气体积分数最大值降至 $0.062\ 1$ (图 12),相比整体管束改进

前的管束主凝结区的最大空气体积分数值降低了 39.7%。

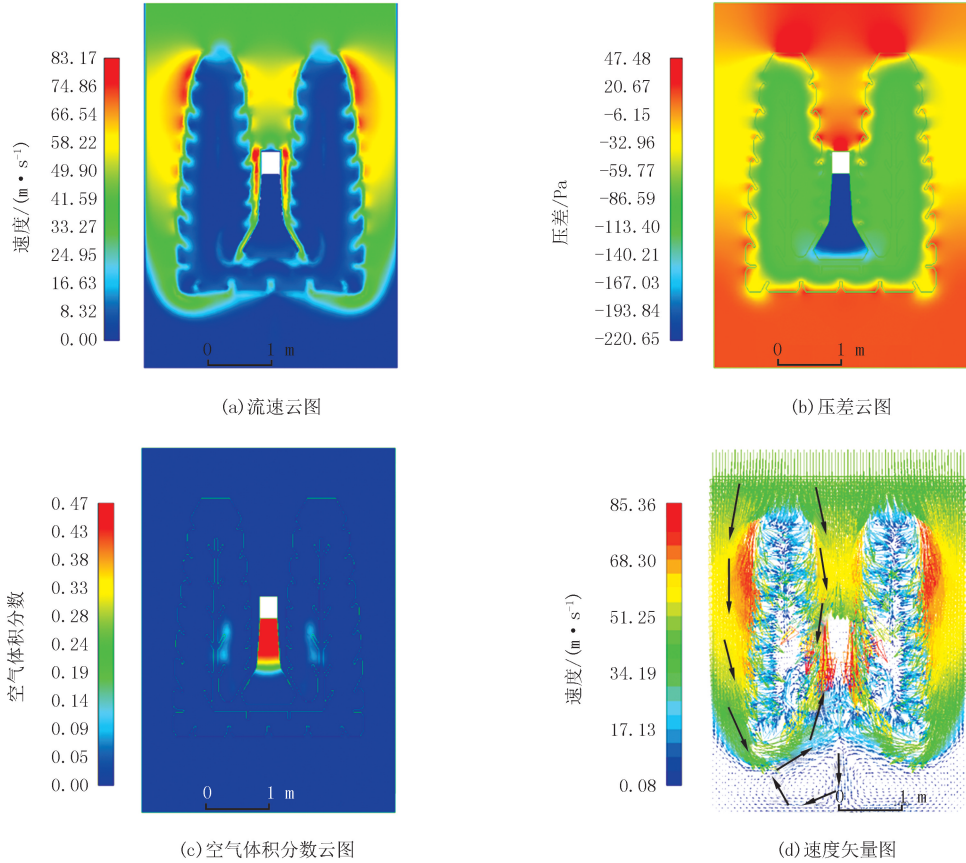


图8 单个管束仿真结果

Fig. 8 Simulation results of a single tube bundle

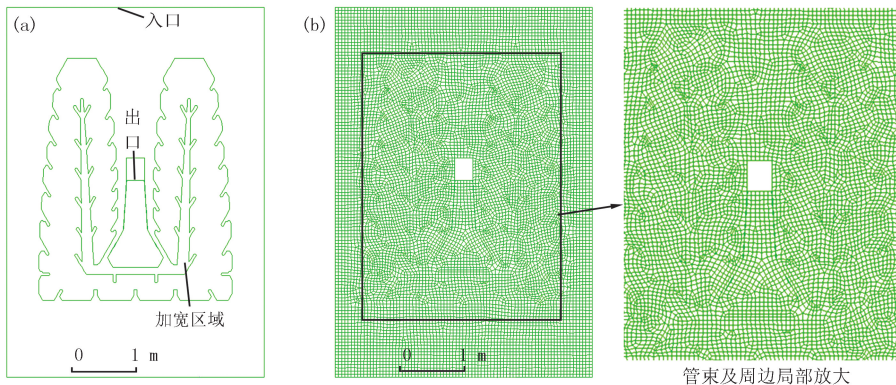


图9 单个管束(排空气通道倾斜1°且加宽)条件计算域网格划分结果

Fig. 9 Grid division results of calculation domain for single tube bundle(exhaust channel is inclined at 1° and widened)

4 结 论

(1)对单个管束结构进行分析发现,该管束排空气通道倾斜 1°且加宽后条件下的空气体积分数值等值线分布更加疏散且均匀,说明排气通道的加宽能够明显地改善该类型管束主凝结区的空气聚集问题,改进前后的单个管束主凝结区的空气体积分数值最大值分别为 0.110 0 和 0.041 4。

(2)对整体管束结构进行分析发现,通过将管束区与壳体壁面距离加宽 200 mm,并使管束整体向水位方向下沉 200 mm,能够有效减小中间通道下方与临界水位线之间的涡流尺寸.同时参照单个管束优化后的结构进行布管,管束主凝结区的空气体积分数值最大值由 0.103 0 减小至 0.041 4,降低了 39.7%。

