

DOI: 10.19666/j.rlfed.202502026

空冷单元内外空气流场重构对其系统 冷却性能的影响

李旋¹, 李禹江¹, 韩强¹, 周飞², 米玉鸿³, 秦春莹^{4,5}, 赵元宾⁵

(1.山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013;

2.江苏省国信研究院有限公司, 江苏 南京 210005;

3.嘉峪关宏晟电热有限责任公司, 甘肃 嘉峪关 735100;

4.宁夏电投永利能源有限公司, 宁夏 银川 751400;

5.山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061)

[摘要] 直接空冷系统作为火电机组核心的热力循环末端, 其运行效能受电厂地理位置及周边环境参数的显著制约。以某电厂直接空冷系统为原型, 建立空冷系统及周边建筑物、山体环境的三维数值模型, 提出针对空冷岛迎风侧或换热不利单元的复合防风措施, 探究适用性强、效果佳的直接空冷系统防风措施与优化机制, 分析空冷单元内外空气流场重构对直接空冷系统冷却性能的影响。结果表明: 直接空冷单元内部和外部防风措施的设置可有效改善机组的热力性能, 风速 5 m/s 时, 大十字墙挡风对空冷岛换热性能改善效果较好, 散热器迎面风速升高了 0.24 m/s, 散热器表面温度降低了 2.40 °C; 空冷单元内外空气流场重构后, 直接空冷系统散热器表面平均温度最高降低 5.77 °C, 背压最高降低 2.92 kPa。空冷单元内外空气流场重构可显著改善直接空冷系统冷却效果, 提高电站冷端系统的运行性能, 未来直接空冷系统导流装置的优化设计可聚焦于流场均匀性改善。

[关键词] 直接空冷系统; 冷却特性; 防风措施; 数值模拟; 机组背压

[引用本文格式] 李旋, 李禹江, 韩强, 等. 空冷单元内外空气流场重构对其系统冷却性能的影响[J]. 热力发电, 2025, 54(11): 151-160. LI Xuan, LI Yujiang, HAN Qiang, et al. Influence of air flow field reconstruction inside and outside the air cooling unit on cooling performance of the system[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(11): 151-160.

Influence of air flow field reconstruction inside and outside the air cooling unit on cooling performance of the system

LI Xuan¹, LI Yujiang¹, HAN Qiang¹, ZHOU Fei², MI Yuhong³, QIN Chunying^{4,5}, ZHAO Yuanbin⁵

(1.Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China;

2.Jiangsu Guoxin Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210005, China;

3.Jiayuguan Hongsheng Electric Heating Co., Ltd., Jiayuguan 735100, China;

4.Ningxia Power Investment Yongli Energy Co., Ltd., Yinchuan 751400, China;

5.College of Nuclear Science and Energy Power, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: As the core of thermal power units, the operation efficiency of the direct air cooling system is significantly restricted by the geographical location of the power plant and the surrounding environmental parameters. Taking the direct air cooling system of a power plant as the prototype, a three-dimensional numerical model of the air cooling system and the surrounding buildings and mountain environment is established, and the composite wind prevention measures for the windward side of the air cooling island or the units with unfavorable heat transfer are proposed. The windproof measures and optimization mechanism of the direct air cooling system with strong

收稿日期: 2025-02-28

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程(2022TSGC1026)

Supported by: Shandong Province's Project for Promoting the Innovation Capability of Science and Technology-based Small and Medium-sized Enterprises (2022TSGC1026)

第一作者简介: 李旋(1982), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电厂水工工艺设计, lixuan@sdepcci.com。

通信作者简介: 赵元宾(1981), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为高效能量转换及节能技术, zhyb@sdu.edu.cn。

applicability and good effect are explored, and the influence of air flow field reconstruction inside and outside the air cooling unit on the cooling performance of the direct air cooling system is analyzed. The results show that the internal and external wind-proof measures of the direct air-cooled unit can effectively improve the thermal performance of the unit. When the wind speed is 5 m/s, the large cross wall windshield has a good effect on improving the heat transfer performance of the air-cooled island. The frontal wind speed of the radiator increases by 0.24 m/s, and the surface temperature of the radiator reduces by 2.40 °C. After the reconstruction of the air flow field inside and outside the air cooling unit, the average surface temperature of the radiator in the direct air cooling system reduces by 5.77 °C, and the back pressure reduces by 2.92 kPa. The reconstruction of the air flow field inside and outside the air cooling unit can significantly improve the cooling effect of the direct air cooling system and improve the operating performance of the cold end system of the power station. In the future, the optimization design of the diversion device of the direct air cooling system can focus on the improvement of the uniformity of the flow field.

Key words: direct air cooling system; cooling characteristics; windproof measures; numerical simulation; unit back pressure

“双碳”背景下，直接空冷系统以其优异的节水性能，在全球范围内尤其是在水资源紧张的富煤地区，正逐渐成为工业冷却的首选方案^[1-2]。尽管直接空冷系统具有耗水少的优点，但其也存在机组运行背压高、能耗大等问题^[3-4]，尤其在夏季高温或环境风的条件下，可能导致汽轮机背压过高，机组运行效率降低。因此研究直接空冷岛受周围环境影响下的运行性能，对提升火电厂的整体能效、实现“双碳”目标、节能减排等方面具有重要的工程价值。

实际生产中，为降低环境风力对直接空冷系统性能的不利影响，通常会采取增设风场导流调控装置这一策略^[5-6]。众多学者为改善环境风对直接空冷系统的不利影响做了大量研究工作，提出了很多改进措施。Borghesi 等人^[7]提出了在空冷单元四周加装导流装置的方法，结果表明导流装置提升了空冷单元的换热性能。Owen 等人^[8]研究了空冷岛加装挡风墙的流场情况，结果表明加装后明显提升了空冷系统流动换热性能。Venter 等人^[9]研究发现在空冷平台和环境风速较高时布置外围多孔挡风板可以有效改善直接空冷系统性能。王金平等^[10]提出设置喷淋装置、延伸挡风墙、加装导流装置、提高散热器的冲洗质量是保证直接空冷机组夏季高温安全经济运行的重要措施。李文毓^[11]通过在空冷岛平台内部加装十字防风网，改善了空冷凝汽器的换热效率。程友良等^[12]提出了在空冷单元内部加装弯叶式导流板的方法，结果表明弯叶式导流板可以使散热器出口温度分布更加均匀。呼浩等^[13]提出在风机出口处设置导流板优化措施，研究结果表明加装后优化了空冷单元管束换热不均的现象。Gao 等人^[14]提出在空冷平台下方安装导流板，发现导流板向外倾斜角度为 45°时，直接空冷系统换热效果最好。郑

