DOI：10.19666/j.rlfd.202507135

# 2×1 000 MW 机组高位塔单机工况配水优化研究

唐　周[1]，余保忠[2]，赵元宾[3]，赵悦辰[1]，韩　辉[2]，钱丹石[1]，郭常敏[4]
（1. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司，上海　200063；
2. 安徽淮南平圩发电有限责任公司，安徽　淮南　232089；
3. 山东大学核科学与能源动力学院，山东　济南　250061；
4. 济南蓝辰能源技术有限公司，山东　济南　250101）

［摘　　要］【目的】针对两机一塔型高位塔单机运行时塔内未配水区空气产生的回流、抢风问题。【方法】以某电厂 2×1 000 MW 机组高位塔为研究对象，建立定热负荷三维数值模型并进行验证，在无风、主导风向风速条件下，分析不同配水方案对塔内空气流场、热力参数及水温场的影响，得到了配水方案优化机制。【结果】研究表明：无风时未配水区域空气流速极低，气流偏转短路现象严重，侧风时在喉部生成大面积低速涡流，不同配水方案通过改善塔内空气动力场而影响有效通风量，进一步造成有效气水比和出塔水温度差异；无风条件下有效气水比与配水面积呈正相关，侧风条件下高位塔热力性能受到配水面积与配水位置的双重影响；在侧风风速 2.7 m/s 条件下，迎风侧半塔配水方案 3 的有效通风量、有效气水比较背风侧配水的方案 2 分别提高 4 111 kg/s、0.16，高温区峰值温度降低 1.98 ℃，出塔水温度较无风时降低 0.63 ℃。【结论】通过优化配水位置、扩大配水面积以及优选迎风侧配水，可增大进塔风速，减小气流短路并提高有效通风量，显著改善高位塔抗风性能并降低出塔水温度。

［关　键　词］高位收水冷却塔；分区配水；两机一塔；气流短路；配水优化；数值模拟；热力性能

［引用本文格式］唐周，余保忠，赵元宾，等. 2×1 000 MW 机组高位塔单机工况配水优化研究[J]. 热力发电，2026，55(8)：184.
Tang Z，Yu B Z，Zhao Y B，et al. Study on water distribution optimization of high-position tower for a 2×1 000 MW unit under single-unit operating condition[J]. Thermal Power Generation，2026，55(8)：184.

# Study on water distribution optimization of high-position tower for a 2×1 000 MW unit under single-unit operating condition

Tang Zhou[1], Yu Baozhong[2], Zhao Yuanbin[3], Zhao Yuechen[1], Han Hui[2], Qian Danshi[1], Guo Changmin[4]
(1. East China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200063, China;
2. Huainan Pingwei Power Generation Co., Ltd. of Anhui, Huainan 232089, China;
3. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
4. Jinan Lanchen Energy Technology Co., Jinan 250101, China)

**Abstract:** [Objective] This paper aims to solve the problems of backflow and air flow competition caused by air in the non-water distribution area of the “dual-unit and single-tower” type high-position tower. [Methods] A three-dimensional numerical model of constant heat load is established and verified by taking the high-position tower of a 2×1 000 MW unit in a power plant as the research object. Under the condition of no wind and dominant wind speed, the influence of different water distribution schemes on the air flow field, thermal parameters and water

收 稿 日 期：2025-07-25　修 回 日 期：2025-08-26　接 受 日 期：2025-09-05
基 金 项 目：山东省科技型中小企业创新能力提升工程（2022TSGC1026）
Supported by：Science and Technology Innovation Capability Improvement Project of Medium-sized Enterprises in Shandong Province (2022TSGC1026)
第一作者简介：唐周（1995），男，硕士，工程师，主要研究方向为水工及消防工艺设计，3127@ecepdi.com。
通信作者简介：赵元宾（1981），男，博士，副教授，主要研究方向为高效能量转换理论及热工过程优化，zhyb@sdu.edu.cn。

temperature field in the tower is analyzed, and the optimization mechanism of water distribution scheme is obtained. [Results] The results show that under the condition of no wind, the air velocity in the area without water distribution is very low, and the phenomenon of air flow deflection and short circuit is serious. A large area of low-speed vortex is generated in the throat under crosswind condition. Different water distribution schemes affect the effective ventilation volume by modifying the aerodynamic field in the tower, which further causes the difference of effective air-water ratio and outlet water temperature. Under the condition of no wind, the effective air-water ratio is positively correlated with the water distribution area. Under the condition of crosswind, the thermal performance of the high-position tower is affected by the water distribution area and the water distribution position. With the crosswind speed of 2.7 m/s, the effective ventilation rate and effective air-water ratio of Scheme 3 with water distribution on the windward side are 4 111 kg/s and 0.16 higher than those of Scheme 2 with water distribution on the leeward side, respectively. The peak value of the high temperature zone reduces by 1.98 ℃, and the outlet water temperature is 0.63 ℃ lower than that under no-wind conditions. [Conclusion] By optimizing the water distribution position, expanding the water distribution area and selecting water distribution on the windward side, the wind speed at the tower inlet can be increased, the short circuit of the air flow can be reduced and the effective ventilation volume can be increased, so as to improve the wind resistance of the high-position tower and reduce the outlet water temperature.
**Key words:** high-position water collecting cooling tower; partitioned water distribution; dual-unit and single-tower; air flow short circuit; water distribution optimization; numerical simulation; thermal performance

