

文章编号:1672-3961(2010)06-0139-05

# 机械通风冷却塔排布置数值模拟分析及优化

高坤华,徐士倩,郑德升,韩敬钦,王伟

(山东电力工程咨询院有限公司,山东 济南 250013)

**摘要:**针对印尼4×600MW机组火电项目中,两组平行机械通风冷却塔排间距设计参照国内相关规范要求取值过大的问题,结合当地实际环境因素、塔排间距对塔排冷效的影响进行了数值模拟分析,评估了环境风对不同的冷却塔排布置方式湿热空气回流和干扰的影响,对塔排布置方式进行了优化。得出结论:塔排长轴与夏季主导风向平行的情况下,湿空气的回流不受塔排间距的影响,塔排间距可由51 m降至21.6 m,从而在保证冷效的前提下减少电厂占地面积。

**关键词:**机械通风冷却塔;塔排布置方式;环境风;冷效

**中图分类号:**TM619 **文献标志码:**A

## A numerical model analysis and optimization of layout for a mechanical ventilating cooling tower

GAO Kun-hua, XU Shi-qian, ZHENG De-sheng, HAN Jing-qin, WANG Wei

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

**Abstract:** The spacing distance between two parallel mechanical ventilating cooling tower rows was designed too large according to the relevant Chinese Design Codes in the Indonesian 4×600MW Thermal Power Plant. A mathematical model experiment was made to analyze the influence of local practical environment factor and spacing distance of tower row on cooling effort, evaluate the environmental wind's influence on reflux and disturbance of exhaust wet air in different cooling tower row layouts, and optimize the cooling tower row layout. It was concluded that as its long axis parallels the dominate summer wind direction, the spacing distance has no influence on wet air reflux and spacing distance can be decreased from 51m to 21.6 m, and thereby the site area of the plant is reduced with guaranteed cooling effort.

**Key words:** mechanical ventilating cooling tower; cooling tower row layout; environmental wind; cooling effort

## 0 前言

随着我国火力发电项目速度趋缓,越来越多的电力勘测设计单位开始向国外市场拓展生存空间,我院最近完成了印度、印尼涉外工程的设计。由于此类地区气温及湿度都较高,600 MW 机组二次循环供水系统配置15台机械通风冷却塔,多台机组带来机械通风冷却塔排布置的问题。依据现行规范规定,长轴不在同一直线上相互平行布置的机械通风冷却塔的塔排间距的确定不仅要考虑冷却塔进风口

配风的要求,更重要的是控制湿热空气回流和干扰的影响<sup>[1]</sup>。长轴不在同一直线上相互平行布置的机械通风冷却塔的塔排之间可采用0.5倍~1.0倍的塔排长度,并要求不小于塔的进风口高度的4倍<sup>[2]</sup>。按此要求两平行塔排间距至少要脱开51 m。本文通过对机械通风冷却塔排布置数值模拟分析,针对现场工程实际情况优化冷却塔排布置方式,达到了降低电厂占地面积,节约投资成本的目的。

## 1 工程概况

循环水系统采用带有机械通风冷却塔的单元制

收稿日期:2010-04-13

基金项目:山东电力工程咨询院有限公司2009年科技立项项目

作者简介:高坤华(1965-),女,山东济南人,高级工程师,主要研究方向为大中型电厂的供排水、消防、环保等方面的设计。

E-mail:gaokh1965@163.com

循环供水系统。每台机组配置15台机械通风冷却塔,循环水倍率66倍,凝汽器面积42 000 m<sup>2</sup>,循环水管DN3200。本工程4×600MW机组共设4排,60台机械通风冷却塔,冷却塔工艺参数见表1。

