

文章编号: 1000-4750(2018)02-0076-08

# 侧风对超大型冷却塔内空气动力场的影响研究

董国朝, 张建仁, 蔡春声, 韩 艳

(长沙理工大学桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室, 湖南, 长沙 410114)

**摘 要:** 对常见的七种导流叶片的侧风预防措施效果进行了 CFD 数值模拟, 为导流片的选取提供依据。在计算流体力学方法的基础上, 忽略塔内的传热传质过程, 引入风扇边界条件来模拟由于热蒸汽而引起的塔内抽力, 采用多孔介质边界条件来模拟全塔的阻力及填料区通风率, 并且在雨区和填料区使用 UDF 编写阻力源项程序来模拟空气流经塔内的阻力, 研究了不同型号导流片及不同侧风对塔内的空气动力场分布特性的影响。系统地得到了各种型号导流片在不同侧风下的整流效果, 定量的分析了侧风对塔内流场的影响, 给出了侧风防御措施的选取原则, 为冷却塔导流片的选取提供理论依据。

**关键词:** 冷却塔; 冷却塔导流片; 数值模拟; 阻力源项; 多孔介质

中图分类号: TM621.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.09.0736

## NUMERICAL INVESTIGATION OF CROSSWIND EFFECT ON AERODYNAMIC FIELD OF SUPER LARGE COOLING TOWER

DONG Guo-chao, ZHANG Jian-ren, CAI Chun-sheng, HAN Yan

(Key Laboratory for Safety Control of Bridge Engineering of Ministry of Education and Hunan Province, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** The effect of prevention measures on seven kinds of deflector under crosswind is simulated by CFD method. Based on the computational fluid dynamics method, and by ignoring the process of heat and mass transformation, the draft of the tower caused by hot steam is simulated by the boundary condition of fan. The resistance of tower and the ventilation rate of filling zone are simulated by porous medium boundary conditions, and the resistance of rain zone and the filling zone of the tower are calculated by the UDF source program. The rectifier effect of various types of deflector under different crosswind conditions and the quantitative analysis of the impact of crosswind on the flow field are obtained. The selection principle of crosswind defensive measures is presented so as to provide a theoretical basis for the selection of cooling tower deflector.

**Key words:** cooling tower; deflector of cooling tower; numerical simulation; resistance source; porous medium

自然通风逆流湿式冷却塔广泛用于电站冷凝器循环水的冷却过程中, 其冷却性能直接影响电站冷凝系统的运行效率。冷却塔的冷却性能与许多因素有关, 除了填料及配水系统的布置形式外, 环境侧风的存在会使塔内流场分布不均而降低冷却塔的冷却能力。研究各因素对于冷却塔性能的影响, 尤其是存在环境侧风下的冷却塔性能, 对于提高冷

却塔的设计水平, 提出改善冷却塔运行的有关措施, 具有重大的现实意义。

### 1 侧风对冷却塔性能影响研究现状

学者们采用各种措施来尽量减小侧风对冷却塔冷却性能带来的不利影响<sup>[1-7]</sup>。Al-Waked 等<sup>[8-9]</sup>的结果表明: 侧风影响下的十字隔墙有利于提高冷

收稿日期: 2016-09-25; 修改日期: 2017-03-14

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2015CB057706); 国家自然科学基金项目(51408061); 重点学科创新性项目(15ZDXK07)

通讯作者: 董国朝(1981—), 男, 广东阳春人, 讲师, 博士, 从事计算流体力学及桥梁风工程研究(E-mail: dgcepu@163.com).

作者简介: 张建仁(1958—), 男, 湖南湘阴人, 教授, 博士, 博导, 从事结构可靠度研究(E-mail: jianrenz@hotmail.com);

蔡春声(1963—), 男, 江西南昌人, 长沙理工特聘教授, 博士, 美洲风工程协会秘书长, 从事桥梁风工程研究(E-mail: cscsai@lsu.edu);

韩 艳(1978—), 女, 江苏连云港人, 副教授, 博士, 从事桥梁风工程及风-车-桥研究(E-mail: ce\_hanyan@163.com).

却塔的冷却性能，并提出了一种降低侧风影响的防风墙。张磊<sup>[10]</sup>通过现场测试与特异性分析方法提出了适合于针对侧风影响的通风导流改造措施的评价方法。刘德民<sup>[11]</sup>研究了不同数量导风板对冷却塔性能的影响，确定了导风板最佳加装方案。赵元宾等<sup>[12]</sup>指出：十字隔墙在低风速时对冷却塔冷却性能有利；高风速时，风向与迎风侧第一块隔墙的角度会影响冷却塔总体冷却性能。当前文献针对结果安全研究居多<sup>[13-14]</sup>，系统地研究不同侧风影响下各种导流措施对冷却塔冷却性能的影响研究依然较少。