近年来，随着“双碳”战略驱动火电机组向大容量、高参数方向升级[1-2]，国内新建及扩建的 2×1 000 MW 超超临界机组普遍采用“两机一塔”高位收水冷却塔作为冷端核心。该布置以一座高位塔同步服务 2 台百万千瓦机组，较传统“一机一塔”模式每年可节约运行电费约 716.63 万元[3]，经济性显著。然而，“两机一塔”型高位塔在单机运行时处于局部配水的非对称工况，热力性能对配水方式的敏感性显著增强；加之环境侧风的影响，进一步放大了塔内气流短路、通风量衰减等不利效应[4-6]。因此，深入探究高位塔在单机运行局部配水下的热力特性及优化策略，对于提高冷却塔运行效率、降低系统能耗具有重要的理论和实际意义。

高位塔内循环水与空气的传热传质过程较为复杂。传统的设计计算通常依赖于麦克尔模型、波普模型来描述相变和传热过程，但这些模型在考虑三维空间因素变化时存在局限性。近年来，国内外学者开始利用三维数值模拟方法对冷却塔内复杂的传热传质过程进行精细化研究。基于这些研究手段，湿冷塔的性能优化方向主要聚焦于配水与配风 2 个关键环节。

在配水优化方面，研究多集中于填料布置策略以及配水分区设计。李桥明等[7]指出，通过阀门调节单机运行时不同工况下参与换热的内围淋水面积可显著降低出塔水温度。王锁斌等[8]发现，常规湿冷塔采用外圈配水时，高流量时外圈配水水温可能高于全塔配水，低流量时则相反。陈瑞[9]通过常规湿冷塔的分区配水研究，观察到冷却效率和通风量随内区配水比例增加呈现先增后减的趋势。杨静等[10]进一步指出，过大的外区配水流量会增加进风口空气阻力，导致冷却效率降低。周晓慧[11]进行了常规湿冷塔不同配水方式下的三维数值研究，研究表明局部配水使塔内部温度场更均匀。此外，填料非等间距的布置方案也有利于提升冷却塔换热性能[12]，将填料非等间距布置与分区配水结合后，可达到比单一模式更好的效果[13-14]。这些研究充分表明，科学合理的配水策略是提升冷却塔性能的有效手段。

值得注意的是，环境因素，特别是侧风，对冷却塔的运行性能影响尤为显著。为应对侧风的不利影响，Chen 等人[15]研究了十字墙结构的作用，证明其能有效降低高位塔出塔水温度、提升冷却性能。张德英[16]指出，通过风机辅助强制对流可有效削弱侧风对冷却塔出塔水温度的恶化效果，但其作用幅度受到风机布置位置和功率的影响[17]。此外，配水策略还关联着高位塔在特定条件下的运行特性，如杨利等[18]探究了局部配水对高位塔防冻节能的影响，指出局部配水可有效提升防冻性能，但环境侧风会削弱这种效果。

聚焦于具有复杂配水结构的高位塔案例，我国南部某电厂 2×1 000 MW 机组采用“两机一塔”高位收水冷却塔方案，并设计了独特的 8 个配水分区。在单机运行时，采用分区配水，存在多种配水方案。这种复杂的配水设计虽为运行优化提供了灵活性，但也增加了研究的挑战性。目前，针对具有多个配水分区高位塔，特别是在环境侧风影响下单机运行工况的研究非常有限。基于此，本文旨在深入研究该类型高位塔在单机运行工况下，不同配水方案对塔内空气动力场及热力性能的影响，阐明不同配水

方案的优化选择机制。本研究结果将为高位塔在复杂工况下的优化运行提供理论依据，对进一步提升冷却塔运行效率和机组调峰能力、实现节能降耗具有重要的实践指导意义。

# 1 数值模型

## 1.1 数学模型

本文所建立的自然通风高位收水冷却塔的数值模型，采用定热负荷[19]计算方法，并忽略了侧风对塔内循环水流运动的影响，将塔内循环水的流动简化为垂直向下流动，将空气视为不可压缩流体。

塔内空气侧流动与能量方程的通用表达形式为[20]：

$$\nabla(\rho u_i \varphi - \Gamma_\varphi \nabla\varphi) = S_i \tag{1}$$

式中：$\rho$为湿空气密度，kg/m$^3$；$u_i$ 为沿各方向的速度值；$\varphi$ 为通用变量；$\Gamma_\varphi$为广义扩散系数；$S_i$ 为源项。

塔内循环水的质量、能量、动量守恒方程如下[20-21]：

$$\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}(-z)} = -S_\mathrm{m} \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}(-z)} = \frac{(\rho_\mathrm{w}-\rho)g}{\rho_\mathrm{w} v_z} - \frac{f}{m_\mathrm{w} v_z} \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}(c_\mathrm{w} t_\mathrm{w} q)}{\mathrm{d}(-z)} = -S_\mathrm{we} \tag{4}$$

式中：$S_\mathrm{m}$ 为对流体积传质速率，kg/(m$^3$ s)；$q$ 为淋水密度，kg/(m$^2$ s)；$v_z$ 为水滴下落速度，m/s；$f_z$ 为水滴下落阻力，N；$\rho_\mathrm{w}$ 为水的密度，kg/m$^3$；$m_\mathrm{w}$ 为单个水滴质量，kg；$c_\mathrm{w}$ 为水的比热容，J/(kg·℃)；$t_\mathrm{w}$ 为水温，℃；$S_\mathrm{we}$ 为对流传质散热量，W/m$^3$。

循环水液滴在气流中的蒸发过程以离散相模型进行描述[21]：

$$\mathrm{d}m_\mathrm{p} = k_\mathrm{c} A_\mathrm{p} \rho_\infty \ln(1+B_\mathrm{m})\mathrm{d}t \tag{5}$$