表1 冷却塔工艺参数表  
Table1 Parameters of cooling tower

参数名称	参数值
干球温度 $\theta/^\circ\text{C}$	35
湿球温度 $\tau/^\circ\text{C}$	28
大气压 $P/\text{kPa}$	100.4
相对湿度 $\Psi$	0.59
空气密度 $\gamma/\text{kg}/\text{m}^3$	1.12
进塔水温 $T_1/^\circ\text{C}$	40
出塔水温 $T_2/^\circ\text{C}$	32
单塔处理水量 $\text{m}^3/\text{h}$	5 540
单塔平面基础尺寸/m	20.4 × 20.4
塔进风口高度/m	4.75
气水比 $\lambda$	0.65
淋水段风速 $V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.14
重量风速 $g_a/(\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1})$	2.39
塔总阻力 $P_q/\text{Pa}$	101.17
设计交换数 $N$	1.64
风机类别	玻璃钢轴流风机
风机直径 $\varphi/\text{mm}$	9 750
设计风量 $G/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	3 200 000
风机动压 $P_d/\text{Pa}$	59.87
风机全压 $\Delta P/\text{Pa}$	161.04
配用电动机功率 $N/\text{kW}$	200

## 2 数学模型的建立

### 2.1 基本模型的建立

由于机械通风冷却塔附近建筑及周围地形会对冷却塔附近气流产生影响,因此基本模型为4×600MW机组的60台机械通风冷却塔附近建构筑物及周围地形条件,利用Gambit软件构建计算的几何模型。见图1。

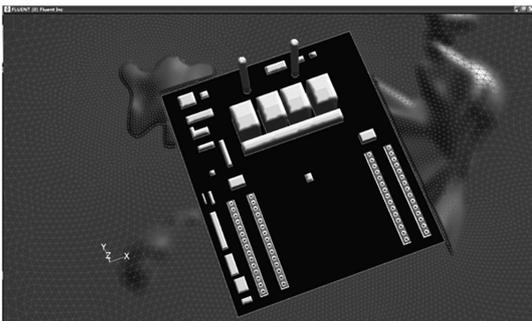


图1 电厂地形图

Fig. 1 Topographical map of plant

### 2.2 数据计算方法

#### 2.2.1 冷却塔热力计算

冷却塔的热力计算主要包括冷却塔进风口与出风口的温度及其对冷却塔机组运行的影响。

将冷却过程中散热系数 $\alpha$ 、散质系数 $\beta_v$ 、湿空气的比热 $c$ 看作是常量。冷却塔内水蒸气的分压力取平均大气压力值。不考虑水侧的热阻,忽略蒸发水量。在水温变化不大的范围内,将饱和水蒸汽分压力及饱和空气与水温的关系假定为线性关系。

冷却塔的热力计算采用最常用的焓差法。以焓差为动力的散热方程式:

$$dH_q = \beta_{xv} (h''_t - h_0) dV, \quad (1)$$

式中, $H_q$ ——水散热量;

$\beta_{xv}$ ——容积散质系数(单位: $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}/\text{kg})$ );

$h''_t$ ——温度为水温 $t$ 时饱和空气比焓(单位: $\text{kJ}/\text{kg}$ );

$h_0$ ——空气比焓(单位: $\text{kJ}/\text{kg}$ )。

将式(1)积分后有

$$h_2 = h_1 + \frac{1}{K} \frac{c_w \Delta t}{\lambda}, \quad (2)$$

式中, $\lambda$ ——气水比;

$h_1, h_2$ ——进出塔空气的比焓(单位: $\text{kJ}/\text{kg}$ );

$$K = 1 - \frac{c_w t_2}{r_m};$$

$c_w$ ——水的比热(单位: $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ )。

又

$$h = 1.005\theta + (2500 + 1.842\theta) \frac{0.622\varphi p''_v}{p_a - \varphi p''_v}, \quad (3)$$

式中,

$\theta$ ——干球温度(单位: $^\circ\text{C}$ );

$\varphi$ ——相对湿度(单位:%);

$p''_v$ ——在 $\theta$ 温度条件下的饱和蒸汽压(单位:Pa);