要真实模拟运行状态下塔内的传热传质过程需要巨大的计算资源，特别是工况繁多时。因此，本文采用一种折中的方法研究所关心的问题：以软件 FLUENT 为基础，忽略塔内的传热传质过程，引入风扇边界条件来模拟由于热蒸汽而引起的塔内抽力，采用多孔介质来模拟塔的阻力及填料区通风率，在雨区和填料区使用 UDF 编写阻力源项程序来模拟空气流经塔内的阻力，研究了不同型号导流片及不同侧风对塔内的空气动力场分布特性的影响，为冷却塔导流片的选取提供理论依据。

## 2 计算工况及理论方法

### 2.1 工况设置

针对目前常见的七种导流叶片的侧风预防措施效果进行了模拟，包括：径向直线型叶片；径向旋流型叶片；横向百叶窗；切向直线型叶片；切向旋流型叶片；翼型导流板；格栅板。各导流叶片如图 1 所示；其中计算工况还模拟了十字隔墙对塔内空气动力场的影响。本文采用 B 类地貌梯度风，10 m 参考高度处的来流风速分别为 0 m/s、4 m/s 和 10 m/s，通过不同的侧向来流风速，研究不同风速对塔内空气动力场的影响。

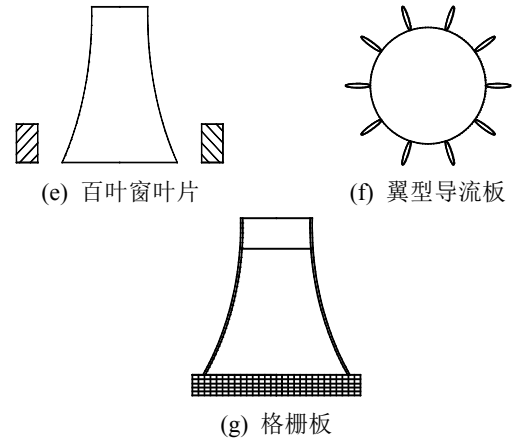
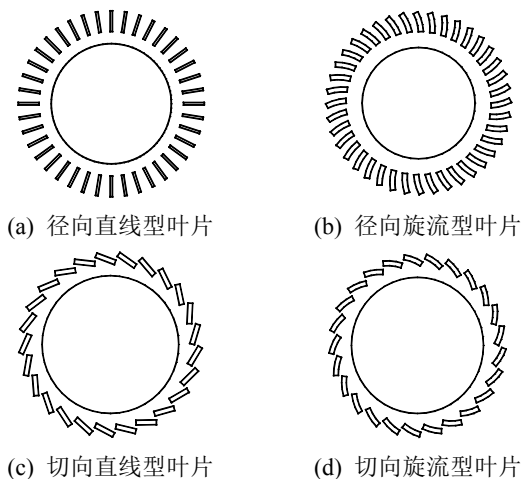


图 1 导流叶片示意图

Fig.1 Deflector of cooling tower

详细研究工况如表 1 所示。

表 1 塔内空气动力场计算工况表

Table 1 Calculation conditions of aerodynamic field

导流措施	序号	研究工况	风速/(m/s)
	1		0
	2	无十字隔墙	4
	3		10
	4		0
十字隔墙	5	十字隔墙，0°侧风	4
	6		10
	7		0
	8	十字隔墙，45°侧风	4
	9		10
径向直线叶片	10	长 6 m，间距 10°，	0
0°十字隔墙	11	高 15 m，距离 25 m	4
	12		10
径向旋流型叶片	13	长 6 m，间距 10°，	0
0°十字隔墙	14	高 15 m，距离 25 m，	4
	15	曲率半径 20 m	10
切向直线型叶片	16	长 6 m，间距 10°，	0
0°十字隔墙	17	高 15 m，距离 25 m	4
	18		10
切向旋流型叶片	19	长 6 m，间距 10°，	0
0°十字隔墙	20	高 15 m，距离 25 m，	4
	21	曲率半径 20 m	10
百叶窗	22	宽 4 m，高 15 m，	0
0°十字隔墙	23	距离 25 m，	4
	24	叶片间距 2 m	10
翼型导流叶片	25	长 6 m，间距 10°，	0
0°十字隔墙	26	与进风口等高，	4
	27	紧靠入口	10
格栅板	28	宽 4 m，高 15 m，	0
0°十字隔墙	29	网格间距 2 m×2 m，	4
	30	距离 25 m	10

### 2.2 计算基本参数及边界条件

某超大型冷却塔淋水面积为 20000 m<sup>2</sup>，塔高

220 m, 塔筒底部标高 13.45 m, 喉部标高 169.4 m, 塔筒底部直径 169.8 m, 喉部直径 103.5 m, 塔顶出口直径 109 m。图 2 描述了冷却塔的计算机尺寸及边界条件; 本文采用 SST 湍流模型。