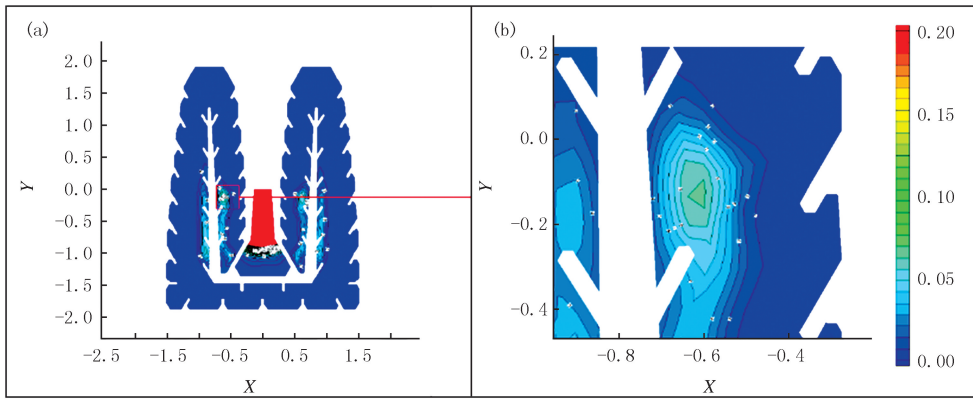


图10 单个管束排空气通道倾斜1°(加宽)条件下空气体积分数等值线图

Fig.10 Contour map of air volume fraction of single tube bundle when the exhaust channel is inclined at 1° and widened

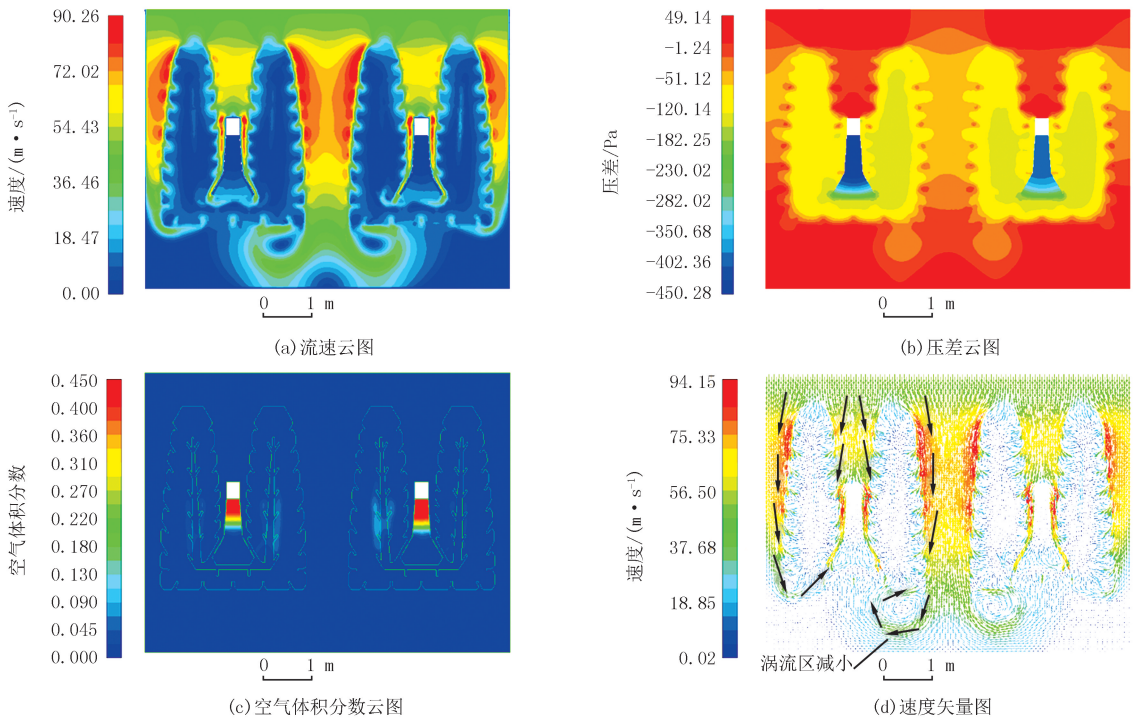


图11 整体管束优化后的内部流场仿真结果

Fig.11 Simulation results of the internal flow field after optimization of the overall tube bundle