$P_a$ ——大气压力(单位:Pa)。

现假定出风口处空气相对湿度为100%,有

$$\lg p''_v = 2.0057173 - 3.142305 \left( \frac{10^3}{T} - \frac{10^3}{373.16} \right) +$$

$$8.21 \lg \left( \frac{373.16}{T} \right) - 0.0024804(373.16 - T).$$

(4)

式中, $t$ ——温度(单位: $^\circ\text{C}$ );

$T$ ——空气的绝对温度(单位:K)。

由公式(1)~(4),通过进风口的干球温度和相对湿度、出风口的相对湿度和大气压力,求出冷却塔出风口的温度。

### 2.2.2 湿热空气回流率

回流率  $R$  定义为从风筒排出的湿热气流被进风口吸入的比例,用试验数据按式(5)进行计算:

$$R = \frac{\bar{t} - t_a}{t_j - t_a}, \quad (5)$$

式中: $\bar{t}$ ——进风口各点平均温度(单位:℃);

$t_a$ ——行近空气流温度(单位:℃);

$t_j$ ——风筒排出气流温度(单位:℃)。

### 2.2.3 换热效率

冷却塔的任务是将热水从水温  $t_1$  冷却到  $t_2$ ,进入冷却塔的温度较低的空气经过蒸发传热和接触传热带走热水降温释放的热量,经由出风口排出。

若将冷却塔简化成只有进出风口的换热设备,并假设热水降温释放的热量全部由吸入的空气带走,单位时间内进出风口的热量关系如式(6)(下标 in 和 out 分别表示进风口和出风口):

$$\Delta q = \dot{m}_{out}(c_{out}t_{out}) - \dot{m}_{in}(c_{in}t_{in})。 \quad (6)$$

式中: $c$ ——比热(单位:kJ/(kg·℃));

$\dot{m}$ ——质量流量(单位:kg/s);

$t$ ——温度(单位:℃);

$$\dot{m}_{out} \approx \dot{m}_{in},$$

则式(6)可写为

$$\Delta q = \dot{m}(c_{out}t_{out} - c_{in}t_{in})。 \quad (7)$$

确立一标准工况的换热量,得出  $N$  台冷却塔在实际运行时换热效率  $\eta$  和相对换热效率  $\eta'$ :

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{N \cdot q_0} \times 100\%, \quad (8)$$

$$\eta' = \frac{\sum_{i=1}^N q_i - N \cdot q_0}{N \cdot q_0} \times 100\%, \quad (9)$$

式中: $q_i$ ——冷却塔的实际换热量;

$q_0$ ——标准工况下的换热量。

### 2.3 单塔运行的标准工况的建立

对于数值模拟,通过建立一个标准工况(表2),确定参数及式(8)和式(9)中的  $q_0$ 。

表2 单塔运行标准工况数据表

Table 2 The data table of standard operation condition of single cooling tower

进风口温度/℃	出风口直径/m	出风口风速/(m·s <sup>-1</sup> )	出风口温度/℃	大气压/kPa
干球 30 湿球 28.6	10.512	9.47	37.04(相对湿度 100%)	101.24

数值模拟计算主要考虑以下工况:

环境温度:31.3℃,33.0℃。

环境风速:2.8 m/s,4.0 m/s,5.0 m/s。

环境风风向角:8个风向角,风向角间隔45°。

塔排间距:15 m,20 m,25 m,30 m,40 m。

## 3 计算结果及分析

由于31.3℃和33℃时曲线变化规律相同,下面仅分析31.3℃时的计算结果。

### 3.1 塔排间距和环境风速的影响

图2~4是31.3℃时,不同塔排距离下,塔排整体的平均温度升高值和回流率以及总体平均换热效率。

从图2~4可以看出:

(1) 无风时,随着间距增大,进风口平均温度升高值及热回流率均有明显下降;环境风速为4 m/s和5 m/s时,随着塔排间距增大,进风口平均温度和热回流率的降低幅度,以及总体平均换热效率升高幅度有所下降;间距为40米时,环境风速为4 m/s和5 m/s时较2.8 m/s进风口平均温度升高0.2℃,热回流率升高1.2%,总体平均换热效率降低0.41%。

