

DOI: 10.19666/j.rlfed.202401005

低风阻流线型导风板对自然通风 湿式冷却塔的性能影响

杨繁昌¹, 刘江^{1,2}, 王明勇³, 翁培奋^{1,2}, 张宇琪¹

(1.上海电力大学能源与机械工程学院, 上海 201306;

2.上海热交换系统节能工程技术研究中心, 上海 200090;

3.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为改善冷却塔雨区流场结构, 进一步增大通风量, 在已有平板型导风板基础上, 提出一种布置在雨区的低风阻流线型导风板。设计工况下, 以常规冷却塔和在各高度布置平板型导风板的改造塔为参考对象, 分析 5 种不同布置高度 (1/6、1/3、1/2、2/3、5/6 进风高度) 下低风阻流线型导风板对整塔通风量、塔内流场结构和温度分布等参数的影响。结果表明: 随着导风板布置高度的升高, 塔内各区域的空气分配发生了变化, 对内区填料换热产生了明显影响, 使整塔冷却性能呈现出先提升后下降的趋势; 在进风口高度 2/3 处布置流线型导风板时, 通风量增量与填料区底部平均温度减量达到最优值, 冷却塔性能改善效果最佳, 此时相较于常规冷却塔, 循环水温降相对增长 2.65%, 通风量相对增长 2.78%。此外, 相较于最佳布置高度的平板型导风板, 采用低风阻流线型导风板改造后循环水温降相对增长 1.2%。

[关键词] 自然通风湿式冷却塔; 冷却性能; 流线型导风板; 数值计算

[引用本文格式] 杨繁昌, 刘江, 王明勇, 等. 低风阻流线型导风板对自然通风湿式冷却塔的性能影响[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 122-131. YANG Fanchang, LIU Jiang, WANG Mingyong, et al. Effect of low wind resistance streamlined wind deflectors on the performance of naturally ventilated wet cooling towers[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 122-131.

Effect of low wind resistance streamlined wind deflectors on performance of naturally ventilated wet cooling towers

YANG Fanchang¹, LIU Jiang^{1,2}, WANG Mingyong³, WENG Peifen^{1,2}, ZHANG Yuqi¹

(1.School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China;

2.Shanghai Engineering and Technology Research Center for Energy Saving of Heat Exchange Systems, Shanghai 200090, China;

3.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to improve the flow field structure of rain area in cooling tower and further increase the ventilation, on the basis of the existing flat plate type wind guide plate, this paper proposes a streamline wind guide plate with low wind resistance that can be arranged in the rain area. Under the design condition, by taking the conventional cooling tower and the reformed tower with flat plate-type air guide plate arranged at each height as the reference objects, the influences of the low wind resistance streamline air guide plate on ventilation, flow field structure and temperature distribution of the whole tower are analyzed, at five different arrangement heights (1/6, 1/3, 1/2, 2/3, 5/6 air intake height). The results show that, with the rise of the height of the air guide plate arrangement, the air distribution in each region of the tower has changed, which has a significant effect on the packing heat exchange in inner zone, so that the cooling performance of the whole tower improves at first and

收稿日期: 2024-01-08

基金项目: 上海市 2020 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目 (20dz1205302)

Supported by: Shanghai's 2020 Annual Science and Technology Innovation Action Plan: Social Development and Science & Technology Project (20dz1205302)

第一作者简介: 杨繁昌 (1999), 男, 硕士, 主要研究方向为气液两相流数值模拟, 3307233452@qq.com。

通信作者简介: 刘江 (1980), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境流体力学领域内的气固两相流实验及数值模拟, jiangliuxjtu@shiep.edu.cn。

then declines. When arranging the streamlined wind guide plate at 2/3 height of the air inlet, the ventilation increment and the average temperature reduction at the bottom of the filler area reaches the optimal value, and the improvement effect of the cooling tower performance is the best. Compared with the conventional cooling tower, the circulating water temperature drop and the ventilation increases by 2.65% and 2.78%, respectively. In addition, the circulating water temperature drop increases by 1.2% after the tower is retrofitted with a low wind resistance streamlined air guide, compared with the flat plate with an optimal arrangement height.

Key words: natural ventilation wet cooling tower; cooling performance; streamlined induced draft plate; numerical calculation

冷却塔是热力发电厂冷端系统的重要设备^[1],其热力性能的优劣对热力发电厂的发电效率和安全性有着重要影响^[2-4]。通过分析常规冷却塔内部流动情况,普遍发现塔内中心区域由于通风量较少,气-水均匀性较低,导致冷却性能较差^[5-8]。

因此,许多研究人员提出了对冷却塔中心区域流场结构改造的方案。通过研究发现导风管可以将空气引流到冷却塔中心区域,并在提升塔内气-水分布均匀性^[9-11]的基础上,在导风管水平侧增加一定数量的孔隙达到进一步优化通风的目的^[12]。当有环境侧风影响时,将十字风墙与导风管相结合后发现对冷却性能依旧有较好改观^[1-14]。考虑使用导风管对于进风而言会有较大的沿程阻力,所以周兰欣课题组提出采用多层导风板方案减少沿程阻力^[15],该方案增加了进风垂直方向的速度分量,提高了换热效果。但该方案下安装间距过大时,空气流动不均匀;安装间距过小时,对空气的水平移动产生较大阻力。山东大学张政清等^[16-18]提出在雨区布置分流直板,形成一种雨区干湿混合的冷却模式。发现布置分流直板后,塔内温度场、流场趋于均匀,显著提升了冷却性能。

根据流动阻力分析,导风板实质上是削弱了外围雨区的阻力,增大中心区域通风量,提升塔内空气动力场均匀性,从而优化了整塔冷却性能。然而导风板本身对流场而言即为一种局部阻力部件。因此,课题组思考是否能提出一种低风阻型导风板,在既保留改造流场能力的同时,又能显著降低其自身阻力。根据以上思路,本文以常规冷却塔雨区流场分布为出发点,提出一种低风阻流线型导风板结构,对比平板型导风板分析其对冷却塔性能的影响,并探讨最佳布置高度。

