热能工程

文章编号:1001-2060(2024)04-0096-08

# 侧风对机械通风高位收水冷却塔群三维 热力特性的影响研究

# 龙国庆1,张国罡1,陈学宏2,孙奉仲3

(1.中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司,广东广州 510663;2.鲁东大学低碳能源研究所,山东烟台 264025;3.山东大学能源与动力工程学院,山东济南 250061)

摘 要:为探究环境侧风对机械通风高位收水冷却塔群热力性能的影响,建立了由10座冷却塔组成的背靠背塔群 的三维数值计算模型,并分析了不同环境风速及风向下冷却塔群通风特性、热风回流特性及换热特性的变化规律。 研究结果表明:环境侧风诱导产生的塔内外横向旋涡对冷却塔群整体热力特性产生了恶化效应;在10 m/s 风速 下,侧风会使塔群平均通风量最大下降23.0%;45°侧风引起的塔群热风回流现象最严重,使得进风口气流温度和 含湿量最大分别增加2.3%和6.3%;在横向旋涡及热风回流等因素的作用下,环境侧风会对冷却塔群换热特性产 生不利影响,其中45°风向为最不利风向,使得出塔水温最大升高1.1℃。

关键 词:机械高位冷却塔群;环境侧风;传热传质;热风回流;数值计算

中图分类号:TK264 文献标识码: A DOI: 10.16146/j. cnki. rndlgc. 2024.04.012

[引用本文格式] 龙国庆,张国罡,陈学宏,等. 侧风对机械通风高位收水冷却塔群三维热力特性的影响研究[J]. 热能动力工程, 2024,39(4):96 - 103. LONG Guo-qing, ZHANG Guo-gang, CHEN Xue-hong, et al. Influence of crosswind on three-dimensional thermal performance of mechanical draft cooling tower cluster with high-level water collecting device[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(4):96 - 103.

# Influence of Crosswind on Three-dimensional Thermal Performance of Mechanical Draft Cooling Tower Cluster with High-level Water Collecting Device

LONG Guo-qing<sup>1</sup>, ZHANG Guo-gang<sup>1</sup>, CHEN Xue-hong<sup>2</sup>, SUN Feng-zhong<sup>3</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, China, Post Code: 510663;

2. Low Carbon Energy Institute, Ludong University, Yantai, China, Post Code: 264025;

3. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061)

Abstract: To investigate the influence of ambient crosswind on the thermal performance of the mechanical draft cooling tower cluster with high-level water collecting device, a three-dimensional numerical model for the back-to-back cooling tower cluster consisting of 10 cooling towers was established, and the variation laws of ventilation, hot air recirculation and heat exchange characteristics of cooling tower cluster under different ambient air velocities and directions were analyzed. Results indicate that the transverse vortices inside and outside the cooling tower cluster; under the air velocity of 10 m/s, the environmental crosswind reduces the average air flow of the cluster by up to 23.0%; the 45° crosswind results in the most serious hot air recirculation in cooling tower cluster, which increases the air intake air flow tempera-

收稿日期:2023-10-12; 修订日期:2023-10-30

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2022QE288)

作者简介:龙国庆(1971-),男,中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司教授级高级工程师.

Fund-supported Project: Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2022QE288)

• 97 •

ture and moisture content by 2.3% and 6.3%, respectively; due to the transverse vortices and hot air recirculation, the ambient crosswind exerts an adverse effect on the heat transfer characteristics of cooling tower cluster, and the most unfavorable crosswind direction of 45° causes a maximum increase of 1.1  $^{\circ}$ C in the outlet water temperature.

