

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.020

超大型湿冷塔进风流场及导流装置 数模研究及应用

何辉

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 基于 Fluent 软件, 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行应力封闭, 对某工程塔内传热传质过程进行三维数值计算。计算分析了塔内外空气的速度场、温度场, 建立了相关方程及气水两相间传热传质理论模型。结合工程实际情况, 对冷却塔进风流场进行深入分析: 1) 导风板的存在降低了塔侧空气绕流流速, 增大了冷却塔进风口流场的对称性, 使塔内空气动力场的均匀程度增加; 导风板安装高度和长度对冷却塔进风流场产生较大影响, 以高 11 m、长 8 m 导风板对 #1、#2 冷却塔性能的改善作用最大; 2) 导风板安装角度和块数对冷却塔进风流场产生一定影响, 在导风板安装角度由 0° 至 20° 变化、在导风板安装块数由 60 块至 90 块变化时, 两塔冷却性能变化影响较小。

关键词: 冷却塔; 数值分析; 导风板。

中图分类号: TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0101-07

Research and Application About Flow Field of Wet Cooling Towers and Numerical Simulation of Windshield Board

HE Hui

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Based on the Fluent software, we used the standard $k-\varepsilon$ model to close the Reynolds average equations and analyze the heat and mass transfer process in the three-dimensional of the natural draft wet cooling towers (NDWCT) for the specific project. We calculated the fields of air velocity and temperature inside and outside the cooling tower and established the relevant equations and gas-water two-phase heat and mass transfer theory models. Combined with the actual situation of the project, we deeply analyze the Flow Field of the cooling tower: 1) the existence of windshield board reduces the air flow around the tower side flow rate and increases the symmetry of the cooling tower inlet flow field, so that the uniformity of tower aerodynamic field was increased. Installation height and length of windshield board have a greater impact into the air flow field. Especially, the 11m high, 8m long windshield board improve the performance of #1, #2 cooling tower mostly. 2) Installation angle and blocks number of windshield board have certain impact into the air flow field. When the windshield board angle change from 0° to 20° and the blocks number change from 60 to 90, there was little changes of cooling performance between the two towers.

Key words: cooling tower; numerical analysis; windshield board.

冷却塔是大型发电厂中重要的热力设备之一, 其运行性能对电厂的安全性和经济性都有很大影响。自然通风湿式逆流冷却塔是目前国内应用最为广泛的一种冷却塔形式, 其热力性能受环境因素影

响较大, 尤其是环境侧风的作用使塔周向进风极不均匀, 减小了塔内通风量, 严重降低了冷却效率, 增加了出塔水温, 使得电厂煤耗增加。然而国内大部分工程设计都未考虑冷却塔侧风影响, 由于环境侧风对超大塔影响尤为明显, 目前环境侧风对冷却塔影响研究就显得尤为必要。关于冷却塔的研究多集中于塔内传热传质, 较少涉及冷却塔的通风阻力, 但通风量和进风阻力是湿式冷却塔的设计、评

收稿日期: 2015-06-21

作者简介: 何辉(1983), 男, 湖南郴州人, 工程师, 硕士, 主要从事电站水工系统研究及应用(e-mail) hehui@gedi.com.cn。

价过程中极为重要的热力参数。在冷却塔进风口周围安装导风板可减小侧风带来的不利影响,但关于侧风下导风板对冷却塔热力性能影响规律的系统理论研究和报道较少^[1-6]。

对于1 000 MW级火电机组配置的自然通风逆流湿式冷却塔,鉴于其径向尺寸较大,塔底进风口附近空气流动的自由空间相对更大,进塔空气的三维分布更易受环境气象条件的影响。为充分利用进塔空气,实现冷却塔总体冷却性能的提高,需对优选出来的塔型气-水流程及其传热传质过程进行三维计算分析研究。而国内外有关冷却塔的常规分析研究方法,通常是一维方法(只考虑冷却水和空气参数在塔内高度方向的变化)和二维方法(可考虑气-水参数在塔内高度方向和径向的变化),两者均不考虑塔内外气-水参数沿冷却塔周向的变化。进行超大型冷却塔热力性能的三维数值模拟计算,充分掌握塔内外空气流场的三维分布、空气沿程气-水传热传质强度在三维空间内的变化,以及由此引起塔内冷却水参数的三维变化,对于分析研究冷却塔结构、配风配水方式、塔内典型装置和典型构件形式等对冷却塔局部传热传质强度和整体热力性能的影响和作用机理,实现大型冷却塔总体热力性能的提高具有重要的工程意义和理论意义。

