文章编号：1008－8857(2021)04－0214－08　**DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2021.04.005

湿式冷却塔进风口加装导风板的优化设计

金琦凡，王宏光
（上海理工大学 能源与动力工程学院/上海市动力工程多相流动与传热重点实验室，上海 200093）

摘　要：基于两相流传热传质理论，利用 Fluent 软件模拟 300 MW 机组冷却塔填料区使用多孔介质时的通风率，采用离散相模型（DPM）在配水区上表面加入热水，模拟研究新型旋流型叶片导风板的优化能力，给定不同弧度及安装角，分别在 0、3 和 7 $m \cdot s^{-1}$ 风速下计算冷却塔出塔水温，并分析侧风对冷却塔冷却性能的影响。研究结果表明：加装导风板可以降低侧风引起的不利影响，导风板数量为 50 块时效果最好，旋流型叶片导风板的最佳安装角为 20°，此时旋流型叶片的最佳弧度为 15°，最大温降可达 0.787 4 K。研究结果为火电厂选择导风板提供了依据。

关键词：导风板；侧风；数值模拟；多孔介质；冷却塔
中图分类号：TK124　　**文献标志码**：A

Optimal design of air deflector installed in the wet cooling tower

JIN Qifan，WANG Hongguang
(School of Energy and Power Engineering/Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the heat and mass transfer of two-phase flow, the ventilation rate of packing area with porous media in the cooling tower of 300 MW unit was simulated using Fluent software. The optimization of new type of swirl vane air deflector under different radians and installation angles was simulated using the discrete phase model (DPM) combined with adding hot water on the surface of water distribution zone. The outlet water temperature of the cooling tower at the air velocity of 0 $m \cdot s^{-1}$, 3 $m \cdot s^{-1}$ and 7 $m \cdot s^{-1}$ was calculated, respectively. The effect of crosswind on the performance of cooling tower was analyzed. The results showed that the installation of air deflector could reduce the adverse effect caused by the crosswind. The best performance was achieved with air deflectors of 50. The optimum installation angle of swirl vane deflector was 20°. Meanwhile the optimum radian of the swirl vane was 15°. And the maximum temperature drop of 0.787 4 K was achieved at last. The research results could provide a theoretical basis for the selection of air deflector in the power plant.

Keywords: air deflector; crosswind; numerical simulation; porous media; cooling tower

收稿日期：2018－12－27
第一作者：金琦凡（1994—），女，硕士研究生。研究方向：动力工程。E-mail：821789086@qq.com

自然通风逆流湿式冷却塔是一种大型空间薄壁开口结构，是火电厂热力循环中重要的冷端设备。近年来随着用电负荷急剧增加，能源日益紧张，冷却塔的节能潜力巨大。冷却性能受环境因素影响，尤其是受环境侧风的影响。冷却塔性能差会使循环冷却水的温度升高，导致凝汽器真空度下降，汽轮机效率降低，最终使机组发电煤耗增加，影响电厂热效率[1–4]。以 300 MW 机组冷却塔为例，出塔水温每提高 1 ℃，其效率降低 0.23%，发电标准煤耗增加 0.738 g·(kW·h)$^{-1}$。

赵元宾等[5]对风速廓线指数和雨滴当量直径进行了敏感性分析，结果表明，侧风造成进风口进风相对偏离度增大，从而影响冷却塔冷却性能。周兰欣等[6]基于 Poppe 热质交换模型以及 Fluent 软件自定义源项方法，建立了比较完善、适用的冷却塔数值求解模型，并对不同风速下塔内外空气动力场进行了研究。Al-Waked 等[7]发现在冷却塔内部加装十字隔墙可以改善由于侧风引起的冷却塔冷却性能下降问题，并提出了新型的防风墙措施。Al-Waked 等[8–10]采用标准的 $k-\varepsilon$ 模型对不同运行工况下的冷却塔进行了传热传质模拟，发现在冷却塔内放置多孔性固体墙可以改善冷却塔冷却性能。金童等[11]对冷却塔加装导风板进行了数值模拟，分析了安装角对冷却塔冷却性能的影响。

当前文献研究的导风板均为直板型，针对导风板的形状、结构参数优化的研究还很少，故本文将对导风板的形状、弧度、数量及安装角等进行优化设计，分析在环境侧风影响下，不同导风板结构参数对冷却塔冷却性能的影响。

