

三塔合一间接空冷系统结构参数对 夏季运行特性的影响研究

孟彦青¹, 赵强强², 范烨², 朱敏¹, 贾大为², 黄汉成²,
杜宪南², 韩立³, 师建军¹, 邹洋⁴, 师进文²

(1. 中煤伊犁能源开发有限公司, 835000, 新疆伊犁; 2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点
实验室, 710049, 西安; 3. 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室, 710054, 西安;
4. 西安热工研究院有限公司, 710054, 西安)

摘要: 为了揭示三塔合一间接空冷系统结构参数对系统夏季运行特性的影响规律, 基于夏季汽机额定负载工况, 利用商业计算软件和互联网通信协议, 建立了三塔合一间接空冷系统的耦合计算模型, 验证了系统仿真模型的准确性。利用本文模型, 定量分析了塔身高度、进风口直径、排烟高度和烟囱直径等关键结构参数的变化对系统运行性能的影响。结果表明: 塔身高度和进风口直径的增加能显著降低机组背压, 当塔身高度从 190 m 增至 206 m 时, 机组背压降低了 0.73 kPa。当进风口直径从 126 m 增加至 138 m 时, 机组背压降低了 2.04 kPa。排烟高度对机组背压的影响较小, 在工程实际中可忽略, 烟囱直径从 6.5 m 增加到 10.5 m 时, 机组背压增加了 0.37 kPa, 增加趋势随着烟囱直径增大逐渐平缓, 烟囱面积越大对机组背压所产生的影响越小。综合考虑投资成本和运行效益, 建议塔身高度和进风口直径应适当增大, 而烟囱直径应适当减小。研究结果可为三塔合一间接空冷系统的结构优化和机组经济性提升提供理论依据。

关键词: 三塔合一间接空冷系统; 运行特性; 系统仿真; 结构参数

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202607005 **文章编号:** 0253-987X(2026)07-0046-11

Influence of Structural Parameters on the Summer Operational Characteristics of a Three-Tower-in-One Indirect Air-Cooling System

MENG Yanqing¹, ZHAO Qiangqiang², FAN Ye², ZHU Min¹, JIA Dawei²,
HUANG Hancheng², DU Xiannan², HAN Li³, SHI Jianjun¹, ZOU Yang⁴, SHI Jinwen²

(1. China National Coal Yili Energy Development Co., Ltd., Yili, Xinjiang 835000, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. National Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage,
Xi'an 710054, China; 4. Xi'an Thermal Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: To elucidate how the structural parameters of the three-tower-in-one indirect air-cooling system influence its operational characteristics in summer, a coupled calculation model for the system was established under the turbine rated load condition in summer, using commercial simulation software and Internet communication protocols. The accuracy of the system's simulation model was verified, and the impacts of key structural parameters—including tower height, air inlet diameter,

flue gas exhaust height, and chimney diameter—on the system's operational performance were quantitatively analyzed. The results demonstrate that, as the tower height and air inlet diameter increase, the unit back pressure significantly drops. Specifically, as the tower height increases from 190 m to 206 m, the unit back pressure is reduced by 0.73 kPa; as the air inlet diameter increases from 126 m to 138 m, the unit back pressure decreases by 2.04 kPa. The influence of flue gas exhaust height on the unit back pressure was found to be minimal, so much so that it is negligible in engineering practice. When the chimney diameter is increased from 6.5 m to 10.5 m, the unit back pressure increases by 0.37 kPa. The increase in back pressure gradually levels off as chimney diameter grows, indicating a diminishing impact of chimney area on unit back pressure. Considering both investment costs and operational benefits, it is recommended that the tower height and air inlet diameter should be moderately increased, while the chimney diameter should be slightly decreased. These findings provide a theoretical basis for the structural optimization and improved unit economics of three-tower-in-one indirect air-cooling systems.

Keywords: three-tower-in-one indirect air-cooling system; operational characteristics; system-level simulation; structural parameters

冷端系统是火电机组核心组成部分,其运行状态直接影响机组效率与经济性^[1-2]。我国地域广阔、气候差异显著,能源分布呈区域不均特征,富煤的“三北”地区面临水资源匮乏问题^[3]。传统的水冷方式使机组发展受限,而空冷系统的出现很好地解决了能源分布矛盾,其节水、经济的冷却形式让它成为富煤缺水地区建设大规模电站的最佳冷端系统^[4-5]。对比同功率的直接空冷系统,间接空冷系统拥有更低的煤耗指标和更好的热经济性,在“双碳”目标背景下具有更广阔的应用前景^[6]。

三塔合一间接空冷系统将脱硫塔与烟囱布置于空冷塔内,利用热空气上升作用强化烟气扩散并提升塔内流动换热性能,兼具节水、节能环保的优势^[7-9]。此类型机组是由德国的烟塔合一技术发展而来,而后逐渐在各国得到应用,国内外学者也对三塔合一间接空冷系统展开了各种仿真研究^[10]。

现有研究表明,间接空冷塔、脱硫塔及烟囱的结构参数均会影响三塔合一间接空冷塔塔内流动与换热性能。针对结构参数所产生影响,周二奇等分析了环境风速、烟囱排烟以及塔内脱硫除尘设备对三塔合一间接空冷塔流动换热性能的影响。结果表明,无风时,烟囱排烟和塔内设备对风量的影响都非常小;有风时,塔内除尘设备最大可使风量增加11.4%^[11-12]。赵文升等以600 MW的三塔合一间接空冷塔为研究对象,分析结构参数对塔热力性能的影响规律,并通过对比进风量和出塔水温,得出最优的结构参数。研究结果表明,出口直径与散热器外缘直径的比值在0.80~0.85之间、喉部直径与散

热器外缘直径的比值为0.60~0.65时空冷塔性能最佳^[13]。张军峰以660 MW超超临界间接空冷机组为基础,对“三塔合一、四位一体”系统进行模拟计算,分析了塔内除尘装置对空冷塔热力性能的影响^[14]。Yang等通过研究三塔合一间接空冷塔内部流场随喉部变化规律指出,其喉部高度越小,空气与烟气的混合越剧烈^[15]。孔德满等通过对某2×350 MW机组三塔合一间接塔的模拟研究指出,塔内脱硫排烟装置对空冷塔风量和换热量的影响很小,且在一台机组运行时,风量和换热量会随风速呈先减小后增大的规律^[16]。刘秣含对某600 MW机组三塔合一间接空冷系统塔内结构不同布置方案展开研究,并以换热量和循环水出口温度对不同方案的换热效果进行评价^[17]。刘昆研究了加高烟囱以及加装风机对低负荷空冷塔流动换热特性的改善效果,表明烟囱高度升高和风机压力增加到2 kPa时可有效改善空冷塔内部压力场和温度场的分布^[7]。李金芳等利用三塔合一系统变负荷模型,对间接空冷塔在不同负荷下的冷却性能进行分析,指出高负荷会增强空冷塔冷却能力^[18]。