Al-Waked Rafat^[7]使用k-ε模型,通过三维数值模拟计算(CFD)方法研究了外界侧风对湿式冷却塔热力性能的影响,但在填料区内通过控制液滴速度模拟水膜和空气间的传热传质,具有一定的近似性。

1 物理模型及控制方程

1.1 冷却塔工作原理

在常规逆流式自然通风冷却塔中,热水由管道通过竖管(竖井)送入塔内热水分配系统,经配水管再通过喷溅装置,将水洒到填料上;经填料后成雨状自由跌落入至下部集水池,冷却后的水抽走重新使用。填料区雨滴呈水膜形式与空气进行传热传质,因重力、表面张力等因素最后呈液滴进入雨区,与进入塔内的冷空气进行传热传质。空气经进风口依次进入雨区、填料区、配水区和除水器,最后变成几乎饱和的湿热空气由塔顶排出。塔内湿热空气和塔外空气密度差产生塔内空气流动的抽力,抽力大小与塔体几何尺寸、运行条件和环境参数有关。

1.2 湿空气运动控制方程

在环境空气参数和冷却塔运行参数恒定时,塔内外空气运动处于定态非平衡状态,满足稳态雷诺平均N-S控制方程。其中包括描述空气质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程^[8]。

水蒸气质量组分 ω_v 守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho_v \omega_v) = \nabla \cdot (\rho D_{eff} \nabla \omega_v) + S_m \quad (1)$$

式中: D 为组分质量扩散系数, m^2/s 。

塔内外空气压力变化不大,可忽略压力变化所引起的密度变化,将湿空气处理为不可压缩理想气体。气体状态控制方程:

$$\rho = \frac{P_{op}}{R \sum_i \frac{\omega_i}{M_i}} \quad (2)$$

式中:下角标 op 为环境参数; ω 为质量分数; M 为摩尔质量, $kg/kmol$; R 为通用气体常数, $8\,314.47\,J/(kmol \cdot K)$ 。采用 $k-\xi$ 湍流模型对控制方程式动量守恒方程、能量守恒方程和式(1)进行湍流封闭。

1.3 冷却水运动控制方程

忽略冷却水运动倾斜。认为冷却水只沿垂直方向做下落运动。控制体内冷却水的质量和能量守恒控制方程如下:

质量守恒方程见式(3):

$$\frac{dq}{d(-z)} = S_m \quad (3)$$

式中: q 为冷却水淋水密度, $kg/(m^2 \cdot s)$ 。

能量守恒方程见式(4):

$$\frac{d}{d(-z)}(c_w T_w q) = -S_{we} \quad (4)$$

式中: C_w 为比热容, $kJ/(kg \cdot K)$;下标 w 表示冷却水; S_{we} 为冷却水能量减小量, $kW/(m^3 \cdot s^{-1})$ 。

配水区和雨区内雨滴 z 向运动速度控制方程为:

$$\frac{dv_w}{d(-z)} = \frac{(\rho_w - \rho)g}{\rho_w v_w} - \frac{f_z}{m_w v_w} \quad (5)$$

式中: v_w 为雨滴竖直下落速度, m/s ; ρ_w 为雨滴密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; f_z 为雨滴下落所受空气 z 向阻力, N 。

1.4 传热传质模型

根据水蒸发的单膜理论,填料区气水间传质速率计算公式:

$$S_m = \beta_{xv} \cdot (x''_w - x_a) \quad (6)$$

式中: $\beta_{sv} = Bq^m g_0^n$ 为单位体积填料内的传质系数, 其中参数 B, m, n 由填料淋水实验^[9-10]给出; g_0 为湿空气质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

配水区和雨区内单位体积冷却水蒸发量计算公式^[5]:

$$S_m = N_p A_p h_m \left[\frac{P''_w}{RT_w} - \frac{P_{va}}{RT} \right] \quad (7)$$

式中: N_p 为单位体积内雨滴个数; A_p 为单个雨滴的表面积, m^2 ; h_m 为单位面积传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