1　计算方法

1.1　连续相控制方程

自然通风逆流湿式冷却塔内，在配水区、雨区及填料区采用离散相模型模拟冷却塔的流场，其中：水滴作为离散相，采用拉氏法求解；空气作为连续相，采用欧拉法求解。在离散型中选择蒸发模型，填料区的阻力采用多孔介质模型进行计算。

空气作为连续相，在机组工况稳定运行时，将塔内外的流场当作稳态进行计算，控制方程的通用形式[12]为

$$\nabla\cdot\left(\rho u_i\phi-\Gamma_\phi\nabla\phi\right)=S_\phi+S_{p\phi} \tag{1}$$

式中：ρ 为空气密度，kg·m^{-3}；u_i 为各方向速度矢量，m·s^{-1}；ϕ 为通用变量，可代表各方向速度分量（u、v、w）和温度 T 及动能 k 和湍流耗散率 ε；Γ_ϕ 为广义扩散系数；S_ϕ 为湿空气中所含水滴蒸发的质量汇；$S_{p\phi}$ 为因湿空气和水滴相互作用的额外源项；∇ 为微分算子。

1.2　离散相控制方程

在自然通风逆流湿式冷却塔内，冷却水以水滴的形式自由下落，附着在填料层上成为模态流动，与空气进行热交换。其换热形式主要以水气接触对流换热和冷却水蒸发换热为主，塔内辐射换热量很小，可忽略不计。

将水滴作为离散相，计算水滴的轨迹、质量、动量和能量传递。在配水区及雨区，冷却水以水滴的形式自由下落，水滴的温度可通过其热平衡得出。热平衡的计算式将水滴的焓变与两相流的对流传热和汽化潜热联系起来[13]，即

$$M_{\mathrm{p}}c_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=hA_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{adb}}-T_{\mathrm{p}}\right)+\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}h_{\mathrm{fg}} \tag{2}$$

式中：M_{p} 为水滴质量，kg；c_{p} 为水滴比热，J·(kg·K)$^{-1}$；T_{p} 为水滴温度，K；t 为时间，s；h 为对流传热系数，W·(m^2·K)$^{-1}$；A_{p} 为水滴表面积，m^2；T_{adb} 为单元内气相干球温度，K；h_{fg} 为液体的汽化潜热，J·g^{-1}。

1.3　填料区多孔介质模型

在填料区使用多孔介质模型，通过定义黏性惯性阻力系数及孔隙率，模拟流体流过填料层所受的阻力及通风率，根据经验公式（Darcy 定律）确定系数大小。本文中采用 Ergun 模型，并在动量方程中增加一个源项，源项代表动量消耗，公式为

$$S_i=-\left(\sum_{j=1}^{3}\boldsymbol{D}_{ij}\mu v_j+\sum_{j=1}^{3}\boldsymbol{C}_{ij}\frac{1}{2}\rho\left|v_j\right|v_j\right) \tag{3}$$

式中：S_i 为 i 方向（x，y，z）的动量源项；$\boldsymbol{D}$ 和 $\boldsymbol{C}$ 是规定的矩阵；μ 为流体动力黏度，m^2·s^{-1}；v 为空气速度，m·s^{-1}。

本文中孔隙率为 0.85，y 向惯性阻力系数为 14，x 向和 z 向惯性阻力系数为均 171。

空气流经配水区及雨区时所受阻力可通过编写用户自定义函数(UDF)计算。单位体积雨滴对空气造成的阻力[14–16]为

$$F_x = -\frac{6q}{\rho_w \pi |v_w| d_p^3} C_d Re_d \frac{\pi d_p \mu}{8} v_x \quad (4)$$

$$F_y = -\frac{6q}{\rho_w \pi |v_w| d_p^3} C_d Re_d \frac{\pi d_p \mu}{8} (v_y + v_w) \quad (5)$$

$$F_z = -\frac{6q}{\rho_w \pi |v_w| d_p^3} C_d Re_d \frac{\pi d_p \mu}{8} v_z \quad (6)$$

