

文章编号: 1006-3080(2023)04-0474-07

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20220601001

# 基于环境风温-冷却水温耦合计算的间接空冷却塔 冬季运行及防冻研究

康卫东<sup>1</sup>, 李高潮<sup>2</sup>, 王子豪<sup>3</sup>, 王永进<sup>4</sup>, 张利<sup>1</sup>, 师进文<sup>3</sup>, 韩立<sup>5</sup>

(1. 神华国能宁夏鸳鸯湖发电有限公司, 银川 750411; 2. 西安热工研究院有限公司, 西安 710054;  
3. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049; 4. 国家电投集团山西铝业  
有限公司, 山西忻州 034100; 5. 西安西热节能技术有限公司, 西安 710054)

**摘要:**间接空冷却塔是空冷发电机组的重要冷端设备, 其换热性能直接影响着整个发电机组的运行情况。本文针对宁夏某电厂的双间接空冷却塔系统, 在Fluent软件中通过使用用户自定义函数(UDF)对其进行了环境风温-冷却水温的实时耦合计算, 进而对其在冬季大风条件下的冻结风险进行研究。结果表明: 耦合计算模型具有较好的精度, 与各项实测数据相比误差均在5%以内。环境侧风会增加各扇段出口水温的不均匀度, 主要表现为迎风扇段出口水温急剧降低。减小迎风扇段的百叶窗开度可提升其冷却水出口温度, 但同时会使背风扇段出口水温骤降。当同时减小迎风与背风扇段百叶窗开度时, 各扇段出口水温回升且分布更加均匀, 整塔冻结风险普遍降低。

**关键词:**间接空冷却塔; 环境侧风; 冷却水温; 实时耦合计算; 防冻

**中图分类号:**TK121

**文献标志码:**A

间接空冷系统因具有节约水资源<sup>[1]</sup>、维护量低、噪声小等优点, 在华北、西北等富煤贫水地区得到了大范围的应用<sup>[2]</sup>。间接空冷系统的核心装置是间接空冷却塔(以下简称间冷却塔), 间冷却塔的安全稳定运行是火电机组发电效率和工作经济性的重要保障<sup>[3]</sup>。

间冷却塔由于直接暴露在大气环境中, 且其使用自然通风的方式冷却, 所以环境侧风是影响间冷却塔换热性能的重要因素。国内外学者也研究了存在环境侧风时冷却塔的性能表现。Goudarzi等<sup>[4-5]</sup>发现环境侧风对间冷却塔的性能影响很大, 可降低其35%~40%的换热效果。向同琼等<sup>[6]</sup>发现当环境侧风存在时, 间冷却塔通风量受到影响, 进而影响其工作效率。Wang等<sup>[7]</sup>发现当风速大于4 m/s时, 间冷却塔的散热性能随环境风速增加而降低。林闽城等<sup>[8]</sup>指出在无风环境下时

间冷却塔的通风量和散热量最大, 环境风会使换热效果变差。Liao等<sup>[9]</sup>指出自然通风间冷却塔换热量会随着环境风速的增加表现出先减小后增大的特点。王蓝婧等<sup>[10]</sup>对660 MW发电机组的SCAL(Surface Condenser Aluminum Exchangers)型间冷却塔的研究表明, 当环境风速为12 m/s时, 间冷却塔的冷却效果最差。由于环境侧风对间冷却塔性能的负面影响, 也有学者针对如何削弱环境侧风的影响进行研究。例如卢承斌等<sup>[11]</sup>使用一种环状导流板与内部风墙的组合装置来减小环境风对间冷却塔的换热影响, 卫慧敏等<sup>[12]</sup>通过建立间冷却塔数学模型, 对空冷却塔的塔体结构进行了优化。除此之外, 环境气温也对间冷却塔的性能有着较大影响, 夏季时环境温度过高, 间冷却塔的换热能力会急剧下降<sup>[13-14]</sup>; 而冬季气温过低, 间冷却塔的散

收稿日期: 2022-06-01

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1505403)

作者简介: 康卫东(1974—), 男, 陕西宝鸡人, 工程师, 主要研究方向为火电机组运行和生产管理。E-mail: 17001590@chnenergy.com.cn

通信联系人: 师进文, E-mail: jinwen\_shi@mail.xjtu.edu.cn

引用本文: 康卫东, 李高潮, 王子豪, 等. 基于环境风温-冷却水温耦合计算的间接空冷却塔冬季运行及防冻研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2023, 49(4): 474-480.