间接空冷系统中凝汽器是除空冷塔外的核心设备,其运行性能直接决定系统运行的安全性和高效性,凝汽器到空冷塔的散热量变化会影响机组运行效率^[19]。凝汽器压力(即机组背压)是衡量机组运行经济性的重要指标^[20],其增加或降低1 kPa,汽轮机的功率会相应增加或减少0.5%~2.0%^[21]。当前,三塔合一间接空冷系统研究多聚焦空冷塔、脱硫塔与烟囱的耦合,基本不考虑与其他核心设备的耦

合,难以反映机组运行特性及提供优化参考。

因此,本文借助商业计算软件和互联网通讯方法,实现间接空冷塔、凝汽器以及脱硫装置之间的耦合计算,建立间接空冷系统仿真模型,基于夏季汽轮机额定负载(TRL)工况验证模型后开展模拟,分析不同结构参数对系统夏季运行特性的影响,为同类型机组的结构设计优化、提高机组运行经济性及推动间接空冷系统的应用发展提供理论支撑。

1 几何及数值模型

1.1 几何模型

研究机组为 $2\times 1\,000\text{ MW}$ 超超临界燃煤机组,地理位置在我国北方,采用一机一塔的布置方式,共包含两座三塔合一间接空冷塔。按照表 1 所示的详细几何尺寸并结合厂区平面布置图以及脱硫塔、烟囱的设计图纸,建立了如图 1 所示的三塔合一间接空冷双塔模型。该模型对三塔合一间接空冷系统的双曲线型塔身、密封平台、脱硫塔、烟囱、烟气管道、基座等几何细节进行了还原。对于空冷散热器,它是由多个冷却三角组成,一个冷却三角包含两个冷却柱和一个百叶窗,在建立的模型中将其等效成无厚度的平面。

表 1 三塔合一间接空冷塔的几何参数

Table 1 Geometric parameters of the three-tower-in-one indirect air-cooling tower

参数/m	数值
塔身高度 H_a	196.0
出口直径 D_a	100.0
喉部高度 H_b	150.9
喉部直径 D_b	96.0
进风口高度 H_i	31.5
进风口直径 D_i	130.4
散热器外缘直径 D_o	160.0
脱硫塔高度 H_{st}	40.0
烟囱高度 H_{ct}	20.0

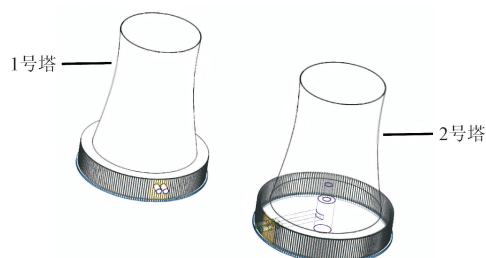


图 1 三塔合一间接空冷双塔模型

Fig. 1 Three-tower-in-one indirect air-cooling twin-tower model

1.2 网格模型

本文所研究的三塔合一间接空冷塔的网格模型如图 2 所示。空气计算域的尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 $1\,500\text{ m}\times 1\,500\text{ m}\times 800\text{ m}$,足以避免边界条件对中心计算区的影响。采用多面体网格划分,具有较高的体贴性与计算效率。内部网格非均匀分布,空冷散热器附近的网格尺寸小、密度大,计算域边缘的网格尺寸大、密度小,流动换热参数变化剧烈的部分网格较密集、变化平缓的部分网格较稀疏,可在保证计算精度的同时节省计算资源。

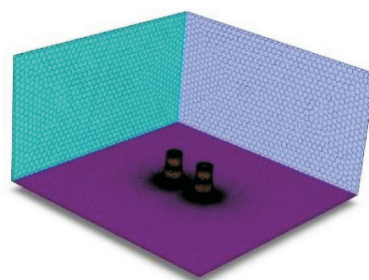


图 2 三塔合一间接空冷塔网格模型

Fig. 2 Grid model of the three-tower-in-one indirect air-cooling tower

网格无关性的计算结果如表 2 所示。以机组在夏季 TRL 工况的设计参数为边界条件和验证标准,由计算结果可知,当网格数量在 364 万及以上时,总换热量的模拟计算值与设计值的相对误差已经在 5% 以内,继续增加网格数量不会对模拟结果产生显著影响,故三塔合一间接空冷双塔模型的网格数量确定为 364 万。

表 2 三塔合一间接空冷塔网格无关性验证结果

Table 2 Verification results of grid irrelevance of the three-tower-in-one indirect air-cooling tower

网格 数量/ 10^4	总换热量/MW		相对 误差/%
	模拟计算值	设计值	
186	1 312.4	1 164.1	12.70
280	1 238.5	1 164.1	6.39
364	1 184.9	1 164.1	1.79
439	1 197.2	1 164.1	2.84
470	1 183.5	1 164.1	1.67

1.3 数值计算方法

间接空冷塔的三维流动换热模拟涉及多个复杂的湍流换热过程,为简化计算过程并提高模拟的合理性,可对间接空冷系统的数值模型作出如下假设:

(1)间接空冷系统附近空气的流动视为不可压缩流动,空气密度变化符合理想气体状态方程;

(2)间接空冷系统的换热过程为稳态换热,忽略过程中的辐射换热,并考虑重力和浮升力的影响;

(3)空气流经间接空冷系统固体壁面时不产生滑移。

此外,间接空冷系统的仿真模拟应满足三大守恒定律,包括连续性(质量守恒)方程、动量守恒方程以及能量守恒方程^[22-25]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\mu \text{grad } \mathbf{u}_i) - \nabla p + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad } T\right) + S_T \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; $\mathbf{u}$ 为流体流速; u_i 为第*i*个方向的流体流速; μ 为流体动力黏度; p 为流体压力; T 为流体温度; λ 为流体导热系数; c_p 为流体比定压热容; S_i 和 S_T 分别为动量守恒方程和能量守恒方程的源项。控制方程采用基于压力基的分离式求解方法,选择 Standard $k-\epsilon$ 湍流模型模拟塔内、外复杂的湍流流动^[26-28]。