春波^[15]提出在直接空冷系统四周加装导流网，发现加装后明显改善了山环境风引起的热风回流现象。高沛^[16]探究了空冷岛挡风墙下加装防风网的情况，结果表明防风网加装后能显著改善空冷凝汽器的换热性能，环境风速为 6 m/s 时，风机进气量最高增加了 4.6%。严鹏航^[17]研究了在空冷岛靠近来流侧加装导流装置的情况，结果表明该方式减小了热风回流的影响，提高了空冷岛流场的流动换热能力。崔超等^[18]提出了外部复合导流装置：一部分为布置在平台四周向外倾斜 60°的导流板，另一部分为呈“井”字布置在风机下侧的垂直导流板，结果表明复合导流装置的安装明显提高了直接空冷系统的冷却空气质量流量和换热量，风速越大，导流板的改善效果幅度越大。李涛等^[19]研究了空冷单元内部和外部同时加装平直矩形导流板的情况，结果表明加装后，风速 2 m/s 时进风量最高增加了 1.5%，散热器出口平均温度最高降低了 3 °C 左右。

综上所述，加装风场导流调控装置可以提高直接空冷系统的冷却能力，有利于机组安全经济运行。目前，学者们大多研究的是直接空冷单元内部或外部单一设置防风措施的情况，对空冷单元内部和外部同时设置防风措施的研究较少，且复合装置仅研究内部风机出口导流和外部垂直导流的影响。基于此，本文针对性提出空冷单元风机隔墙间均流及外部倾斜防风装置，优选复合防风措施，探究空冷单元内外空气流场重构对直接空冷系统冷却性能的影响，旨在为直接空冷系统导流装置的优化提供有力的技术支撑。

1 研究模型

本文以我国某电厂直接空冷系统为原型，根据

厂区总平面布置条件和气象条件，基于给定散热量，对厂区建构物及周边山体等复杂山体环境下直接空冷系统冷却特性及其防风措施展开数值模拟计算研究。

1.1 几何模型

本文选取环境温度为 32 °C 时的夏季工况为研究对象，该工况下，机组的运行参数见表 1，结合厂区总平面图山体及数值计算要求，建立空冷岛及周围建筑物几何模型如图 1 所示，直接空冷岛模型如图 2 所示。空冷岛系统空冷凝汽器采用防冻 M 型布置直接空冷凝汽器系统，布置在主厂房 A 排第 1 排散热器外，每台机组设 56 个冷却单元，为 7×8 布置方案。沿第 1 排方向布置 7 列空冷器，每列为 8 个冷却单元，其中 6 个为顺流单元，2 个为逆流单元。空冷平台高 45 m，挡风墙高度 14.34 m，走廊宽度分别为 1.5 m 和 2.0 m。

表 1 机组运行参数
Tab.1 Operating parameters of the unit

项目	数值
环境温度/°C	32
汽轮机排汽量/(kg·s ⁻¹)	1 184
排汽焓/(kJ·kg ⁻¹)	2 561.2
汽轮机排汽压力/kPa	25
汽轮机排热量/MW	758
散热量/MW	758

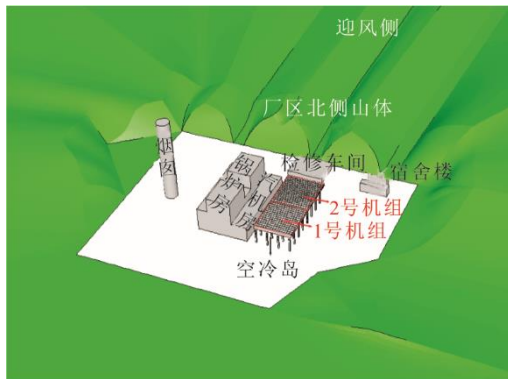
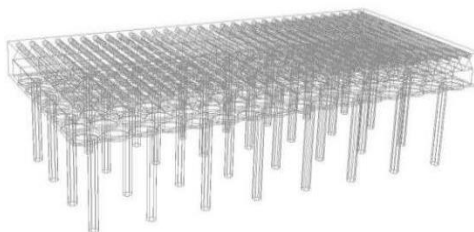
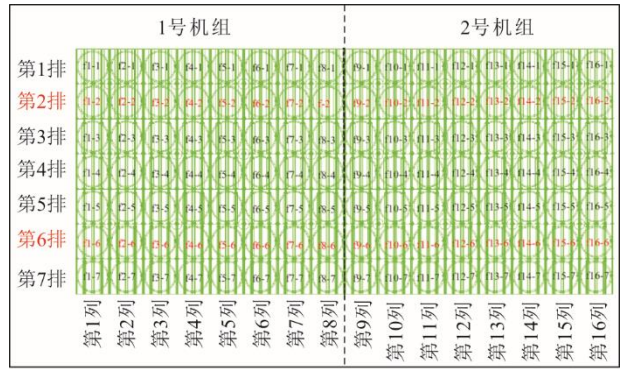


图 1 空冷岛及周围建筑物几何模型
Fig.1 Geometric modelling of the air-cooled island and surrounding buildings



a) 空冷岛整体模型



b) 空冷风机布置示意

图 2 空冷岛模型
Fig.2 The air-cooled island model

1.2 网格划分

以空冷岛西侧中心位置为模型坐标原点，确定整个计算域，计算域近似为底面直径为 2 600 m、高为 2 000 m 的圆柱，包含了空冷岛及其周围主要建筑物和山体模型，空冷平台区域采用四面体网格进行网格划分，四周区域采用六面体网格进行网格划分，对风机进风口处和散热器上方进行网格加密，网格划分如图 3 所示。