**Citation:** KANG Weidong, LI Gaochao, WANG Zihao, et al. Winter Operation and Anti-Freezing Research of Indirect Air-Cooling Tower Based on Coupling Calculation between Ambient Wind Temperature and Cooling Water Temperature[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2023, 49(4): 474-480.

热管束则有冻裂的风险<sup>[15-16]</sup>。杨晓茹<sup>[17]</sup>提出了两种较为有效的防冻措施,并使用模拟计算的方法加以研究。王伟佳等<sup>[18]</sup>通过分析冬季气温与间冷系统各参数的关系,建立了电站间冷系统高效防冻控制逻辑。王丰力<sup>[19]</sup>在电厂进行了实验,并结合数值模拟,得到了翅片管束临界冻结参数分布规律。赵佳骏等<sup>[20]</sup>采用实验的方法研究了间冷系统散热器的冻结因素,并建立了有效的间冷系统冬季运行优化模型。

综上所述,目前关于环境侧风对间冷塔整体性能影响的研究已经较为充分,但是关于环境侧风与间冷塔各扇段出口水温的耦合分析仍然较少,且上述研究的模型中缺乏冷却水温度和空气温度实时迭代的耦合换热过程,其计算精度难以得到保证。本文利用 Fluent 软件,结合用户自定义函数(UDF)实现各扇段水温与附近空气流动传热特性的实时耦合;然后通过模拟计算分析环境风对间冷塔换热性能的影响机理,并进一步提出了冬季大风条件下的百叶窗调节方案。

## 1 模型与方法

### 1.1 几何模型与网格划分

宁夏某电厂采用的是带表面式凝汽器的间接空冷系统。该系统共配置有 2 座间冷塔,采用 1 机 1 塔的形式布置,每台发电机组使用 1 座间冷塔进行蒸汽排汽的冷却。间冷塔的基本尺寸如图 1 所示,其中虚线框中数据表示离地面高度为 0 时的塔身直径。

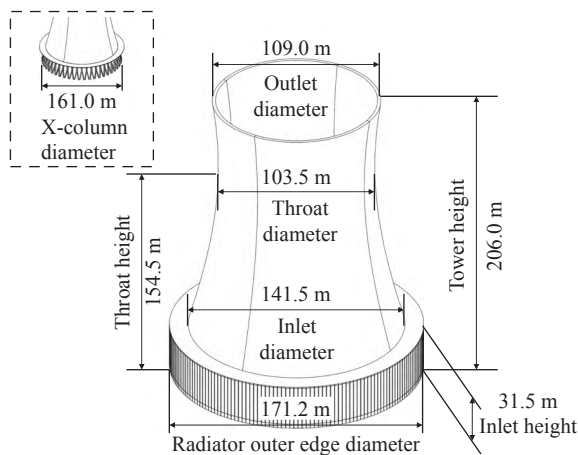


图 1 间冷塔几何参数示意图

Fig. 1 Geometrical parameters of indirect air-cooling tower

在建立几何模型的过程中,对实际的间冷塔进行了相应的简化,使其能够满足数值计算的要求:(1)将散热管束的流动换热特性等效为阻力系数与换热系数;(2)将百叶窗等效为一个具有可变空气阻力

的面。在此基础上,根据目标电厂的实际情况建立了双塔模型。

本文中双塔模型的计算区域尺寸为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times 0.6 \text{ km}$ ,使用 Fluent Meshing 软件对其进行非结构化网格(多面体网格)划分。鉴于计算域面积较大,模型中采用非均匀网格划分方法,对间冷塔附近的网格进行加密处理以更准确地捕捉间冷塔流动传热特性,对计算区域边缘的网格进行稀疏化处理以减少网格总数,最终网格数为 350 万。

目标电厂厂址地区的全年主导风向为东南风,结合间冷塔的地理方位,双塔模型中空气入口流动方向与两塔中心连线的夹角选为  $23.5^\circ$ ,1 号塔与 2 号塔的迎风扇段为 11 号、12 号与 1 号扇段(分别表示为 1-11、1-12、1-1 和 2-11、2-12、2-1),背风扇段为 5 号、6 号与 7 号扇段(分别表示为 1-5、1-6、1-7 和 2-5、2-6、2-7)。以上扇段是依据电厂提供的技术文件来划分的。