1.4 模型边界条件

1.4.1 环境边界条件

计算域边界条件如图3所示,将空气流入计算域的边界条件设置为速度入口,除地面和确定的速度入口,剩余侧面和顶面都设置压力出口边界。地面存在摩擦力,会对地面附近的风速产生影响,这种影响随高度降低而增加^[29]。为了模拟实际情况下环境风在竖直方向上的速度分布,引入了等效模型为

$$u_z = u_{10} (z/10)^P \quad (4)$$

式中: u_z 为距离地面 z 处的风速; u_{10} 为距离地面10 m处的风速; z 为距离地面高度; P 为地面粗糙度指数。

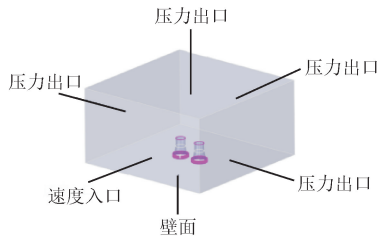


图3 计算域边界条件

Fig. 3 Computational domain boundary conditions

间接空冷系统的塔身尺寸在百米数量级,导致地面大气压力及温度和间接空冷塔出口处大气状态会出现较大区别。为使间接空冷系统的模拟更合适,整个系统所处计算域的大气压力和温度不能视

为定值,故引入大气压力和温度的计算公式。利用用户自定义函数(UDF)导入计算软件,实现对环境压力和环境温度的等效处理,计算式为^[17,30]

$$p_{\text{air-}z} = 1.013 \times 10^6 [1 - (z/44\,300)]^{5.256} \quad (5)$$

$$T_{\text{air-}z} = T_{\text{air-}2} - 0.007(z - 2) \quad (6)$$

式中: $p_{\text{air-}z}$ 为距离地面高度 z 的大气压; $T_{\text{air-}z}$ 为距离地面高度 z 的环境温度; $T_{\text{air-}2}$ 为距离地面2 m的环境温度。

1.4.2 空冷换热器边界条件

根据目标电厂当地所处的气象数据可知,将主导风向西风作为模拟计算的空气流通方向。由于双塔模型中心连线与坐标轴平行,故计算模型中用风向角 α 代替风向, $\alpha=90^\circ$ 代表西风风向。三塔合一间接空冷系统模型主导风向图如图4所示。

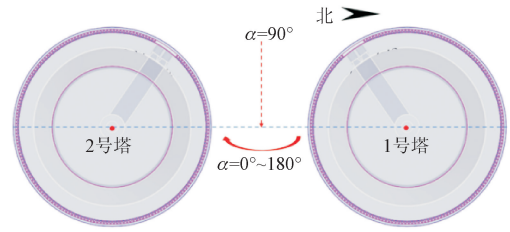


图4 三塔合一间接空冷系统模型主导风向图

Fig. 4 Dominant wind direction diagram of the three-tower-in-one indirect air-cooling system model

本文采用 Fluent 的换热器模型,建立空冷换热器的等效模型。空冷换热器由多个冷却三角组成,每个冷却三角中包含的两个散热翅片管束等效为无厚度平面,并设置为换热器边界。换热器边界的定义需要用到翅片管束的阻力系数 f_{fin} 和换热系数 K_{fin} ,计算式为

$$f_{\text{fin}} = 45.299\,0 (\rho_{\text{air}} v_{\text{air}})^{-0.423\,5} \quad (7)$$

$$K_{\text{fin}} = 33.077\,6 (\rho_{\text{air}} v_{\text{air}})^{0.455\,8} \quad (8)$$

式中: ρ_{air} 为空气密度; v_{air} 为进口空气流速。

1.4.3 百叶窗边界条件

百叶窗位于冷却三角外侧,在计算模型中将其等效为无厚度的多孔压力跳跃边界。该边界的定义需要输入面渗透率 ω ,压力跳跃系数 C_2 ,多孔介质厚度即百叶窗厚度 Δm 。空气流经压力跳跃边界所产生的压降与流速的关系为^[31]

$$\Delta p = \left(\frac{1}{2} C_2 \rho_{\text{air}} v_{\text{air}}^2 + \frac{\mu}{\omega} v_{\text{air}} \right) \Delta m \quad (9)$$

式中: C_2 为压力跳跃系数; ω 为面渗透率; Δm 为多孔百叶窗厚度,根据设计资料取 $\Delta m = 0.1\text{ m}$ 。根据目标电厂的设计文件,对不同百叶窗开度下的空气压降和流速按照式(9)进行拟合,即可得到不同开度

下的 ω 和 C_2 ,将其输入计算中,完成对百叶窗开度的定义。

1.4.4 脱硫塔边界条件

脱硫塔与烟囱布置在三塔合一间接空冷塔内部,脱硫塔和烟囱的高度、烟气的排放速度 v_f 以及温度 T_f 都会对塔内的空气流域产生影响,进而影响整塔的流动换热特性。因此,需将烟气的排气口定义为速度入口,并根据相似机组的烟气排放速度和温度对脱硫系统的速度入口边界参数进行定义,取 $v_f = 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $T_f = 50^\circ\text{C}$ 。

1.5 系统仿真模型

将间接空冷塔和凝汽器看作一个整体进行研究,在两者间流动的循环水是实现系统耦合计算的关键纽带。循环水在凝汽器中吸收蒸汽的热量后流入间接空冷塔,与空气进行热交换,冷却的循环水再次流入凝汽器与蒸汽换热,如此反复循环。忽略管路热损失,满足凝汽器热负荷与空冷塔散热量相等的能量平衡

$$Q_{\text{COND}} = Q_{\text{vapor}} = Q_{\text{water}} = Q_{\text{tem}} = Q_{\text{tower}} \quad (10)$$

式中: Q_{COND} 为凝汽器热负荷; Q_{vapor} 为蒸汽凝结放热量; Q_{water} 为循环水吸收热量; Q_{tem} 为蒸汽与循环水之间的温差传热量; Q_{tower} 为间接空冷塔换热量。