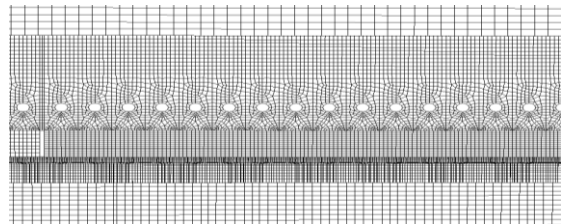


图 3 网格划分示意
Fig.3 Schematic diagram of grid division

1.3 数学模型

1.3.1 控制方程

在给环境气象条件、运行工况下，认为直接空冷岛处于稳定运行状态，计算域内空气的流动为不可压缩定常流动，采用时均 Navier-Stokes 控制方程描述其流动特性，其中雷诺应力平均项采用 RNG $k-\epsilon$ 模型进行湍流封闭，控制方程的通用形式^[20]可表示为：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中：各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项； ρ 为密度，kg/m³； u 为速度矢量，m/s； ϕ 为通用变量； Γ_ϕ 为 ϕ 对应的广义扩散系数； S 为广义源项。

1.3.2 风机模型

风机在模型中采用风扇模型（FAN），风扇模

型是集总模型，可用于确定具有已知特征的风扇对大流域流场的影响。数值模拟时风扇假设为无限薄，风扇的压升可表示为流速的函数^[21]，其关系式^[22]为：

$$\Delta p_{fan} = \sum_1^n f_n v^{n-1} \quad (2)$$

式中： Δp_{fan} 为压力升高，Pa； f_n 为压力跳跃多项式系数； v 为垂直于风扇的当地流体速度，m/s，既可以是正也可以是负。

1.3.3 翅片管散热器模型

采用 radiator 模型描述空气通过散热器时的压降和对流换热过程。Radiator 模型中压降的计算公式^[23-24]为：

$$\Delta p_{hxg} = K_L \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (3)$$

式中： Δp_{hxg} 为压降，Pa； K_L 为阻力系数； v_1 为垂直于多孔面的空气流速，m/s。

1.4 边界条件

无环境风时，设置圆柱计算域侧面为压力入口，计算域顶面为压力出口；侧风条件下，设置迎风面为速度入口，背风面及计算域顶面为压力出口，计算域如图 4 所示。

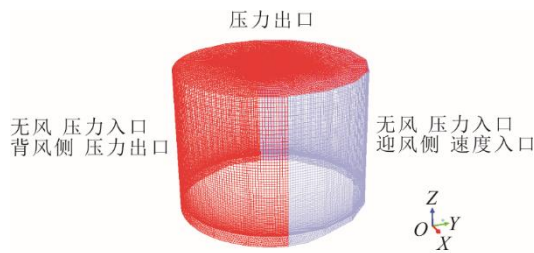


图 4 计算域示意

Fig.4 Schematic diagram of the computational domain

侧风条件下，入口边界条件采用速度入口边界条件，本计算采用大气边界函数^[25]：

$$\frac{U_i}{U_\infty} = \left(\frac{Z_i}{Z_\infty} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中： Z_∞ 为气流达到均匀时的速度，m/s； U_∞ 为 Z_∞ 处来流平均风速，m/s； Z_i 为任意高度，m； U_i 为 Z_i 处平均速度，m/s； α 为壁面粗糙系数。

根据具体情况选择以上参数，由自定义函数（UDF）加载计算。出口边界条件选用压力出口边界条件，根据大气压与海拔高度的关系给定流动出口边界上的静压。无风条件下，计算域的顶部边界被设置为压力出口 Pressure Outlet；有风条件下，背风侧被设置为压力出口。回流空气温度为环境温度，回

流方向为 From Neighboring Cell。出口边界上的静压通过式(5)规定。

$$p = 1013.25e^{-a/7.926} \quad (5)$$

式中： p 为大气压，hPa； a 为海拔高度，m。

1.5 模型验证

本文分别建立了总网格数分别为 391 万、425 万、457 万和 600 万的 4 套网格系统，得到对应散热器表面迎面风速分别为 3.24、3.28、3.31、3.32 m/s，网格数从 391 万到 457 万时，散热器表面迎面风速变化幅度较大，但网格数增加到 600 万，与网格数 457 万相比散热器表面迎面风速基本不变，由于本文所用模型计算区域很大，为确保计算精度同时节省计算成本，本文选取 457 万网格数进行模拟计算。

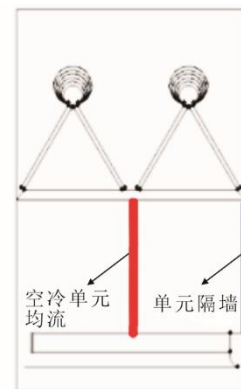
以空冷系统排汽装置出口处背压作为有效性验证参数，对模型进行有效性验证，将电厂设计工况数据与模拟结果比较（表 2）。由表 2 可知，模型相对误差小于 5%，误差在允许范围内，说明模型具有可靠性。

表 2 有效性验证
Tab.2 Validity verification

项目	背压 (32 °C) /kPa	背压 (37 °C) /kPa
设计工况	26.12	32.30
模拟工况	26.56	31.14
相对误差	1.68%	3.72%

1.6 防风措施设置

基于复杂山体影响，针对空冷岛迎风侧或换热不利单元布置适用于直接空冷系统的防风措施，设计了 5 种防风措施（图 5），分别为：1）空冷单元均流（防风措施 1）；2）外围上倾斜消涡（防风措施 1）；3）外围下倾斜消涡（防风措施 3）；4）迎风侧挡风（防风措施 4）；5）大十字墙挡风（防风措施 5）。