式中：$m_\mathrm{p}$ 为液滴质量，kg；$k_\mathrm{c}$ 为传质系数，m/s；$A_\mathrm{p}$ 为液滴的表面积，m$^2$；$\rho_\infty$为空气密度，kg/m$^3$。

高位收水冷却塔填料阻力特性表达式为[18-19]：

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = A_\mathrm{p} v^M \tag{6}$$

式中：$\Delta p$ 为淋水填料阻力，Pa；$\gamma$为空气重力密度，N/m$^3$；$v$ 为通过淋水填料的风速，m/s；$A_\mathrm{p}$、$M$ 为由试验确定的经验系数。

本文采用的填料特性如下：

$$N = 2.17\lambda^{0.70} \tag{7}$$

$$A_\mathrm{p} = 0.002\,1q^2 - 0.006\,4q + 1.76 \tag{8}$$

$$M = -0.001\,9q^2 + 0.02q + 2 \tag{9}$$

式中：$N$ 为淋水填料的冷却特性数，Pa；$q$ 为淋水密度，m$^3$/(m$^2$ h)。

## 1.2 几何模型

本文研究了我国某火力发电厂 2×1 000 MW“两机一塔”自然通风高位收水冷却塔。此高位收水冷却塔填料采用“S”波薄膜式填料，总高度为2.0 m。高位塔几何结构参数详见表 1，几何模型示意如图 1 所示。

表 1 研究对象几何结构参数

**Tab.1 Geometric parameters of the research object**

| 项目 | 数值 |
|---|---|
| 总淋水面积/m$^2$ | 21 200.0 |
| 内区 1+内区 2 净淋水面积/m$^2$ | 8 381.6 |
| 外区 1+外区 2+外区 3+外区 4 净淋水面积/m$^2$ | 5 819.3 |
| 外区 5+外区 6 净淋水面积/m$^2$ | 6 923.2 |
| 塔顶标高/m | 238.00 |
| 喉部标高/m | 182.65 |
| 填料顶部标高/m | 25.63 |
| 填料底部标高/m | 23.63 |
| 进风口高度/m | 20.60 |
| 冷却塔底直径/m | 181.77 |
| 喉部直径/m | 111.60 |
| 塔顶出风口直径/m | 117.88 |

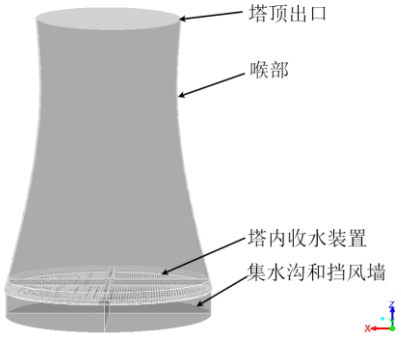



图 1 高位塔几何模型示意

**Fig.1 Schematic diagram of the geometric model of the high-position tower**

本文所研究的 2×1 000 MW“两机一塔”自然通风高位收水冷却塔配水区域共分为 8 个区域，侧风风向选取夏季主导风向 E 风向，侧风风向与配水分区的相对位置关系如图 2 所示。

根据上述结构尺寸，建立 1:1 的高位收水冷却塔几何模型，计算域设置为半径 700 m，高度为 1 000 m 的圆柱形空间。考虑到计算精度、速度的要求，网格采用分区域划分方式，对喷淋区、填料区等主要传热传质区的网格进行加密，合理过渡不同

区域网格，网格划分如图 3 所示。

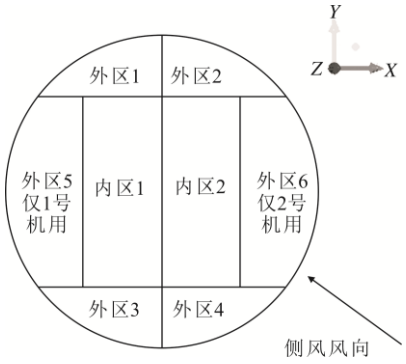



图 2 2×1 000 MW 机组高位塔配水分区示意

**Fig.2 Schematic diagram of water distribution areas of the high-position tower of the 2×1 000 MW unit**

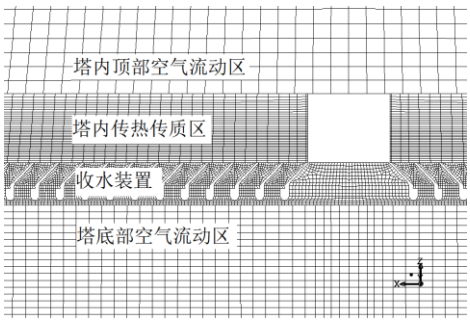



图 3 网格划分示意

**Fig.3 Grid division diagram**

### 1.3 边界条件及求解

无风时，设置计算域顶面为压力出口，计算域侧面设置为压力入口；侧风条件下，垂直来风风向的计算域侧面设置为速度入口，背风面和计算域顶面设置为压力出口；塔壁、挡风墙、地面等设置为壁面边界类型，具体如图 4 所示。

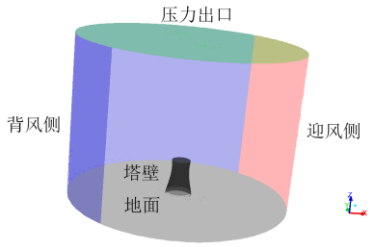



图 4 计算域和边界条件

**Fig.4 Computational domain and boundary conditions**

风速与高度之间的关系采用风速廓线函数表示，如式(10)所示。

$$\frac{v_a}{v_f}=\left(\frac{a}{a_f}\right)^{0.24} \tag{10}$$

式中：$v_a$ 为计算域内 $a$ 高度处的空气流速，m/s；$v_f$ 为 $a_f$ 高度处的空气流速，m/s。

计算过程中，利用用户自定义变量和自定义函数实现塔内循环水和流动空气的源项设置。监测能量残差小于 $10^{-6}$，其他各项残差均小于 $10^{-4}$，且检测面循环水温度连续迭代 200 次，变化小于 0.02 ℃时，则认为迭代收敛。