1.5 阻力模型

填料, 配水设施和除水器等塔内设施对湿空气运动的阻力作用, 通常表示为公式(8)所给定的压降形式:

$$\Delta p = \rho A v_p^n \quad (8)$$

式中: A, n 为由实验数据所确定的经验系数^[6], v_p 为填料区湿空气竖直方向局部运动速度, m/s 。

在配水区和雨区内, 湿空气与滴状冷却水之间存在相对运动。滴状冷却水竖直下所受阻力^[6]

$$f_z = C_d R_{ed} \frac{\pi d_p \mu}{8} (v_z + v_w) \quad (9)$$

2 数值计算

2.1 计算模型

某 1 000 MW 级电厂冷却塔计算原型: #1 和 #2 塔高为 172 m, 淋水面积为 11 500 m^2 , 进风口高度(从水池边以上)为 11.50 m, 淋水填料采用高度 1.25~1.75 m 不均匀布置的高效斜坡填料, 塔底 0.0 m 标高直径 D 为 129.70 m。计算域其周向边界到 #1、#2 冷却塔塔心径向距离的最小值为 500 m、顶部边界高度为 900 m, 计算域网格数约为 97 万, 可实现所分析冷却塔热力性能的准确计算, 两塔塔群及塔间建筑物布置示意图详见图 1。

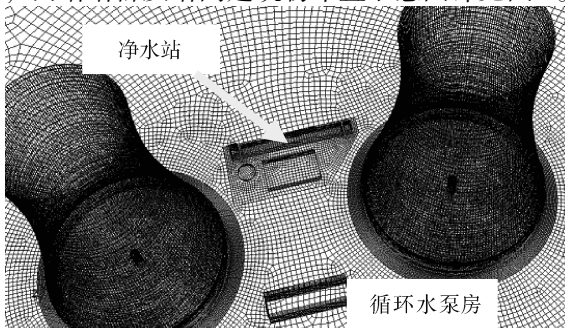


图 1 两塔塔群及塔间建筑物布置示意图

Fig. 1 Arrangement Schematic Diagram Between the Towers

某 1 000 MW 级电厂冷却塔气象参数及运行工况见表 1:

表 1 某 1 000 MW 级电厂冷却塔气象参数及运行工况
Table 1 1 000 MW Power Plant Cooling Tower Meteorological Parameters and Operating Conditions

测量参数	数值
气压/kPa	1 009.5
干球温度/°C	18.9
湿球温度/°C	15.8
相对湿度/%	73
年平均风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.0
年主导风向	N
循环水量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	101 454
循环水温升/°C	9.16
进塔水温/°C	32.16
出塔水温/°C	23.0

2.2 边界条件及计算方法

计算采用二阶迎风格式对控制方程对流项进行离散, 采用体积力加权格式进行压力插值, 采用 SIMPLE 算法耦合压力和速度进行迭代, 残差收敛至 10^{-4} 时, 计算收敛。

3 工程计算验证

针对某 1 000 MW 级电厂 #1、#2 冷却塔塔群所建三维数值计算模型, 以国内某 1 000 MW 机组大型冷却塔实测数据为验证数据, 计算分析雨滴当量直径、计算域范围等对计算结果的影响, 以正确选取雨滴当量直径及计算域尺寸, 保证该发电厂 #1、#2 冷却塔三维数值计算模型计算结果的正确性。

3.1 验证塔型及其实测工况

该验证塔型为某内陆 1 000 MW 燃煤发电机组所备 12 000 m^2 大型自然通风逆流淡水冷却塔, 0.0 m 标高人字柱中心直径 D 为 133.21 m, 冷却塔总高 165 m, 进风口高 11.64 m, 进风口高度冷却塔内径 124.794 m, 填料层底标高 12.39 m, 填料为等高布置的双向波填料, 填料本身高度 1.5 m, 喉部高度 127.05 m, 喉部直径 75.21 m, 塔出口直径 80.08 m。

表 2 给出了该淋水面积为 12 000 m^2 大型冷却塔的实测工况。

表2 某电厂1 000 MW机组12 000 m²冷却塔
实测工况(验证塔)

Table 2 1 000 MW Power Plant of the 12 000 m² Cooling
Tower Found Condition (the Verify Tower)