1 计算模型和边界条件

1.1 冷却塔塔形参数

图1为自然通风逆流湿式冷却塔结构示意图。循环水通过中央竖井送入配水系统后经过喷嘴喷淋

在填料层顶部,形成一层水膜,然后在重力和表面张力的作用下离开填料,最终以水滴的形式落入下方的集水池中。与此同时,环境空气由进风口进入冷却塔内,依次穿过雨区、填料区和喷淋区,最终从塔顶的出口排出。在喷淋区、填料区和雨区,循环水与环境空气之间发生气液二相之间的传热传质。

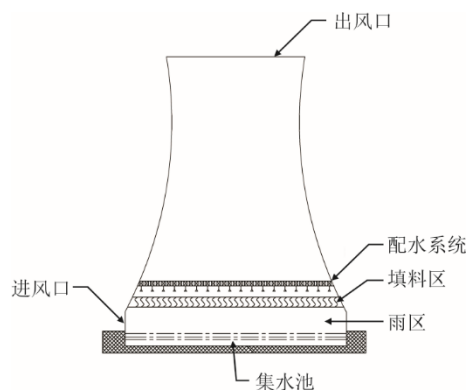


图1 自然通风逆流湿式冷却塔
Fig.1 Schematic diagram of the natural ventilation counter flow wet cooling tower

本文选取某电厂实际运行的自然通风逆流湿式冷却塔作为研究对象,表1是该塔的相关参数。以此冷却塔的相关尺寸为基础,在雨区布置低风阻流线型导风板。

表1 冷却塔相关参数
Tab.1 Related parameters of the cooling tower

项目	数值
塔顶标高/m	102.60
出口直径/m	48.71
进风口标高/m	7.18
进风口直径/m	76.76
填料层底部标高/m	7.84
填料层厚度/m	1.00
淋水面积/m ²	4 500.00

1.2 几何模型

本文主要研究低风阻流线型导风板布置高度对冷却塔冷却性能的影响。为保证模拟的真实可靠^[19],

在模型中添加了外部大气环境组成，具体如图 2 所示。计算域为直径 600 m，高度 300 m 的圆柱形空间，冷却塔位于计算域底部的中心位置。

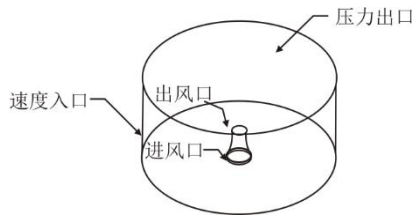


图 2 计算区域
Fig.2 Computational region

1.3 冷却塔雨区改造

本文依据常规冷却塔在设计工况下雨区的流线分布设计导风板结构。首先，选取流线起点的竖直位置，分别为冷却塔进风口高度的 1/6、1/3、1/2、2/3、5/6 处；其次，流线起点的水平位置为与冷却塔进风口相距 1 m 处，流线终点的位置为填料层底部；最后，将每个高度上的原始流线偏折角度 α 后，进行旋转得到流线型导风板。低风阻流线型导风板结构示意图如图 3 所示。

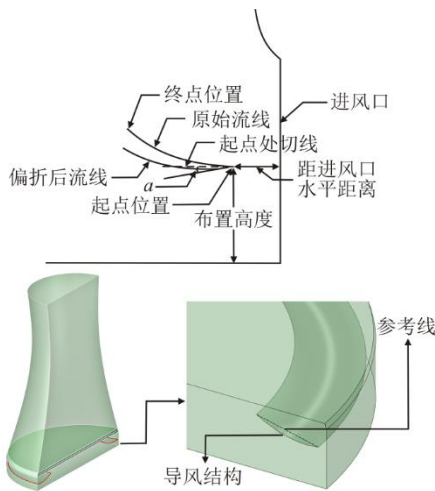


图 3 低风阻流线型导风板结构示意图
Fig.3 Schematic structure of the low wind resistance streamline wind guide plate

针对此塔流线型导风板的最佳偏折角在 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 内，通过多次试算分析，确认最优偏折角为 10° ，因此选择此角度作为偏折角。为便于分析流线型导风板布置高度对冷却性能的影响，对原始冷却塔和不同流线型导风板布置高度的冷却塔进行命名（表 2）。

在计算域中截取 $x=0$ m 截面为特征面，以 $x=0$ m 截面与填料层底面的交线为特征线。定义流线型导

风板内径在竖直方向上投影形成的圆形范围为内区。内外区范围示意如图 4 所示。

表 2 各布置方式命名
Tab.2 Naming of each layout

未布置导风板	1/6 进风高度	1/3 进风高度	1/2 进风高度	2/3 进风高度	5/6 进风高度
布置 1	布置 2	布置 3	布置 4	布置 5	布置 6

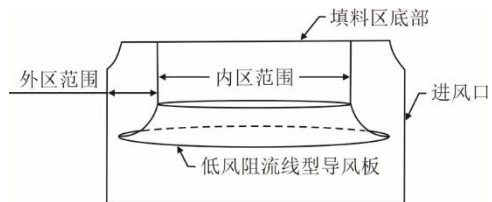


图 4 内外区范围示意
Fig.4 Schematic diagram of scope of the inner and outer zones

实际应用中，若下落至流线型导风板上的循环水发生积聚，则会在导风板起点位置下落并形成水幕，这种情况则会增大雨区进风阻力，恶化冷却性能。而流线型导风板结构的底部存在凹槽区域，因此以循环水不发生积聚为准则，在凹槽区域最低点沿导风板周向布置一定数量的圆形孔洞用于排放落在导风板上的循环水^[20]。

以布置在进风口 2/3 高度的导风板为例，在其底部最低处，沿圆周方向均匀布置 10 个直径 25 cm 的圆形孔洞区域用于排放落在导风板上的循环水，以此避免形成水幕。将水柱简化为由导风板底部连接至集水池的圆柱体，以体现水柱对于冷却塔进风的阻力作用。计算结果显示，开孔前后（即有无水柱）冷却塔通风量相差 4.28 kg/s，整塔循环水温降相差 0.03 K。可近似认为水柱存在对于冷却塔通风影响微小，可以忽略。