Key words: mechanical draft cooling tower cluster with high-level water collecting device, ambient crosswind, heat and mass transfer, hot air recirculation, numerical calculation

# 引 言

湿式冷却塔是进行工业循环水冷却的常见设备,可应用于发电、化工等多种行业。基于结构特征,湿式冷却塔可分为常规冷却塔和高位收水冷却塔,其中后者具有显著的节能降耗优势<sup>[1]</sup>。

目前,关于自然通风高位收水冷却塔的研究较 为广泛。文献[2-6]对比了变工况条件下常规冷 却塔与高位收水冷却塔的性能差异规律。王淼等 人<sup>[7]</sup>通过数值计算发现,环境侧风是影响自然通风 高位收水冷却塔换热性能的一个重要因素。基于环 境侧风的作用机理<sup>[8-10]</sup>, Chen 等人<sup>[11-12]</sup>进一步指 出,侧风诱导产生的塔内纵向旋涡会对高位收水冷 却塔的热力性能产生负面影响,并针对其影响程度 给出了具体的评价方法。文献[13-15]通过对某 高位收水冷却塔开展现场实测,获得了其内部气流 速度、气温和水温等参数的分布规律,并验证了数值 计算所得结论的正确性。另外,一些学者也针对高 位收水冷却塔的关键组件进行了相关研究。比如, He 等人<sup>[16]</sup>和 Lyu 等人<sup>[17]</sup>分别采用数值计算和物 模试验方法,分析了结构参数对高位收水装置阻力 特性的影响,发现 U 型收水装置对气流的阻力最 小。龙国庆等人<sup>[18]</sup>进一步通过风洞实验,获得了 U 型收水装置阻力系数与雷诺数的计算关联式。郭富 民等人<sup>[19]</sup>的相关研究证明,填料阻力系数及集水槽 深度对收水装置阻力系数的影响程度很小。田松峰 等人<sup>[20]</sup>给出了挡水板结构特征对收水装置阻力系 数的影响规律。Lyu 等人<sup>[21]</sup>则推荐了高位塔的填 料优化布置型式。

随着高位收水技术的发展,机械通风冷却塔高 位收水冷却塔也开始受到关注<sup>[22]</sup>。龙国庆等人<sup>[23]</sup> 研究了机械通风高位收水冷却塔的三维热力特性, 并验证了其与环境侧风间的相互作用机理。"在工 程应用中,机械通风高位收水冷却塔一般为背靠背 成群布置,而关于侧风作用下冷却塔群热力特性的 研究未见报道,这制约了机械通风高位收水冷却塔 的进一步应用。

基于以上分析,本文建立了由 10 座冷却塔组成 的背靠背塔群的三维数值计算模型,探究了环境侧 风对冷却塔群通风效果、热风回流特性及换热能力 的作用规律,所得结论可作为机械高位塔群优化设 计的参考。

# 1 几何模型

研究对象为背靠背式机械通风高位收水冷却塔 塔群(下称机械高位塔群),塔群共包含5×2=10 座冷却塔,进风口分别位于塔群两侧,其布置方式如 图1所示。



图1 机械高位塔群布置示意图



每座机械高位塔的结构如图 2 所示。其水平截 面为矩形,其关键参数见表 1。另外,冷却塔使用 1.5 m 厚的 S 波填料,填料片间距为 30 mm,其性能 参数见文献[24]。



图 2 机械高位塔结构示意图 Fig. 2 Structure diagram of a mechanical draft cooling tower with high-level water collecting device · 98 ·

<b>Tab.</b> 1	Key	structural	parameters	of	cooling	tower

机械高位塔关键结构参数

参 数	数值
进风口高度/m	9.1
进风口宽度/m	20.5
冷却塔进深/m	21.5
风机外筒安装平台高度/m	24.0
风机外筒长度/m	6.0
收水器间距/m	2.0
风机直径/m	10.4