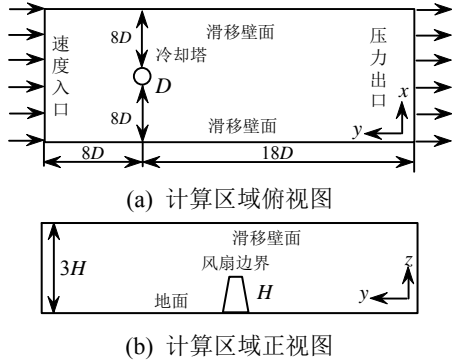


图 2 计算区域及边界条件

Fig.2 Calculation domain and boundary conditions

### 2.3 网格划分策略

本文计算模型包含大量复杂的叶片和格栅结构, 为了实现全流域的六面体划分以提高计算结果精度, 网格划分时不考虑导流片和十字隔墙的厚度, 同时忽略人字柱的影响。塔筒内、外网格做边界层处理, 以准确地模拟塔筒周围流场; 同时, 导流片和十字隔墙进行网格加密处理, 以便准确地模拟导流片和十字隔墙的边界层厚度, 避免塔底进风口阻力过大现象。图 3 列举了个别工况的网格图。

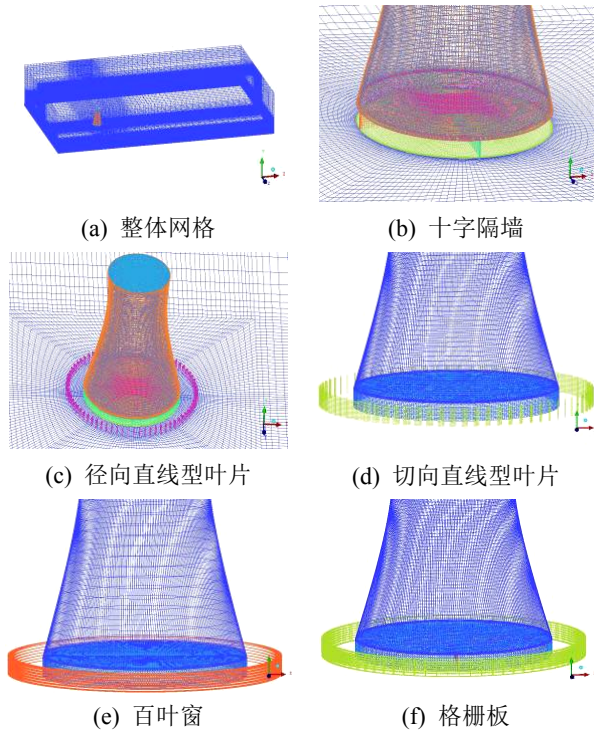


图 3 各型导流叶片网格图

Fig.3 Mesh of different types of deflector

### 2.4 计算基本理论

在塔顶出口处定义一个无厚度的通风面作为风扇边界条件来模拟塔内的总抽力, 压力在经过风扇面时会出现跃升, 风扇的不连续压力而跃升的值是流过风扇的风速的函数, 压力跃升函数如下:

$$\Delta P = \sum_{n=1}^N f_n v^{n-1} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  为压力跃升值;  $f_n$  为压力跳跃多项式系数;  $v$  为垂直于风扇的当地流体速度。速度  $v$  方向为沿着塔的高度方向, 风扇压升为 130 Pa。

将填料区作为一个独立的流体域赋予多孔介质材料特性, 多孔介质模型采用经验公式定义其流动阻力。在描述多孔介质的动量方程中增加一个代表动量消耗的源项, 源项公式如下:

$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_j \right) \quad (2)$$

式中:  $S_i$  为  $i$  向( $x$ 、 $y$  或  $z$  向)的动量源项;  $D$  和  $C$  为规定的矩阵。在多孔介质中, 动量损失对于压力梯度有贡献, 压降和流体速度成比例。本研究中填料区多孔率为 0.9, 垂直向惯性阻力系数为 16(1/m), 其他两个方向的阻力系数为 200(1/m), 可认为多孔介质对湍流漩涡结构不产生影响。在雨区中, 忽略淋水倾斜的影响, 只考虑液滴在重力方向的运动。由于雨滴与空气的流动方向是相反的, 当流体流过雨区时必然会受到雨区阻力的影响。空气经过雨区受到的阻力通过 FLUENT 的用户自定义函数(UDF)编程来实现。单位体积内所有雨滴对湿空气所组成的阻力作用之和按下式计算<sup>[15-18]</sup>。

水平向( $x$  向)的阻力计算公式为:

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

垂直向( $y$  向)的阻力计算公式为:

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

水平向( $z$  向)的阻力计算公式为:

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

式中:  $q$  为淋水密度;  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  分别为空气三个方向的速度;  $v_w$  为水滴的下落速度;  $d_p$  为水滴的直径;  $\rho_w$  为水的密度;  $Re_d$  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。

$$Re_d = \frac{\rho d_p \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + (v_z + v_w)^2}}{\mu_a} \quad (6)$$

$$C_d = \frac{24}{Re_d} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_d}} + 0.4 \quad (7)$$

式中， $\mu_a$  为湿空气粘性。

### 3 计算结果及分析

本文分别从塔内填料区平均速度、塔入口处径向速度和塔填料区中间截面速度分布三方面进行详细研究，给出了各型导流叶片对空气的整流效果，为冷却塔导流片的选取提供理论依据。