a) 空冷单元均流（防风措施1）

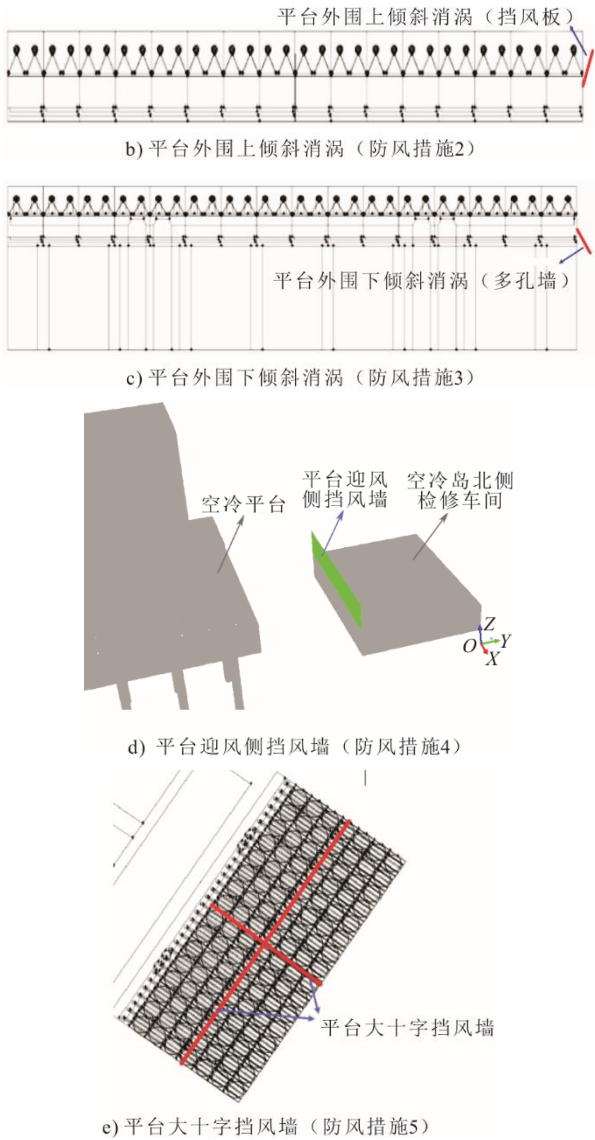


图 5 防风措施布置示意

Fig.5 Schematic layout of wind protection measures

2 防风措施对空冷岛换热性能的影响

本研究主要考虑夏季高负荷运行工况及厂区北侧山体环境不利影响，故数值模拟过程中采取TRL设计工况与夏季主导风向NE（东北风）作为计算条件，为保证管束迎面风速达到设计工况风速2.23 m/s，选取TRL设计环境自然风风速5 m/s进行了多/无防风措施对直接空冷系统换热性能作用效果的数值模拟。

2.1 单一防风措施

分别针对5种防风措施进行了独立防风效果的模拟计算，得到计算结果见表3、表4。2号机组靠近北侧山体，受山体影响较大，因此本研究重点分析2号机组的换热性能。由表4可知，大十字墙挡风对空冷岛2号机组散热器迎面风速和散热器表面

温度的改善效果均最优，散热器迎面风速升高了0.24 m/s，表面温度降低了2.40 °C，其次为空冷单元均流、外围下倾斜涡流。因此筛选大十字墙挡风、空冷单元均流、外围下倾斜涡流防风措施作为优选防风措施。由表3可知，大十字墙挡风对1号机组的换热性能产生不利影响。大十字墙作用下1号机组散热器风速分布云图如图6所示。结合图6可知，主要是因为十字墙分割处影响1号机组风机进风，进风流场出现旋涡，产生了空气绕流现象，导致其散热器换热性能降低，换热器表面温度升高。

表 3 防风措施对空冷系统 1 号机组换热性能的影响
Tab.3 Influence of windproof measures on heat transfer performance of No.1 unit in air cooling system

防风措施	散热器迎面风速/(m·s ⁻¹)	散热器表面温度/°C	温度降低幅度/°C
无防风措施	3.54	44.40	0
空冷单元均流	3.62	42.94	1.46
外围上倾斜涡流	3.55	44.47	-0.07
外围下倾斜涡流	3.58	44.12	0.28
迎风侧挡风	3.53	44.62	-0.22
大十字墙挡风	3.31	45.55	-1.15

表 4 防风措施对空冷系统 2 号机组换热性能的影响
Tab.4 The influence of windproof measures on the heat transfer performance of No.2 unit of air cooling system

防风措施	散热器迎面风速/(m·s ⁻¹)	散热器表面温度/°C	温度降低幅度/°C
无防风措施	3.10	46.29	0
空冷单元均流	3.22	44.58	1.71
外围上倾斜涡流	3.11	46.31	-0.02
外围下倾斜涡流	3.18	45.29	1.00
迎风侧挡风	3.09	47.00	-0.71
大十字墙挡风	3.34	43.89	2.40

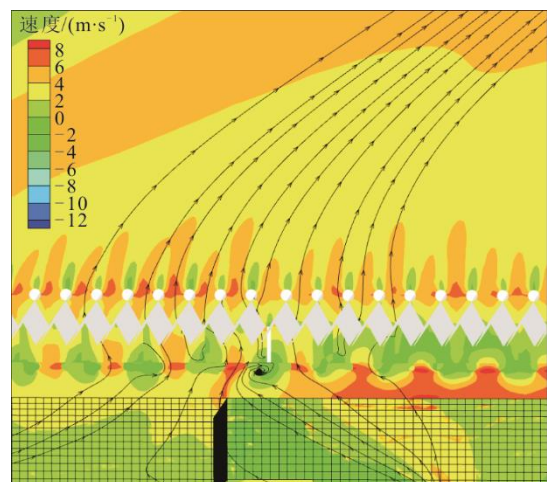


图 6 大十字墙作用下 1 号机组散热器风速分布云图
Fig.6 Cloud diagram of the flow-field distribution of the unit under the influence of the large cross-wall

2.2 防风措施结构优化

研究表明,适当增大防风措施孔隙率,有利于降低对无风工况的不利影响,而优选防风措施中,空冷单元均流装置与单元隔墙相同,无孔隙率,故针对外围下倾斜消涡和大十字墙挡风防风措施进行多孔率优化计算。

2.2.1 外围下倾斜消涡结构优化

TRL 夏季工况,环境温度 32 °C,夏季主导风向 NE,风速 5 m/s 下以外围下倾斜消涡作为单一防风措施,分别设置其孔隙率为 20%、40%、60%进行直接空冷系统的数值模拟与热力计算,计算结果如图 7 和表 5 所示。