1.4 控制方程

湿空气的运动状态控制方程包括质量、动量、能量和组分守恒方程。这些方程可以用通用形式^[21-22]表示为：

$$\nabla(\rho\mu\varphi) = \nabla(\Gamma_{\varphi}\nabla_{\varphi}) + S_{\varphi} \quad (1)$$

式中： ρ 为湿空气密度； μ 为湿空气流速； φ 为不同方程（如连续性方程、动量方程、能量方程、组分方程和湍流模型）对应的变量； Γ_{φ} 为扩散系数； S_{φ} 为方程的源项。在冷却塔内使用这些方程时，由于空气与水的换热在填料区、喷淋区和雨区存在

差异,因此需要根据每个区域的换热特点,分别采用相应的公式进行计算,具体的公式可以参考文献[23]。

在冷却塔内,循环水作为离散相,以液滴下落的方式进行运动。在运动过程中,水滴不断进行传热和传质。阻力对水滴的影响体现在运动速度的变化上,而传热过程则会导致循环水温度的变化,传质过程则表现在淋水密度的变化。冷却水的控制方程可以表示为^[24-25]:

$$\frac{d\phi}{d(-z)} = S_{\phi} \quad (2)$$

式中: ϕ 分别为 u_w 、 t_w 或 q ; z 为竖直向上的坐标; S_{ϕ} 为方程源项,均为负值,分别采用相对应的公式^[25]计算。

冷却塔内的传热传质现象主要发生在喷淋区、填料区和雨区,包括接触传热和蒸发传热传质。接触传热的传热量可以表示为^[25]:

$$dQ_{\alpha} = \alpha(t_w - t)dA \quad (3)$$

式中: α 为接触传热系数; t_w 为循环水温度; t 为空气温度; dA 为接触面积。

蒸发传热传质可以分别用以下公式表示。

传质速率:

$$dS_m = \beta_x(\chi'' - \chi)dA \quad (4)$$

传热量:

$$dQ_{\beta} = \gamma_w S_m dA \quad (5)$$

式中: β_x 为传质系数; χ'' 为水面饱和空气层的含湿量; χ 为周围湿空气的含湿量; γ_w 为水的汽化潜热。

当环境空气从雨区进风口进入冷却塔后,在上升的过程中会受到液滴阻力和填料层阻力的影响。阻力可以统一表示^[25]为:

$$f = \xi_i \rho \frac{u^2}{2} \quad (6)$$

式中: ξ_i 为阻力系数,根据经验公式(与尺寸相关)进行计算; ρ 为该处湿空气密度; u 为流经该处的气流速度。

1.5 模型设置

1) 介质设置 循环水在填料区以水膜形式流动,雨区使用 DPM 模型^[26],忽略碰撞变形等因素,对雨区的水滴粒径使用符合高斯分布的粒径设置。

2) 边界条件设置 空气入口边界为速度入口。

无风情况下,侧面为环境空气的入口,速度大小为 0 m/s。空气入口温度设为环境温度。出口边界使用压力出口条件,压力设置为参考压力。计算域底面、流线型导风板和冷却塔壁面设置为壁面。冷却塔入口和出口设置为内部边界,与外部环境连接。

3) 运行设置 根据当地环境工况设置运行温度、压力、空气密度和重力加速度,参考点位于地面进风口处。

4) 求解设置 采用 Boussinesq 近似,使用标准 $k-\epsilon$ ^[5]模型封闭控制方程;对流项采用二阶迎风格式离散化;使用合适的松弛因子提高求解的收敛速度;模型计算使用 SIMPLE 算法;能量方程的收敛精度设为 10^{-6} ,其他方程的收敛精度设为 10^{-4} 。

1.6 计算验证

鉴于冷却塔内气-水热质交换主要发生在喷淋区、填料区和雨区,所以在网格划分时特别加密了这些区域。对 100 万、140 万、180 万和 220 万网格数量的数值计算结果进行比较后发现,在相同工况下循环水出塔温度随网格数量增加逐渐趋于稳定。最终选择网格单元数量为 180 万的网格进行后续计算。

为验证计算模型对冷却塔变工况模拟的适应性,进一步验证模型的准确性。本文计算并对比了未布置导风板的原塔在不同循环水流量和不同相对湿度下循环水温降的模拟值和现场实测值。其中 6 组实测工况是在其冷却性能已下降 15% 时所测数据,结果见表 2。由表 2 可见,模拟值与实测值之间的最大误差均不超过 2.5%,验证了仿真模型的准确性。

表 3 出塔水温模拟值与现场实测值对比
Tab.3 Comparison between simulated and measured water temperature of outlet tower

	循环水流量/ (t·h ⁻¹)	相对湿度/ %	模拟温降/ ℃	实测温降/ ℃	相对误差/ %
设计工况	30 082	79.0	9.00	8.92	0.89
		31.8	8.65	8.69	0.46
		33.6	8.68	8.72	0.45
实测工况	27 645	35.5	8.64	8.56	0.93
		39.4	10.73	10.97	2.18
		43.8	10.49	10.67	1.65
		47.4	10.36	10.63	2.47

2 计算结果及分析

本文选取设计工况作为改造前后冷却性能的

对比工况。冷却塔的设计工况如下：进塔空气干球温度 28.76 °C，进塔空气湿球温度 25.80 °C，相对湿度 79%，大气压力 100 000 Pa，循环水量 30 082 m³/h，冷却塔设计出塔水温为 31.9 °C。

表 4 给出了 6 种布置方式在设计工况下，整塔循环水温降 t_{all} 以及各布置方式与布置 1（未布置导风板的原塔）整塔循环水温降的差值 Δt_{all} 。表 4 的结果表明：在设计工况下，布置 2 的整塔冷却性能不仅没有提升，反而下降；布置 3、布置 4、布置 5、布置 6 的整塔冷却性能均有不同程度的提升，其中布置 5 的循环水温降提升最高为 0.25 K。

表 4 各布置方式下循环水温降及差值 单位: K
Tab.4 Temperature drop and difference of circulating water in each arrangement