## 2 数学模型

#### 2.1 控制方程

根据文献[25],本研究采用雷诺时均 Navier-Stokes 方程组来描述湿空气运动,而循环水的控制 方程为:

$$\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}z} = K_{\mathrm{m}}(\chi''_{\mathrm{w}} - \chi) \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}(c_{\mathrm{w}}qt)}{\mathrm{d}z} = K_{\mathrm{h}}(t - t_{\mathrm{a}}) + K_{\mathrm{m}}r_{\mathrm{w}}(\chi_{\mathrm{w}}'' - \chi) \qquad (2)$$

$$\frac{\mathrm{d}v_{wz}}{\mathrm{d}z} = \frac{f_z}{m_w v_{wz}} - \frac{(\rho_w - \rho_a)g}{\rho_w v_{wz}}$$
(3)

式中:q—单位淋水面积上的循环水流量,kg/(m<sup>2</sup>·s); K<sub>m</sub>—传质系数,kg/(m<sup>3</sup>·s);K<sub>h</sub>—传热系数,kW/(m<sup>3</sup>·K);  $\chi \pi \chi''_w$ —空气含湿量和饱和含湿量,kg/kg; $c_{p,w}$ —水 的比热容,kJ/(kg·K);t 和  $t_a$ —水温和空气温 度,℃; $r_w$ —水的汽化潜热,kJ/kg; $\rho_w$ 和 $\rho_a$ —水和空 气密度,kg/m<sup>3</sup>; $v_{wz}$ —水滴在竖直方向的下落速度, m/s; $f_z$ —空气对水的阻力,N; $m_w$ —单个水滴质 量,kg。

# 2.2 计算域及求解方法

为消除计算域边界与机械高位塔群的相互影响,将计算域取为远大于塔群几何尺寸的长方体(1200m×900m×400m),如图3所示。当不存在环境风时,计算域的侧面和顶面分别设置为压力入口和压力出口;当存在环境风时,将位于侧风下游的计算域侧面设置为压力出口,将其他侧面和顶面设置为速度入口。另外,采用 fan 模型模拟塔顶风机的作用。风机运行特性拟合公式为:

 $\Delta p = -0.000 \ 2G^2 + 0.236G + 214$ (4)  $\exists r p - M d \in E, Pa; G - M d : m^3/s_{\circ}$ 





#### Fig. 3 computational domain and boundary condition

#### 2.3 计算方法验证

2.3.1 网格无关性验证

为获得精确的计算结果,采用结构化网格划分 整个计算域,并对填料区和高位收水区的网格进行 加密。选取表2中的工况B进行网格无关性验证, 将不同网格数量下的计算结果列于表3。

#### 表 2 验证工况

Tab. 2 Verification condition

参 数	工况 A	工况 B	工况 C
气水比λ	0.87	1.03	1.58
进塔水温 t₁/℃	28.1	28.1	27.9
环境湿球温度 <i>t</i> <sub>sh</sub> /℃	6.9	7.0	7.2

#### 表 3 不同网格数量下计算的出塔水温

Tab. 3 Calculated outlet water temperature

under different grid numbers

总网格数量/万	计算出塔水温/℃	平均通风量/kg·s <sup>-1</sup>
248	18.22	981.3
316	18.39	989.6
384	18.48	999.1
468	18.49	999.2

由表 3 可以看出,当计算域网格数量超过 384 万时,出塔水温和平均通风量的计算结果基本不再 随网格数量的增加而发生明显变化。因此,本文研 究均基于 384 万网格数量进行计算。

图 4 展示了机械通风高位收水冷却塔群的局部 网格,其中塔群外部空间网格数为 164 万,单个冷却 塔网格数量为 22 万。

计算过程中,选用 RNG k - e 模型作为湍流模型,并采用 SIMPLE 算法对控制方程进行求解。控制方程中的压力项和其他各项分别采用体积力加权格式和二阶迎风格式进行离散。判断计算收敛的标准为:能量离散方程残差小于 1 × 10<sup>-6</sup>,其余方程残