### 1.4 模型验证

本文所建立的数学模型已在文献[19-21]中得到了充分验证，在此基础上，利用本文研究对象设计工况进行准确性验证，工况参数如表 2 所示。

表 2 验证工况参数

**Tab.2 Working condition parameters for verification**

| 空气干球温度/℃ | 相对湿度/% | 大气压/kPa |
|---|---|---|
| 29.1 | 78 | 100.0 |
| 循环水量/(t·h$^{-1}$) | 设计循环水温降/℃ | 设计出塔水温/℃ |
| 185 760 | 8.9 | 29.5 |

分别建立总网格数量 600 万、800 万、1 000 万的几何模型，利用上述参数展开验证。结果显示，600 万网格数量的模型出塔水温度与设计值偏差为 0.115 ℃，800 万网格数量的模型出塔水温度与设计值偏差为 0.101 ℃，1 000 万网格数量的模型出塔水温度与设计值偏差为 0.09 ℃。为兼容计算准确性与计算速度，本研究最终选取 800 万网格数量的数值模型。

## 2 结果与分析

本文研究对象为“两机一塔”型高位收水冷却塔，循环冷却水系统夏季采用一机三泵高速运行，单机运行时设计配水方案 6 种，各配水方案淋水密度和运行分区详见表 3（表中“×”表示配水分区关闭，“√”表示配水分区运行）。利用定热负荷三维数值模型计算夏季工况无环境侧风和夏季主导风向平均风速 $v_c$ 为 2.7 m/s 下各配水方案的塔内空气动力场、热力性能参数和水温场分布，计算过程中，循环水温降值取设计工况的 8.9 ℃。

表 3 夏季单机运行配水方案

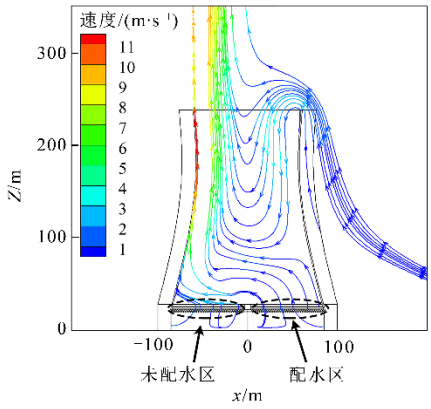
**Tab.3 Water distribution schemes for single-unit operation in summer**

| 方案 | 内区 | | 外区 | | | | | | 淋水密度/($m^3$·(h·$m^2$)$^{-1}$) | 配水面积占比/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| 1 | √ | √ | × | × | × | × | × | × | 11.08 | 40 |
| 2 | √ | × | √ | × | √ | × | √ | × | 8.79 | 50 |
| 3 | × | √ | × | √ | × | √ | × | √ | 8.79 | 50 |
| 4 | √ | × | √ | √ | √ | √ | √ | × | 6.89 | 64 |
| 5 | × | √ | √ | √ | √ | √ | × | √ | 6.89 | 64 |
| 6 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | × | × | 6.54 | 67 |

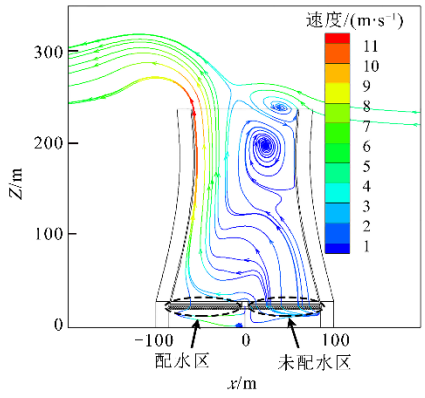
### 2.1 配水方式对塔内空气动力场的影响

图 5 给出了方案 2 和方案 3 在 $y$= –2 m 截面无风（$v_c$=0 m/s）和侧风条件（$v_c$=2.7 m/s）下塔内外流线图。对比图 5a)、图 5b)可知：当无环境侧风影响时，未配水区域上方空气偏转严重，且空气流速极低，仅为 0.1 m/s；配水区域空气垂直流出塔外，随着高度升高，与未配水区域空气不断混合，流速在塔壁位置的喉部高度达到最大，为 11.66 m/s；当环境侧风风速增大至 2.7 m/s 时，未配水区域上方空气在喉部高度以上出现大面积低速涡流，流速仅为 0.05 m/s，塔顶出口位置部分气流直接横向逸出，气流短路现象加剧；配水区域空气的流动状态变化较小，但最大流速增大至 12.11 m/s。

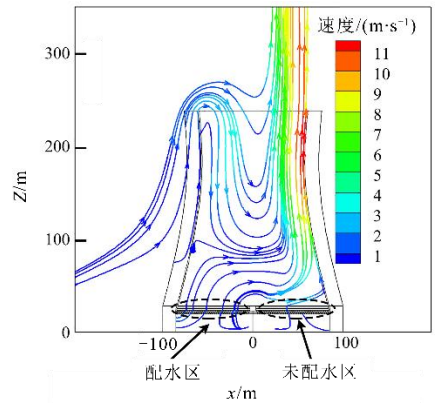
对比图 5c)、图 5d)可知：当配水区域由方案 2 背风侧半塔调整为方案 3 的迎风侧半塔时，在无风条件下，2 种配水方案的塔内空气动力场分布特征一致，呈镜像对称，未配水区域空气在运动过程中，受到配水区域空气上升流速的携带，在塔内引起空气倒流，并对配水区域空气的运动产生挤压；在环境侧风风速 2.7 m/s 条件下，方案 3 未配水区域的塔内低速涡流明显小于方案 2，塔内低风速区域范围缩小，空气流速最大为 11.99 m/s。