	布置 1	布置 2	布置 3	布置 4	布置 5	布置 6
t_{all}	9.00	8.66	9.13	9.15	9.25	9.08
Δt_{all}	0	-0.34	0.13	0.15	0.25	0.08

2.1 塔内空气速度场分析

图 5 为各布置方式下冷却塔内部速度分布云图，其反映了塔内空气流动情况。布置 1（图 5a）显示常规冷却塔在运行过程中，塔外空气由进风口进入，沿径向流动至冷却塔中心区域。在这一过程中，由于空气在雨区受到雨滴阻力的作用，空气速度逐渐减小。

布置导风板后，在其下方形成了无水滴的进风通道，不同的布置高度形成的通道不同，则对进风阻力有着不同的影响。在布置 2（图 5b）中，由于导风板位置过低，使原本能够进入塔中心区域的气流改向上方流动，使中心区域的低速区明显增大。而在剩余布置方案中，可以明显看到高速区域向内区的延展；这是由于流经导风板下方的空气没有受到水滴阻力的作用，在进入内区范围后，气-水间经过充分换热，湿空气密度降低，使内区范围压强降低，促进空气进入中心区域。

随布置高度升高，内区范围的高速区域逐渐增大，其中布置 5（图 5e）的高速区域增大最为明显。在近壁面区域，低速区域随布置高度的升高逐渐减少，但是布置 6（图 5f）由于布置高度距离进风口上沿较近，产生了较大范围的涡流从而削弱空气速度。在外区范围中，由于导风板的分流作用，使得外区的平均风速随布置高度升高逐渐下降。

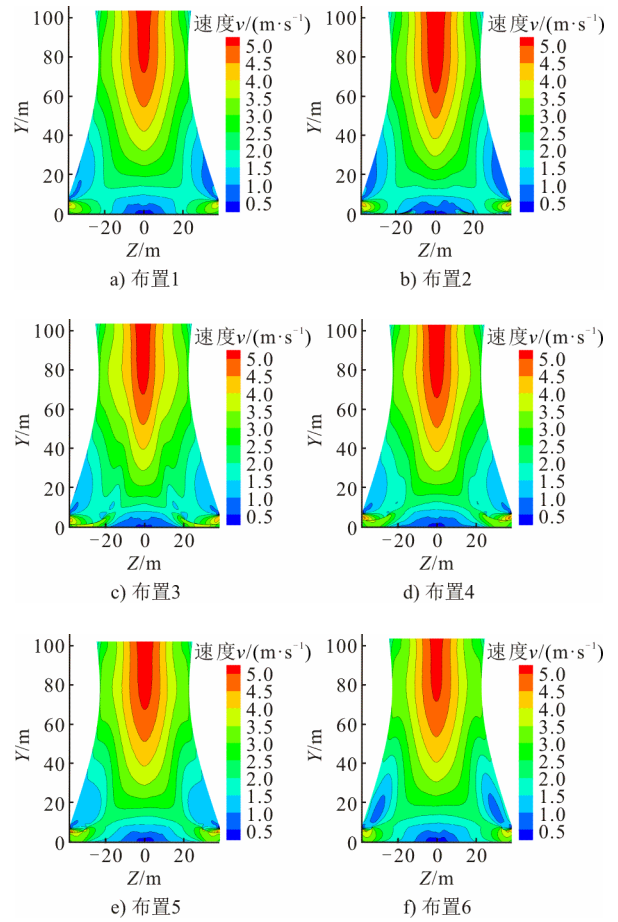


图 5 各布置方式下冷却塔内部速度分布云图
Fig.5 Cloud diagram of velocity distribution inside the cooling tower in each arrangement

填料区各范围平均风速如图 6 所示，图中 v_{in} 、 v_{out} 和 v_{all} 分别为布置 2 至布置 6 填料底部内区范围平均风速、外区范围平均风速和整个填料区底面平均风速。图 6 显示：随布置高度的升高， v_{in} 先上升再下降并在布置 3（进风口高度 1/3）处取得最大值； v_{out} 呈现逐渐下降的趋势； v_{all} 随着布置高度的升高先上升再下降，在布置 5 处达到最大值。

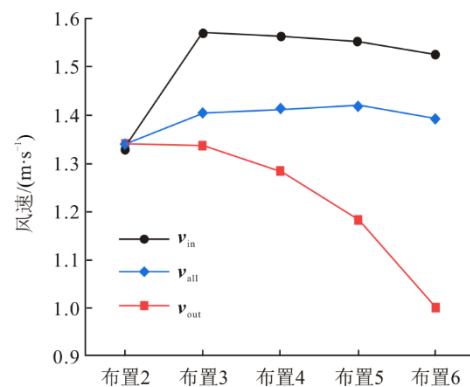


图 6 填料区各范围平均风速
Fig.6 Ventilation per unit area for each range of the fill zone

表 5 为各布置方式下整塔通风量 q_v 以及各布置方式与布置 1 整塔通风量的差值 Δq_v 。在改造塔中, 随着布置高度的升高, 冷却塔通风量增量呈现先增大后下降的趋势, 并在布置高度为进风口高度 2/3, 即布置 5 时取得最大值, 增量为 166.66 kg/s。

表 5 整塔通风量及差值 单位: kg/s
Tab.5 Ventilation and difference of the whole tower

	布置 1	布置 2	布置 3	布置 4	布置 5	布置 6
q_v	6 282.86	6 125.54	6 423.65	6 441.36	6 449.52	6 369.87
Δq_v	0	-157.32	140.79	158.50	166.66	87.01

2.2 塔内空气温度场分析

图 7 为各布置方式下冷却塔内部温度分布云图, 其反映了塔内各区域空气温度分布情况。布置 1 下, 塔外空气在流动过程中不断从循环水中吸热, 使得温度升高, 因此冷却塔中心区域温度明显高于外围区域温度。并且由于填料区是循环水换热的主要区域, 所以填料上方空气温度大于雨区空气温度。空气温度越高, 与循环水之间的温差越小, 气-水间传热传质能力越差。