工况	P_a /hPa	θ /°C	τ /°C / (m ³ · h ⁻¹)	Q_w /°C	t_{wo} /°C	t_{wc} /°C	误差 /°C
C1	1 002	29.91	25.26	77 410	30.17	30.42	-0.25
C2	1 002	28.48	25.4	77 410	30.18	30.14	0.04
C3	1 002	29.18	25.47	77 410	30.43	30.35	0.08
C4	1 002	29.33	25.65	77 410	30.52	30.49	0.03
C5	1 001	30.13	25.65	77 410	30.5	30.69	-0.19
C6	1 000	29.45	25.64	112 294	32.4	32.63	-0.23
C7	1 000	28.24	25.37	112 294	32.32	32.21	0.11
C8	1 000	27.96	24.98	112 294	31.99	31.96	0.03
C9	1 000	27.68	24.97	112 294	31.87	31.88	-0.01
C10	1 002	29.18	25.47	77 410	30.43	30.35	0.08

由计算可知, 实测出塔水温与计算出塔水温误差最大值为 -0.25°C , 误差最小值为 $+0.03^{\circ}\text{C}$, 分别占计算总温降 9.16°C 的2.7%和0.3%, 两者之间偏差较小。上述分析表明所建模型模拟塔内传热传质准确性较高。

3.2 计算验证选取

经网格独立性分析、雨滴当量直径选取和计算域尺寸选取等最终确定: 网格系统网格数为97万; 雨区雨滴阻力计算当量直径 d_{wrz} 和热力计算当量直径 d_{wrh} 分别取3.25 mm和4 mm; 计算域其周向边界到#1、#2冷却塔塔心径向距离的最小值为500 m、顶部边界高度为900 m。

考虑到验证塔型和该发电厂#1、#2冷却塔尺寸、负荷、环境气象参数、冷却水量等的近似性, 可采用基于验证塔型所得网格系统划分方法和计算域尺寸选取标准, 建立该发电厂#1、#2冷却塔的三维数值计算模型, 相应计算结果的绝对误差较小。同时考虑到计算模型的适用性, #1、#2冷却塔塔群优化布置、导风板控风方案、填料布置方式等对#1、#2冷却塔冷却性能作用影响的相对误差会很小。

4 计算结果分析

4.1 年主导风向N向自然风作用下两塔冷却性能分析

以年平均工况为例, 在年主导风向为N向的环境自然风作用下, 计算分析#1和#2冷却塔的冷却

性能。在环境自然风速分别为 $0.97 \sim 40 \text{ m/s}$ 下, 表3给出了#1、#2冷却塔水池水面加权平均水温即出塔水温以及#1、#2冷却塔两塔出塔水温的计算偏差。其中 0.97 m/s 自然风速对应夏季10%概率气象条件下的环境自然风风速, 19 m/s 为累年10 min平均最大风速, 40 m/s 为所选择极大风速。

表3 对应全年平均工况, 自然风风速(风向N)对#1、
#2冷却塔性能参数的影响

Table 3 The Annual Average Conditions, N to Effect of #1, #2
Cooling Towers Performance Parameters

N向 自然 风速 m/s	出塔水温			N向 自然 风速 m/s	出塔水温		
	#1塔	#1塔	#1塔 -#2塔		#1塔	#1塔	#1塔 -#2塔
0	22.918	22.912	0.006	8	25.269	24.862	0.407
0.97	23.095	23.088	0.007	9	25.163	24.753	0.41
2.0	23.617	23.473	0.144	10	24.916	24.590	0.326
3.0	24.095	23.952	0.143	11	24.682	24.385	0.297
4.0	24.529	24.658	-0.129	12	24.459	24.190	0.269
5.0	24.860	24.895	-0.035	19	23.168	22.855	0.313
6.0	25.142	24.985	0.157	40	20.262	19.940	0.322
7.0	25.311	24.936	0.375				