循环水在凝汽器的进、出口温度与其在间接空冷塔的进出口温度分别对应相等

$$\begin{cases} T_{\text{water-out-c}} = T_{\text{water-in-t}} \\ T_{\text{water-in-c}} = T_{\text{water-out-t}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $T_{\text{water-out-c}}$ 为循环水流出凝汽器温度; $T_{\text{water-in-c}}$ 为循环水流入凝汽器温度; $T_{\text{water-in-t}}$ 为循环水流入间接空冷塔温度; $T_{\text{water-out-t}}$ 为循环水流出间接空冷塔温度。

以式(10)和式(11)为基础,分别采用 Fluent 软件对间接空冷塔进行三维数值计算,采用 Matlab 软件对凝汽器进行一维热力计算。结合间接空冷系统的运行机理与互联网通信数据传输方法,搭建 Fluent-Matlab 耦合计算平台,实现间接空冷系统级仿真。间接空冷系统联合仿真模型如图 5 所示^[32]。

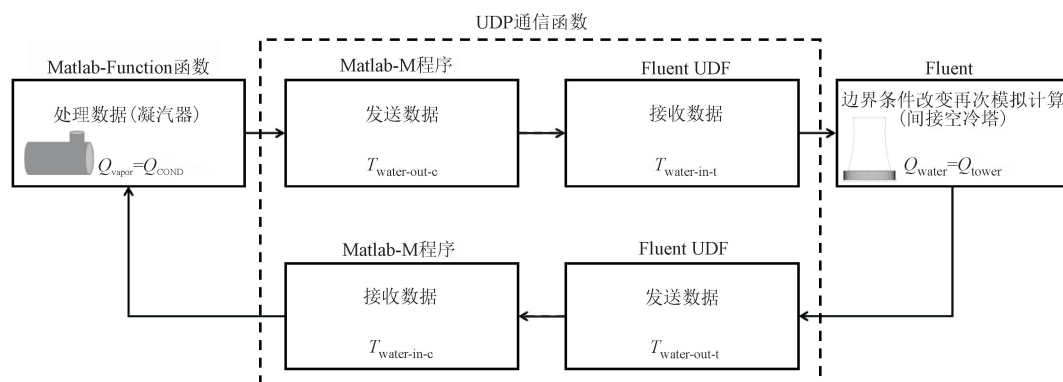


图 5 间接空冷系统联合仿真模型

Fig. 5 Co-simulation model of the indirect air-cooling system

2 模拟计算结果及分析

2.1 系统仿真模型准确性验证

为验证三塔合一间接空冷系统仿真模型的准确性(本文主要针对间接空冷系统的夏季工况进行研究),故选取间接空冷塔和凝汽器在 TRL 工况下的运行参数为边界条件计算换热量。TRL 工况的具体参数如表 3 所示。总换热量、机组压力等运行参数模拟值与设计值的对比结果如表 4 所示。由表中数据可知,间接空冷塔总换热量、机组背压以及循环水进出塔温度的相对误差都在 3% 以内,进而说明间接空冷联合仿真模型在 TRL 工况下的计算精确度较好。

表 3 三塔合一间接空冷系统 TRL 工况计算边界条件

Table 3 Calculation boundary conditions under TRL conditions of the three-tower-in-one indirect air-cooling system

参数	数值
环境风速 $u_{10}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5
环境气温 $T_{\text{air}}/^\circ\text{C}$	32
环境压力 p_{air}/Pa	89 160
循环水流量 $q_{\text{water}}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	21 997.2
$T_{\text{water-in-t}}, T_{\text{water-out-c}}/^\circ\text{C}$	64.2
$T_{\text{water-out-t}}, T_{\text{water-in-c}}/^\circ\text{C}$	51.6
烟气排放温度 $T_f/^\circ\text{C}$	50
烟气排放速度 $v_f/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	28
蒸汽负荷 $q_{\text{vapor}}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	517.3
百叶窗开度/%	100

表4 三塔合一间接空冷系统TRL工况计算结果与标准参数

Table 4 Calculation results and standard parameters of TRL conditions of three-tower-in-one indirect air-cooling system

参数	标准值	计算值	相对误差/%
总换热量 $Q_{\text{tower}}/\text{MW}$	1 164.1	1 196.8	2.810
凝汽器高压侧压力 $p_{\text{k-h}}/\text{kPa}$	28.0	27.3	2.560
循环水进塔温度 $T_{\text{water-in-t}}/^\circ\text{C}$	64.2	63.5	1.160
循环水出塔温度 $T_{\text{water-out-t}}/^\circ\text{C}$	51.6	51.3	0.066

2.2 塔身高度影响分析

选取间接空冷塔塔身高度为190、192、194、196、198、200、202、204以及206 m等9种情况进行模拟计算,其中间接空冷塔塔身设计高度 $H_a=196$ m。

以1号塔为例,不同塔身高度下间接空冷系统的风量、循环水进出塔温度以及机组平均背压变化分别如图6和图7所示。当塔身高度增加时,间接空冷塔风量增加,循环水出塔温度降低,风量增加值以及循环水出塔温度降低值与塔身高度的变化大致呈线性关系。循环水出塔温度的变化使循环水进塔温度和机组平均背压也出现了相同的变化趋势。当塔身高度从190 m增加到206 m时,循环水的进塔温度从64.50℃降低至63.82℃,机组平均背压由24.31 kPa降至23.58 kPa。

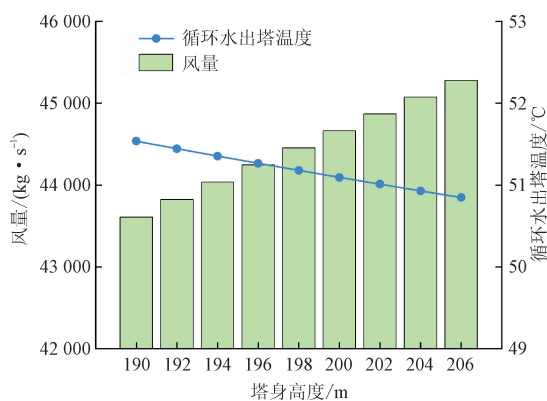


图6 不同塔身高度下间接空冷系统风量和循环水出塔温度
Fig. 6 Air volume, circulating water outlet temperatures of the tower of the indirect air-cooling system under different tower heights