加导流板后, 布置 2 方案的中心高温区域并没有缩小, 反而增大。这是由于导流板位置过低, 使导风板下方压力升高, 增大了进风阻力, 削弱整塔通风量, 所以当循环水流量不变时, 空气温度自然升高。改造布置 3 至布置 6 中, 由于大量干冷空气被导入内区, 增强了内区循环水换热, 所以中心高温区域明显缩减, 在不同程度上优化了塔内区温度分布。在外区范围, 由于受到空气流动的影响, 弱化了换热过程, 随布置高度的升高, 外区空气温度逐渐升高。

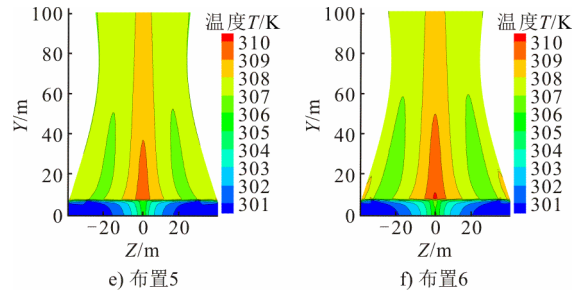
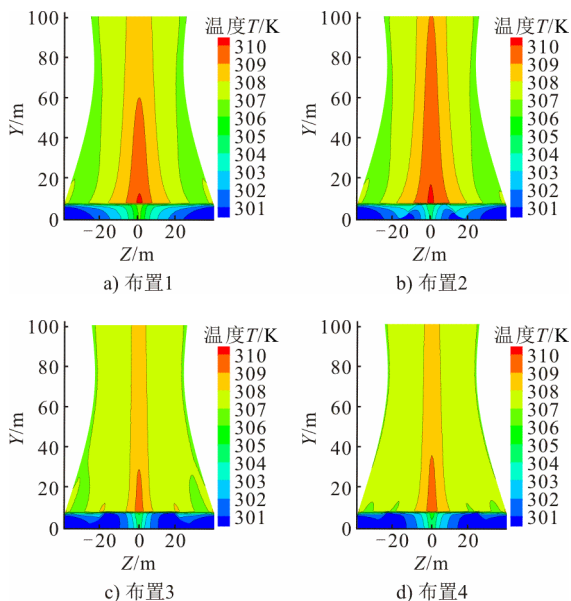


图 7 各布置方式下冷却塔内部温度分布云图
Fig.7 Temperature distribution inside the cooling tower with different arrangements

表 6 为各布置方式下填料区底部空气平均温度 $t_{fill-air}$, 以及各改造方式与布置 1 填料区底部平均温度的差值 $\Delta t_{fill-air}$ 。表 6 数据表明, 每种改造方式下的 $t_{fill-air}$ 都比常规塔低, 并且随布置高度升高, $t_{fill-air}$ 呈现先下降再上升的趋势。在布置高度为进风口高度 2/3 时, $t_{fill-air}$ 取得相对最优值, 相较于常规冷却塔可以降低 1.13 K。

表 6 填料区底部平均温度及差值 单位: K
Tab.6 Average temperature and the difference at bottom of the packing area

	布置 1	布置 2	布置 3	布置 4	布置 5	布置 6
$t_{fill-air}$	304.42	304.41	303.63	303.41	303.29	303.69
$\Delta t_{fill-air}$	0	-0.01	-0.79	-1.01	-1.13	-0.73

2.3 循环水温降分析

图 8 为各布置方式在填料区底面特征线 Z 轴上循环水温降 Δt 分布情况。图 9 为各布置下冷却塔填料区底部循环水平均温降。

从图 8 可见, 布置 1 近壁面区域和中心区域的循环水冷却效果较差。从填料层外侧到内侧, 循环水温降呈现由高到低的变化趋势, 表明了填料外侧的冷却能力大于填料内侧, 这与常规冷却塔的实际冷却效果相符。

对于外区范围, 由于导风板的分流作用, 降低了外区平均风速, 从而使得各个改造方案的循环水温降都高于布置 1。对于内区范围, 布置 2 中心区域的速度和温度场都被恶化, 所以其内区范围循环水温降反而不如布置 1; 剩余改造方案, 提高了内区平均风速, 降低了内区空气温度, 所以内区范围各个位置循环水温降都高于布置 1。可以明显看出布置 3 在内区范围中对于循环水冷却效果优化最为明显, 这是由于布置 3 内区范围空气风速最快和温度最低。

图 9 表现出整个填料区循环水温降幅度, 在内

外区综合影响下, 布置 2 填料区底部循环水温降相对布置 1 呈现上升趋势, 随着布置高度的升高, 填料区底部循环水温降先上升再下降并在布置 5 处取得最优值。因此, 虽然布置 3 在内圆范围内对于循环水温降优化效果最为明显, 但是在整个填料区而言依旧是布置 5 的整体效果更好。