#### 3.1 冷却塔内填料区平均速度

流场的均匀程度以及经过填料区域的通风量是反映塔内冷却效果的两个重要指标，填料区流场越均匀、通风量越大，冷却效果越明显。

表 2 和表 3 表明，在风速为 0 m/s 时，空塔中填料区的平均速度为最大，均方差最小，说明经过填料区的通风量为最大；其次是径向直线型叶片、径向旋流型叶片、切向直线型叶片、切向旋流型叶片，它们的平均速度都在 1.64 m/s 附近，而切向型叶片比径向型叶片时的平均速度要小，均方差也相对大，说明切向型叶片的阻力比径向型的大；采用翼型导流板叶片时的平均速度最小而均方差最大，主要原因是翼型导流片的厚度尺寸相对较大，导致在静风时刻的阻挡效应最明显。百叶窗和隔栅板的平均速度和均方差值介于前面两种情况之间。

表 2 不同来流风速下填料区的平均速度

Table 2 Velocity in fill zone of different cross wind

计算工况	入口来流风速		
	0 m/s	4 m/s	10 m/s
空塔	1.67	1.49	1.24
0°十字隔墙	1.64	1.48	1.18
45°十字隔墙	1.64	1.50	1.14
径向直线型叶片	1.65	1.54	1.22
径向旋流型叶片	1.65	1.50	1.29
切向直线型叶片	1.63	1.41	1.27
切向旋流型叶片	1.64	1.43	1.29
翼型导流板	1.58	1.35	1.28
百叶窗	1.62	1.42	1.33
隔栅板	1.60	1.45	1.34

表 3 不同来流风速下填料区的速度均方差

Table 3 Mean square error of velocity in fill zone

计算工况	入口来流风速		
	0 m/s	4 m/s	10 m/s
空塔	0.0028	0.056	0.313
0°十字隔墙	0.0029	0.053	0.279
45°十字隔墙	0.0029	0.058	0.384

(续表)

计算工况	入口来流风速		
	0 m/s	4 m/s	10 m/s
径向直线型叶片	0.0032	0.055	0.374
径向旋流型叶片	0.0033	0.058	0.321
切向直线型叶片	0.0045	0.057	0.319
切向旋流型叶片	0.0046	0.056	0.316
翼型导流板	0.0048	0.062	0.293
百叶窗	0.0047	0.054	0.218
隔栅板	0.0046	0.053	0.212

风速为 4 m/s 时，导流片的作用初步显示出优势，最大平均速度出现在径向直线型叶片工况，切向直线型叶片由于挡风面积较大而在填料区的平均速度变得最小。当风速为 10 m/s 时，采用导流叶片措施比空塔和单纯采用十字隔墙的效果更加明显；隔栅板措施的填料区平均速度最大而均方差值也最小，说明在这一风速下的整流效果最好；百叶窗的效果较好，效果最差的是 45°十字隔墙时刻，其他措施介乎两者之间，结果与文献[9]结论吻合。

#### 3.2 塔入口处径向速度研究

本文对塔入口处三个不同高度 3 m、6 m 及 9 m 处的径向速度进行分析，以比较不同导流叶片对风场的整流效果。来流方向及环向角定义如图 4。

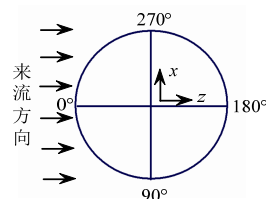
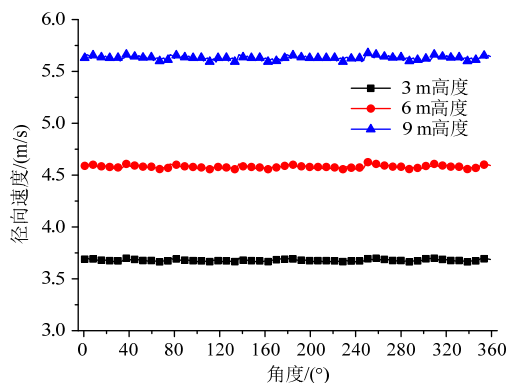


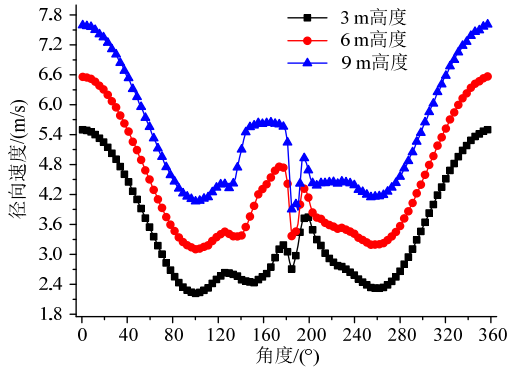
图 4 来流方向以及环向角度标定

Fig.4 The flow direction and toroidal Angle

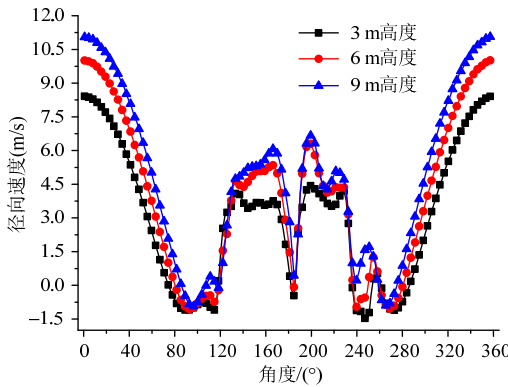
图 5(a)中空塔无侧风下不同高度处的径向速度图表明：塔内同一高度处的径向风速基本上是一个固定值。当存在侧风时(图 5(b)、图 5(c))，无十字隔墙的塔内各高度径向速度不再是固定值，丧失了轴对称的特征，曲线随着侧风的增加而更加混乱。