### 1.2 数值模型及边界条件

本文使用基于有限容积法的软件 Fluent 来进行数值模拟计算。对于模型中的空气湍流流动,使用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型来描述;对动量方程、能量方程、湍流动能方程与湍流动能耗散方程均使用二阶迎风差分格式来进行离散,算法采用改进的压力-速度耦合 SIMPLEC 算法。在计算过程中,能量方程的残差收敛标准设置为  $1 \times 10^{-6}$ <sup>[21]</sup>,其余参数的残差收敛标准设置为  $1 \times 10^{-4}$ <sup>[22]</sup>。

在边界条件设置上,计算域的入口侧面定义为速度入口边界条件,底面设为壁面边界条件,剩余的 3 个侧面及顶面设为压力出口边界条件。其中速度入口边界条件使用式(1)所示的标准风速廓线函数,使用 C 语言编写 UDF 文件并导入 Fluent 中。

$$u = u_{10} \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (1)$$

式中: $z$  为高度, $u$  为  $z$  米高度处的风速, $u_{10}$  为 10 m 高度处的风速, $p$  为地面粗糙度(取值为  $0.16$ <sup>[23]</sup>)。

### 1.3 翅片管束处理

因为间冷塔散热管束由大量周期性重复的翅片管束组成,所以可以通过对翅片管束的最小重复几何单元进行流动特性计算,来获得整个散热管束的阻力系数。翅片管束最小重复单元及其计算域网格如图 2 所示,计算域延长了出口与入口段,并使用多面体网格来划分计算域。在此基础上,分别计算入口空气速度为  $1 \sim 10 \text{ m/s}$  时入口与出口之间的压降,然后根据式(2)得到阻力系数,最后对阻力系数与速度进行多项式拟合,得到式(3)所示的阻力系数与入

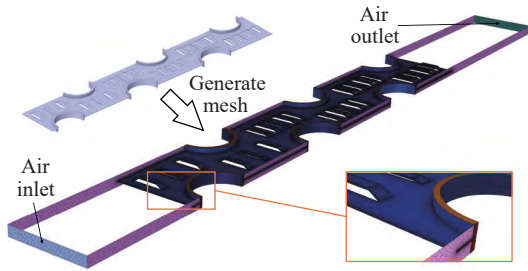


图 2 翅片管束最小重复单元计算域及网格

Fig. 2 Computational area and mesh of the smallest repeating unit of finned bundle

口空气流速的函数关系。

$$k_L = \frac{2\Delta p}{\rho u^2} \quad (2)$$

$$k_L = 42.0107 - 19.0185u + 5.4396u^2 - 0.8293u^3 + 0.0633u^4 - 0.0019u^5 \quad (3)$$

式中:  $\Delta p$  为压降,  $k_L$  为阻力系数,  $\rho$  为密度。

#### 1.4 耦合计算方法

在实际的间冷塔中, 散热管束外侧空气与管内冷却水的换热过程是互相耦合的, 主要体现在空气进出口温度与冷却水进出口温度的耦合上。而 Fluent 内置的 Radiator 模型的传热温度是定值, 仅能模拟空气流过散热器温度上升的过程, 无法模拟冷却水在管内温度降低的现象。所以, 为了模拟空气与冷却水耦合换热的过程, 需要通过编写相应的 UDF 将空气进出口温度与冷却水进出口温度相互耦合, 对应到 Radiator 模型中就是要将空气进出口温度与换热温度联系起来。

散热管束中的换热过程是冷却水中的热量转移到空气中的过程, 表现为空气温度的上升和冷却水温度的下降。由能量守恒可知冷却水损失的热量等于空气获得的热量, 即:

$$q_{\text{air}} C_{p,\text{air}} (T_{\text{out,air}} - T_{\text{in,air}}) = q_{\text{water}} C_{p,\text{water}} (T_{\text{in,water}} - T_{\text{out,water}}) \quad (4)$$

式中:  $q_{\text{air}}$  为空气流量,  $q_{\text{water}}$  为冷却水流量,  $C_{p,\text{air}}$  为空气比定压热容,  $C_{p,\text{water}}$  为冷却水比定压热容,  $T_{\text{in,air}}$  和  $T_{\text{out,air}}$  分别为空气进、出口温度,  $T_{\text{in,water}}$  和  $T_{\text{out,water}}$  分别为冷却水进、出口温度。

式(4)将空气进、出口温度与冷却水进、出口温度互相联系, 以此为基础的 UDF 迭代逻辑如图 3 所示。

由图 3 可知, 计算的初始条件为  $T_{\text{out,air}} = T_{\text{in,air}}$  和  $T_{\text{out,water}} = T_{\text{in,water}}$ , 即此时空气和冷却水尚未发生热交换。当计算开始之后, UDF 开始迭代, 在 Fluent 的每一步计算中, UDF 都会读取这一步计算得到的新的空气出口温度  $T'_{\text{out,air}}$  与空气流量  $q'_{\text{air}}$ , 并据此算出散