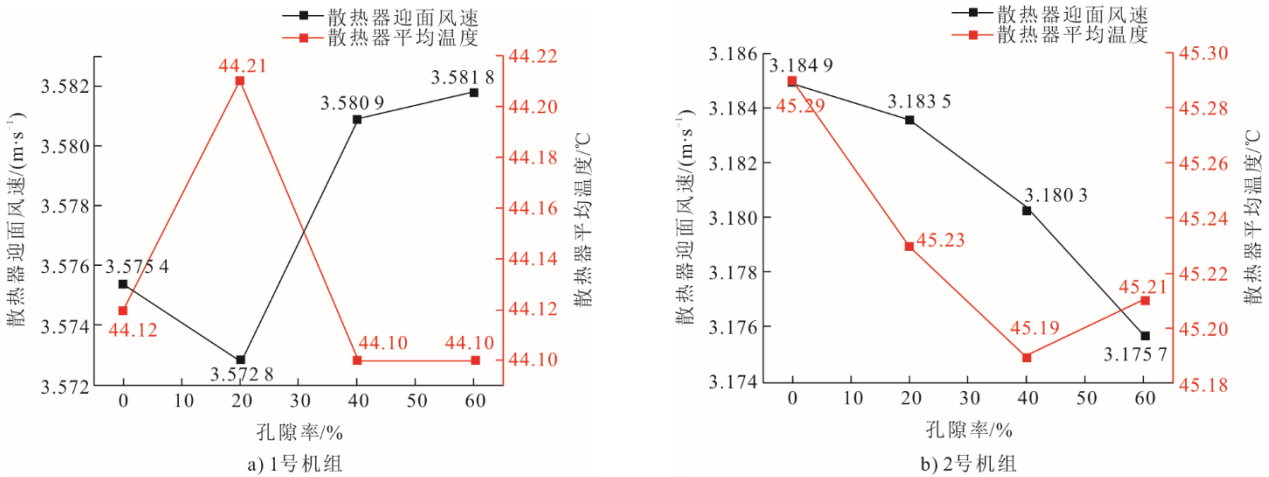


图 7 外围下倾斜消涡结构孔隙率优化

Fig.7 Optimization of the porosity of the inclined vortex-elimination structure under peripheral conditions

表 5 外围下倾斜消涡结构孔隙率优化 1、2 号机组排汽压力对比 单位: kPa

Tab.5 The exhaust pressures of No.1 and No.2 units after the optimization of porosity of the inclined vortex-elimination structure

项目	孔隙率/%			
	0	20	40	60
1 号机组排汽压力	20.77	20.81	20.76	20.76
1 号机组排汽压力变化	0	-0.04	0.01	0.01
2 号机组排汽压力	21.34	21.31	21.29	21.30
2 号机组排汽压力变化	0	0.03	0.05	0.04

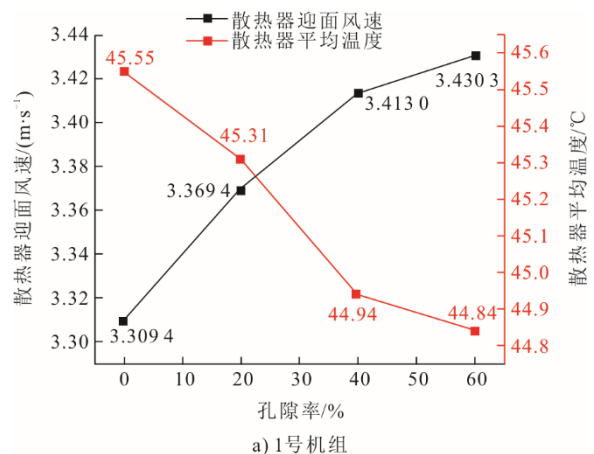
由图 7 可知,相比于原孔隙率 0,外围下倾斜消涡作用下,1 号、2 号机组(靠近山坡)的风速和平均温度变化都很小,风速偏差仅约为 0.001~0.009 m/s 左右,平均温度相差 0.02~0.10 °C。结合表 5 可以看出,相比之下,孔隙率 40%外围下倾斜消涡结构作用下机组背压降低幅度最大,整体相对较好。综上所述,外围下倾斜消涡结构可优选孔隙率 40%作为其优选结构,但外围下倾斜消涡结构孔隙率影响较小,不增加孔隙率时的防风效果亦很显著,可结合材料成本综合选择。

2.2.2 大十字墙挡风结构优化

同理,针对空冷平台下方增设大十字墙作为单一防风措施,分别设置其孔隙率为 20%、40%、60%

进行直接空冷系统的数值模拟与热力计算,计算结果如图 8 和表 6 所示。

由图 8 可知,相比于原孔隙率 0,大十字墙作用下,增大孔隙率后,对 1 号机组产生了较好的效果,散热器迎面风速最大升高约了 0.12 m/s,散热器平均温度降低了 0.71 °C,但 2 号机组散热器迎面风速反而降低,散热器平均温度升高。结合表 6 可知,1 号机组的背压随着孔隙率的增大而减小,但孔隙率 60%较孔隙率 40%背压降低幅度较小,且对 2 号机组产生的不利影响最大。综上,大十字墙结构可优选孔隙率 40%作为其优化结构,且建议控制孔隙率不宜超过 60%。



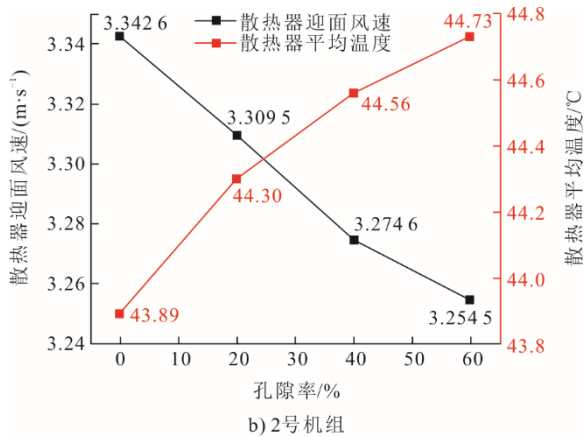


图 8 大十字墙孔隙率优化
Fig.8 Porosity optimization of large cross wall

表 6 大十字墙结构孔隙率优化 1、2 号机组排汽压力对比
单位: kPa

Tab.6 The exhaust pressures of No.1 and No.2 units with large cross wall porosity optimization

项目	孔隙率			
	0%	20%	40%	60%
1 号机组排汽压力	21.47	21.35	21.17	21.12
1 号机组排汽压力变化	0	0.12	0.30	0.35
2 号机组排汽压力	20.66	20.85	20.99	21.06
2 号机组排汽压力变化	0	-0.19	-0.33	-0.40