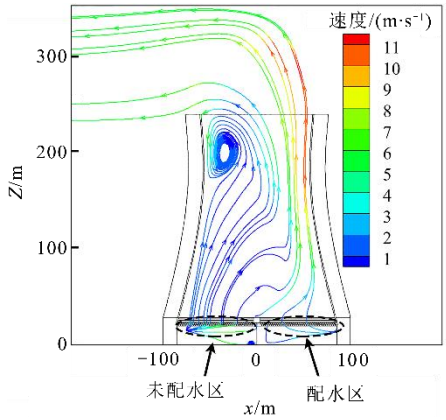

a) 方案 2（$v_c$=0 m/s）




b) 方案 2（$v_c$=2.7 m/s）




c) 方案 3（$v_c$=0 m/s）




d) 方案 3（$v_c$=2.7 m/s）

**图 5 不同风速下方案 2、方案 3 塔内空气动力场**

**Fig.5 Aerodynamic fields inside the tower in Scheme 2 and Scheme 3 with different wind speeds**

如图 5 所示，配水区域空气经过了有效的两相传热，为有效通风，未配水区域空气则为无效通风。无风条件下，方案 2 的有效通风量和无效通风量分别为 9 917、8 952 kg/s，有效通风量占总通风量的 53%，方案 3 的有效通风量和无效通风量分别为 9 841、8 877 kg/s，有效通风量占总通风量的 53%，在无风条件下两方案的塔内空气动力场一致，有效通风量差距极小。

侧风条件（$v_c$=2.7 m/s）下，方案 2 的有效通风量和无效通风量分别为 8 548、8 993 kg/s，有效通风量占总通风量的 49%，方案 3 的有效通风量和无效通风量分别为 12 659、9 266 kg/s，有效通风量占总通风量的 58%，相较于方案 2 高出 9%，有效通风量增大 4 111 kg/s。在侧风条件下，通过优化配水方式改善塔内空气动力场，显著提高塔内有效通风量，为改善高位塔冷却效率提供必要条件。

### 2.2 配水方式对通风量和有效气水比的影响

不同配水方案由于配水面积、淋水密度以及配水区域的不同，对高位塔通风量和气水比的影响也

不同。图 6 给出了不同配水方案下高位塔抽力和有效通风量占比变化曲线。图 7 给出了不同侧风条件下高位塔有效通风量、无效通风量及各自占比的变化趋势。

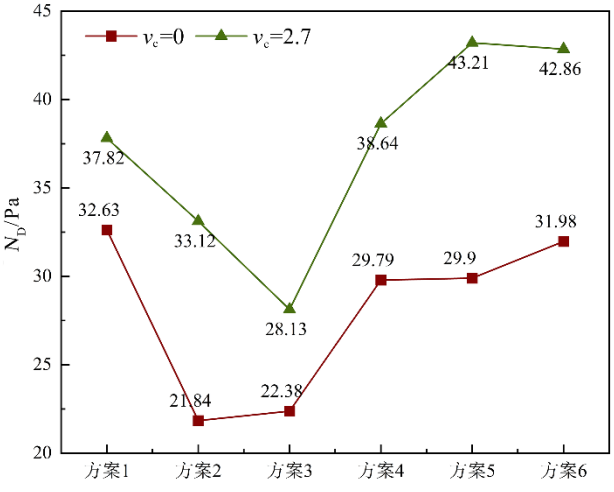
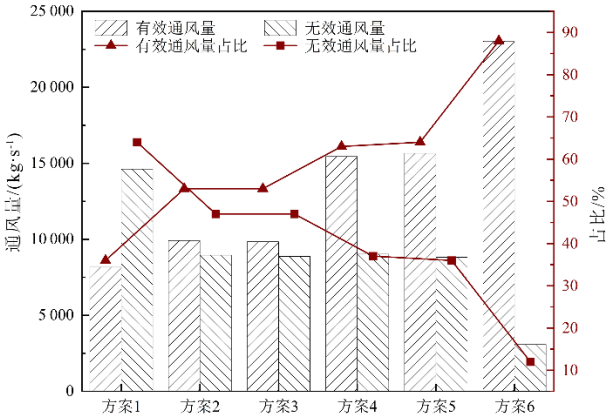
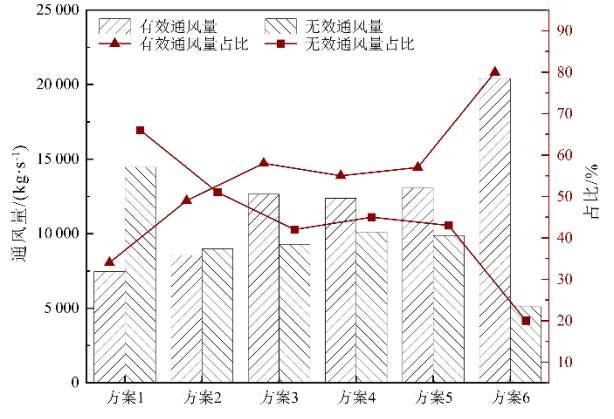