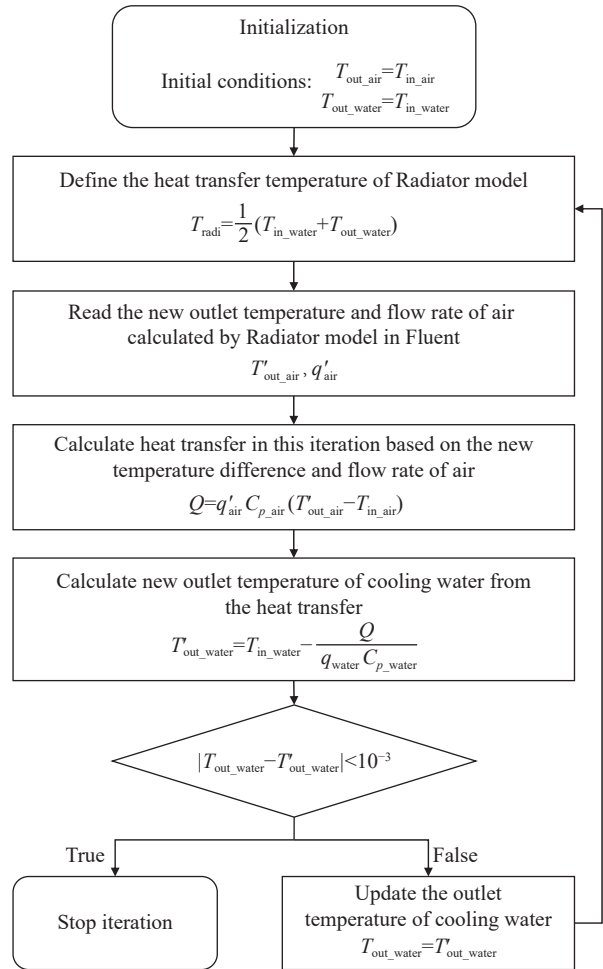


图 3 耦合计算 UDF 逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of the UDF of coupled calculation

热量  $Q$  和新的冷却水出口温度  $T'_{\text{out,water}}$ 。然后判断  $|T_{\text{out,water}} - T'_{\text{out,water}}| < 10^{-3}$  是否为真, 即判断冷却水的出口温度是否已经迭代到稳定值。若判断不为真, 则将出口水温更新为本次 UDF 迭代得到的值, 而后回到定义 Radiator 换热温度的步骤, 用新的出口水温定义换热温度。以此反复迭代之后, 空气与冷却水出口温度趋于稳定, 冷却水放出的热量与空气吸收的热量逐渐相等, 即满足能量守恒(式(4))。这样就通过上述 UDF 逻辑实现了空气和冷却水的实时耦合换热计算。

#### 1.5 模型验证

1.5.1 网格无关性验证 图 4 所示是网格无关性验证结果图。由图 4 可知, 当网格数量达到 350 万时, 间冷塔的换热量趋于稳定。这说明在网格数大于或等于 350 万时就可以通过计算得到较为精确的结果, 网格无关性验证成功。

1.5.2 标准工况数据对比验证 为了验证数值计算模型对实际间冷塔的还原程度, 本文使用目标电厂 TMCR(汽轮机最大连续出力)工况标准参数进行模



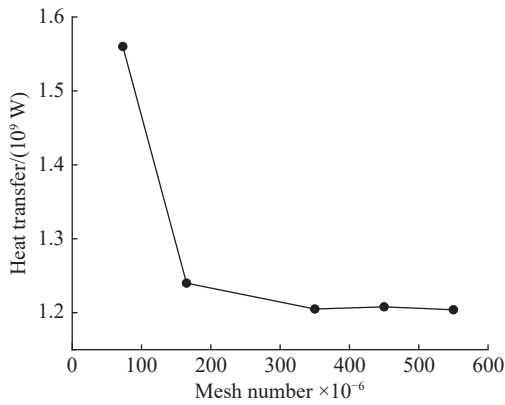


图4 网格无关性验证结果图

Fig. 4 Mesh independence verification result diagram

拟计算: 环境风速 4 m/s, 环境温度 15 °C, 冷却水入口温度 43.1 °C、入口流量 27097 kg/s。计算方法使用 1.2~1.4 节所述方法。表 1 示出了模型验证计算得到的结果与设计文件中标准工况的参数。可以看到, 本模型正确地反映了间冷塔抽吸力的作用以及散热管束与空气之间的耦合换热效应, 模拟结果与标准参数的相对误差最高为 4.84%, 最低为 0.31%, 整体相对误差在 5% 以内, 其中最为关键的换热量与出口水温的相对误差分别仅为 0.47% 与 0.31%, 说明 1.4 节所提出的耦合计算方法可为本模型提供较好的计算精度。