式中：q为淋水密度，$t\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$；v_x、v_y、v_z分别为空气 3 个方向的速度，$m\cdot s^{-1}$；v_w为水滴的下落速度，$m\cdot s^{-1}$；d_p为水滴直径，m；ρ_w为水的密度，$kg\cdot m^{-3}$；Re_d为湿空气相对于球形雨滴运动的雷诺数；C_d为球形雨滴的阻力系数。

2 物理模型及边界条件

2.1 模型建立

本文以 300 MW 机组冷却塔为模拟对象。采用双曲线型冷却塔风筒，并采用 SolidWorks 软件按照冷却塔实物尺寸绘制几何模型。为便于模拟，对冷却塔进行一定的简化。简化后的冷却塔结构参数如表 1 所示。

表 1 冷却塔结构参数

Tab. 1 Geometry of the cooling tower

参数名称	数值	参数名称	数值
冷却塔高度/m	125	配水区高度/m	1.7
喉部标高/m	117	塔底半径/m	46.46
雨区标高/m	8	喉部中面半径/m	26.19
填料层高度/m	1.1	塔顶半径/m	28.16

在建立计算域时，认为计算域边界空气仅沿水平方向流动。定义风速所在方向为 x 轴，在环境状况和机组运行稳定时，塔内外的空气流场也处于稳态。计算区域边界条件如图 1 所示。计算区域高为 500 m，约为冷却塔本身高度的 5 倍；计算区域半径为 500 m，约为冷却塔进风口半径的 10.76 倍。流体入口采用速度入口边界条件，出口采用压力出口边界条件，表压为 0 Pa。工况参数通过实测得到，环境干球温度为 301.32 K，大气压力为 98.1 kPa，进塔水温为 311 K，进塔水质量流量为 15 000 $kg\cdot s^{-1}$，水滴直径为 5 mm，相对湿度为 73%。

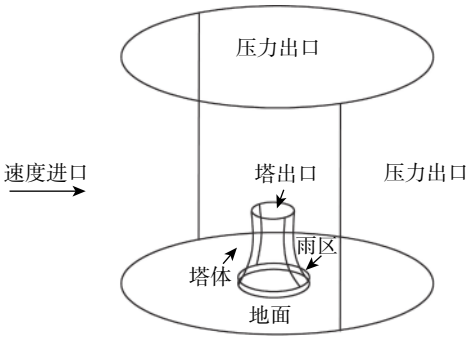


图 1 计算区域边界条件

Fig. 1 Boundary conditions of calculation domain

2.2 网格划分

采用 ICEM 软件建立混合网格。冷却塔网格示意图如图 2 所示。由于冷却塔传热传质主要集中在配水区、填料区和雨区，故冷却塔内部采用结构体网格划分，环境区域采用非结构网格划分，模型网格总数约为 100 万。网格划分时不考虑导风板的厚度，对塔筒内、外网格做边界层处理，以准确模拟塔筒周围流场。对导风板进行网格加密处理，以便准确模拟导风板边界层厚度，避免出现塔底进风口阻力过大的现象。

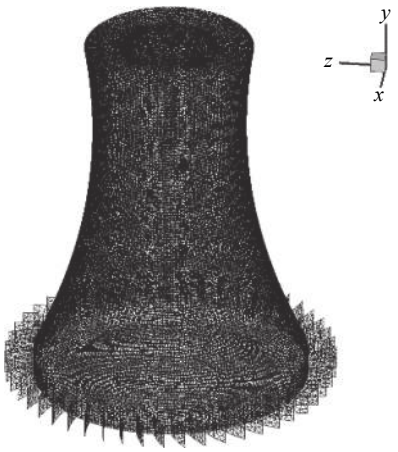


图 2 冷却塔网格示意图

Fig. 2 Grid of the cooling tower

3　计算结果分析

3.1　工况设置

对新型旋流型叶片导风板进行数值模拟，并将其与目前常用的直板型导风板进行分析、比较。对不同弧度及安装角的旋流型叶片导风板分别模拟计算出塔水温，弧度分别为 15°、30°、45°、60°，安装角分别为 0°、20°、30°、40°。图 3 为旋流型叶片导风板示意图。表 2 为叶片导风板计算工况。采用无风(0 m·s^{-1})、低风速(3 m·s^{-1})及高风速(7 m·s^{-1})三种工况，以模拟不同环境风速下导风板的优化效果。

