DOI:10.19666/j.rlfd.202605103

基于防冻卷帘的空冷塔防冻运行策略研究

贲 岳[1]，李陆军[2,3]，粘华荣[4]，朱 晴[3]，魏承君[1]
(1.国核电力规划设计研究院有限公司，北京 100095；
2.流域水循环与水安全全国重点实验室中国水利水电科学研究院，北京 100048；
3.中国水利水电科学研究院水力学所，北京 100038；
4.国电投莱阳核能有限公司，山东 烟台 265217)

［摘 要］【目的】为解决内陆核电间接空冷塔冬季低温与横向风耦合作用下的散热器冻裂难题，填补防冻卷帘在复杂风况下的性能研究空白，明确其下落距离与防冻效果的量化关系，保障机组冬季安全经济运行。【方法】以某大型间接空冷塔为研究对象，基于 Fluent 软件建立三维数值模型，设定厂址典型冬季气象条件，系统模拟无环境风及 4 m/s 横向风两种工况下，防冻卷帘不同下落距离对整塔出塔水温及各扇区水温分布的影响规律。【结果】防冻卷帘下落距离与出塔水温呈显著正相关，针对该塔型，卷帘每下落 1 m 可提升出塔水温约 0.5 ℃；无环境风及 4 m/s 风况下，卷帘下落 36 m（遮挡约 75%进风口高度）时，出塔水温均超过 20 ℃的防冻临界温度。横向风会破坏塔内流场均匀性，导致各扇区水温最大差异约 3 ℃，迎风侧 110°、背风侧 65°范围为防冻不利扇区；防冻卷帘在较大下落距离时可有效削弱风致衰减，均衡扇区水温分布。【结论】基于数值模拟结果，推导了两种风况下目标出塔水温对应的整塔卷帘下落距离计算公式，提出不利扇区在整体调控基础上额外增加 6 m 下落距离的局部强化策略，为间接空冷塔冬季精准防冻调控提供了量化依据和技术支撑。

［关 键 词］间接空冷塔；防冻卷帘；横向风；扇区特性；冬季防冻

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码.

Study on anti-freezing operation strategies of indirect air-cooling towers based on anti-freeze roller shutters

Ben Yue[1], Li Lujun[2,3], Nian Huarong[4], Zhu Qing[3], Wei Chengjun[1]
(1.State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100095, China;
2.State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;
3.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
4.Laiyang Nuclear Energy Co., Ltd., Yantai 265217, China)

Abstract: [Objective] The radiators of indirect air-cooling towers in inland nuclear power plants are prone to freezing and cracking under the coupling effect of low winter temperature and crosswind. To solve this practical engineering problem, this study fills the research gap regarding the performance of anti-freeze roller shutters under complex wind conditions. It quantitatively clarifies the correlation between the shutter drop distance and anti-freezing performance, aiming to ensure the safe, stable and economic operation of nuclear power units in winter. [Methods] A typical large-scale industrial indirect air-cooling tower for inland nuclear power generation is selected as the core research object in this study. A refined full-scale three-dimensional numerical model of the cooling tower is established and verified through mesh independence analysis based on FLUENT fluid simulation software. Combined with real field meteorological monitoring data, the typical winter temperature and wind field parameters of the plant site are accurately configured. Two representative operating conditions, namely the no-wind static

收 稿 日 期：2026-05-28 修 回 日 期：2026-06-17 接 受 日 期：2026-06-22 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：中国水科院基本科研业务费项目 (HY0145B022021)
Supported by：IWHR Research&Development Support Program (HY0145B022021)
第一作者简介：贲岳（1980），男，博士，高级工程师。主要研究方向为水污染控制、电厂消防、冷却塔设计、流体力学及瞬态分析，benyue01@spic.com.cn
通信作者简介：李陆军（1981），男，博士，正高级工程师。主要研究方向为冷却塔工艺、流体力学、空气动力学的试验及仿真，lilujun2008@126.com。

condition and the 4 m/s typical winter crosswind condition, are adopted to systematically simulate and analyze the effects of varying drop distances of anti-freeze roller shutters on the overall outlet water temperature and the spatial water temperature distribution characteristics of each cooling sector of the tower. [Results] The simulation results indicate that the drop distance of the anti-freeze roller shutter presents a significant positive linear correlation with the tower outlet water temperature. For the investigated tower type, every 1-meter increase in the shutter drop distance steadily raises the outlet water temperature by approximately 0.5 ℃. Under both no-wind and 4 m/s crosswind conditions, the outlet water temperature exceeds the critical anti-freezing threshold of 20 ℃ when the shutter drops by 36 m, covering about 75% of the total air inlet height. Crosswind severely disturbs the uniformity of the internal flow field, leading to unbalanced heat exchange among different sectors with a maximum water temperature difference of 3 ℃. The 110° windward area and 65° leeward area are identified as freezing-vulnerable sectors. Increasing the shutter drop distance can effectively weaken the wind-induced water temperature attenuation and greatly balance the water temperature distribution across all sectors. [Conclusion] Based on extensive numerical simulation data and statistical analysis, empirical formulas for calculating the optimal overall shutter drop distance corresponding to different target outlet water temperatures under the two typical winter wind conditions are derived. A targeted local anti-freezing enhancement strategy is proposed for freezing-prone sectors, which requires an extra 6 m drop distance on the basis of overall unified regulation. The research findings provide a reliable quantitative basis and practical technical support for precise anti-freezing regulation and stable high-efficiency winter operation of indirect air-cooling towers in inland nuclear power plants.