塔身高度所产生的变化趋势是因其会对间接空冷塔的塔内抽力产生影响。一般间接空冷塔的设计需满足塔内空气密度差所产生的抽力与塔内空气流动时所产生的阻力相同^[33]。塔内总抽力 F 一般为

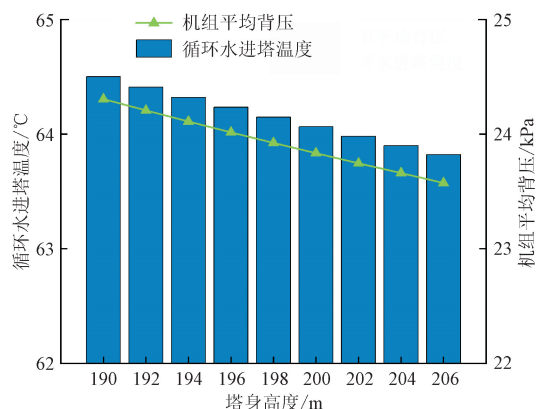


图7 不同塔身高度下间接空冷系统循环水进塔温度、机组平均背压
Fig. 7 Circulating water inlet temperatures of the tower, average unit back pressure of the indirect air-cooling system under different tower heights

3种抽力之和,计算式为

$$F = F_N + F_P + F_W \quad (12)$$

式中: F_N 为间接空冷塔有效高度产生的抽力; F_P 为间接空冷塔出口热空气羽流产生的附加抬升高度抽力; F_W 为间接空冷塔顶部风的射流作用产生的抽力。

在工程实践中,只考虑有效高度产生的抽力 F_N ,其计算式为^[34-35]

$$F_N = H_e g \Delta \rho_{\text{air}} \quad (13)$$

式中: H_e 为间接空冷塔的有效高度,即垂直布置的散热器中心高度与间接空冷塔出口高度的高度差; g 为重力加速度; $\Delta \rho_{\text{air}}$ 为间接空冷塔内部与外部空气的平均密度差^[36]。

由式(13)可知,在外界环境不发生变化时,塔内抽力与有效高度成正比,改变塔身高度等同于改变塔的有效高度,塔内抽力等比例增加,风量等比例增加,由塔内热平衡方程可知,循环水出塔温度下降值也成比例。但是,塔内的流动情况复杂,塔身高度增加导致抽力增大,促使塔内风量增加,强化空冷塔散热能力,进而导致平均密度差减小,对抽力产生反向抑制作用。上述两因素的耦合作用使抽力随塔身高度的增加呈“增幅趋缓”的非线性特征,因而塔身高度对抽力的影响需同时考虑两者的协同变化,而非单一参数的线性关联。对于本文所研究的三塔合一间接空冷系统,塔身高度每增加2 m,风量约增加 $200 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,循环水出塔温度约降低 0.1°C 。

2.3 进风口直径影响分析

以夏季 TRL 工况的运行参数为边界条件,间接空冷塔进风口直径根据设计参数选取 126~138 m 的计算区间,其中进风口设计直径 $D_i = 130.4$ m。以 1 号塔为例,不同进风口直径下间接空冷系统的风量和循环水进出塔温度以及机组平均背压变化分别如图 8 和图 9 所示。

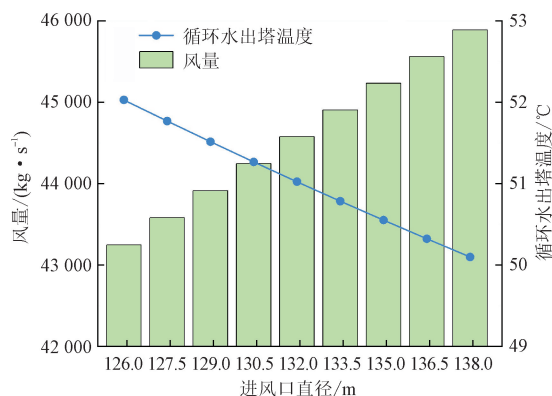


图 8 不同进风口直径下间接空冷系统风量和循环水出塔温度
Fig. 8 Air volume, circulating water outlet temperatures of the tower of the indirect air-cooling system under different air inlet diameters

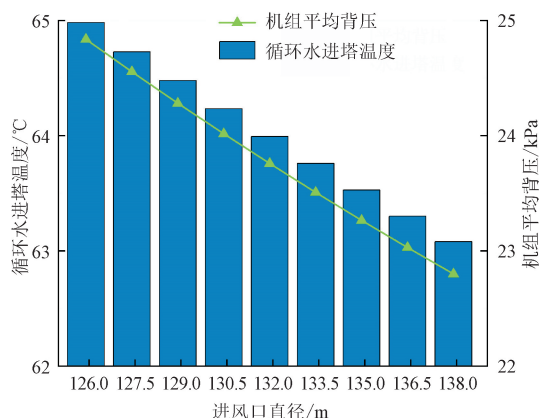


图 9 不同进风口直径下间接空冷系统循环水进塔温度和机组平均背压
Fig. 9 Circulating water inlet temperatures of the tower, average unit back pressure of the indirect air-cooling system under different air inlet diameters

进风口直径的变化与冷却三角数量的变化线性相关。故改变进风口直径的直接效果是改变进气面积和换热面积,进而使风量和循环水换热温差作出相应改变。从塔内热平衡公式可知,这些变量都是呈线性关系,但由于塔内空气密度的改变、塔内脱硫塔的阻碍作用等因素,使进风口直径与风量、循环水

出塔温度之间的变化量表现出线性趋势。当进风口直径从 126 m 增加至 138 m 时,循环水进塔温度由 64.98 °C 降至 63.08 °C,机组平均背压由 24.84 kPa 降至 22.80 kPa。

研究表明,机组背压降低 1 kPa,火电机组热耗指标减少 $30 \text{ kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,煤耗指标减少 $1 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ [37]。由此可见,塔身高度或者进风口直径的增加都会对火电机组的运行产生积极影响,降低机组背压进而降低热损耗和煤损耗。但是,增加塔身高度和进风口直径会带来建筑成本等前期投资成本增加,故从经济性角度出发,应综合考虑增加成本与增加高度和直径带来的收益,选择较为合适的塔型结构设计方案。