(a) 无十字隔墙静风下各高度径向速度



(b) 无十字隔墙、来流风速 4 m/s



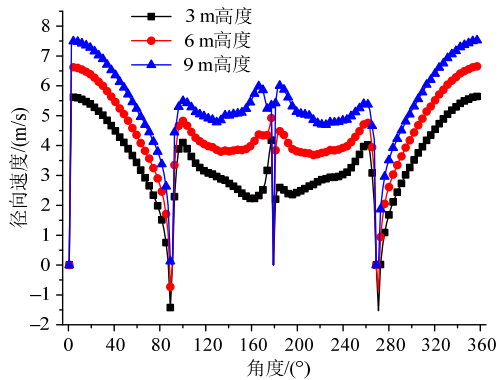
(c) 无十字隔墙、来流风速 10 m/s

图 5 无十字隔墙静风下各高度径向速度

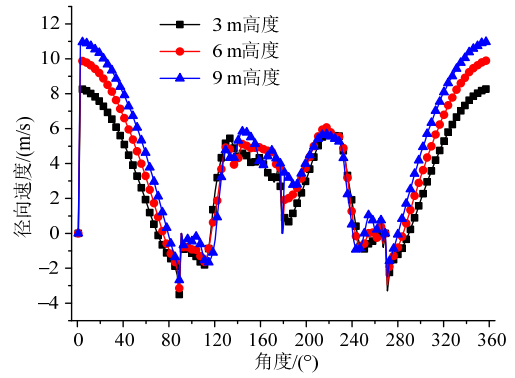
Fig.5 The radial velocity with no cross baffle and cross wind

当添加 0°十字隔墙时, 4 m/s 侧风下, 各高度处的径向速度较无十字隔墙时最大风速无明显变化; 低风速下(图 6(a))的径向速度曲线呈现对称分布, 在 90°~270°出现一个平台区, 体现了十字隔墙在 4 m/s 侧风下在背风区的整流作用; 而随着侧向风速的增加(图 6(b)), 平台区出现混乱, 十字隔墙背风区径向速度出现明显负值, 在 90°十字隔墙下游位置出现极值-3.72 m/s。

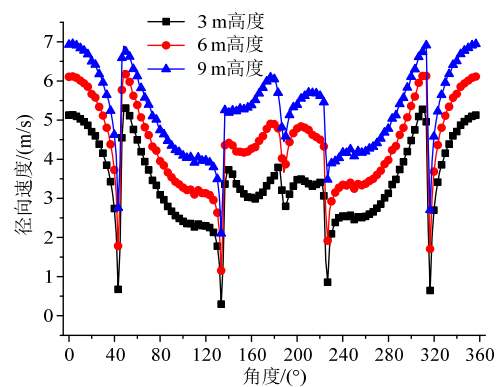
当十字隔墙与侧风成 45°时, 其整流效果更加明显。各高度处的径向速度在 4 m/s 时保持对称分布, 并且在 10 m/s 下的径向速度负值比 0°来流时