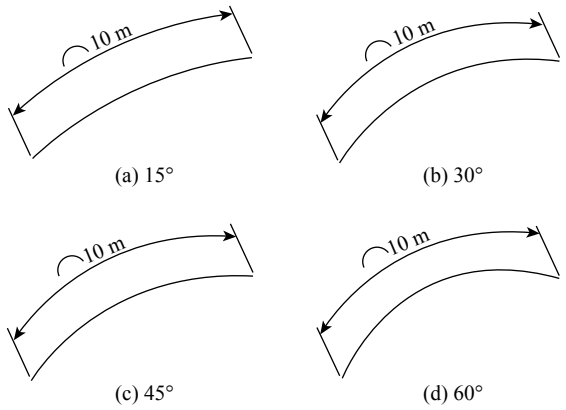


图 3　旋流型叶片导风板示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the swirl vane deflector

3.2　导风板数量优化

导风板数量的选取会影响冷却塔冷却性能，而不同尺寸冷却塔的最佳导风板数量并不唯一，故本文中选取直板型导风板，并分别在 0、3、7 m·s^{-1} 风速下，加装 10、20、30、40、50、60 块导风板，以模拟最优导风板数量。导风板均在雨区外围相隔同等距离安装，安装角均为径向(安装角为 0°)。不同导风板数量 N 时的出塔水温 t_2 和温降 Δt 如图 4 所示，其中温降指加装导风板时的出塔水温与未加装导风板时的出塔水温相比的下降值。

水滴通过配水区进入填料层再进入雨区。提取降落到雨区底部的水滴平均温度作为出塔水温。从图 4 中可以看出：当风速为 3 m·s^{-1}、未加装导风板时，出塔水温为 302.921 4 K；加装 10 块导风板后，出塔水温降至 302.846 0 K，只有 0.075 4 K 的温降。这是由于冷却塔塔底直

表 2　叶片导风板计算工况

Tab. 2　Calculation conditions of different vane air deflectors

序号	导风板类型	弧度/(°)	安装角/(°)
1	旋流型	15	0
2			20
3			30
4			40
5		30	0
6			20
7			30
8			40
9		45	0
10			20
11			30
12			40
13		60	0
14			20
15			30
16			40
17	直板型	无	0
18			20
19			30
20			40

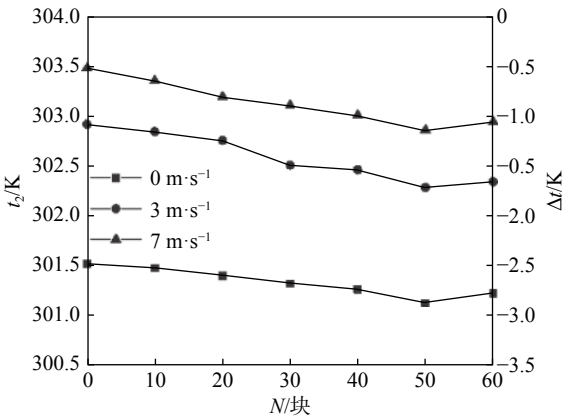


图 4　不同风速下不同导风板数量时的出塔水温

Fig. 4　Outlet water temperature of the towers installed with different numbers of air deflectors at different air velocities

径为 92.92 m，而导风板数量只有 10 块，每隔 29.17 m 才有 1 块导风板，这不足以整流入口来流空气，以使其往塔中心处偏转。由于侧风风速较大，横向通风量增加，大量空气与背风侧空气碰撞产生漩涡，部分空气还会直接从背风侧流出，形成“穿堂风”。由于导风板数量少，只有导风板附近的空气速度有所下降，降温效果不明显。当导风板数量增加后，出塔水温逐渐降低，气流量增加，并均匀流过填料层，增强了水气间的热质交换。导风板数量为 50 块时，出塔水温为 302.388 8 K，温降达 0.532 6 K。当导风板数量进一步增加时，出塔水温反而逐渐升高。这是由于导风板数量过多，间距过短，影响了通风量，导致降温效果变差。