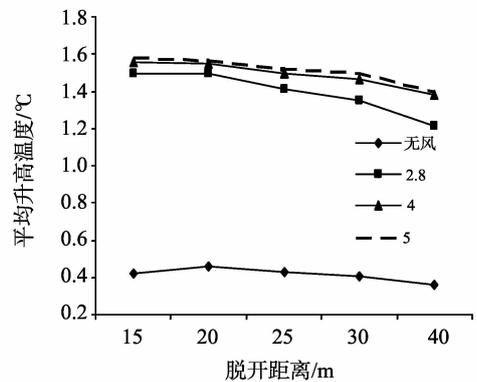


图2 31.3℃时不同间距的平均温度升高值  
Fig. 2 Average temperature increment of different spacing at 31.3℃

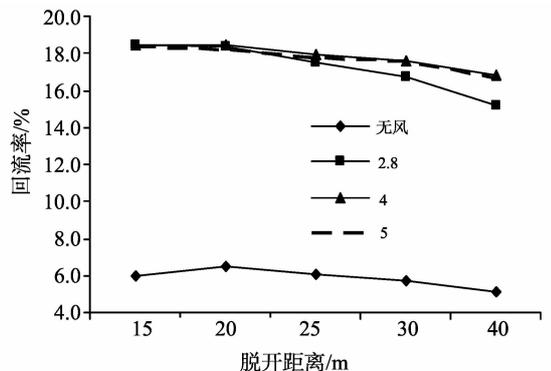


图3 31.3℃时不同间距的平均回流率  
Fig. 3 Average reflux ratio of different spacing at 31.3℃

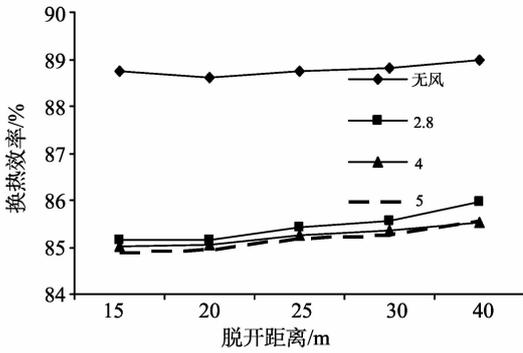


图4 31.3 °C时不同间距的平均换热效率

Fig. 4 Average heat transmission effectiveness of different spacing at 31.3 °C

(2) 从计算结果上看,不同的塔排间距,对平均升高温度的影响在 0.2 °C 范围内,对平均热回流率的影响在 2% 之间,对换热效率的影响在 0.5% 范围内,本项目中塔排间距对冷却塔机组运作的影响较小。

(3) 不同的环境风速,对平均升高温度的影响在 0.4 °C 范围内,对平均热回流率的影响在 3% 之间,对换热效率的影响在 1% 范围内,本项目中环境风速对冷却塔机组运作的影响较小。

### 3.2 环境风速和风向的影响

研究表明:环境风速与风向对电厂空冷效率产生影响<sup>[3-4]</sup>。图5~10为31.3 °C时,风速为分别为2.8 m/s,5 m/s 下塔排整体平均温度升高值、平均热回流率和平均换热效率随风向变化的曲线图。

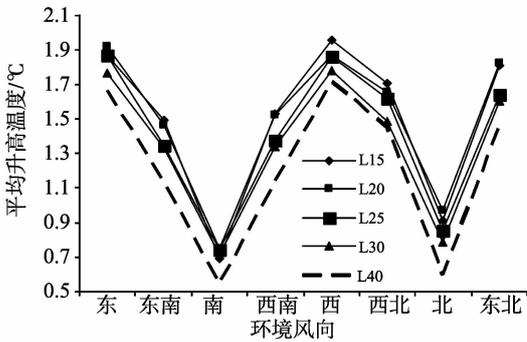


图5 风速 2.8 m/s, 31.3 °C 时不同风向下的平均温升

Fig. 5 Temperature increment of different wind direction at 31.3 °C and with the wind speed of 2.8 m/s