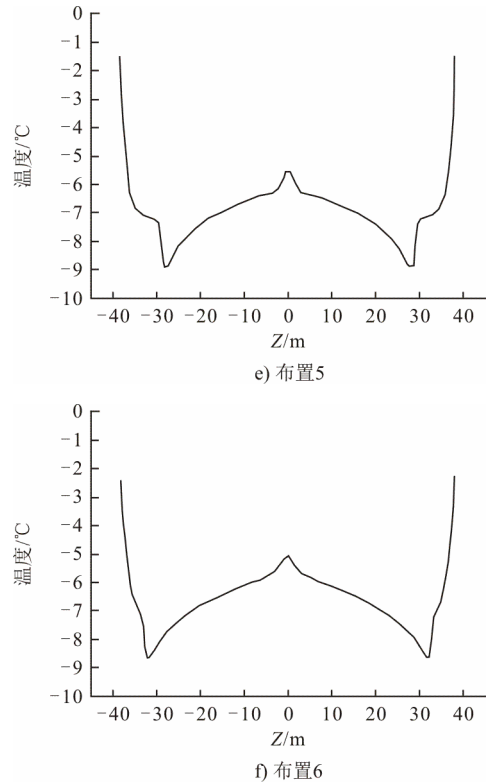
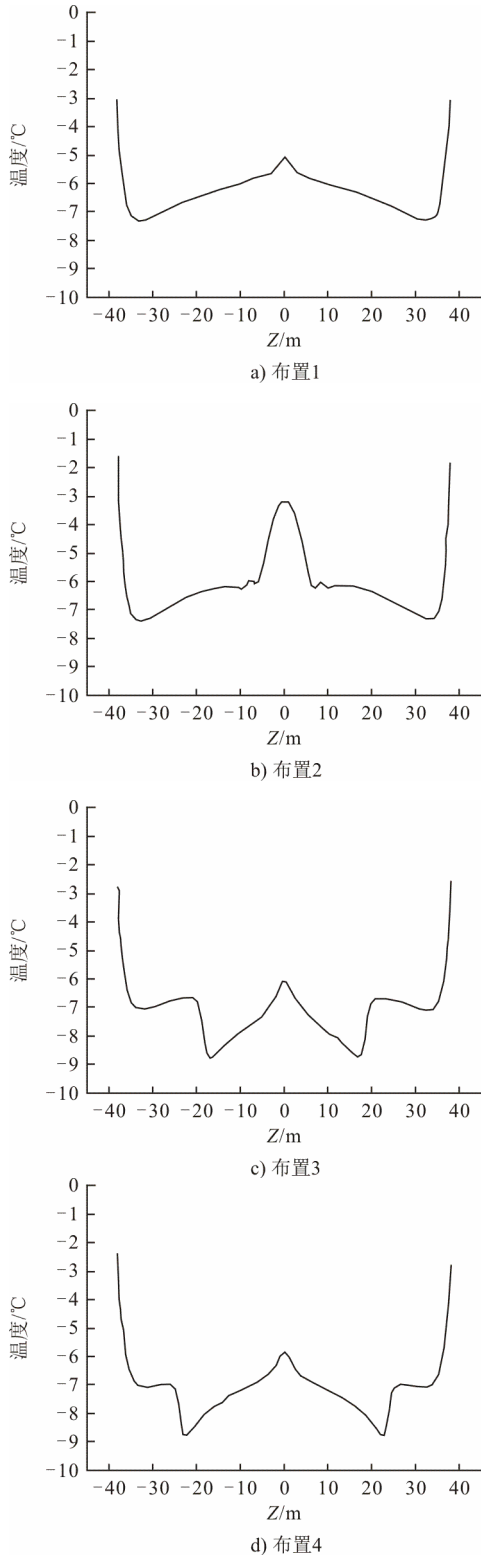


图 8 各布置方式下填料区底面特征线上冷却水温降分布
Fig.8 Cooling water temperature drop distribution on characteristic line of the bottom surface in the packed area for each arrangement method

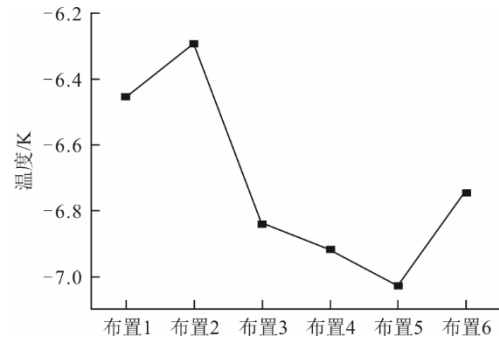


图 9 各布置下冷却塔填料区底部循环水平均温降
Fig.9 Average temperature drop of circulating water at bottom of the cooling tower packing area under each arrangement

2.4 2 种型式导风板性能对比

为对比 2 种型式导风板的优化效果, 本文在各布置高度下施加平板型导风板后进行数值模拟并与流线型导风板的计算结果进行对比。图 10 为各布置高度下 2 种型式导风板优化后的循环水温降对比, 图 11 为优化后冷却塔通风量对比, 图 12 为优化后冷却塔填料层底部循环水温降对比, 图 13 为平板型导风板在最低、最高布置高度时冷却塔速度、温度分布云图。

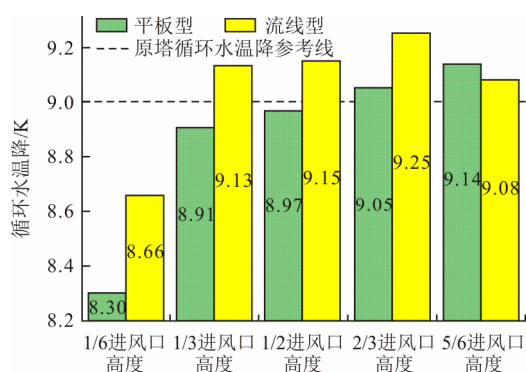


图 10 各布置高度下 2 种型式导风板下冷却塔温降对比
Fig.10 Temperature drop of the cooling tower under two types of air guide plate at each arrangement height

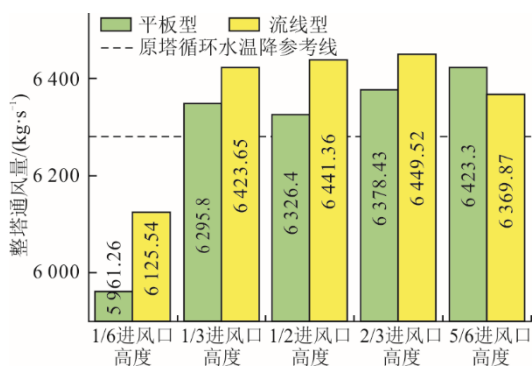


图 11 各布置高度下 2 种型式导风板下冷却塔通风量对比
Fig.11 Ventilation capacity of the cooling tower under two types of air guide plate at each arrangement height

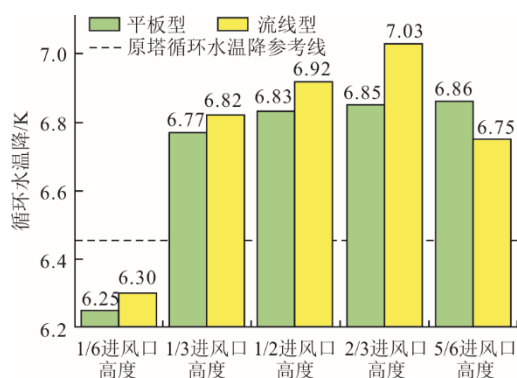


图 12 各布置高度下 2 种型式导风板下冷却塔填料层底部循环水温降对比
Fig.12 Temperature drop of circulating water at bottom of the packing layer of the cooling tower under two types of wind guide plate at each arrangement height