由表3可知, #1冷却塔出塔水温以 $v_c = 7 \text{ m/s}$ 环境自然风为转折风速, 在 $v_c \leq 7 \text{ m/s}$ 时, #1冷却塔出塔水温随侧风风速的增加而增加; 在 $v_c \geq 7 \text{ m/s}$ 时, #1冷却塔出塔水温随侧风风速的增加而减小。而#2冷却塔则以 $v_c = 6 \text{ m/s}$ 环境自然风为转折风速, 在 $v_c \leq 6 \text{ m/s}$ 时, #2冷却塔出塔水温随侧风风速的增加而增加; 在 $v_c \geq 6 \text{ m/s}$ 时, #2冷却塔出塔水温随侧风风速的增加而减小。两塔转折风速的不同, 主要是由于塔外建筑环境对两塔塔内空气动力场影响程度的不同造成的。

在塔外净水站及循环水泵房的影响下, 所研究自然风风速范围内, #1塔出塔水温普遍大于#2塔出塔水温, 这表明N向环境自然风下, 净水站对其背风侧#1冷却塔冷却性能的不利影响较大, 而对其侧方#2塔冷却性能不利影响相对较小。

4.2 年主导风向N向自然风下导风板作用分析

以高11 m、长8 m的导风板为例, 计算分析导风板对#1、#2两塔出塔水温的影响。

结合表3~5可知, 在所研究风速范围内($0 \sim 40 \text{ m/s}$), 导风板对#1、#2两塔冷却性能均起到有利的改善作用, 使出塔水温下降; 采用导风板

后，两塔空气动力场发生变化，使得两塔冷却性能转折风速也发生了变化；2 m/s 年平均风速条件下，导风板对#1 塔冷却性能的影响大，#1 塔出塔水温减小 0.253 ℃，而#2 塔出塔水温减小 0.192 ℃；2 m/s 年平均风速条件下，采用导风板前和后，#1 塔出塔水温均高于#2 塔出塔水温。但导风板的采用，降低了两塔出塔水温偏差，塔水温偏差由无导风板的 0.144 ℃，减小为 0.083 ℃。

表4 (高11 m、长8 m)导风板作用下的#1、#2 冷却塔出塔水温

Table 4 #1, #2 Cooling Tower Water Temperature with Windshield Board(11 m high, 8 m long)

N向自然风速 m/s	出塔水温			N向自然风速 m/s	出塔水温		
	#1 塔	#1 塔	#1 塔 -#2 塔		#1 塔	#1 塔	#1 塔 -#2 塔
0	22.846	22.856	-0.01	8	24.246	24.188	0.058
0.97	23.031	23.009	0.022	9	24.249	24.047	0.202
2	23.364	23.281	0.083	10	24.109	23.894	0.215
3	23.683	23.606	0.077	11	24.023	23.722	0.301
4	23.992	23.970	0.022	12	23.896	23.523	0.373
5	24.191	24.126	0.065	19	22.509	22.212	0.297
6	24.304	24.252	0.052	40	19.941	19.833	0.108
7	24.286	24.279	0.007				

表5 高11 m、长8 m 导风板对#1、#2 冷却塔出塔水温的影响(无导风板出塔水温 - 有导风板出塔水温)

Table 5 #1, #2 Cooling Tower Water Temperature with 11 m high, 8 m long. Windshield Board (The Water Temperature without Windshield Board Minus with Windshield Board)

N向自然风速 m/s	出塔水温降/℃		N向自然风速 m/s	出塔水温降/℃	
	#1 塔	#2 塔		#1 塔	#1 塔
0	0.072	0.056	8	1.023	0.674
0.97	0.064	0.079	9	0.914	0.706
2	0.253	0.192	10	0.807	0.696
3	0.412	0.346	11	0.659	0.663
4	0.537	0.688	12	0.563	0.667
5	0.669	0.769	19	0.659	0.643
6	0.838	0.733	40	0.321	0.107
7	1.025	0.657			

图2 给出了2 m/s 环境自然风作用下，导风板对#1、#2 冷却塔 z=4 m 横截面空气动力场的影响。

从图2 可知，2 m/s, N 向自然风下，导风板

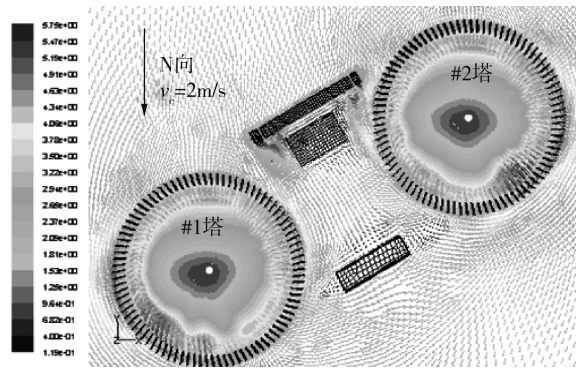


图2 2 m/s, N 向主导自然风速下导风板对 z=4 m 横截面空气动力场的影响

Fig. 2 Cross-section of the Air Force Field (Z=4 m) with Windshield Board of 2 m/s and N direction