3.3 导风板弧度及安装角优化

为便于分析比较，分别选取旋流型叶片导风板弧度为 15°、30°、45°、60°，直板型导风板在本文等同于弧度 0°，安装角分别为 0°、20°、30°、40°。图 5 为导风板安装角示意图。由前文模拟结果可知，未加装导风板时，出塔水温为 302.921 4 K。图 6 为不同弧度导风板在各安装角下的出塔水温和温降。

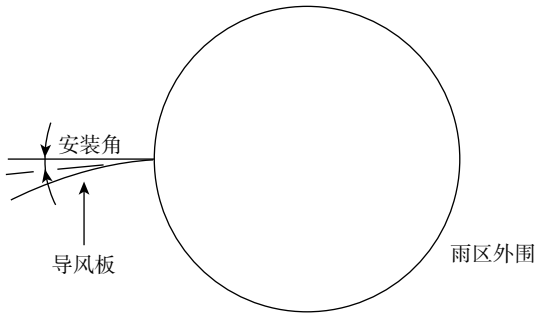


图 5 导风板安装角示意图

Fig. 5 Installation angle of the air deflector

由图 6 中可知，对于旋流型叶片导风板，出塔水温在导风板安装角为 0°和 20°时最低，此时冷却塔的冷却效果最好。对于直板型导风板，安装角为 30°和 40°时的出塔水温相差不大，冷却效果优于安装角为 0°和 20°时的直板型导风板。由于篇幅有限，本文重点分析旋流型叶片，故主要分析 0°和 20°安装角的冷却塔空气动力场分布。

当安装角为 0°时：弧度为 30°的旋流型叶片导风板降温效果最明显，与未加装导风板时相比，

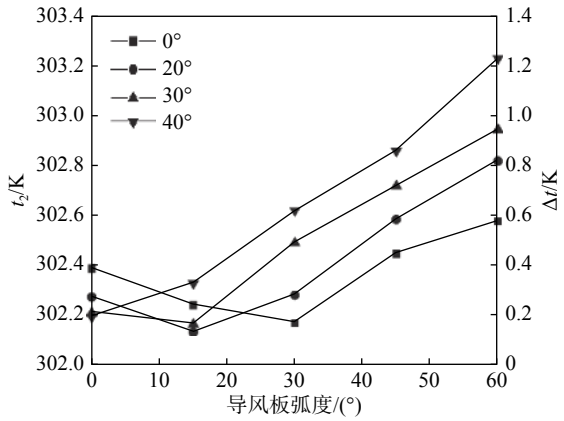


图 6 不同弧度导风板在各安装角下的出塔水温和温降

Fig. 6 Outlet water temperature under different installation angles of the air deflector

出塔水温温降可达 0.750 1 K；加装弧度为 15°的旋流型叶片导风板时温降为 0.749 2 K，此时导风板弧度较小，空气从进风口流入时切向角较小，气流无法被整流至冷却塔中心，水气接触面积减少，故冷却效果不及 30°旋流型叶片导风板，但优于直板型导风板；而弧度为 45°和 60°的旋流型叶片导风板优化效果并不理想，出塔水温高于直板型导风板。但相较于未加装导风板时分别有 0.472 1 、0.341 9 K 的温降。其原因是弧度大于一定值时，导风板切向角度过大，在降低导风板附近气流速度的同时阻挡了部分气流流入塔内，使得通风量减少，水气换热面积减少。