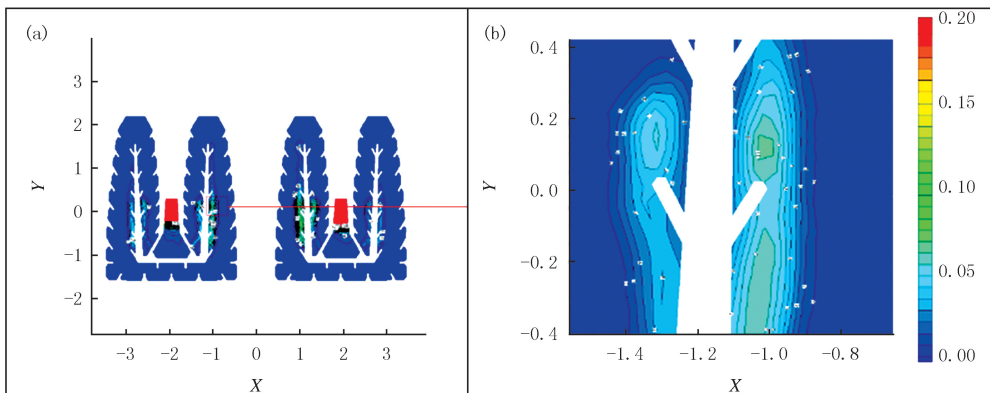


图12 整体管束优化后管束区内空气体积分数等值线图

Fig.12 Contour map of air volume fraction in the tube bundle area after optimization of the overall tube bundle

参 考 文 献

- [1] 陈维汉,周颺.流过管束的流动换热与结构的综合性能评价[J].华中科技大学学报(自然科学版),2004,32(2):70-73.
CHEN W H,ZHOU B.A comprehensive performance evaluation of fluid flow heat transfer through tube banks[J].Journal of Huazhong University of Science and Technology,2004,32(2):70-73.
- [2] ZENG H,MENG J A,LI Z X.Numerical study of a power plant condenser tube arrangement[J].Applied Thermal Engineering,2012,40:294-303.
- [3] 陈锋,刘恒,王军.核电厂凝汽器换热管裂纹故障分析与处理[J].汽轮机技术,2021,63(5):373-376.
CHEN F,LIU H,WANG J.Failure analysis and treatment for crack of condenser Tuber at nuclear power plant[J].Turbine Technology,2021,63(5):373-376.
- [4] ZU S A,CHEN J E,CHE Y H,et al.Research on steam flow excited vibration of nuclear power condenser based on full three-dimensional numerical simulation technology[J].AIP Advances,2022,12(3):035015.
- [5] SI H Y,CAO L H,LI P,et al.Steam flow excited vibration and dynamic characteristics of seal in different rotor whirling motion[J].Tribology International,2021,160:107029.
- [6] MIWA S,HIBIKI T.State-of-the-art in plant component flow-induced vibration(FIV)[J].Experimental and Computational Multiphase Flow,2020,2(1):1-12.
- [7] 汪国山.电站凝汽器热力性能数值仿真及其应用[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [8] 张莉,朱勇军,强永平,等.冷端系统协同工作下的凝汽器性能数值计算[J].汽轮机技术,2019,61(2):86-90.
ZHANG L,ZHU Y J,QIANG Y P,et al.Numerical calculation of condenser performance considering cooperative operation of cold-end system[J].Turbine Technology,2019,61(2):86-90.
- [9] 凌佳喜,易思强,廖先伟,等.考虑冷却水速度分布特征的凝汽器数值模拟计算[J].动力工程学报,2020,40(8):646-653.
LING J X,YI S Q,LIAO X W,et al.Numerical simulation on a condenser considering velocity distribution of the cooling water[J].Journal of Chinese Society of Power Engineering,2020,40(8):646-653.
- [10] 祖帅,车银辉,刘艳庄,等.枞树形管束凝汽器流体弹性激振特性数值研究[J].汽轮机技术,2022,64(1):33-37.
ZU S,CHEN Y H,LIU Y Z,et al.Numerical study of steam Flow Induced vibration characteristics in fir-shaped tube bundle of condenser [J].Turbine Technology,2022,64(1):33-37.
- [11] ZOLFAGHARNASAB M H,PEDRAM M Z,VAFAI K.A robust single-phase approach for the numerical simulation of heat pipe[J].International Communications in Heat and Mass Transfer,2022,132:105894.

Numerical simulation and structure optimization of flow field in condenser tube bundle

Jiang Jinyu¹, Chen Chen¹, Li Liang², Chen Zilong¹, Huang Lei¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China;

2. Zhejiang Holip Electronic Technology Co., Ltd., Jiaxing 314300, China)

Abstract: In this paper, a CFD method based on a porous medium model is used to numerically simulate the flow field in the condenser bundle area of a 600 MW turbine generator unit. For this tube bundle structure, the internal flow field of the condenser was improved by adjusting the width of the inclination angle of the tube bundle exhaust air passage, the size of the shell side wall and the position of the tube bundle. The results show that the optimized structure of the overall tube bundle can effectively reduce the vortex range and alleviate the air concentration in the main condensation zone of the tube bundle, and the maximum air concentration in the main condensation zone of the tube bundle is reduced by 39.7% compared with that before the improvement of the overall tube bundle.

Keywords: condenser; vortex; air volume fraction

[责任编辑 陈留院 赵晓华]