的存在降低了塔侧绕流流速，增大了冷却塔进风口流场的对称性，使塔内空气动力场的均匀程度增加。

图3 给出了2 m/s, N 向自然风下导风板对两塔水池水面水温场的影响。图3 可知，相对于无导风板时，出塔水温有所降低，#1 塔出塔水温降低 0.253 ℃，#2 塔出塔水温降低 0.192 ℃。

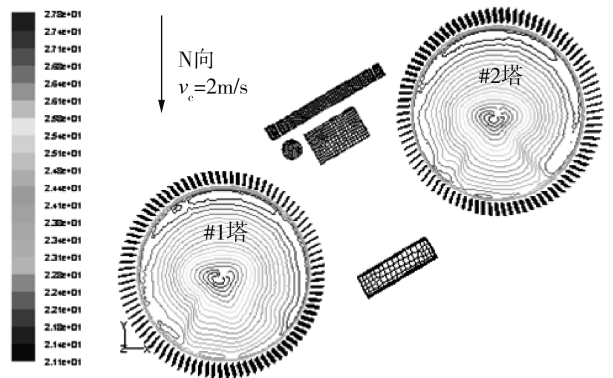


图3 2 m/s N 向主导自然风速下导风板对水池水面水温场的影响

Fig. 3 Pool Water Temperature Field with Windshield Board of 2 m/s and N direction

4.3 年主导风向 N 向自然风下导风板作用分析

为分析导风板尺寸对导风板作用的影响，表6 在常见风速范围内，给出了导风板尺寸对#1、#2 冷却塔出塔水温的影响。

由表6 可知，所研究尺寸范围导风板均可对#1、#2 冷却塔冷却性能起到改善作用；所研究导风板尺寸范围内，以高11 m、长8 m 导风板对#1、#2 冷却塔性能的改善作用最大。

表6 常见风速范围内, 导风板尺寸对#1、#2
冷却塔出塔水温的影响

Table 6 The Normal Wind Speed Conditions, Effect of #1, #2
Cooling Towers Water Temperature with Windshield Board

N向 自然 风速 m/s	无导风板		高 11m 长 8m		高 9m 长 8m	
	#1 塔	#2 塔	#1 塔	#2 塔	#1 塔	#2 塔
2	23.617	23.473	23.364	23.281	23.376	23.301
4	24.529	24.658	23.992	23.970	24.053	24.062
6	25.142	24.985	24.304	24.252	24.421	24.377
8	25.269	24.862	24.246	24.188	24.416	24.322
10	24.916	24.590	24.109	23.894	24.316	24.028
	高 11m 长 5m		高 11m 长 3m			
2	#1 塔	#2 塔	#1 塔	#2 塔		
4	23.414	23.328	23.439	23.346		
6	24.105	24.108	24.235	24.216		
8	24.453	24.431	24.603	24.557		
10	24.478	24.435	24.677	24.568		

4.4 布置优化前冷却塔进风口导风板优化

年平均气象条件下冷却塔的设计工况与表1内容相同。考虑到年平均工况的代表性, 在该电厂#1、#2冷却塔最初布置方式基础上, 本章节计算实现了冷却塔进风口导风板尺寸及安装方式的优化。

4.4.1 导风板安装角度优化

表7给出了导风板安装角度对两塔冷却性能的影响。由表7可知, 在导风板安装角度为 10° 时, #1塔出塔水温减小 0.253°C , 相对于其他安装角度减小最多; 在导风板安装角度为 15° 时, #2塔出塔水温减小 0.196°C , 相对于其他安装角度减小最多。考虑到冷却塔进风口导流措施的优化为当地建筑环境下两塔冷却性能的综合优化, 应以两塔平均水温最大减小量为目标函数, 在导风板安装角度为 10° 时, #1塔和#2塔出塔水温平均减小 0.223°C , 相对于其他安装角度减小最多。