差小于1×10<sup>-4</sup>,且连续200次计算出塔水温的变 化值小于0.01℃。



图 4 机械高位塔群局部网格 Fig. 4 Local grids of cooling tower cluster

2.3.2 模型验证

机械通风高位收水冷却塔实物如图 5 所示。针 对某座淋水面积为 64 m<sup>2</sup>的机械通风高位收水冷却 塔进行现场测试,测试过程中环境风速不超过 1.2 m/s,且冷却塔进风口始终位于上游风向。为验证 本研究中数值建模方法的准确性,选取表 2 中 3 个 运行工况对所测试的机械通风高位收水冷却塔进行 数值计算,并将出塔水温的实测数据与数值计算数 据进行对比,如表 4 所示。



图 5 机械高位塔实物图 Fig. 5 Site picture for a mechanical draft cooling tower with high-level water collecting device

表 4 机械高位塔出塔水温度的计算值与实测值对比 Tab.4 Comparation of calculated and measured outlet water temperatures of cooling tower

工况	实测出塔水温	计算出塔水温	计算误	相对误
	$t_{\rm 2d}$ /°C	$t_2 / C$	差/℃	差/%
А	20.10	20.01	0.09	1.1
В	18.70	18.48	0.22	2.3
С	15.50	15.62	0.12	1.0

根据表4可知,在各种工况下,出塔水温的实测 值与计算值的误差在0.09~0.22 ℃之间,相对误差 (即计算误差与循环水温降的比值)最大不超过 2.3%。由此可见,本文的数值计算结果可满足计算 精度的要求。

# 3 计算结果及分析

选取 0°,45°和 90°3 个风向(见图 1),每个风 向的风速范围为 0~10 m/s。在上述侧风工况下开 展数值计算,以探究侧风对机械高位塔群热力特性 的影响。具体参数为:大气压 100.89 kPa,环境空气 干球温度 22.4 ℃,环境空气含湿量 13.6 g/kg,进塔 水温 28.9 ℃,淋水密度 3.59 kg/(m<sup>2</sup>·s)。

#### 3.1 侧风对塔群通风量的影响

通风量是评价机械高位塔群通风性能的一个重 要参数。图6给出了不同风向下环境侧风风速对机 械通风高位收水冷却塔群各塔平均通风量的影响。





由图 6 可以看出,在各种风向下,随着环境风速的增加,塔群各塔平均通风量都呈逐渐下降的趋势。 这说明,各种侧风对于塔群的通风性能都有不利影 响,其中 45°风向带来的不利影响最明显。当环境 风速增加到 10 m/s 时,相较于无风工况,0°,45°和 90°风向的侧风分别使塔群平均通风量下降了 9.2%,23.0%和22.2%。

为分析侧风作用下塔群各塔通风量存在差异的 原因,基于5 m/s 环境风速工况,图7 和图8 分别给 出了不同风向下各塔通风量和进风口半高平面气流 速度等值线图。





图 7 环境风速为 5 m/s 时不同风向下各塔通风量 Fig. 7 Air flow rate of each cooling tower in different crosswind directions at air velocity of 5 m/s



图 8 环境风速为 5 m/s 时,不同风向下塔群进风口 半高平面空气速度等值线及流线图

Fig. 8 Air intake air velocity contour and streamline diagram on half-height plane of cooling tower cluster in different crosswind directions at air velocity of 5 m/s

由图7和图8可知,在0°风向下,尽管位于迎风

面的4号和5号冷却塔和位于背风面的6号、8号 和10号冷却塔内出现了小范围的横向旋涡,但这些 旋涡的影响范围较小,因此各塔通风量差距并不大; 在45°风向下,由于这些冷却塔内都存在明显的横 向旋涡且位于上游位置的冷却塔会影响下游冷却塔 的进风,导致1~5号冷却塔通风量不断下降,6号 冷却塔内部横向旋涡的影响程度最大、通风量也最 低,而由于7~10号冷却塔受环境侧风的作用较小 其通风量都超过6号冷却塔;在90°风向下,1号和6 号冷却塔横向旋涡范围最大、通风量最小,而其他8 座冷却塔的通风量基本一致。