表 1 标准参数与模拟结果对比

Table 1 Comparison between standard parameters and simulation results

Item	Heat transfer/MW	RE/%	Draught/Pa	RE/%	$q_{air}/(kg \cdot s^{-1})$	RE/%	Outlet air velocity/( $m \cdot s^{-1}$ )	RE/%	$T_{out\_water}/^{\circ}C$	RE/%	$T_{in\_air}/^{\circ}C$	RE/%
Standard values	1 200.6		139		59 708		6.2		32.5		38.8	
Calculated values	1 206.2	0.47	137	1.44	60 385	1.13	5.9	4.84	32.4	0.31	40.0	3.09

RE—Relative errors

## 2 环境侧风对间冷塔性能的影响

根据宁夏某电厂的气象资料, 冬季大风条件下出现频次最高的气温为-10 °C、风速为 20 m/s, 故环境气温取-10 °C, 环境风速取 20 m/s, 百叶窗为全开状态。同时图 5、图 6 中的水平截面距地面高度为 15 m, 是散热管束高度的一半。

### 2.1 环境侧风对间冷塔温度、压力和流场的影响

由间冷塔水平方向的温度与流场分布(图 5)可知, 在冬季大风条件下, 从迎风扇段流入的空气在间冷塔底部形成了穿透风, 然后直接冲击背风扇段的内侧。这导致背风扇段外侧的空气难以流入塔内, 并在背风扇段附近形成了高温空气区域。同时, 塔底的穿透风在塔内形成了两个旋转方向相反的涡流, 再加上塔外侧空气绕流的影响, 导致间冷塔两侧扇段附近出现了温度极高的区域。

水平方向的压力分布与流场如图 6 所示。可以看到, 间冷塔的迎风扇段外侧出现了高压区域, 由此在迎风扇段内外侧产生的更高的压力差会导致其空气流量进一步增加。而在迎风扇段两侧的扇段, 其外部会形成压力相对较低的区域, 这是空气绕流时流速增加所导致的。压力降低会导致两侧扇段内外压差降低, 从而减少其空气流量, 进而导致两侧扇段的换热量降低、出口水温上升。尤其在两塔中央通

道处, 伯努利效应十分明显, 两塔侧面的低压区连在了一起。对于背风侧扇段, 塔底穿透风对其的冲击会使其内侧压力相对较高, 同时空气绕流间冷塔会

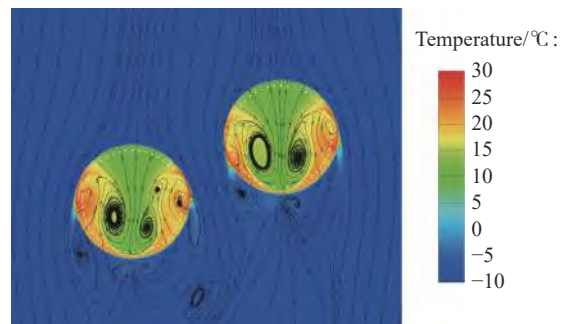


图5 双塔温度及流场图

Fig. 5 Temperature and flow field contour of twin tower

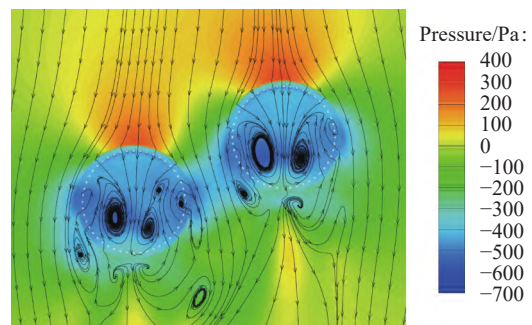


图6 双塔压强及流场图

Fig. 6 Pressure and flow field contour of twin tower

在塔后形成涡流,这将导致背风扇段的空气流量也处于较低的水平。

## 2.2 环境侧风对间冷塔出口水温的影响

图 7 所示是冬季大风条件下双塔各扇段冷却水出口水温的分布情况。在风速为 20 m/s 时,迎风扇段的出口水温极低,尤其是 12 号扇段,其出口水温已经接近 0 °C,发生冷却水冻结事故的风险极高。而对于两侧扇段与背风扇段来说,其冷却水出口温度已经接近 TMCR 工况的标准冷却水入口温度(43.1 °C),此时这些扇段处于重度散热不良的情况之下。