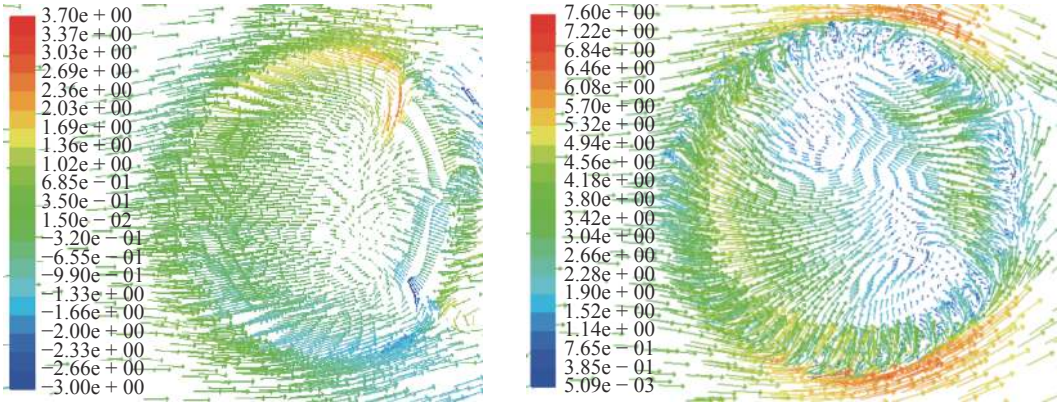
当安装角为 20°时：弧度为 15°的旋流型叶片导风板导风性能最好，与未安装导风板时相比，出塔水温降低 0.787 4 K；当弧度进一步增大，可以发现，弧度为 60°的旋流型叶片导风板出塔水温为 302.821 0 K，高于未加装导风板时的出塔水温。这是由于导风板弧度过大，气流进入雨区时受其弧度影响，径向速度过小；且安装角较大，气流在导风板附近有明显的停滞区域，纵向通风量减少，影响了塔内的水气换热，导致温降为负值。

3.4 进风口流场分析

图 7(a)为 $v = 3\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 下进风口未加装导风板时雨区横截面的空气流线图。由图中可知，进风口附近很多空气流线沿切向角流出塔外，速度在进风口处很大，形成“穿堂风”。纵向通风量

减少，向上进入雨区及填料区的空气量严重减少，大大减弱了空气与水的热质交换。冷却塔的换热主要集中在雨区及填料区，致使出塔水温升高，冷却塔的冷却效率降低。

图 7(b)为 $v = 3\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 下加装安装角为 20°、弧度为 15°的旋流型叶片导风板时在雨区横截面的空气流线图。由前文可知，此时出塔水温温降最大，为 0.787 4 K。导风板的弧度直接影响了气流进入雨区时的切向扭转角度，气流沿特定角度进入塔内，导风板附近气流速度降低。同时，气流受到导风板的诱导作用，在塔中心形成稳定上升的气流，增加了纵向通风量，延长了气流停留时间，增加了水气接触面积与时间，使换热增强。



(a) 无导风板　　(b) 有导风板

图 7　$v = 3\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 时进风口雨区横截面空气流线图

Fig. 7　Inlet air streamlines at the cross section of rain zone and $v = 3\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$

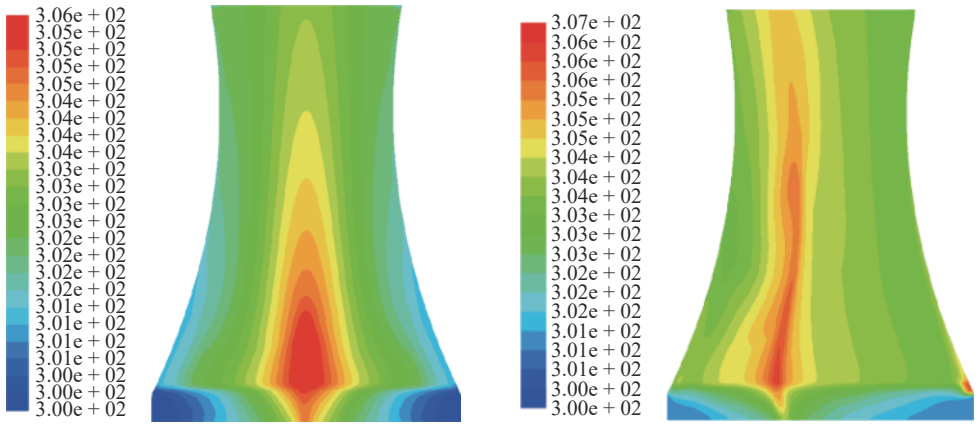
由图 7 中可知，加装导风板是一种将空气重新分配的简单、有效的方法，简称空气动力涡流装置。通过诱导空气按照一定的轨迹运动，使进塔的气流均匀流过填料层及雨区，在冷却塔内形成一股旋转稳定上升的气流，减弱外界侧风对塔的不利影响。也由于装置的诱导作用，空气进风量增加，增加了水气接触面积，改善了侧风对冷却塔的不利影响。