#### 3.2 侧风对塔群热风回流的影响

除通风量外,热风回流也会影响机械高位塔群 的热力性能。不同风向和风速下塔群进风口气流温 度和气流平均含湿量的变化,如图9和图10所示。



图 9 不同环境侧风风向下的塔群各塔进风口平均气温

Fig. 9 Average air intake air temperature of each cooling tower in different crosswind conditions



图 10 不同环境侧风风向下的塔群进风口平均含湿量 Fig. 10 Average air intake moisture content of each cooling tower in different crosswind conditions

由图 9 和图 10 可知,在 0°和 45°风向下,当环 境风速增加时,塔群进风口平均气温和含湿量都呈 现先升高后降低的变化规律,其转折风速分别为 5 和 7 m/s;当风向为 0°时,在转折风速下,相对于 无风工况,进风口平均气温和含湿量分别增加了 0.45 ℃和 0.79 g/kg;而当风向为 45°时,在转折风速 下,以上两个参数分别增加了 0.52 ℃和 0.85 g/kg; 因此,在环境风速不超过 5 m/s 时 0°风向带来的热 风回流程度最严重,当环境风速超过 6 m/s 时 45°风 向引起的热风回流程度最明显。另外,在各种风速 下,90°风向均不会造成热风回流现象。

3.3 侧风对塔群换热性能的影响

机械高位塔群的通风性能和热风回流特性都会 对其换热性能产生显著影响。为分析换热性能的变 化规律,图 11 给出了不同环境侧风风向下的塔群平 均出塔水温。





由图 11 可知,当环境风速增加时,0°风向下出 塔水温先升高后降低,而 45°和 90°风向下出塔水温 持续上升。这是由于在 0°风向下,随着环境风速的 增加,虽然通风量不断降低,但由于热风回流的影 响,塔群进口气流温度和含湿量先增后降,这导致出 塔水温出现了相应的变化趋势。在 45°风向下,尽 管热风回流造成的进风口气流参数与 0°风向下,尽 管热风回流造成的进风口气流参数与 0°风向下,尽 管热风回流造成的进风口气流参数与 0°风向下,尽 包该风向下通风量随环境风速的下降率更高,因此 出塔水温的增长率逐渐放缓。另外,在 90°风向下, 由于不存在热风回流,塔群出塔水温的变化仅受通 风量的影响。值得注意的是,在各种风速下,45°风 向对应的出塔水温都要高于其他风向,而 0°风向下 塔群平均出塔水温相对处于较低水平。 为分析塔群内各塔出塔水温间的差异机制,图 12 和图 13 分别给出了环境风速为5 m/s时不同风 向下塔群出塔水温和出塔水温等值线图。



图 12 环境风速为 5 m/s 时不同风向下各塔出塔水温 Fig. 12 Outlet water temperature of each cooling tower in different crosswind directions at air velocity of 5 m/s



Fig. 13 Outlet water temperature contours of cooling tower cluster in different crosswind directions at air velocity of 5 m/s

根据图 12 和图 13,在 0°风向下,尽管迎风面冷 却塔通风量略低于背风面冷却塔,但环境侧风均匀 了迎风面冷却塔的内部流场,使得这些冷却塔内的 出塔水温明显较低;在 45°风向下,受横向旋涡的影 响,1~5号塔的出塔水温不断升高,7号塔的出塔水 温最低,而6号塔的出塔水温远高于其他各塔;在 90°风向下,由于1号和6号塔内的横向旋涡最强, 其出塔水温比其他各塔高出 1.5℃左右。由此可 见,塔群内各冷却塔的换热性能明显受到内部气流 分布特性(尤其是内部横向旋涡)的影响。

## 4 结 论

本文研究了侧风环境对机械通风高位收水冷却 塔通风性能、热风回流规律及换热性能的影响规律, 得到主要结论如下:

(1) 在各种风向下,环境风速越高,塔群整体通 风量越小,且 45°风向对塔群通风性能产生不利影 响最明显。环境侧风诱导产生横向旋涡是通风性能 恶化的主要原因。

(2) 0°和 45°风向会引起热风回流现象,且随 着环境风速的增加,热风回流程度先升高后降低。

(3)受通风量和热风回流的双重影响,当环境 风速增加时,0°风向下塔群平均出塔水温先升高后 降低,45°和90°风向下塔群平均出塔水温整体不断 增加。另外,在各种风速下45°风向对应的出塔水 温都高于其他风向。

#### 参考文献:

[1] 杨永伟,周自强,范诚豪.高位冷却塔节能分析研究[J].山西
 电力,2017(2):58-61.

YANG Yong-wei, ZHOU Zi-qiang, FAN Cheng-hao. Analysis on energy-saving of high-level water collecting cooling tower [J]. Shanxi Electric Power,2017(2):58-61.

[2] 贾明晓,胡三季,韩 立,等.1000 MW 机组高位收水冷却塔
 热力性能试验研究[J].动力工程学报,2017,37(9):751 - 756,772.

JIA Ming-xiao, HU San-ji, HAN Li, et al. Thermal performance study of a high-level water collecting cooling tower for 1 000 MW units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(9):751-756,772.

 [3] 范进宇,刘 江,王春艳,等. 自然通风高位收水冷却塔性能对 比分析[J]. 汽轮机技术,2021,63(1):25-28.

FAN Jin-yu, LIU Jiang, WANG Chun-yan, et al. Performance anal-

ysis of high-level water collecting cooling tower[J]. Turbine Technology,2021,63(1):25-28.

- [4] ZHAO Y B, SUN F Z, LONG G Q, et al. Comparative study on the cooling characteristics of high level water collecting natural draft wet cooling tower and the usual cooling tower[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 116:150 – 164.
- [5] WANG M, WANG J, WANG J J, et al. Contrastive analysis of cooling performance between a high-level water collecting cooling tower and a typical cooling tower[J]. Journal of Thermal Science, 2018, 27(1):39-47.
- [6] 吴志祥,王存新.1000 MW 机组高位收水冷却塔项目的技术 经济性分析[J].东北电力大学学报,2016,36(3):34-40.
  WU Zhi-xiang, WANG Cun-xin. Technical and economic analysis of the project of the high water cooling tower of 1 000 MW unit [J]. Journal of Northeast Electric Power University,2016,36(3): 34-40.
- [7] 王 森,王 锦,杨新明.高位收水冷却塔冷却性能的数值模拟研究[J].中国电机工程学报,2019,39(6):1723-1731,1869.

WANG Miao, WANG Jin, YANG Xin-ming. Numerical simulation study on cooling performance of operating condition for high-level water collecting cooling tower[J]. Proceedings of the CSEE,2019, 39(6):1723 - 1731,1869.

- [8] 马利斌.环境侧风对自然通风逆流湿式高位收水冷却塔冷却 性能的影响与模拟[D].上海:上海电力大学,2019.
  MA Li-bin. The influence of ambient crosswind on the cooling performance of natural ventilation counter-current wet high water intake cooling tower and its simulation[D]. Shanghai; Shanghai University of Electric Power, 2019.
- [9] 田松峰,王少雷,陈 曦,等.环境风速对高位收水冷却塔运行 特性影响的数值模拟及优化[J].汽轮机技术,2017,59(1):
   53-56,59.

TIAN Song-feng, WANG Shao-lei, CHEN Xi, et al. Numerical simulation of high wind speed affect the operating characteristics of the cooling tower water and yield optimization [J]. Turbine Technology, 2017, 59(1):53-56, 59.