2.4 排烟高度影响分析

根据脱硫塔的设计高度,选取脱硫塔高度为 35~50 m 的计算区间对三塔合一间接空冷系统进行仿真模拟,其中脱硫塔设计高度 H_{st} 为 40 m,烟囱设计高度 H_{ct} 为 20 m。脱硫塔高度变化时烟囱高度按照其设计参数的比例变化,烟气排放高度为脱硫塔高度和烟囱高度之和。不同排烟高度的间接空冷塔网格模型如图 10 所示,排烟高度分别为 52.5、60、67.5、75 和 82.5 m。

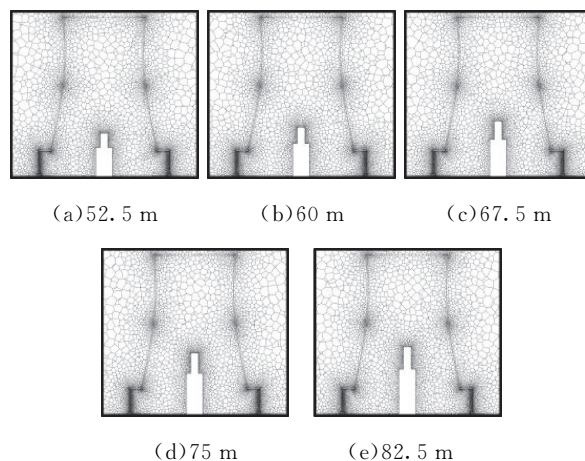


图 10 不同排烟高度的间接空冷塔网格模型

Fig. 10 Grid model of indirect air-cooling towers with different smoke exhaust heights

图 11 为不同脱硫塔高度下三塔合一间接空冷系统的机组平均背压。随着脱硫塔高度的增加,1 号机组与 2 号机组的平均背压的变化趋势很小,故在工程设计过程中可以认为脱硫塔高度的变化几乎不会对间接空冷系统的流动换热及运行性能产生影响,此结论与周二奇、席新铭等的研究结果相同 [11-12,38]。

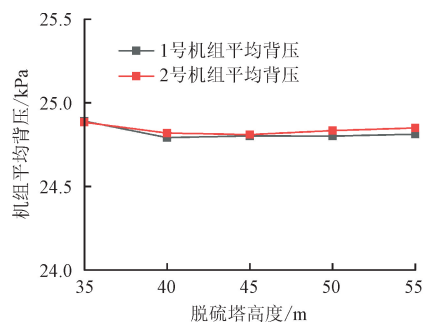


图 11 不同脱硫塔高度下间接空冷系统的机组平均背压
Fig. 11 Average back pressure of the unit of the indirect air-cooling system at different desulfurization tower heights

2.5 排烟面积影响分析

当火电机组排放的烟气流量保持不变时,烟囱面积通过影响烟气排放速度使间接空冷塔抽吸力变化,进而影响其流动换热性能。本研究通过改变烟囱直径来改变烟囱面积,对不同烟囱直径下的三塔合一间接空冷系统进行仿真计算,分析其运行特性的变化。不同烟囱直径下的间接空冷塔网格模型如图 12 所示,烟囱直径分别为 6.5、7.5、8.5、9.5 和 10.5 m,烟囱的设计直径为 9.5 m,其余边界条件与 TRL 工况的设计参数一致。

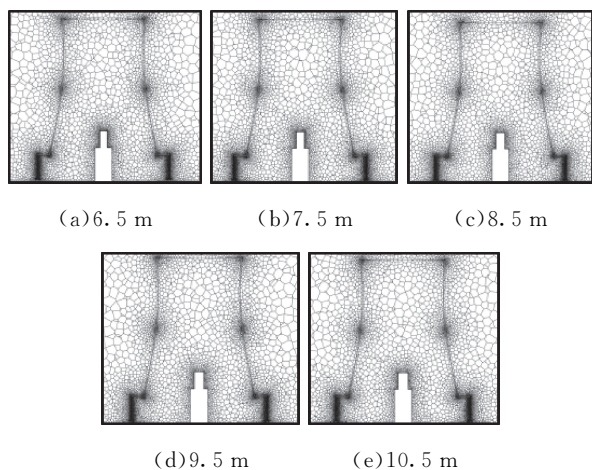


图 12 不同烟囱直径的间接空冷塔网格模型

Fig. 12 Grid model of indirect air-cooling towers with different chimney diameters

以 1 号塔为例,不同烟囱直径下间接空冷系统的塔内风量和空气平均温度如图 13 所示。随着烟囱直径的增大,塔内风量逐渐减少,塔内空气平均温度增加,其原因是烟囱面积增大,烟气排放速度下降,使塔抽吸力下降,导致风量下降和塔内空气平均温度上升。当烟囱直径从 6.5 m 减少到 10.5 m 时,

风量减少了 $1\,545.15\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,塔内空气平均温度升高了 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明烟囱面积对塔流动换热性能存在一定影响。当烟囱直径越来越大时,风量和塔内空气平均温度的变化趋势越来越平缓,说明在大烟囱直径下,烟囱直径对塔抽吸力的调节作用较小。

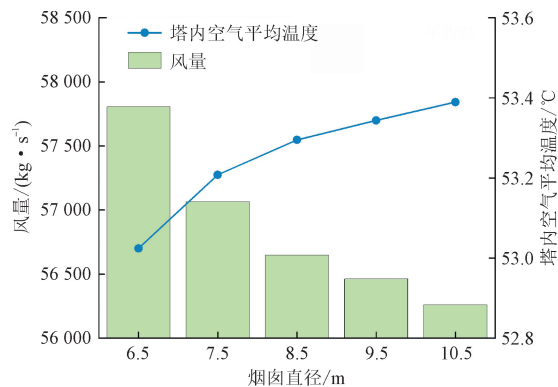


图 13 不同烟囱直径下间接空冷系统塔内风量和空气平均温度

Fig. 13 Air volume and average air temperature in the tower of indirect air-cooling system under different chimney diameters

图 14 给出了间接空冷系统循环水进塔温度和机组平均背压随烟囱直径的变化趋势。由图可知,循环水进塔温度和机组平均背压都会随着烟囱直径的增加而增加。原因是,烟囱直径增加,在排烟流量不变的情况下,排烟速度降低使塔内抽吸力减小,塔内空气平均温度增加会使循环水换热温度增加,循环水出塔温度增加,导致机组背压升高。烟囱直径从 6.5 m 增加到 10.5 m 时,机组平均背压增加了 0.37 kPa 。机组背压随烟囱直径的增加变化趋势逐