3.5　$y = 0$ 截面的空气温度场分析

图 8(a)为 $v = 0\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 下 $y = 0$ 截面空气温度分布。由于空气与水的接触散热及水的蒸发散热，无侧风时空气温度由外向内沿径向逐次升高。塔中心处的空气温度最高，温度分布对称。这是由于无侧风条件下，水气接触均匀，空气从四周进入塔内，逐渐与水发生热量交换，空气吸收热量伴随部分水滴蒸发，水蒸气上升。雨区内，空气在中心处温度最高；雨区以上的塔内区域，空气温度由外向里逐渐升高。雨区外围循环水冷却最为充分，部分区域水温甚至低于环境温度，这是因为该区域水的蒸发散热较强；冷却塔中心的高温水在落入雨区前冷却得极不充分，影响了冷却水的温降，也降低了冷却塔的换热性能。

图 8(b)为 $v = 3\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 下 $y = 0$ 截面的空气温度分布。由图中可知，空气温度分布的轴对称性被打破，空气温度场的高温区域出现在塔的背风侧。迎风面风速高，背风面风速低，两股气流相遇后，在迎风侧进风口上缘气流相碰撞，引起空气回流，延长水气接触时间，还会使进入冷却塔的空气量减少，致使冷却塔出塔水温增高，冷却效率降低。

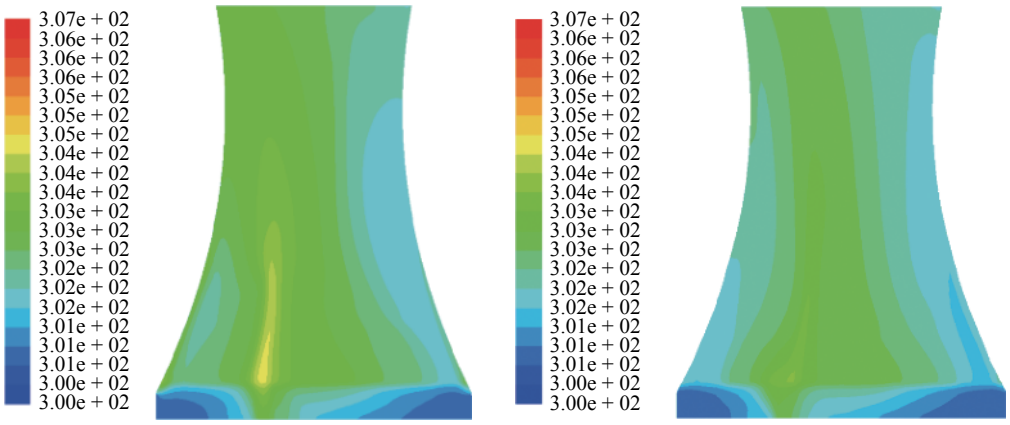
图 9(a)为加装 50 块直板型导风板、安装角为 20°时 $y = 0$ 截面的空气温度分布。图 9(b)为安装 50 块旋流型叶片导风板，弧度为 15°、安装角为 20°时 $y = 0$ 截面的空气温度分布。与未加装导风板相比，加装导风板后空气温度分布更加均匀，中心区域温度降低，高温区域面积明显减少。由于旋流型叶片导风板本身具有一定的弧度，配合一定安装角，四周的来流会沿给定角度整流后进入冷却塔，使冷却塔内的通风量增加。



(a) $v = 0\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ (b) $v = 3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

图 8 不同风速下 $y = 0$ 截面温度分布

Fig. 8 Temperature distribution at the cross section $y = 0$ and $v = 3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ under different air velocity



(a) 直板型导风板 (b) 旋流型导风板

图 9 安装角为 20°时 $y = 0$ 截面的空气温度分布

Fig. 9 Temperature distribution at the cross section $y = 0$ and the installation angle = 20°

并在塔中心形成稳定旋转上升气流，增加了水气接触面积与时间，使气流分配更均匀，从而使出塔水温降低，冷却效率提及。

4 结 论

采用空气动力涡流装置，为使导风板的优化效果最佳，对不同弧度旋流型叶片导风板及直板型导风板进行数值模拟。基于冷却塔内的两相流传热传质理论，结合计算流体力学(CFD)软件特点，并在雨区及填料区使用用户自定义编程(UDF)编写阻力源项，多孔介质模拟填料区通风率，得出结论如下：