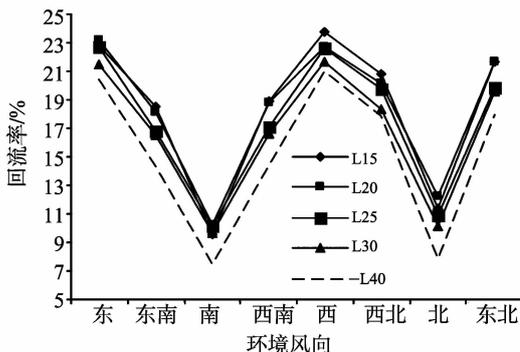


图6 风速 2.8 m/s, 31.3 °C 时不同风向下的回流率

Fig. 6 Reflux ratio of different wind direction at 31.3 °C and with the wind speed of 2.8 m/s

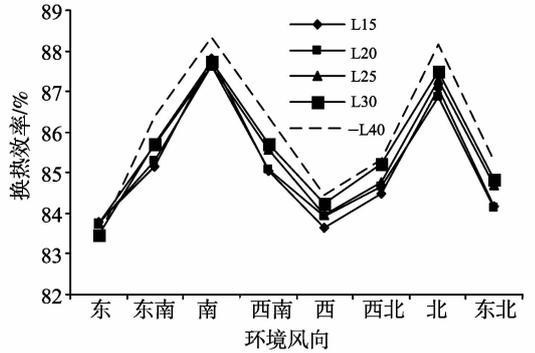


图7 风速 2.8 m/s, 31.3 °C 时不同风向下的换热效率

Fig. 7 Heat transmission effectiveness of different wind direction at 31.3 °C and with the wind speed of 2.8 m/s

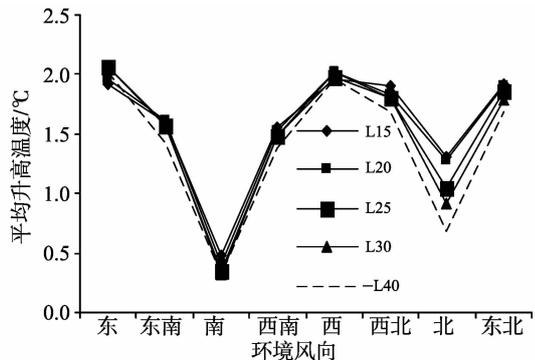


图8 风速 5.0 m/s, 31.3 °C 时不同风向下的平均温升

Fig. 8 Average temperature increment of different wind direction at 31.3 °C and with the wind speed of 5.0 m/s

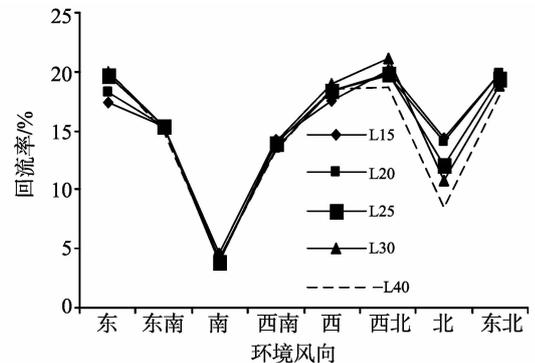


图9 风速 5.0 m/s, 31.3 °C 时不同风向下的回流率

Fig. 9 Reflux ratio of different wind direction in 31.3 °C and with the wind speed with 5.0 m/s