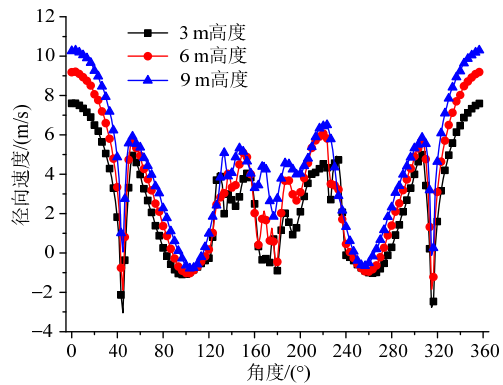
(a) 十字隔墙、0°侧风 4 m/s



(b) 十字隔墙、0°侧风 10 m/s



(c) 十字隔墙、45°侧风 4 m/s



(d) 十字隔墙、45°侧风 10 m/s

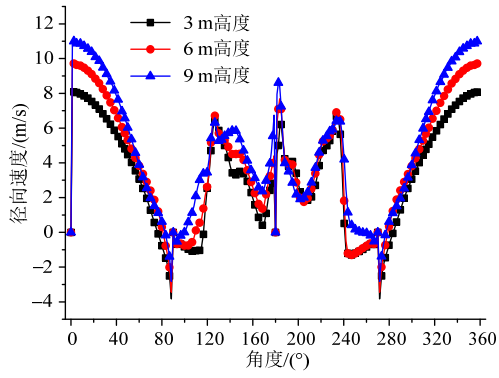
图 6 有、无十字隔墙下各高度径向速度

Fig.6 The radial velocity with and without cross baffle

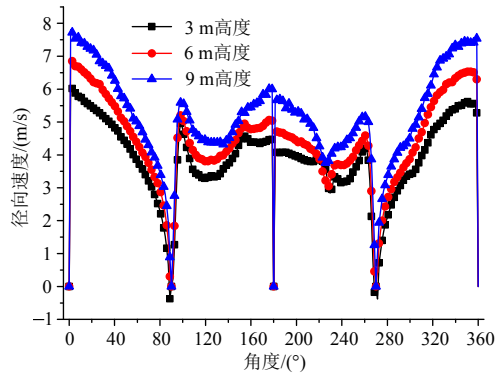
小, 但却在 100°与 260°位置附近出现速度负值, 主要是此处雨区出现了“穿堂风”, “穿堂风”会严重影响双曲型自然通风冷却塔的冷却效果。

图 7 显示径向和切向导流叶片的径向速度基本类似, 说明径向、切向导流叶片对侧风的整流效果基本相同; 而贴近十字隔墙的下游位置在侧风速 10 m/s 都出现了径向速度负值, 出现的角度和大小差别不大; 而侧风越大, 下游平台区越混乱; 其它各径向和切向导流片的速度特性与图 7 所列工况类似, 限于篇幅不一列举。

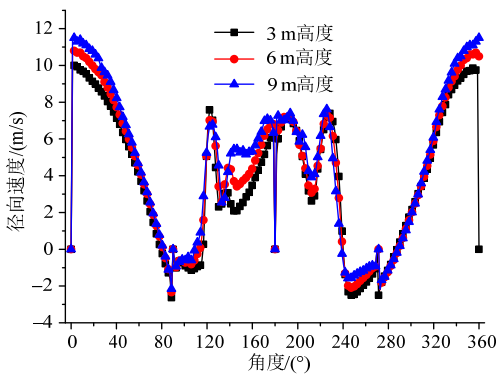




(a) 径向旋流型叶片、侧风 10 m/s



(b) 切向旋流型叶片、侧风 4 m/s



(c) 切向旋流型叶片、侧风 10 m/s

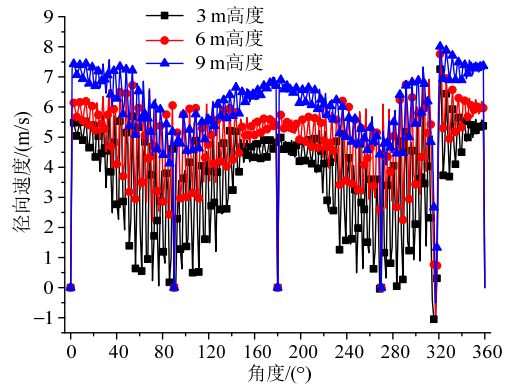
图 7 径向、切向导流片个别工况径向速度图

Fig.7 The radial velocity of various types of deflector

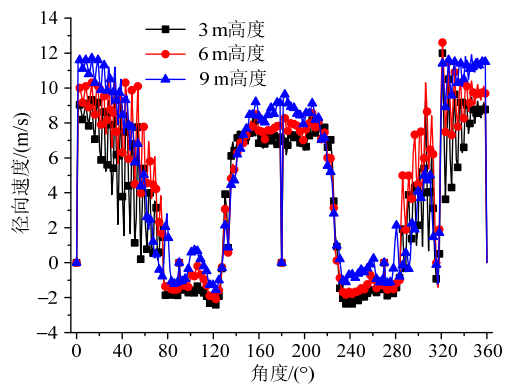
由于翼型导流叶片(图 8(a)和图 8(b))是紧靠入口并与雨区相邻,因此,低风速下由于边界流动的影响,径向速度图出现了许多接近零的速度点;当侧风速度为 10 m/s 时,在 80°与 120°以及 240°与 280°两个角度区间出现了径向速度负值,其他位置基本上保持与低风速相似的变化趋势。

百叶窗与格栅版型导流叶片在 4 m/s 时径向速度基本类似,最大速度出现在正前方进风口位置,都在 90°~270°出现一个正速度平台区。而在 10 m/s 风速下,格栅板与百叶窗的主要效果区别也是出现在背风区,两者的最小径向速度极值接近,而格栅板背风区的正平台区更加广阔,百叶窗则基本上没