图 6 不同配水方案下高位塔抽力变化曲线

**Fig.6 Variation curves of pumping force of the high-position tower in different water distribution schemes**




a) $v_c$=0 m/s




b) $v_c$=2.7 m/s

图 7 不同侧风条件下高位塔通风量变化趋势

**Fig.7 Change trends of ventilation volume of the high-position tower under different crosswind conditions**

高位塔抽力计算公式为：

$$N_D = H_e \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \tag{11}$$

式中：$N_D$ 为高位塔抽力，Pa；$\rho_1$ 为进塔空气密度，kg/m$^3$；$\rho_2$ 为高位塔塔顶出口面平均空气密度，kg/m$^3$；$H_e$ 为有效高度，高位收水冷却塔的有效高度取为填料顶面到塔顶出口的距离，m；$g$ 为重力加速度，m/s$^2$。

由图 6 可知：在无风条件下，方案 1 高位塔抽力最大为 32.63 Pa，方案 2—方案 6 抽力逐渐增大，在淋水密度相同的情况下，方案 3 较方案 2 增大 0.54 Pa；在环境侧风风速 2.7 m/s 条件下，方案 1—方案 6 的高位塔抽力相较于无风条件下分别增大 5.19、11.30、5.75、8.85、13.30、10.90 Pa。

由图 7a)可知，无风时，有效通风量占比随配水面积的增大而增大，且相同的配水面积下，尽管配水区域不同，但有效通风量占比一致，如方案 2 与方案 3、方案 4 与方案 5。由图 7b)可知，在环境侧风风速 2.7 m/s 条件下，方案 1—方案 2 及方案 4—方案 6 在侧风条件下的有效通风量占比相较于无风条件分别降低 1.83%、3.83%、8.10%、7.03%、8.20%，其中方案 3 的有效通风量占比反而增大 5.16%。这表明，在侧风条件下，配水位置成为影响有效通风量的另一主要因素。方案 3 有效通风量占比 58%，方案 2 仅 49%，结合图 5 可知，主要原因是方案 3 集中于迎风侧配水，减少了塔内无效通风诱导回流。

有效气水比计算公式为：

$$\lambda = \frac{G_1}{h} \tag{12}$$

式中：$\lambda$ 为有效气水比；$G_1$ 为有效通风量，kg/s；$h$ 为循环水水量，kg/s。

图 8 给出了不同配水方案下有效气水比变化曲线。由图 8 可知：无风时有效气水比与配水面积正相关；侧风时，方案 1—方案 2 及方案 4—方案 6 的有效气水比相较于无风条件下分别降低 0.03、0.05、0.12、0.10、0.10，方案 1 的降幅最小，方案 5 和方案 6 的降幅最大，方案 3 有效气水比反而增大 0.11。这表明侧风条件下，有效气水比受配水位置与面积双重调控，方案 3 有效气水比 0.49 较方案 2 升高 0.16，因迎风侧配水利用高速进风提升传质效率；而方案 4 有效气水比 0.48，低于方案 5 的 0.51，因方案 4 在背风侧大面积配水，该区域受涡流影响阻碍空气流通。由式(12)可知，在循环水量恒定的情况下，有效气水比完全取决于有效通风量的大小，方

案 6 因抽力高、有效通风占比大，维持了较高的有效气水比。

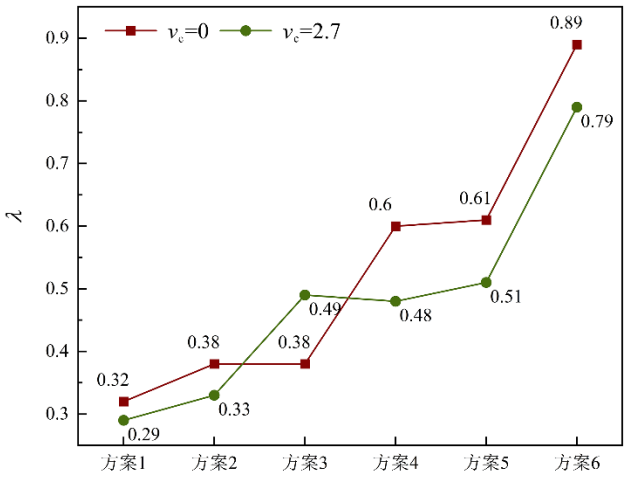



图 8 不同配水方案下有效气水比变化曲线

**Fig.8 Change curves of effective air-water ratio in different water distribution schemes**

### 2.3 配水方式对出塔水温的影响

图 9 给出了不同配水方案下出塔水温度变化趋势。出塔水温度变化是前述热力参数的综合体现，无风条件下，出塔水温度由配水面积主导，随着配水面积的增大，淋水密度逐渐降低，方案 6 出塔水温度最低为 29.72 ℃，得益于较高的有效气水比；侧风下，方案 1—方案 2 及方案 4—方案 6 的出塔水温度相较于无风条件下分别升高 1.51、1.47、1.18、0.36、0.99 ℃，方案 6 由于配水面积较大且有效气水比较高，其出塔水温在侧风条件下保持最低，方案 3 在侧风下的有效气水比高于无风条件 0.11，其出塔水温度降低 0.63 ℃，相较于方案 2 降低 2.01 ℃。