表7 导风板安装角度对#1、#2冷却塔出塔水温的影响
Table 7 Installation angle of Windshield Board for the Effect of
#1, #2 Cooling Towers Water Temperature

安装角度	#1 塔出塔水温 变化/ $^\circ\text{C}$	#1 塔出塔水温 变化/ $^\circ\text{C}$	#1、#2 塔平 均水温变化/ $^\circ\text{C}$
0°	-0.247	-0.186	-0.216
10°	-0.253	-0.192	-0.223
15°	-0.229	-0.196	-0.215
20°	-0.237	-0.187	-0.213

因此在当地建筑环境下, #1塔和#2塔两塔进风导流措施综合优化后, 导风板安装角度为 10° , 此时两塔水温平均减小 0.223°C 。

4.4.2 导风板块数优化

表8给出了导风板块数安装角度对两塔冷却性能的影响。由表8可知, 在所研究导风板块数60、72、80和90块的范围内, 导风板块数越多, #1、#2塔两塔出塔水温下降越多。在导风板块数为60块时, #1、#2塔平均水温减小 0.2°C ; 在导风板块数由60块增加为72块时, #1、#2塔平均水温减小 0.023°C ; 在导风板块数由72块增加为80块时, #1、#2塔平均水温减小 0.008°C ; 在导风板块数由80块增加为90块时, #1、#2塔平均水温减小 0.012°C 。

表8 导风板安装块数对#1、#2冷却塔出塔水温的影响
Table 8 Installation Blocks Number of Windshield Board for
the Effect of #1, #2 Cooling Towers Water Temperature

导风板 数量/块	#1 塔出塔水温 变化/ $^\circ\text{C}$	#1 塔出塔水温 变化/ $^\circ\text{C}$	#1、#2 塔平均 水温变化/ $^\circ\text{C}$
60	-0.215	-0.181	-0.200
72	-0.253	-0.192	-0.223
80	-0.263	-0.216	-0.241
90	-0.277	-0.228	-0.254

以年平均工况为例, 对尺寸为 $11.5\text{ m} \times 8\text{ m}$ 导风板的安装角度及块数进行了优化: 在导风板安装角度由 0° 至 20° 变化时, #1冷却塔和#2冷却塔两塔出塔水温平均变化 0.01°C ; 在导风板安装块数由60块至90块变化时, 两塔出塔水温平均变化 0.054°C 。这表明年平均气象条件下, 导风板安装角度对于初始布置方案中#1、#2冷却塔两塔冷却性能的影响很小。

4.5 导风板优化效益分析

对1000 MW机组而言, 循环水温度每降低 1°C , 凝汽器背压降低 0.5 kPa , 根据背压和微增出力曲线, 在设计背压附近, 背压降低 0.5 kPa , 微增出力增加 2.5 MW 。通过本技术实施, 可使循环水温度多降低 0.7°C , 凝汽器背压降低 0.35 kPa , 微增出力增加 1.75 MW 。按照标煤价格 800 元/t 计算, 则年经济效益约为 220 万元 。导风板初投资约 980 万元 , 预计4.5年可收回投资。

5 结论

1) 针对某发电厂 $2 \times 1000\text{ MW}$ 新建工程冷却

塔布置方案进行了三维数学建模,并通过同容量机组冷却塔实测工况验证了所建三维数学计算模型在网格划分方法、计算域选取、雨滴当量直径选取的合理性。

2)考虑到验证塔型和该发电厂#1、#2冷却塔尺寸、负荷、环境气象参数、冷却水量等的近似性,可采用基于验证塔型所得网格系统划分方法和计算域尺寸选取标准,建立该发电厂#1、#2冷却塔的三维数值计算模型,相应计算结果的绝对误差较小。同时考虑到计算模型的适用性,导风板控风等方案对#1、#2冷却塔冷却性能作用影响的相对误差会很小。