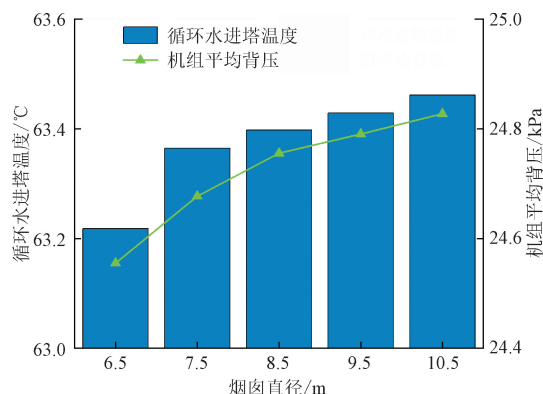


图 14 不同烟囱直径下间接空冷系统循环水进塔温度和机组平均背压

Fig. 14 Circulating water inlet tower temperature and average back pressure of the unit under different chimney diameters

渐平缓,这表明排烟面积越大,烟囱面积对机组背压所产生的影响越小。在工程实践过程中,设计排烟面积越小对机组背压的影响越大,当系统所需的排烟面积较小时,可通过调整烟囱直径对机组背压进行适当调节。

3 结 论

本文以三塔合一间接空冷系统为研究对象,根据北方某电厂布局构建仿真模型,基于夏季TRL工况验证模型后开展模拟,探究塔身高度、进风口直径、排烟高度、排烟面积等结构参数对系统夏季运行特性的影响,得到的主要结论如下。

(1)间接空冷系统运行特性受塔身高度与进风口直径影响,两者增大均有助于改善系统运行状态,塔身高度和进风口直径各增加16 m和12 m,机组背压分别降低0.73 kPa和2.04 kPa。

(2)针对三塔合一间接空冷系统夏季运行特性,分析不同排烟高度的影响发现,当排烟高度从52.5 m增至82.5 m时,机组背压变化浮动较小,在工程实际应用中可忽略不计。

(3)排烟面积通过决定排烟速度来影响机组背压,烟囱直径从6.5 m增加到10.5 m时,机组背压增加了0.37 kPa,增加趋势随着烟囱直径增大逐渐平缓,烟囱面积越大对机组背压所产生的影响越小。

(4)结合工程建设实际,塔身高度与进风口直径增加会导致投资成本上升,且进风口直径增大会额外增加塔体占地面积。因此,对于同类型三塔合一间接空冷系统,综合权衡投资成本与运行收益,建议塔身高度和进风口直径应当向上取值,烟囱直径应当向下取值。

参考文献:

- [1] 杨阳,金杰,刘宝民,等.联合循环机组蒸汽轮机冷端系统运行优化研究[J].机电信息,2023(2): 15-17.
Yang Yang, Jin Jie, Liu Baomin, et al. Study on operation optimization of steam turbine cold end system in combined cycle units [J]. Mechanical and Electrical Information, 2023(2): 15-17.
- [2] 王克.大型火电机组汽轮机冷端系统优化改造技术浅析[J].特种设备安全技术,2022(5): 14-16.
Wang Ke. Brief analysis on optimization and transformation technology of steam turbine cold end system in large-scale thermal power units [J]. Safety Technology of Special Equipment, 2022(5): 14-16.
- [3] 师进文,高凡翔,邹洋,等.电站空冷技术:研究现状及建议[J].西安交通大学学报,2023,57(7): 20-37.
Shi Jinwen, Gao Fanxiang, Zou Yang, et al. Air cooling technology for power stations: research progress and perspectives [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(7): 20-37.
- [4] 王明伟,刘天天,高琦,等.填料蒸发预冷进风的机械通风空冷塔设计及其运行性能[J].中国电力,2024,57(6): 225-234.
Wang Mingwei, Liu Tiantian, Gao Qi, et al. Design and operating performance of mechanical draft dry cooling tower pre-cooled with wet medium [J]. Electric Power, 2024, 57(6): 225-234.
- [5] 谢轶.浅谈我国水资源分布和生态红线[J].现代农业研究,2020,26(3): 143-144.
Xie Yi. On the distribution of water resources and ecological red line in China [J]. Modern Agriculture Research, 2020, 26(3): 143-144.
- [6] 王新宇,史建良,李国宝,等.间接空冷和直接空冷系统技术经济分析[J].热力发电,2010,39(8): 1-3.
Wang Xinyu, Shi Jianliang, Li Guobao, et al. Technical and economical analysis of indirect air-cooled system and direct air-cooled system [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(8): 1-3.
- [7] 刘昆.三塔合一间接空冷系统变工况运行特性研究[D].北京:华北电力大学(北京),2021.
- [8] 马义伟,高延生,玉炜,等.电厂空冷技术的进展[J].中国电力,1996,29(2): 3-5.
Ma Yiwei, Gao Yansheng, Yu Wei, et al. Dry cooling technology progress of thermal power plants [J]. Electric Power, 1996, 29(2): 3-5.
- [9] Ma Huan, Si Fengqi, Li Lan, et al. Effects of ambient temperature and crosswind on thermo-flow performance of the tower under energy balance of the indirect dry cooling system [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78: 90-100.
- [10] 郭浩.三塔合一间接空冷塔优化研究[D].保定:华北电力大学(保定),2017.
- [11] 周二奇,陈龙,郝颖,等.四塔合一式间接空冷塔传热性能的数值研究[J].电力科学与工程,2016,32(1): 12-16.
Zhou Erqi, Chen Long, Hao Ying, et al. Numerical research on heat transfer performance of the four in one type indirect air cooled tower [J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(1): 12-16.
- [12] 周二奇,陈龙,侯艳峰.660 MW机组四合一式空冷塔变工况运行的数值模拟[J].电站辅机,2016,37(2): 4-8.