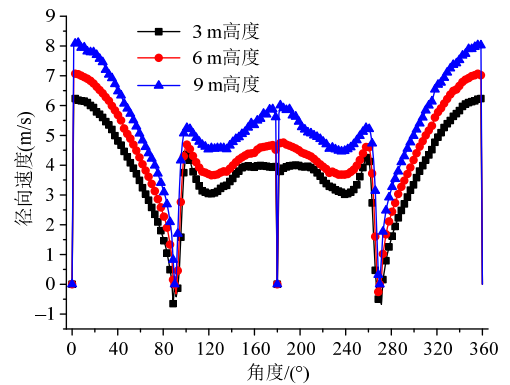
有明显的平台区,因而,格栅板型导流片对流场的整流效果要比百叶窗型导流片要好。



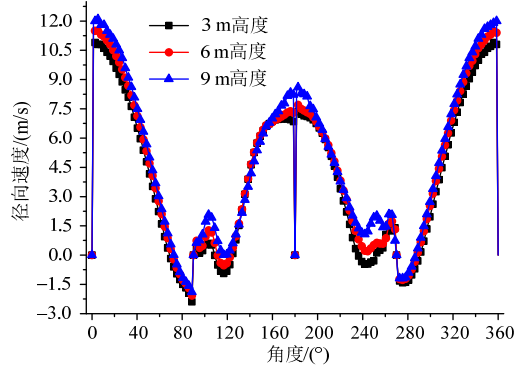
(a) 翼型导流叶片、侧风 4 m/s



(b) 翼型导流叶片、侧风 10 m/s



(c) 百叶窗、侧风 4 m/s



(d) 百叶窗、侧风 10 m/s

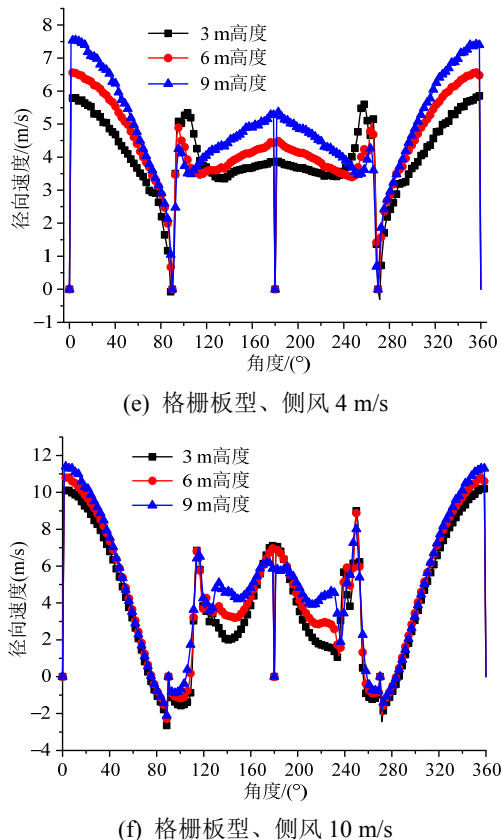


图 8 各种类型导流片不同高度处径向速度图

Fig.8 The radial velocity of various types of deflector

### 3.3 塔填料区中间截面速度分布研究

填料区的速度大小及其分布的均匀性很大程度上决定了冷却塔的冷却效果。本节将对填料区中间截面速度分布进行分析。

无十字隔墙时，上游整体速度分布相对均匀，但是，出现了明显的速度分布中心向背风区偏离的现象，并且在背风区由于旋涡的影响而使得速度变化较大。0°十字隔墙时，填料区速度分布被分割成两个区域，迎风区速度较高，背风区速度较低。45°十字隔墙时，填料区内被分成了四个速度分布相似的区域，上下游区域速度相差较大，左右两侧区域速度值以及分布情况差别不大。

增加各种外围防风措施后，上下游入口区的速度都有相应的增加，速度分布更加均匀，没有出现速度中心偏移。比较几种导流叶片的效果可知，径向直线型叶片、径向旋流型叶片、切向直线型叶片、切向旋流型叶片以及翼型导流板叶片在填料区下游位置的速度分布都有一个明显的速度不均匀区域，而且速度值大小相差较大，此情况在百叶窗导流叶片中不再明显，而格栅板导流叶片填料区的速度分布最均匀，也就是格栅板的整流效果最好。按

整流效果的优劣区分：格栅板最好，其次是百叶窗和翼型导流板较好，而径向直线型叶片、径向旋流型叶片、切向直线型叶片和切向旋流型叶片次之，不加导流叶片时效果则最差。

## 4 结论

本文采用计算流体动力学方法，在不考虑冷却塔内传热传质的情况下，通过引入风扇边界条件来模拟塔内的抽力，并在雨区和填料区使用 UDF 编程来模拟空气受到的阻力，研究各种防风措施在不同来流风速时塔内的空气动力场分布，分别从冷却塔内填料区平均速度、塔入口处径向速度和塔填料区中间截面速度分布三个方面做了详细研究，给出了不同风速下不同导流叶片对空气的整流效果。

(1) 环境侧风的存在使得塔内流场分布不均，使空气流动性能减弱，降低了冷却塔的冷却能力。

(2) 不同风速侧风时各措施对冷却塔塔内的整流效果不一样；0 m/s 侧风时，无导流片时塔内流场分布最好；低风速(4 m/s)时，径向直线型叶片导流片整流效果最好；当高风速(10 m/s)时，隔栅板措施的整流效果最好，效果最差的是 45°十字隔墙时刻，用导流叶片措施比空塔和单纯的十字隔墙的效果明显。