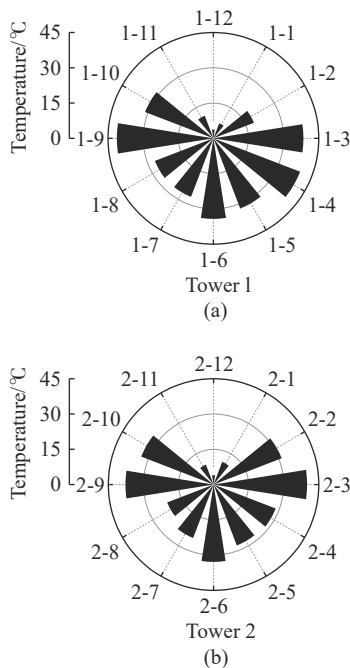


图 7 双塔冷却水出口温度分布图

Fig. 7 Cooling water outlet temperature distribution of twin tower

结合压强云图与冷却水出口温度分布可知,两侧扇段出口水温过高的原因是空气绕塔流动,在塔两侧形成了低压区,进而间接减小了间冷塔局部的抽吸力;同时空气从两塔中间穿过时,其流动截面变小,产生的低压区压力更低,这就导致两塔中央通道两侧的扇段的冷却水出口温度相对更高。同时,两侧扇段附近形成的高温区域导致其换热量继续下降。这种环境风温与冷却水温的耦合关系导致了两侧扇段的换热能力急剧下降。

## 3 冬季防冻的百叶窗开度控制策略

通过上述环境风温-冷却水温耦合计算,发现随着环境侧风速的增加,间冷塔各扇段出口水温的不均匀性越来越明显,具体表现为迎风扇段冷却水

出口温度极低,而两侧及背风扇段出口水温极高。百叶窗可以有效调节间冷塔各扇段的出口水温,通过调节百叶窗的开度,可以控制各扇段的空气流量,进而调控各扇段的出口水温。随着环境风速的升高,间冷塔的迎风扇段的出口水温会大幅降低,而背风扇段与侧面扇段的出口水温则大幅升高。基于这种出口水温分布特点,直观来说应该减小迎风扇段的百叶窗开度,以减少迎风扇段的散热量。

图 8 所示是将迎风扇段(11、12、1 号扇段)的百叶窗开度调整为 10% 之后各扇段的出口水温分布。可以看到,虽然迎风扇段的出口水温回升到了 10 °C 以上,但是双塔的背风扇段出口水温已经全部降至 0 °C 以下,已经处于冻结状态。同时双塔的侧面扇段也出现了部分冻结的情况,只有双塔两侧及中央通道两侧的扇段出口水温相对正常。这是因为在未调节百叶窗开度时,间冷塔底部的穿透风与正常流入背风扇段的空气相互冲击,在图 5 与图 6 中可以看到背风扇段处存在一处温度与压强较高的区域,这就是空气对冲所导致的。当迎风扇段百叶窗关闭之后,塔底穿透风消失,由背风扇段进入间冷塔的空气开始加速流动,进而导致背风扇段的冷却水出口水温急剧下降。

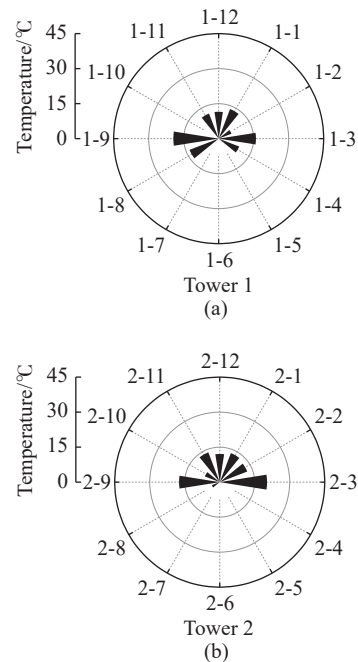


图 8 调整迎风扇段百叶窗开度后各扇段出口水温

Fig. 8 Outlet water temperature of each sector after adjusting the shutter opening degree of windward sectors