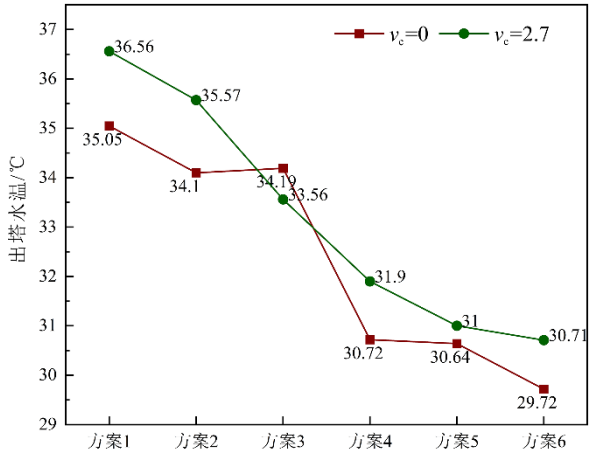
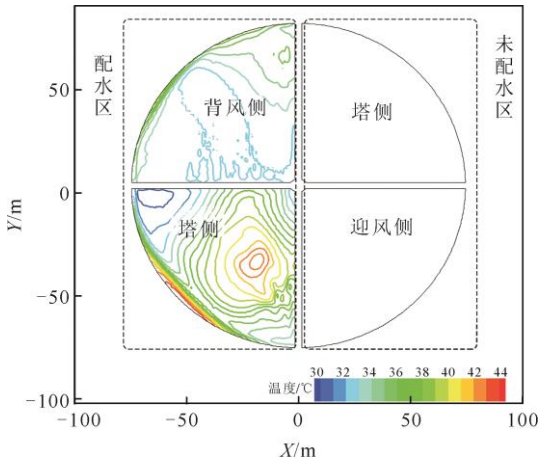


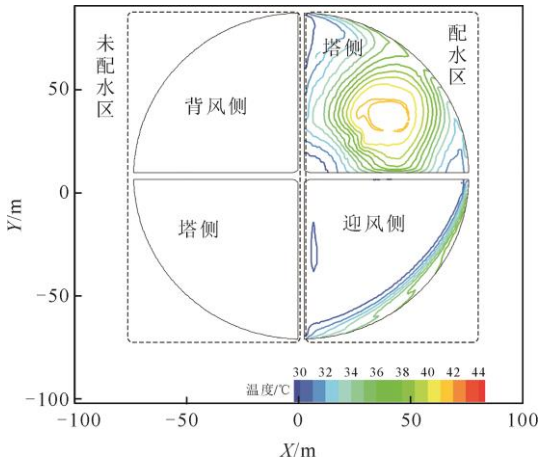

图 9 不同配水方案下出塔水温度变化趋势

**Fig.9 Change curves of water temperature at the tower outlet in different water distribution schemes**

图 10 给出了方案 2、方案 3 侧风条件下（$v_c$=2.7 m/s）高位塔出塔水温等值线分布。由图 10 可知，侧风条件下，方案 2 和方案 3 高水温区域分布在塔侧区域，最高出塔水温度分别为 44.59、42.62 ℃。方案 2 最低出塔水温度为 30.59 ℃，位于塔侧的外区 5，方案 3 最低出塔水温度为 29.98 ℃，位于迎风侧以及塔侧的内区 2、外区 2 的部分区域。方案 3 最高出塔水温度较方案 2 降低 1.98 ℃，且低温区域面积显著扩大，使得整体出塔水温度降低 2.01 ℃。




a) 方案 2（$v_c$=2.7 m/s）




b) 方案 3（$v_c$=2.7 m/s）

图 10 侧风条件下方案 2、3 高位塔出塔水温度等值线分布

**Fig.10 Distributions of temperature contours of water at the high-position tower outlet under crosswind conditions for Scheme 2 and Scheme 3**

结合图 9 可知，对于同样采用迎风侧作为主要配水区域的方案 5，其侧风下的水温增幅较方案 4 降低 0.82 ℃。由此可知，扩大配水面积、优选迎风侧配水、利用迎风侧高速进风提高通风量、增大有

效气水比及避免塔侧低速涡流影响区域配水，可削弱环境侧风对出塔水温的恶化作用，甚至降低出塔水温度，提高高位塔冷却效率。

## 3 结　论

本文围绕 2×1 000 MW 机组“两机一塔”高位塔夏季单机运行工况，利用网格数量 800 万的定热负荷三维数值模型，系统比较了 6 种配水方案对塔内空气动力场、热力性能及出塔水温的影响机制，得到主要结论如下。

1）配水方式显著影响塔内空气动力场。无风时，未配水区域空气流速低至 0.1 m/s，引发倒流并挤压配水区气流；侧风下，未配水区在喉部至塔顶形成大面积低速涡流，加剧气流短路。优化配水位置可缩小涡流范围，提升有效通风量，例如，侧风下采用迎风侧半塔配水的方案 3 有效通风量达 12 659 kg/s，较背风侧半塔配水的方案 2 提升 4 111 kg/s，有效通风量占比提升 9%，为冷却效率改善奠定基础。

2）配水面积与配水位置协同调控热力性能。无风时，有效通风量及有效气水比随配水面积增大而提升，采用全内区+外区 1 至外区 4 配水的方案 6 气水比最高为 0.89；侧风下，配水位置的选择成为制约热力性能的关键，方案 3 采用迎风侧配水利用高速进风提升有效气水比至 0.49，较方案 2 增大了 0.16。

3）出塔水温受配水策略的双重优化。无风时，扩大配水面积可降低水温；侧风下，优化配水位置可削弱侧风对冷却性能的抑制，方案 3 因有效气水比提升 0.11，侧风下出塔水温反降 0.63 ℃，且高温区峰值降低 1.98 ℃。方案 6 因有效气水比最高，可在无风、侧风条件下保持出塔水温度最低，但抗风性能劣于方案 3。侧风下应优先采用迎风侧配水，以利用高速进风提升冷却效率。

综上，“两机一塔”型高位塔单机运行采用迎风侧配水时可削弱塔内气流短路效应，增大有效通风量和气水比，从而改善出塔水温度，增强高位塔抗风性能。扩大配水面积降低淋水密度，选取迎风侧配水以减小未配水区域的无效通风诱导回流引起空气短路的不利影响，是提升高位塔冷却性能的有效手段。

## [参 考 文 献]


[1] 王志学. 某 1 000 MW 燃煤电厂冷却塔选型研究[J]. 机电信息, 2019(18): 31.
Wang Z X. Research on the selection of cooling tower in a 1 000 MW coal-fired power plant[J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(18): 31.