2.3 多防风措施对空冷岛换热性能的耦合优化

在 TRL 夏季工况, 环境温度 32 °C, 夏季主导

风向 NE, 风速 5 m/s 下, 将孔隙率优化 40% 的单一防风措施组合后进行直接空冷系统的数值模拟与热力计算, 得到多/无防风措施时 1、2 号机组计算结果 (表 7、表 8)。

由表 7 和表 8 可知: 空冷单元均流+孔隙率 40% 大十字墙多防风设置下 (空冷单元均流+大十字墙优化), 直接空冷系统 1 号机组散热器表面迎面风速为 3.37 m/s, 相比于无防风措施时降低了 0.17 m/s, 散热器平均温度为 40.85 °C, 降低了 3.55 °C; 2 号机组散热器表面迎面风速为 3.30 m/s, 相比于无防风措施时升高了 0.20 m/s, 散热器平均温度为 40.52 °C, 降低了 5.77 °C, 背压由 21.84 kPa 降至 18.92 kPa, 降低了 2.92 kPa。

空冷单元均流+孔隙率 40% 外围下倾斜消涡+孔隙率 40% 大十字墙多防风措施下 (空冷单元均流+外围下倾斜+大十字墙优化), 1 号机组散热器表面迎面风速相比于无防风措施时降低了 0.06 m/s, 散热器平均温度降低了 1.32 °C; 2 号机组散热器表面迎面风速, 相比于无防风措施时升高了 0.29 m/s, 散热器平均温度降低了 3.53 °C, 背压由 21.84 kPa 降至 20.12 kPa, 降低了 1.71 kPa。可见山体环境下, 结构优化后的 2 种多防风措施, 都明显提高了直接空冷系统 2 号机组散热器的迎面风速, 降低了散热器温度, 有效增强了直接空冷岛的换热性能。

表 7 多防风措施方案 1 号机组性能对比
Tab.7 Performance of No.1 unit with multi-windproof measures

防风措施	散热器迎面风速/(m·s ⁻¹)	散热器表面温度/°C	排汽温度/°C	排汽温度变化/°C	排汽压力/kPa	背压变化/kPa
无防风措施	3.54	44.40	61.09	0	20.90	0
空冷单元均流+大十字墙优化	3.37	40.85	59.31	1.78	19.25	1.66
空冷单元均流+外围下倾斜+大十字墙优化	3.48	43.08	60.43	0.66	20.27	0.63

表 8 多防风措施方案 2 号机组性能对比
Tab.8 Performance of No.2 unit with multi-windproof measures

防风措施	散热器迎面风速/(m·s ⁻¹)	散热器表面温度/°C	排汽温度/°C	排汽温度变化/°C	排汽压力/kPa	背压变化/kPa
无防风措施	3.10	46.29	62.03	0	21.84	0
空冷单元均流+大十字墙优化	3.30	40.52	58.95	3.09	18.92	2.92
空冷单元均流+外围下倾斜+大十字墙优化	3.39	42.76	60.27	1.76	20.12	1.71

计算得到多/无防风措施的机组散热器温度分布云图如图 9 所示, 散热器风速分布云图如图 10 所示。由图 9 可以看出, 采用空冷单元均流+大十字墙优化和空冷单元均流+外围下倾斜+大十字墙优化 2 种多防风方案后, 直接空冷系统散热器表面的温度明显要低于无防风措施时, 尤其是图 9 中左侧

第 2 个靠近迎风侧的散热器温度降低幅度更大。

结合表 7 和表 8 的数据及图 9b)和图 9c)可知, 相比于空冷单元均流+外围下倾斜+大十字墙优化, 空冷单元均流+大十字墙优化方案设置后, 散热器温度降低幅度更显著, 换热效果更优。由图 10 可知: 无防风措施时, 空冷岛迎风侧存在空气绕流现

象，散热器下方有明显漩涡，对散热器的不利影响较大；2 种多防风方案设置后，都减少了空气绕流现象，削弱了环境风对散热器的影响，特别是空冷单元均流+外围下倾斜+大十字墙优化方案，明显改善空冷单元底部的进风流场，漩涡发生偏移，风机进风量增大。但结合表 7 和表 8 分析，空冷单元均流+大十字墙优化方案下机组背压降低幅度大于空冷单元均流+外围下倾斜+大十字墙优化方案，即空冷单元均流+外围下倾斜+大十字墙优化方案虽然提高了散热器周围的空气流动速度，但不利于机组排汽温度的降低。