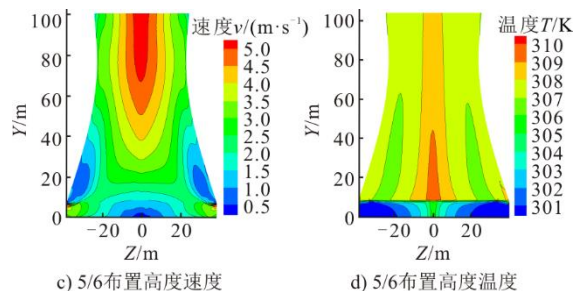
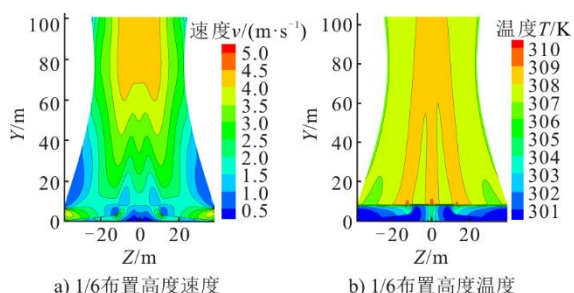


图 13 平板型导风板速度、温度分布云图
Fig.13 Velocity and temperature distribution cloud of flat plate type air guide plate

图 10—图 13 表明：与流线型导风板方案相似，当在 1/6 进风口高度布置平板型导风板时，冷却塔填料区换热性能恶化，整塔循环水温降劣于原塔。在剩余布置高度中，2 种型式导风板均使填料区循环水的热质传递得到优化，但流线型导风板更佳（仅在 5/6 进风高度时效果基本相当）；与流线型导风板不同，平板型导风板只有布置在 2/3 进风高度和 5/6 进风高度上才对整塔循环水温降有优化效果，其中 5/6 进风高度上达到最佳改善效果，整塔通风量增大了 140.44 kg/s，整塔循环水温降增大了 0.14 K。当布置高度较低时，虽然平板型导风板同样有驱使空气进入冷却塔中心区域的作用，但其对于流场结构破坏较大。首先是在导风板起点位置，空气会直接冲击导风板，这会增大局部损失，降低空气动能，其次在相同布置高度，不同型式的导风板对进风口上沿的速度影响有较大差异，平板型导风板会在该区域造成较大的低速区域，使该区域本就不理想的热质交换环境变得更差。因此，在 2 种型式导风板对比中，流线型导风板在各个高度上整体表现优秀，而平板型导风板在大多高度上改造效果甚至劣于原塔，表明其不适于进行工程改造。同时，平板型导风板的加入会导致水幕大范围出现，更不宜雨区进风。

3 结 论

本文在设计工况下，建立了 4 500 m² 某常规冷却塔和布置流线型或平板型导风板的冷却塔三维数值计算模型，计算分析流线型导风板布置高度对冷却塔换热效果的影响。主要结论如下。

1) 流线型导风板的布置高度对冷却塔的冷却效果有着不同的影响。这种影响主要是由于流场结构变化后，使得空气速度温度场对填料区换热性能带来的变化。随着布置高度的升高，性能呈现先上

升后下降的趋势。在布置高度为进风口高度 2/3 时取得相对最优值, 在布置高度为进风口高度 1/6 时取得相对最差值。

2) 当布置高度为进风口高度 2/3 时, 与原始常规塔相比: 填料层底部空气平均温度降低 1.13 K, 整塔通风量增大 166.66 kg/s, 相对增长 2.65%, 循环水温降增大了 0.25 K, 相对增长 2.78%。

3) 通过 2 种型式导风板性能对比, 在各自最优布置高度下, 布置流线型导风板相比于布置平板型导风板, 循环水温降增大了 0.11 K, 相对增长 1.2%。

[参 考 文 献]