(1)导风板数量对环境侧风下冷却塔的冷却效果有一定影响。导风板数量为 50 块时冷却效果最好。当导风板数量进一步增加，出塔水温反而升高。

(2)导风板的安装角对不同类型的导风板的冷却效果影响不同。对于旋流型叶片导风板，安装角为 20°时效果最优；对于直板型导风板，安装角为 40°时效果最优。

(3)旋流型叶片导风板的弧度对冷却塔的冷却效果有很大影响。安装角为 20°时，弧度为 15°的旋流型叶片导风板温降最大，可达 0.787 4 K；弧度为 60°的旋流型叶片温降反为负值，说明弧度过大对进风不利；安装角为 0°时，弧度为 30°的旋流型叶片导风板降温效果最好，优于 45°和 60°的旋流型叶片导风板，温降可达 0.750 1 K。

旋流型叶片导风板能更好地提高冷却塔冷却效率，但其弧度的选择非常重要，且配合不同的安装角有不同的选择要求。

自然通风逆流湿式冷却塔的冷却效率受环境侧风的影响很大，而雨区外围的空气动力涡流装置能改善侧风产生的不利影响，导风板结构参数的优化与冷却塔运行工况、环境气候条件以及冷却塔尺寸等诸多因素有关，针对具体的冷却塔还需进行针对性的导风板优化设计。

参考文献：

[1] 李秀云, 林万超, 严俊杰, 等. 冷却塔的节能潜力分析 [J]. 中国电力, 1997, 30(10): 34 – 36.

[2] 张磊. 自然通风逆流湿式冷却塔三维热力性能测试方法与评价模型研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016: 17 – 44.

[3] 胡三季, 陈玉玲, 刘廷祥, 等. 不同高度淋水填料的热力及阻力性能试验 [J]. 工业用水与废水, 2005, 36(1): 76 – 78.

[4] 王泽军, 刘宝兴. 大型电站哈蒙式空冷系统的热力计算 [J]. 上海理工大学学报, 2006, 28(5): 503 – 506.

[5] 赵元宾, 孙奉仲, 王凯, 等. 侧风对湿式冷却塔空气动力场影响的数值分析 [J]. 核动力工程, 2008, 29(6): 35 – 40.

[6] 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.

[7] AL-WAKED R, BEHNIA M. The effect of windbreak walls on the thermal performance of natural draft dry cooling towers[J]. Heat Transfer Engineering, 2005, 26(8): 50 – 62.

[8] AL-WAKED R, BEHNIA M. The performance of natural draft dry cooling towers under crosswind: CFD study[J]. International Journal of Energy Research, 2004, 28(2): 147 – 161.

[9] AL-WAKED R, BEHNIA M. CFD simulation of wet cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(4): 382 – 395.

[10] AL-WAKED R, BEHNIA M. Enhancing performance of wet cooling towers[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(10): 2638 – 2648.

[11] 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 (河北), 2010.

[12] 赵振国. 冷却塔 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 23–45.

[13] KLOPPERS J C. A critical evaluation and refinement of the performance prediction of wet-cooling towers[D]. Stellenbosch, South Africa: University of Stellenbosch, 2003.

[14] KLOPPERS J C, KRÖGER D G. Loss coefficient correlation for wet-cooling tower fills[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(17): 2201 – 2211.

[15] 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.

[16] 董瑞. 侧风对自然通风湿式冷却塔性能影响的数值研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.

信息

我国首个柔性直流海上风电项目首批机组并网

11 月 8 日，三峡集团江苏如东海上风电项目（简称三峡如东项目）首台机组正式向江苏电网送电，标志着我国首个柔性直流海上风电项目首批机组成功并网。

三峡如东项目位于江苏省如东县黄沙洋海域，是亚洲首个采用柔性直流输电技术的海上风电项目，所发电能通过柔性直流输电工程输送至电网。该工程主要由两座海上升压站、一座海上换流站、一回直流海缆、一座陆上换流站组成。负责汇集输出三峡如东 H6、H10 项目（共 80 万 kW）以及中广核如东 H8 项目（30 万 kW）总计 110 万 kW 容量生产的电能，可有效解决海上风电场大容量、远距离输电问题。

（王　波）