- [10] 陈广安.环境风对高位收水冷却塔空气动力场和热力特性的 影响及其优化机制[D].济南:山东大学,2020. CHEN Guang-an. Crosswind impacts on the aerodynamic field and thermal characteristics of high-level water collecting cooling tower and relevant optimization mechanisms[D]. Jinan; Shandong University,2020.
- [11] CHEN G A, ZHAO Y G, GE W J, et al. Critical guidelines to cope with the adverse impacts of the inner peripheral vortex in the high-level water collecting natural draft wet cooling tower[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 168:114819.
- [12] CHEN G A, ZHAO Y B, LI W D, et al. The efficiency of high-lev-

el water collecting cooling tower with the installation of cross wall affect by the evolution of aerodynamic field[J]. Applied Thermal Engineering,2019,161:114181.

- [13] GAO M,ZOU J,HE S Y, et al. Thermal performance analysis for high level water collecting wet cooling tower under crosswind conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136;568 – 575.
- [14] ZOU J, HE S Y, LONG G Q, et al. Field test on ventilation performance for high level water collecting wet cooling tower under crosswind conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133:439-445.
- [15] DANG Z G, GAO M, LONG G Q, et al. Crosswind influence on cooling capacity in different zones for high level water collecting wet cooling towers based on field test[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 190:134 – 142.
- [16] HE S Y, ZHANG G H, GAO M, et al. Wind tunnel test on the flow resistance of U-type water collecting devices for natural draft wet cooling towers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 186:234 – 240.
- [17] LYU D Q, SUN F Z, ZHAO Y B. Experimental study on the air flow field in the water collecting devices [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105:961 – 970.
- [18] 龙国庆,张治愚,汤东升,等. 高位塔 U 型收水装置有/无水工 况下阻力特性实验研究[J]. 热力发电,2020,49(2):77-82. LONG Guo-qing, ZHANG Zhi-yu, TANG Dong-sheng, et al. Experimental study on resistance characteristics of water collecting devices with U-type channel under dry/wet condition in high-level water collecting cooling towers[J]. Thermal Power Generation, 2020,49(2):77-82.
- [19] 郭富民,赵顺安,杨智.高位集水冷却塔集水装置阻力特性数 值模拟研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2014, 12(1):93-97.

GUO Fu-min, ZHAO Shun-an, YANG Zhi. Study on the numerical

simulation of the water collecting devices' resistance characteristics in the high-level water collecting cooling tower[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(1):93 - 97.

- [20] 田松峰,谷秋实,韩 强,等.高位收水冷却塔结构优化模拟 分析[J].汽轮机技术,2017,59(5):341-344.
  TIAN Song-feng, GU Qiu-shi, HAN Qiang, et al. Simulation and analysis on structure optimization of high-level water collecting cooling tower[J]. Turbine Technology,2017,59(5):341-344.
- [21] LYU D Q, SUN F Z, ZHAO Y B. Impact mechanism of different fill layout patterns on the cooling performance of the wet cooling tower with water collecting devices [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110:1389 – 1400.
- [22] 陈广川,张国罡,张 赢. 高位收水机械通风冷却塔在电厂的应用[J].南方能源建设,2022,9(S2):24-30.
  CHEN Guang-chuan, ZHANG Guo-gang, ZHANG Ying. Application of high level water collecting mechanical draft cooling tower in power plant[J]. Southern Energy Construction, 2022,9(S2): 24-30.
- [23] 龙国庆,张国罡,孙奉仲,等. 机械通风高位收水冷却塔三维 热力特性数值研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(13):
   5078-5086.

LONG Guo-qing,ZHANG Guo-gang,SUN Feng-zhong, et al. Numerical study on the three-dimensional thermal characteristics of mechanical draft high-level water collecting cooling tower [J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(13):5078 - 5086.

- [24] GB/T 50102 2014,工业循环水冷却设计规范[S]. GB/T 50102 - 2014, code for design of cooling for industrial recirculating water[S].
- [25] WAKED R A, BEHNIA M. CFD simulation of wet cooling towers
   [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(4):382 395.

(丛 敏 编辑)