- [1] 韩丹阳, 刘江, 王明勇, 等. 填料不等间距布置对冷却塔冷却效果的影响[J]. 汽轮机技术, 2017, 59(4): 253-256.
HAN Danyang, LIU Jiang, WANG Mingyong, et al. Impact of fill unequal interval layout on cooling tower cooling performance[J]. Turbine Technology, 2017, 59(4): 253-256.
- [2] 唐磊, 刘严雪, 何锁盈, 等. 环境侧风对大型逆流式冷却塔性能影响试验研究[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 144-151.
TANG Lei, LIU Yanxue, HE Luoying, et al. Experimental study on effect of ambient crosswind on performance of large counter-flow cooling towers[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 144-151.
- [3] 王明勇, 栾俊, 刘江. 冷却塔填料布置方式对热力性能的影响[J]. 热力发电, 2018, 47(3): 82-87.
WANG Mingyong, LUAN Jun, LIU Jiang. Impact of non-uniform fill layouts of the cooling tower on thermal performance[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(3): 82-87.
- [4] 王明勇, 闵昌发, 贾继武, 等. 空气导流装置对大型自然通风湿式冷却塔性能影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 132-136.
WANG Mingyong, MIN Changfa, JIA Jiwu, et al. Effect of air guiding baffles on performance of natural draft wet cooling tower[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 132-136.
- [5] AL-WAKED R, BEHNIA M. CFD simulation of wet cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(4): 382-395.
- [6] KLOPPERS J C, KROGER D G. Cooling tower performance evaluation: merkel, poppe, and e-NTU methods of analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(1): 1-7.
- [7] 周兰欣, 蒋波, 叶云飞. 湿式冷却塔热力性能数值分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 53-58.
ZHOU Lanxin, JIANG Bo, YE Yunfei. Numerical study of thermal performance on wet cooling tower[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2009, 36(1): 53-58.
- [8] 王凯. 具有导风板的自然通风逆流湿式冷却塔进风阻力研究及性能优化[D]. 济南: 山东大学, 2009: 1.
WANG Kai. Research on flow resistance of inlet air and performance optimization of natural draft counterflow wet cooling tower with air deflectors[D]. Jinan: Shandong University, 2009: 1.
- [9] 陈友良. 基于控风和导流机理的湿式冷却塔内部空气动力场的优化与重构[D]. 济南: 山东大学, 2013: 1.
CHEN Youliang. Optimization and reconstruction of the aerodynamic field in wet cooling tower based on wind control and guide mechanism[D]. Jinan: Shandong University, 2013: 1.
- [10] 周兰欣, 金童, 尹建兴, 等. 火电机组湿式冷却塔加装导流板的数值研究[J]. 汽轮机技术, 2010, 52(1): 13-16.
ZHOU Lanxin, JIN Tong, YIN Jianxing, et al. Numerical study on on wet cooling tower with baffle plates in thermal power generating units[J]. Turbine Technology, 2010, 52(1): 13-16.
- [11] 周兰欣, 吴瑞康, 丁斌开, 等. 自然通风湿式冷却塔加装中央补风管的数值研究[J]. 热力发电, 2014, 43(7): 27-31.
ZHOU Lanxin, WU Ruikang, DING Binkai, et al. Numerical study on a natural draft wet cooling tower with central catheter pipes[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(7): 27-31.
- [12] 周兰欣, 刘正良, 弓学敏. 湿式冷却塔加装导风管的数值研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 96-100.
ZHOU Lanxin, LIU Zhengliang, GONG Xuemin. Numerical study on wet cooling tower with catheter[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2011, 38(6): 96-100.
- [13] 周兰欣, 马少帅, 刘正良, 等. 一种新型进风导流装置在冷却塔中应用的数值研究[J]. 华东电力, 2013, 41(6): 1359-1363.
ZHOU Lanxin, MA Shaoshuai, LIU Zhengliang, et al. Numerical research on the application of new type of inlet-air diversion device in cooling tower[J]. East China Electric Power, 2013, 41(6): 1359-1363.
- [14] CHEN X H, SUN F Z, CHEN Y L, et al. New retrofit method to improve the thermal performance of natural draft wet cooling towers based on the reconstruction of the aerodynamic field[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 132: 671-680.
- [15] 金童. 湿冷机组自然通风冷却塔加装导流板的数值模拟[D]. 保定: 华北电力大学(保定), 2010: 1.
JIN Tong. Numerical simulation on natural draft wet cooling tower installing deflectors[D]. Baoding: North China Electric Power University (Baoding), 2010: 1.
- [16] 王妮妮, 张政清, 邹健, 等. 雨区干湿混合模式对超大型湿式冷却塔传热传质性能影响的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4927-4935.
WANG Nini, ZHANG Zhengqing, ZOU Jian, et al. Numerical simulation on the effect of dry-wet hybrid cooling in rain zone on heat and mass transfer performance for the super-large wet cooling towers[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4927-4935.
- [17] 张政清. 干-湿雨区对超大型湿式冷却塔三维流场及热质传递特性影响的研究[D]. 济南: 山东大学, 2022: 1.
ZHANG Zhengqing. Study on the influence of dry-wet hybrid rain zone on three-dimensional flow field and heat-mass transfer characteristics in super-large wet cooling towers[D]. Jinan: Shandong University, 2022: 1.
- [18] 张政清, 王明勇, 张德英, 等. 超大型湿式冷却塔干湿混合雨区正交优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8224-8232.
ZHANG Zhengqing, WANG Mingyong, ZHANG Deying, et al. Study on orthogonal optimization for the

- super-large wet cooling tower with dry-wet hybrid rain zone[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8224-8232.
- [19] 范进宇, 刘江, 王春艳, 等. 自然通风高位收水冷却塔性能对比分析[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(1): 25-28.
FAN Jinyu, LIU Jiang, WANG Chunyan, et al. Performance analysis of high-level water collecting cooling tower[J]. Turbine Technology, 2021, 63(1): 25-28.
- [20] 张强, 徐文文, 陈刚, 等. 一种高位收水冷却塔: 202221306697.1[P]. 2022-11-25[2024-01-08].
ZHANG Qiang, XU Wenwen, CHEN Gang, et al. A kind of high level receiving water cooling tower: 202221306697.1[P]. 2022-11-25[2024-01-08].
- [21] WILLIAMSON N, ARMFIELD S, BEHNIA M. Numerical simulation of flow in a natural draft wet cooling tower the effect of radial thermofluid fields[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(2/3): 178-189.
- [22] 王福军. 计算流体动力学分析 CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1.
WANG Fujun. Principles and applications of CFD software for computational fluid dynamics analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1.
- [23] 刘江, 韩丹阳, 白路平, 等. 环境参数对冷却塔性能影响的综合分析[J]. 汽轮机技术, 2017, 59(5): 345-348.
LIU Jiang, HAN Danyang, BAI Luping, et al. Comprehensive analysis of the impact of environmental parameters on the performance of cooling tower[J]. Turbine Technology, 2017, 59(5): 345-348.
- [24] 赵元宾. 侧风对于自然通风逆流湿式冷却塔传热传质影响机制的研究[D]. 济南: 山东大学, 2009: 1.
ZHAO Yuanbin. Mechanism research of crosswind effect on heat and mass transfer in natural draft counterflow wet cooling tower[D]. Jinan: Shandong University, 2009: 1.
- [25] 赵振国. 冷却塔[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 25-28.
ZHAO Zhenguo. Cooling tower[M]. Beijing: China Water Power Press, 1997: 25-28.
- [26] 王晨晨, 刘江, 王明勇, 等. 基于数值方法确定冷却塔雨区水滴粒径分布[J]. 汽轮机技术, 2018, 60(5): 353-356.
WANG Chenchen, LIU Jiang, WANG Mingyong, et al. The numerical analysis of water droplets diameter in the rain zone of cooling tower[J]. Turbine Technology, 2018, 60(5): 353-356.

(责任编辑 邓玲惠)