- Zhou Erqi, Chen Long, Hou Yanfeng. Numerical research on changing operation of 660 MW unit of four in one type indirect air cooled tower [J]. *Power Station Auxiliary Equipment*, 2016, 37(2): 4-8.
- [13] 赵文升, 郭浩, 宋百川. 三塔合一间接空冷塔结构优化研究 [J]. *汽轮机技术*, 2017, 59(4): 257-260.
- Zhao Wensheng, Guo Hao, Song Baichuan. Structure optimization for an indirect air cooling tower with three incorporate towers [J]. *Turbine Technology*, 2017, 59(4): 257-260.
- [14] 张军峰. 间接空冷机组“三塔合一、四位一体”技术应用研究 [J]. *价值工程*, 2019, 38(25): 173-175.
- Zhang Junfeng. Research on the application of “three towers in one, four in one” technology of indirect air cooling unit [J]. *Value Engineering*, 2019, 38(25): 173-175.
- [15] Yang Shuo, Wang Guofeng, Yang Xinle, et al. Numerical study on smoke plume for natural draft cooling tower with flue gas injection [M]//*Environment, Energy and Earth Sciences*. [S. l.]: Destech Publicat Inc., 2018: 135-140.
- [16] 孔德满, 袁益超. 三塔合一间接空冷塔换热能力与烟气扩散的数值模拟 [J]. *热能动力工程*, 2020, 35(3): 193-200.
- Kong Deman, Yuan Yichao. Numerical simulation of heat transfer capacity and flue gas diffusion in an indirect air cooling tower with three incorporate towers [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2020, 35(3): 193-200.
- [17] 刘秣含. 三塔合一间接空冷系统内部结构优化 [J]. *现代工业经济和信息化*, 2021, 11(1): 135-137.
- Liu Mohan. Optimization of internal structure of three-tower integrated air cooling system [J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2021, 11(1): 135-137.
- [18] 李金芳, 韩高岩, 谢娜, 等. 三塔合一间接空冷塔烟气流动特性研究 [J]. *浙江电力*, 2023, 42(2): 106-116.
- Li Jinfang, Han Gaoyan, Xie Na, et al. Characteristic study on flue gas of a “three-in-one” indirect air cooling tower [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2023, 42(2): 106-116.
- [19] Chen Renjun, Zhang Li, Wang Tianci. Numerical study on improving the cooling performance of indirect dry cooling tower by pre-cooling with moist media [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2025, 2932(1): 012023.
- [20] 蔡宁宁. 间接空冷塔内机械通风夏季增效研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [21] 宰相. 耦合热泵供暖的电厂冷端系统优化 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2011.
- [22] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 1-21.
- [23] Drikakis D, Frank M, Tabor G. Multiscale computational fluid dynamics [J]. *Energies*, 2019, 12(17): 3272.
- [24] Yilmaz D. Computational fluid dynamics modeling of surface condensation [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(7): 351.
- [25] 李晓宇, 陶文铨. 干湿工况平直翅片传热传质特性数值模拟 [J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(4): 1034-1040.
- Li Xiaoyu, Tao Wenquan. Numerical investigation of heat and mass transfer characteristics of plain fin under both dry and wet condition [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(4): 1034-1040.
- [26] Rezaei B, Seif M M. Numerical study of flow in skewed compound channel using $k-\epsilon$ turbulence model [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2022, 46(5): 3919-3929.
- [27] 郭烈锦, 张鸣远, 郭秀丽. 气-液两相泡状流 $K-\epsilon$ 紊流模型 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 1994, 9(2): 234-243.
- Guo Liejin, Zhang Mingyuan, Guo Xiuli. A $K-\epsilon$ turbulent model for gas-liquid two-phase bubbly flow [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1994, 9(2): 234-243.
- [28] 张航, 吕友军. 超临界水循环流化床两相流动特性的数值模拟 [J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(1): 127-132.
- Zhang Hang, Lü Youjun. Numerical simulation on two-phase flow characteristics in the supercritical water circulating fluidized bed riser [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(1): 127-132.
- [29] 李非, 路婷婷, 吴正人, 等. 空冷岛对周围大气流场影响数值模拟 [J]. *热力发电*, 2016, 45(11): 82-87.
- Li Fei, Lu Tingting, Wu Zhengren, et al. Numerical simulation on influence of air-cooling island on the atmosphere flow field [J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(11): 82-87.
- [30] 王志军, 宋立军. 利用遗传算法求大气压强精确公式 [J]. *长春大学学报*, 2001, 11(5): 31-33.
- Wang Zhijun, Song Lijun. Evaluating precise formula of atmospheric pressure by using genetic algorithms [J]. *Journal of Changchun University*, 2001, 11(5): 31-33.
- [31] Ansys Inc. ANSYS fluent user's guide [M]. Canonsburg, USA: Southpointe, 2021: 1310-1311.
- [32] 鲍文, 李伟鹏, 常军涛, 等. 基于 FLUENT/MAT-

- LAB接口的分布参数系统闭环控制仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(11): 2851-2854.
- Bao Wen, Li Weipeng, Chang Juntao, et al. Closed-loop control simulation technology of distributed parameter system based on FLUENT/MATLAB interface [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(11): 2851-2854.
- [33] Li Lujun, Zhao Shunan, Song Xiaojun. Numerical simulation of influence of arrangement of flue gas discharge devices on performances of indirect dry air cooling tower [J]. Heat Transfer Engineering, 2017, 38(11/12): 1117-1126.
- [34] 孙蔓蔓, 卫慧敏, 杨立军, 等. 间接空冷自然通风冷却塔抽力计算公式 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 859-866.
- Sun Manman, Wei Huimin, Yang Lijun, et al. Investigation on draft equation for natural draft dry cooling tower [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 859-866.
- [35] Liao H T, Yang L J, Du X Z, et al. Influences of height to diameter ratios of dry-cooling tower upon thermo-flow characteristics of indirect dry cooling system [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 94: 178-192.
- [36] 西北电力设计院. 电力工程水务设计手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [37] 舒吉龙, 冯璟, 安源, 等. 火力发电厂间接空冷系统优化设计 [J]. 电力勘测设计, 2021(S1): 42-46.
- Shu Jilong, Feng Jing, An Yuan, et al. Optimization design of natural draft indirect dry cooling system in thermal power plant [J]. Electric Power Survey & Design, 2021(S1): 42-46.
- [38] 席新铭, 王梦洁, 杜小泽, 等. “三塔合一”间接空冷却塔内空气流场分布特性 [J]. 中国电机工程学报, 2015(23): 6089-6098.
- Xi Xinming, Wang Mengjie, Du Xiaoze, et al. Airflow field characteristics in indirect dry cooling tower of three incorporate towers system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015(23): 6089-6098.

(编辑 杜秀杰)