3)以主导风向为N向的年平均工况为例对两塔冷却性能进行计算分析,在塔外净水站及循环水泵房的影响下,所研究自然风风速范围内,#1塔出塔水温普遍大于#2塔出塔水温。这表明N向环境自然风下,净水站对其背风侧#1冷却塔冷却性能的不利影响较大,而对其侧方#2塔冷却性能不利影响相对较小。常见自然风风速范围内,无环境自然风时冷却塔冷却性能最高,相应出塔水温最低,自然风的存在对两塔冷却性能起到不利的作用。

4)导风板的存在降低了塔侧空气绕流流速,增大了冷却塔进风口流场的对称性,使塔内空气动力场的均匀程度增加。在所研究风速范围内(0~40 m/s),导风板对#1、#2两塔冷却性能均起到有利的改善作用,使出塔水温下降;采用导风板后,两塔空气动力场发生变化,使得两塔冷却性能转折风速也发生了变化。所研究导风板尺寸范围内,以高11 m、长8 m导风板对#1、#2冷却塔性能的改善作用最大。

5)对尺寸为11.5 m×8 m导风板的安装角度及块数进行了优化:在导风板安装角度由0°至20°变化时,#1冷却塔和#2冷却塔两塔出塔水温平均变化0.01℃;在导风板安装块数由60块至90块变化时,两塔出塔水温平均变化0.054℃。这表明年平均气象条件下,导风板安装角度对于初始布置方案中#1、#2冷却塔两塔冷却性能的影响很小。

6)冷却塔进风口加装导风板不仅可以应用于新建大型火力发电厂超塔和核电超塔,也可以应用于现有电厂改造项目,对电厂提高机组效率、降低煤耗具有显著经济效益,若当地年平均风速较大($V \geq 2$ m/s),则经济效益更加明显。

参考文献:

- [1] 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: 1-30.
- [2] DERKSEN D D, BENDER T, BERGSTROM D J, et al. A study on the Effects of Wind on the Air Intake Flow Rate of a Cooling Tower: Part 3, Numerical Study [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996(64): 73-88.
- [3] GAO Ming, SUN Fengzhong, WANG Kai, et al. Experimental Research of Heat Transfer Performance on Natural Draft Counter Flow Wet Cooling Tower Under Crosswind Conditions [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008(47): 935-941.
- [4] 赵顺安, 廖内平, 徐铭. 逆流式自然通风冷却塔二维数值模拟优化设计[J]. *水力学报*, 2003(10): 26-31.
ZHAO Shunan, LIAO Neiping, XU Ming. Two Dimensional Optimal Design of Counter Flow Natural Draught Cooling Tower [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003(10): 26-31.
- [5] 毛献忠, 陈允文, 黄东涛. 逆流式自然通风冷却塔流场及热质交换的数值模拟[J]. *计算物理*, 1994, 11(4): 385-392.
MAO Xianzhong, CHEN Yunwen, HUANG Dongtao. Numerical Simulation of the Flow Field Heat and Mass Transfer in a Natural Draft Cooling Tower of Counterflow [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 1994, 11(4): 385-392.
- [6] 黄东涛, 杜成琪. 逆流式冷却塔填料及淋水分布的数值优化设计[J]. *应用力学学报*, 2000, 17(1): 102-109.
HUANG Dongtao, DU Chengqi. Numerical Optimization on the Arrangement of the Filling Material and Spraying Water in Cooling Tower [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2000, 17(1): 102-109.
- [7] AL-WAKED Rafat, BEHNIA Masud. CFD Simulation of Wet Cooling Towers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006(26): 382-395.
- [8] 赵元宾, 孙奉仲, 王凯, 等. 自然通风湿式冷却塔传热传质的三维数值分析[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2008, 38(5): 36-41.
ZHAO Yuanbin, SUN Fengzhong, WANG Kai, et al. Three Dimensional Numerical Analyses of Heat and Mass Transfer in a Wet Cooling Tower [J]. *Journal of Shandong University(Engineering Science)*, 2008, 38(5): 36-41.
- [9] 赵振国. 冷却塔[M]. 2版. 北京: 水利电力出版社, 2001: 66.
ZHAO Zhenguo. *Cooling Tower* [M]. 2nd. Beijing: Chinese Water Power Press, 2001: 66.
- [10] 史佑吉. 冷却塔运行与实验[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
SHI Youji. *Operation and Experiment of Cooling Tower* [M]. Beijing: Chinese Water Power Press, 1990.