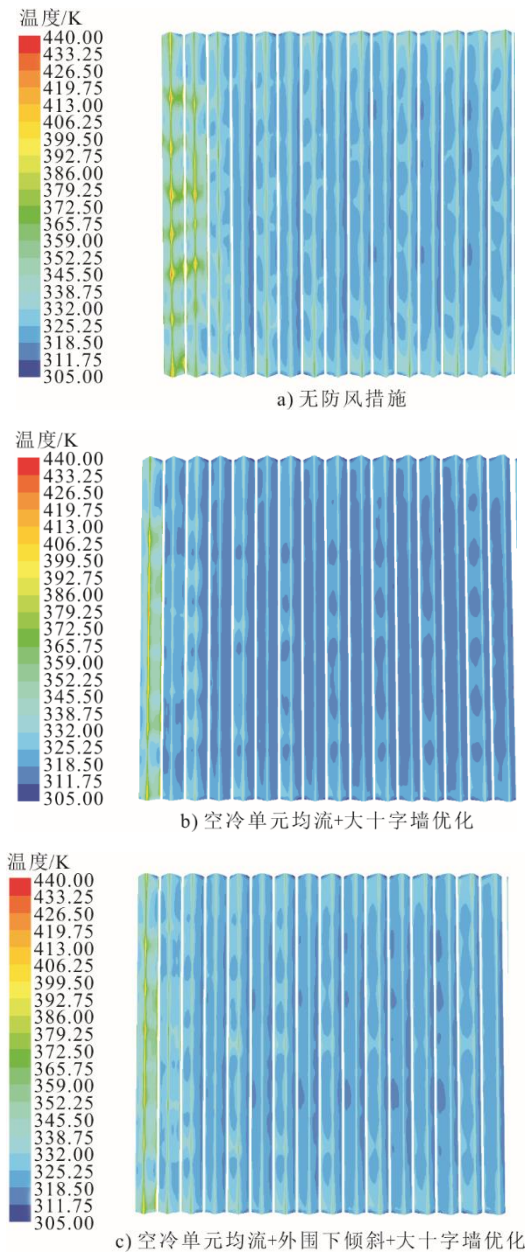
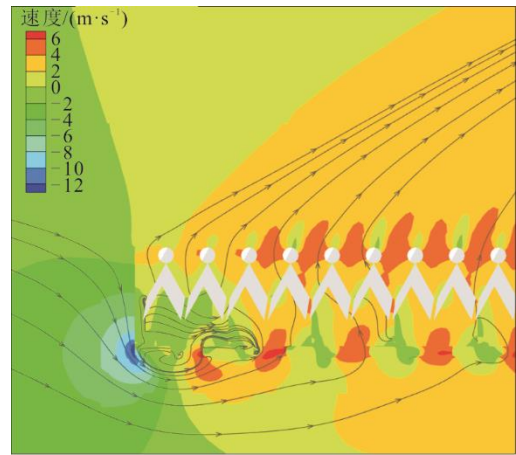
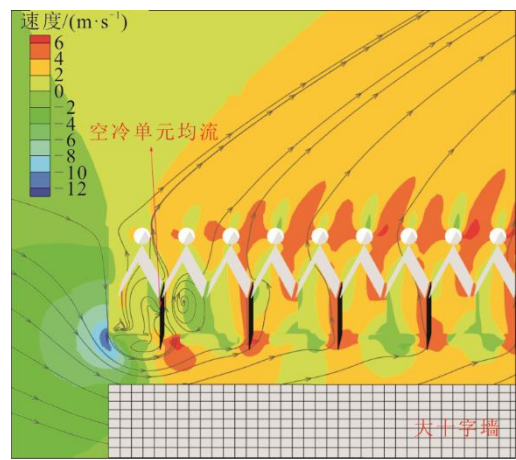


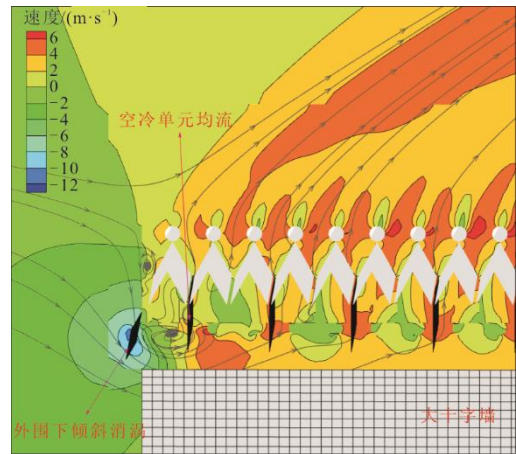
图 9 多/无防风措施时散热器温度分布云图
Fig.9 Cloud diagram of temperature distribution of the radiator with more/no windproof measures



a) 无防风措施



b) 空冷单元均流+大十字墙优化



c) 空冷单元均流+外围下倾斜+大十字墙优化

图 10 多/无防风措施时散热器上方风速分布云图
Fig.10 Cloud diagram of wind speed distribution above the radiator when there are more/no windproof measures

3 结 论

本文建立了空冷系统及周边建筑物、山体环境的三维数值计算模型，基于该模型，针对夏季高负荷工况下空冷岛迎风侧或换热不利单元布置复合防风措施，分析了空冷单元内外空气流场重构下直

接空冷系统散热器排汽温度、迎面风速、机组背压的变化情况, 主要结论如下。

1) 环境自然风风速为 5 m/s 时, 单一防风措施空冷平台下方设大十字墙挡风对空冷岛散热器迎面风速和散热器表面温度的改善效果均最为优异, 散热器迎面风速升高了 0.24 m/s, 散热器表面温度降低了 2.40 °C, 其次为空冷单元均流、外围下倾斜消涡。

2) 对外围下倾斜消涡和十字挡风墙进行多孔率优化计算, 设置孔隙率 40% 的外围下倾斜消涡和大十字墙挡风防风措施时, 机组背压均降低, 有利于提高机组效率。

3) 防风措施优化后, 设置空冷单元均流+大十字墙优化多防风措施后, 2 号机组散热器表面迎面风速相比于无防风措施时升高了 0.20 m/s, 散热器平均温度降低了 5.77 °C, 背压降低了 2.92 kPa; 空冷单元均流+外围下倾斜+大十字墙优化多防风措施下, 2 号机组散热器表面迎面风速相比于无防风措施时升高了 0.29 m/s, 散热器平均温度降低了 3.53 °C, 背压降低了 1.71 kPa。

综上所述, 空冷单元内部均流、空冷平台外围倾斜消涡及大十字墙复合防风措施, 能够提高散热器表面迎面风速, 强化空冷岛换热性能, 有效降低机组背压, 提高机组热力性能, 为直接空冷机组冷端节能提供了设计优化方向。

[参 考 文 献]

- [1] 李路江, 杜威, 王昌欣, 等. 利用二次回归正交试验的空冷岛挡风墙优化设计[J]. 机械设计与制造, 2023(11): 5-8.
LI Lujiang, DU Wei, WANG Changxin, et al. Optimization of windbreak wall of air cooling island based on quadratic regression orthogonal methodology[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2023(11): 5-8.
- [2] 董建宁, 安吉振, 陈衡, 等. 考虑天气影响的火电机组空冷系统性能预测方法[J]. 发电技术, 2024, 45(6): 1105-1113.
DONG Jianning, AN Jizhen, CHEN Heng, et al. Performance prediction method for air cooling system of thermal power unit considering weather effect[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(6): 1105-1113.
- [3] 孙玉庆, 张新海, 柴艳琴, 等. 直接空冷系统技术改进及能效提升研究[J]. 电力学报, 2023, 38(2): 146-155.
SUN Yuqing, ZHANG Xinhai, CHAI Yanqin, et al. Research on technical improvement and energy-saving elevating of direct air-cooling system[J]. Journal of Electric Power, 2023, 38(2): 146-155.
- [4] 刘九洲, 王杰, 万超, 等. 基于精细化建模的直接空冷岛侧风影响模拟研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 491-498.
LIU Jiuzhou, WANG Jie, WAN Chao, et al. Crosswind