[2] 李永涛. 高位收水冷却塔在 1 050 MW 火力发电机组中的应用[J]. 神华科技, 2019, 17(10): 46.
Li Y T. The application of high water collecting cooling tower in 1 050 MW thermal power unit[J]. Shenhua Technology, 2019, 17(10): 46.

[3] 周权, 吴志祥. 1 000 MW 机组两机一塔项目的技术经济性研究[J]. 节能, 2024, 43(9): 100.
Zhou Q, Wu Z X. Research on technical economy of the 1 000 MW unit two unit one tower project[J]. Energy Conservation, 2024, 43(9): 100.

[4] 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: 1.
Liu D M. Three dimensional numerical study of crosswind effect on the performance of natural draft wet cooling tower[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 1.

[5] Al-Waked R, Behnia M. CFD simulation of wet cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(4): 382.

[6] Zhao Y, Sun F, Long G, 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.

[7] 李桥明, 谭志杰, 罗志文. “两机一塔”自然通风冷却塔配水优化研究及应用[J]. 节能与环保, 2025(5): 65.
Li Q M, Tan Z J, Luo Z W. Research and application of water distribution optimization of two machines and one tower natural ventilation cooling tower[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2025(5): 65.

[8] 王锁斌, 邓彤天, 王红波, 等. 深度调峰工况下外圈配水湿式冷却塔模拟研究[J]. 电力大数据, 2020, 23(8): 86.
Wang S B, Deng T T, Wang H B, et al. Simulation study on wet cooling tower with outer water distribution under deep peak shaving condition[J]. Power Systems and Big Data, 2020, 23(8): 86.

[9] 陈瑞. 侧风下填料布置和分区配水对湿式冷却塔冷却性能影响的模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2023: 1.
Chen R. Numerical simulation on the effect of fillings arrangement and partitioned water distribution on the cooling performance of wet cooling towers under crosswind[D]. Jinan: Shandong University, 2023: 1.

[10] 杨静, 王玉坤, 杨松, 等. 湿式冷却塔配水系统分区配水的数值模拟研究[J]. 汽轮机技术, 2020, 62(3): 182.
Yang J, Wang Y K, Yang S, et al. Numerical simulation of different flow of water distribution in wet cooling tower[J]. Turbine Technology, 2020, 62(3): 182.

[11] 周晓慧. 基于新型分区布水的自然通风湿式冷却塔冷却性能数值模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022: 1.
Zhou X H. Numerical investigation on cooling performance of natural draft wet cooling tower with novel water distribution[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022: 1.

[12] 党志刚. 大型湿式冷却塔非等片距填料与分区配水协同优化的数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2020: 1.
Dang Z G. Numerical simulation study on the collaborative optimization for non-equidistant fillings and partition water distribution in large wet cooling towers[D].

Jinan: Shandong University, 2020: 1.
[13] Chen R, Zhang D, Zhang Z, et al. Numerical study regarding cooling capacity for non-equidistant fillings in large-scale wet cooling towers[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 26: 101103.
[14] Zhang D, Zhang Z, Han Q, et al. Numerical simulation on synergetic optimization of non-equidistant fillings and non-uniform water distribution for wet cooling towers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 179: 121676.
[15] Chen G, Zhao Y, Ge W, 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, 2020, 168: 114819.
[16] 张德英. 侧风下强制通风对超大型湿式冷却塔冷却性能影响的模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2022: 1.
Zhang D Y. Simulation study on the effect of forced ventilation on the cooling performance for the super-large wet cooling towers under crosswind conditions[D]. Jinan: Shandong University, 2022: 1.
[17] Zhang D, Chen R, Zhang Z, et al. Crosswind influence on heat and mass transfer performance for wet cooling tower equipped with an axial fan[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 27: 101259.
[18] 杨利, 李旋, 李禹江, 等. 局部配水对高位收水冷却塔防冻节能特性影响的数值研究[J]. 山东电力技术, 2025, 52(3): 86.
Yang L, Li X, Li Y J, et al. Numerical study on the effect of local water distribution on the anti-freezing and energy-saving characteristics of high cooling tower[J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(3): 86.
[19] 王中华, 石秀刚, 岳增刚, 等. 基于定热负荷的自然通风湿式冷却塔防冻特性三维数值研究[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 132.
Wang Z H, Shi X G, Yue Z G, et al. Three-dimensional numerical study on anti-freezing characteristics of natural draft wet cooling tower at constant heat load[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 132.
[20] Wang Z H, Yue Z G, Wang W, et al. Anti-freezing study of high-level water-collecting natural draft wet-cooling tower based on its water temperature distribution characteristics[J]. Energies, 2024, 17(3): 651.
[21] Wang Z H, Yue Z G, Wang W, et al. Study on the influence of circulating water bypass on the thermal and anti-freezing characteristics of high-level wet cooling tower[J]. Energies, 2024, 17(9): 2073.

（责任编辑　邓玲惠）