(3) 侧风防御措施的选取应根据冷却塔所处位置的具体气象条件来决定。对于长期遭受台风影响的沿海地带，可以考虑采用隔栅板或百叶窗型导流叶片作为防侧风措施，而对于一些长期平均风速在 4 m/s 以下的内陆地区，则可以考虑采用径向叶片。

### 参考文献：

- [1] 翟志强, 朱克勤, 符松. 横向风对自然通风干式冷却塔空气流场影响的模型实验研究[J]. 实验力学, 1997, 12(2): 306-311.  
Zhai Zhiqiang, Zhu Keqin, Fu song. Model experiment for the Influence of cross-wind on the air flow field in natural draft dry-cooling tower [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(2): 306-311. (in Chinese)
- [2] A F du Preez, D G Kröger. The effect of the heat exchanger arrangement and wind-break walls on the performance of natural draft dry-cooling towers subjected to cross-winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 58(3): 293-303.
- [3] 董国朝, 张建仁, 蔡春声, 韩艳. 考虑内部构件影响的超大型冷却塔内压系数研究[J]. 工程力学, 2016,

- 33(4): 77—83.
- Dong Guochao, Zhang Jianren, Cai Chunsheng, Han Yan. Study on internal surface pressure coefficient of super-large cooling tower with different internal main components [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(4): 77—83. (in Chinese)
- [4] Yuanshen Lu, Zhiqiang Guan, Hal Gurgenci, Kamel Hooman, Suoying He, Desikan Bharathan. Experimental study of crosswind effects on the performance of small cylindrical natural draft dry cooling towers [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 91(5): 238—248.
- [5] Xuebo Wang, Lijun Yang, Xiaoze Du, Yongping Yang. Performance improvement of natural draft dry cooling system by water flow distribution under crosswinds [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 108(1): 1924—1940.
- [6] 沈国辉, 王宁博, 楼文娟, 孙炳楠. 渡桥电厂冷却塔倒塌的塔型因素分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(8): 123—128.
- Shen Guohui, Wang Ningbo, Lou Wenjuan, Sun Bingnan. Analysis of tower shape factor in the collapse of the ferrybridge cooling towers [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(8): 123—128. (in Chinese)
- [7] 赵林, 李鹏飞, 葛耀君. 等效静风荷载下超大型冷却塔受力性能分析[J]. *工程力学*, 2008, 25(7): 79—86.
- Zhao Lin, Li Pengfei, Ge Yaojun. Numeical investigation on performance of super large cooling towers under equivalent static wind load [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(7): 79—86. (in Chinese)
- [8] Al-Waked R, Behnia M. The effect of wind-break walls on the thermal performance of natural draft dry cooling towers [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2005, 26(8): 50—62.
- [9] Rafat Al-Waked, Masud Behnia. The performance of natural draft dry cooling towers under crosswind: CFD study [J]. *International Journal of Energy Research*, 2004, 28(2): 147—161.
- [10] 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.
- Zhang Lei. Research on the methods and evaluation models of three-dimensional thermal performance of natural draft counterflow wet cooling tower [D]. Jinan: Shandong University, 2016: 17—44. (in Chinese)
- [11] 刘德民. 侧风对自然通风湿式冷却塔性能影响的三维数值研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 55—61.
- Liu Demin. Three dimensional numerical study of crosswind effect on the performance of natural draft wet cooling tower [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 55—61. (in Chinese)
- [12] 赵元宾, 孙奉仲, 王凯, 陈友良, 高明, 王宏国, 史月涛. 十字隔墙湿式冷却塔冷却特性的数值研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(8): 6—13.
- Zhao Yuanbin, Sun Fengzhong, Wang Kai, Chen Youling, Gao Ming, Wang Hongguo, Shi Yuetao. Numerical analysis of the cooling performance of wet cooling tower with cross wall [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(8): 6—13. (in Chinese)
- [13] 张军锋, 葛耀君, 赵林. 群塔布置对冷却塔整体风荷载和风致响应的不同干扰效应[J]. *工程力学*, 2017, 33(8): 15—23.
- Zhang Junfeng, Ge Yaojun, Zhao Lin. Interference effects on global wind loads and wind induced responses for group hyperboloidal cooling towers [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 33(8): 15—23. (in Chinese)
- [14] 张军锋, 葛耀君, 赵林, 柯世堂. 双曲冷却塔表面三维绕流特性及风压相关性研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(9): 234—242.
- Zhang Junfeng, Ge Yaojun, Zhao Lin, Ke Shitang. Wind tunnel study on the three dimensional flow and spatial correlation properties of wind loads on hyperboloidal cooling towers [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(9): 234—242. (in Chinese)
- [15] Kloppers J C, KrOger D G. Loss coefficient correlation for wet-cooling tower fills [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(17): 2201—2211.
- [16] Kloppers J C. A critical evaluation and refinement of the performance of wet-cooling towers [D]. Department Mechanical Engineering, University of Stellenbosch, 2003.
- [17] 赵振国. 冷却塔[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 23—45.
- Zhao Zhenguo. Cooling tower [M]. Beijing: China Water Power Press, 2001: 23—45. (in Chinese)
- [18] 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: 38—65.
- 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: 38—65. (in Chinese)