- influence simulation of direct air-cooling island based on fine modeling[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(4): 491-498.
- [5] 黄文慧. 基于风机群流场组织的电站直接空冷系统性能优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.
HUANG Wenhui. Performance optimization of direct dry cooling system based on flow field organization of fan array in power station[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [6] 杨立军, 贾宝荣, 杜小泽, 等. 内部导流对空冷单元流动传热特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(7): 1226-1228.
YANG Lijun, JIA Baorong, DU Xiaoze, et al. Influence of internal flow guiding device upon flow and heat transfer characteristics in air-cooled condenser cell[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(7): 1226-1228.
- [7] BORGHEI L, KHOSHAKHO R H. Computational fluid dynamics simulation of a thermal power plant with air-cooled condenser[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power & Energy, 2012, 226: 837-847.
- [8] OWEN M T F, KROGER D G. The effect of screens on air-cooled steam condenser Performance under windy conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(16): 2610-2615.
- [9] VENTER A J, OWEN M T F, MUIYSER J. A numerical analysis of windscreen effects on air-cooled condenser fan performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 186: 116416.
- [10] 王金平, 安连锁. 直接空冷机组夏季度夏措施及发展趋势[J]. 山东电力技术, 2010(4): 45-47.
WANG JinPing, AN Liansuo. Measures and development of summer operation of directed air cooling unit[J]. Shandong Electric Power, 2010(4): 45-47.
- [11] 李文毓. 环境风对汽轮机空冷岛换热性能的影响及其改善措施[J]. 机械管理开发, 2022, 37(12): 60-61.
LI Wenyu. Influence of ambient air on heat transfer performance of air cooling island of steam turbine and its improvement measures[J]. Machinery Management and Development, 2022, 37(12): 60-61.
- [12] 程友良, 张宁, 史亚骏, 等. 空冷单元加装弯叶式导流板的数值研究[J]. 节能, 2017, 36(1): 42-46.
CHENG Youliang, ZHANG Ning, SHI Yajun, et al. Numerical study of the air cooled unit with curvifoliate deflectors[J]. Energy Conservation, 2017, 36(1): 42-46.
- [13] 呼浩, 古真桢, 孙林, 等. 导流板对某 660 MW 电厂空冷单元运行性能的影响及优化研究[J]. 节能, 2024, 43(4): 20-24.
HU Hao, GU Zhenzhen, SUN Lin, et al. Effect of deflector on the operation performance of the air-cooled unit of a 660 MW power plant and its optimization study[J]. Energy Conservation, 2024, 43(4): 20-24.
- [14] GAO X F, ZHANG C W, WEI J J, et al. Performance prediction of an improved air-cooled steam condenser with deflector under strong wind[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(17/18): 2663-2669.
- [15] 郑春波. 环境风影响下直接空冷系统流动传热特性分析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020: 1.
ZHENG Chunbo. Analysis on thermo-flow characteristics of air-cooled system under windy conditions[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2020: 1.
- [16] 高沛. 环境风对空冷岛换热性能的影响及其改善措施[D]. 保定: 华北电力大学, 2014: 1.
GAO Pei. The effects of environment wind on heat

- transfer of direct air-cooled condenser and improving measures[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014: 1.
- [17] 严鹏航. 加装导流装置的直接空冷机组结构优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1.
YAN Penghang. Research on structure optimization of direct air-cooled unit with flow guiding device[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 1.
- [18] 崔超, 赵允涛, 黄文慧, 等. 外部复合导流装置对直接空冷系统流动传热特性的影响[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(1): 17-20.
CUI Chao, ZHAO Yuntao, HUANG Wenhui, et al. Influence of external composite flow guiding device upon flow and heat transfer characteristics of direct air cooling system[J]. Turbine Technology, 2019, 61(1): 17-20.
- [19] 李涛, 阴继翔, 高波, 等. 导流装置对直接空冷凝汽器单元空气流动与换热性能影响的数值研究[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(2): 144-150.
LI Tao, YIN Jixiang, GAO Bo, et al. Numerical study on the influence of deflector on air flow and heat transfer characteristics of direct air-cooled condenser unit[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2022, 38(2): 144-150.
- [20] 吴耀鹏, 白国良. 直接空冷体系挡风墙体型系数研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(6): 805-809.
WU Yaopeng, BAI Guoliang. Study on the shape factor of wind-break wall of direct air-cooled system[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2014, 46(6): 805-809.
- [21] 张学镭, 王梅梅, 张耀祖, 等. 直接空冷凝汽器加装导流叶栅的性能分析[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(6): 60-66.
ZHANG Xuelei, WANG Meimei, ZHANG Yaozu, et al. Performance analysis of fixing the flow guiding cascades upon direct air-cooled condenser[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(6): 60-66.
- [22] 侯一晨, 陈志董, 张宗阳, 等. 基于热负荷均匀分配原则的直接空冷系统轴流风机转速灵活调节策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3125-3137.
HOU Yichen, CHEN Zhidong, ZHANG Zongyang, et al. Flexible speed regulation strategy of axial flow fans in direct dry cooling system based on the principle of uniform distribution of heat load[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3125-3137.
- [23] 王淼, 黄骞, 曹文广, 等. 直接空冷凝汽器流场及性能优化数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(4): 66-74.
WANG Miao, HUANG Qian, CAO Wenguang, et al. Numerical investigation on the flow field and performance optimization of the direct air-cooled condenser[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(4): 66-74.
- [24] 刘一帆. 火电机组直接空冷系统数值模拟与运行监测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023: 1.
LIU Yifan. Numerical simulation and operation monitoring of direct air cooling system for thermal power units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023: 1.
- [25] 刘达, 杨建国, 张兆营, 等. 水平挡板改善直接空冷凝汽器流场特性的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2011, 31(12): 949-954.
LIU Da, YANG Jianguo, ZHANG Zhaoying, et al. Numerical simulation on flow field of direct air-cooled condenser improved by horizontal baffles[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(12): 949-954.

(责任编辑 邓玲惠)