由于仅调节迎风扇段的百叶窗开度会导致背风扇段冻结风险激增,所以在冬季大风条件下,需要同时调节迎风及背风扇段的百叶窗,并适当调节部分

侧面扇段的百叶窗开度。图9所示是按表2中的方案调节百叶窗开度之后,各扇段出口水温的分布情况。相比于仅调节迎风扇段百叶窗,整体调节后各扇段的出口水温的均匀性大幅提高,并且没有出现冻结风险较高的扇段。

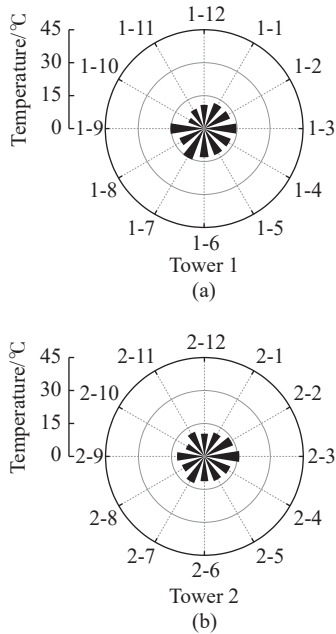


图9 按表2方案调节百叶窗开度后各扇段出口水温  
Fig. 9 Outlet water temperature of each sector after adjusting shutter opening degree according to table 2

表2 各扇段百叶窗开度调节方案

Table 2 Adjustment scheme to shutter opening degree of each sector

Sector type	Serial number	Opening degree/%
Windward	11, 12, 1	10
Leeward	5, 6, 7	10
Side	2, 4, 8, 10	20
	3, 9	100

综上所述,在冬季大风条件下,减小百叶窗开度可以增加对应扇段的冷却水出口温度,降低冻结风险。不过减小迎风扇段的百叶窗开度会造成背风扇段冷却水出口温度下降,所以对迎风与背风扇段的百叶窗开度进行同步调节,才能增加间接空冷塔各扇段出口水温的均匀度,降低发生冻结事故的风险。

## 4 结论

(1)环境风温-冷却水温耦合计算能够为模拟计算模型提供较高的精度。模型的计算结果与电厂实

测数据的误差均在5%以内,最低误差仅为0.31%。

(2)环境侧风会增加间接空冷塔各扇段出口水温的不均匀性。除了迎风扇段因空气流量增大导致出口水温降低,双塔中央通道两侧的扇段由于渐缩通道效应,其冷却水出口温度偏高;背风扇段由于塔底穿透风的冲击,其空气流量降低,冷却水出口温度也较高。

(3)减小百叶窗开度可以降低对应扇段的冻结风险,但不能只减小迎风扇段的百叶窗开度,否则会造成背风扇段冻结风险激增。在冬季大风条件下,应同步调节迎风及背风扇段的百叶窗,同时也应调节与之相邻的侧面扇段的百叶窗。在同时调节迎风、背风扇段及与之相邻扇段的百叶窗之后,各扇段的出口水温均匀性得到了大幅提升,冻结风险也随之降低。

## 参考文献:

- [1] 张庆,王学生,阮伟程,等. 蒸发式空冷器低密度翅片管束干工况换热及阻力特性[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2017, 43(4): 578-583.
- [2] 潘荔,刘志强,张博. 中国火电节水现状分析及措施建议[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 158-163.
- [3] 贾斌,李晓波,张维蔚. 表面式间接空冷系统冷却水流量优化研究[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(3): 230-234.
- [4] GOUDARZI M A. Proposing a new technique to enhance thermal performance and reduce structural design wind loads for natural draft cooling towers[J]. Energy, 2013, 62: 164-172.
- [5] GOUDARZI M, KEIMANESH R. Numerical analysis on overall performance of Savonius turbines adjacent to a natural draft cooling tower[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 99: 41-49.
- [6] 向同琼,田松峰. 间接空冷塔内外流动和传热性能的数值模拟研究[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(12): 58-63,76.
- [7] WANG W L, ZHANG H, LIU P, et al. The cooling performance of a natural draft dry cooling tower under crosswind and an enclosure approach to cooling efficiency enhancement[J]. Applied Energy, 2017, 186: 336-346.
- [8] 林闽城,华敏,王林林,等. 不同环境风速下间接空冷塔性能的模拟分析[J]. 电站系统工程, 2020, 36(6): 5-7.
- [9] LIAO H T, YANG L J, DU X Z, et al. Influences of height to diameter ratios of dry-cooling tower upon thermo-flow characteristics of indirect dry cooling system[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 94: 178-192.
- [10] 王蓝婧,刘康,付文锋,等. 660 MW SCAL型间接空冷塔夏季安全运行改造方案研究[J]. 动力工程学报, 2018,