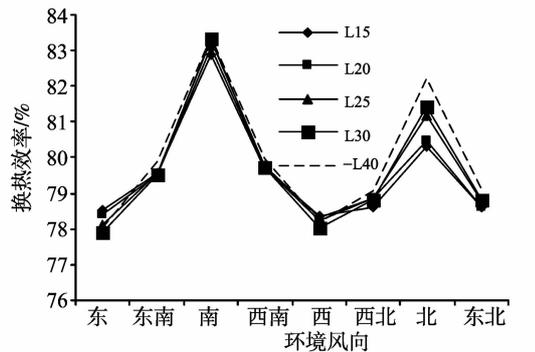


图10 风速 5.0 m/s, 31.3 °C 时不同风向下的换热效率

Fig. 10 Heat transmission effectiveness of different wind direction at 31.3 °C and with the wind speed of 5.0 m/s

由图5~10可以看出:

(1) 在平面布置上,使塔排长轴与夏季主导风向平行,当风向与冷却塔排长边平行,即南风 and 北风时,温度升高值和热回流率较小,换热效率较高。反之,当风向与冷却塔排长边垂直,即东风和西风时,温度升高值和热回流率较大,换热效率也较低。

(2) 从整体上看,塔排间距为40 m时在不同风向风速组合下,进风口平均温度升高值最小,热回流率最低,换热效率最高。随着间距的减小,相应的计算值也随之增大。

(3) 从计算结果上看,不同环境风向,对平均升高温度的影响在 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,对平均热回流率的影响在15%之间,对换热效率的影响在5%范围内。本项目中环境风向对冷却塔机组运作的影响较大。

### 3.3 环境温度的影响

从上述计算结果上看,不同环境温度,平均升高温度的变化不大,对平均热回流率的影响在0~2.5%之间,对换热效率的影响在0~7%范围内。本项目中环境温度对冷却塔机组运作有一定影响,尤其是对换热效率的影响较大。

## 4 数值模拟的结果分析

通过对数值模拟的结果分析,得到以下结论:

(1) 在不考虑环境因素的影响,即在无风的情况下,冷却塔的相互影响会导致其进风口出现热回流的现象,进而降低其换热效率。各塔排中间部分的冷却塔,由于受其他塔出风口排出的热风的影响较大,其进风口热回流率较高,换热效率较低。

(2) 不同的塔排间距对冷却塔机组运作的影响较小,不同的环境风向对冷却塔机组运作的影响较大。在场地条件允许的范围内,间距越大,冷却塔工作效率越高,受风向的影响越小。环境温度对冷却塔运作有一定影响,尤其是对换热效率的影响较大。

## 5 结论

综上所述,环境风向对机械通风冷却塔排的工作效率有着较为重要的影响,环境温度对冷却塔机组的换热效率影响也较为明显,而环境风速、塔排间距等因素则影响较小。根据印尼南苏 $4\times 600\text{MW}$ 坑口电厂厂址的主风向,而厂址附近土地使用不受方向限制,因此在机械通风冷却塔平面布置上,能使塔排长轴与夏季主导风向平行,该情况下,湿空气的回流不受塔排间距的影响,因此确定塔排间距时只考虑冷却塔进风口配风的要求,塔排间距不低于进风口高度的4倍<sup>[1]</sup>,即19 m,为施工运行方便,本项目推荐间距按21.60 m的间距来布置。本机械通风冷却塔布置方案是可行的和经济的。

### 参考文献:

- [1] 东北电力设计院. GB/T50102-2003 工业循环水冷却设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.  
Northeast Electric Power Design Institute. GB/T50102-2003 Code for design of cooling for industrial recirculating water [S]. Beijing:China Planning Press, 2003.
- [2] 中国电力企业联合会. DL/T5339-2006 火力发电厂水工设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2006.  
China Electricity Council. DL/T5339-2006 Code for hydraulic design of fossil fuel power plants [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [3] GU Z F, LI H, ZHANG W H, et al. Wind tunnel simulation on recirculation of air-cooled condensers of a power plant [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(6):509-520.
- [4] GU Z, CHEN X, LUBITZ W, et al. Wind tunnel simulation of exhaust recirculation in an air-cooling system at a large power plant [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(3):308-317.

(编辑:许力琴)