- 38(1): 55-61,68.
- [11] 卢承斌, 姚永灵, 张泰岩, 等. 基于数值模拟技术的电站冷却塔性能优化[J]. 中国测试, 2022, 48(1): 168-176.
- [12] 卫慧敏, 杜小泽, 杨立军, 等. 大型间接空冷塔塔形优化[J]. 热力发电, 2017, 46(11): 50-56.
- [13] MA H, SI F, KONG Y, *et al.* A new theoretical method for predicating the partload performance of natural draft dry cooling towers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 1106-1115.
- [14] 毛明策, 王娟, 胡进宝. 夏季昼间逆温对间接空冷塔散热量的影响[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 147-152.
- [15] 韩玉霞, 李鑫, 赵爽. 350 MW超临界间接空冷机组冬季防冻措施研究[J]. 电站辅机, 2016, 37(2): 23-26.
- [16] 孟令国, 杨芳, 陈承宪, 等. 严寒地区间接空冷塔防冻措施研究[J]. 电力勘测设计, 2021(S1): 13-18.
- [17] 杨晓茹. 间接空冷系统防冻运行性能研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [18] 王伟佳, 陈磊, 孔艳强, 等. 电站间接空冷系统防冻高效运行控制逻辑及数值验证[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2258-2268.
- [19] 王丰力. 空冷散热器管束防冻特性实验及模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [20] 赵佳骏, 华敏, 王飞, 等. 表凝式间接空冷系统冬季运行优化研究[J]. 节能技术, 2020, 38(5): 449-453.
- [21] 刘万旺, 许志美, 宗原, 等. 顺排管束流动和传热数值模拟[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2019, 45(1): 15-22.
- [22] 许叶龙, 刘迎圆, 惠虎, 等. 固液混合过程的数值模拟及实验研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 675-680.
- [23] 李非, 路婷婷, 吴正人, 等. 空冷岛对周围大气流场影响数值模拟[J]. 热力发电, 2016, 45(11): 82-87.

## Winter Operation and Anti-Freezing Research of Indirect Air-Cooling Tower Based on Coupling Calculation between Ambient Wind Temperature and Cooling Water Temperature

KANG Weidong<sup>1</sup>, LI Gaochao<sup>2</sup>, WANG Zihao<sup>3</sup>, WANG Yongjin<sup>4</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, SHI Jinwen<sup>3</sup>, HAN Li<sup>5</sup>

(1. Shenhua Guoneng Ningxia Yuanyang Lake Power Generation Co. Ltd, Yinchuan 750411, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co. Ltd, Xi'an 710054, China; 3. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. SPIC Shanxi Aluminium Co. Ltd, Xinzhou 034100, Shanxi, China; 5. Xi'an TPRI Energy Conservation Technology Co. Ltd, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Because of water saving, the indirect air-cooling tower has been widely used in thermal power generating units in North China. Indirect air-cooling tower is an important cold side equipment of air-cooling generator unit. Its heat transfer efficiency directly affects the operation of the whole generator unit. Therefore, it is important to study the factors that determine the heat transfer efficiency of indirect air-cooling tower. In particular, the ambient crosswind is known to have the greatest influence on its performance. In this research, by using user-defined function (UDF) to calculate the real-time coupling of ambient wind and cooling water temperature, the dual-indirect air-cooling tower system of a Ningxia power plant was simulated in Fluent software. Then, the freezing risk of the system was studied under strong wind conditions in winter. The results show that the coupling calculation model has superior accuracy and with an error of less than 5% comparing to the measured data. Ambient crosswind increases the unevenness of outlet water temperature of each sector, which is mainly manifested as the sharp decrease of outlet water temperature in windward sectors. Reducing the shutters' opening of the windward sectors increases the cooling water outlet temperature; however, the water temperature of the outlet in the leeward sectors decreases sharply. When the shutters' opening of windward and leeward sectors are reduced simultaneously, the outlet water temperature of each sector rises and distributes more evenly, and the freezing risk of the whole tower is generally reduced.

**Key words:** indirect air-cooling tower; ambient crosswind; cooling water temperature; real-time coupling calculation; anti-freezing