Key words: Indirect air-cooling tower; Anti-freeze roller shutter; Crosswind; Sector characteristics; Winter anti-freezing

我国北方缺水地区，间接空冷机组因节水率高成为主流冷却方案[1-2]，但严寒冬季低温、低负荷及横向风导致塔内通风不均[3]，可能造成散热器翅片管束冻裂[4-5]，引发停机及经济损失，因此开展防冻研究是保障机组冬季安全经济运行的必然需求。

目前针对间接空冷塔冬季防冻方案已开展了多方面的研究，徐冬[6]通过优化循环水泵运行策略，明确了扇区投退的操作规范。王雪波等[7]通过数值模拟手段研究了循环冷却水的流量分配对各扇区温度的影响，结果表明通过增大迎风扇段冷却水流量，可显著提升其出口水温，降低迎风扇区的供水管道冻结风险。Kong 等人[8]进一步提出，侧风扇区可适度下调其循环水流量，实现防冻需求与能效的兼顾。但机组深度调峰时循环水量本身偏小，流量调控空间有限，难以满足散热器防冻要求，易出现局部水流停滞冻结。金庆辉等[9]提出一种预热式防冻系统，利用凝汽器出口高温循环水加热冷空气，可使冬季进风温度提升 5~8 ℃，但需注意对自然通风冷却塔抽力的削弱。

也有学者尝试通过优化散热器的方式为空冷系统防冻，杨立军等[10]、张薇等[11]、Kong 等[12-13]分别对不同型式翅片管束的流动传热性能及几何参数影响规律开展了系统研究。王伟佳等[14]研究表明六排管防冻性能优于四排管，且交叉顺流管束冻结风险低于交叉逆流管束；张明玉等[15]进一步证实中间型进水方式流量分配均匀，可降低临界防冻流量需求，平衡防冻效果与系统能效。李昊等[16]进一步将 BP 神经网络应用于空冷系统性能预测，为智能防冻调控技术的发展提供了新思路。

另外，通过附加装置减小进风面积是现阶段更广泛应用的防冻手段。贾贺[17]通过对塔外侧百叶窗不同开度条件下的数值模拟分析发现，百叶窗的开度统一调节只能改变空冷塔的进风量，并不会对温度场及压力场的分布有太多改变。CHEN 等[18]对百叶窗开度进行了分区调节研究，认为在−5 ℃条件下，只关小迎风扇区百叶窗开度即可实现防冻目的，其它扇区百叶窗应保持全开状态；而在−10 ℃和−15 ℃条件下，侧风和后侧扇区百叶窗开度应同步关小，否则会增加各扇段出水温度的不均匀度，提升背风扇段冻结风险[19]。李春山[20]则着眼工程实际，提出结合百叶窗开度调节、空冷散热器的三级保护、扇区充水以及高位水箱防冻的复合措施，为间接空冷系统冬季安全运行提供全方位保障。

但在应用过程中，百叶窗叶片密封性能不足，存在转动部件锈蚀及冬季冰雪冻结导致的卡涩问题[21]，在强风下易产生风致震动噪声[22]。为解决这一问题，有研究人员提出一种滚动式防冻卷帘，其卷帘箱位于下部，上下运行时防冻卷帘平贴在抗风金属网格上，解决了负压和风压的吸附，减少了摩擦阻力。与电厂 DCS 系统连接可远程、移动端针进行精准操控。

但目前防冻卷帘在横向风影响下的的防冻性能研究不深入，缺少卷帘下落距离与防冻效果的量化关系，因此本文聚焦于不同横向风风速工况下，

卷帘不同下落距离对冷却塔关键运行参数的影响。从整体与扇段两个维度，探究了横向风风速与防冻卷帘下落距离的耦合作用，对间接空冷塔的影响，填补了防冻卷帘在复杂风况下的研究空白，为冬季防冻的精准调节提供数据支撑，对于保障严寒地区间接空冷机组安全稳定运行、提升机组运行可靠性具有工程实践意义。

1 数值计算方法

1.1 研究对象

间接空冷塔高度 241.82 m，塔出口直径 136.7 m，零米直径 248.37 m，喉部高度 193.46 m，喉部直径 123.11 m，进风口高度 51.81 m，展宽平台夹角 10°，配有 291 个冷却三角，其外围直径 258.37 m。冷却塔三角宽度 3.1 m，夹角 53°，高度 48 m，散热器为双流六排管程，翅片间距 3.6 mm，片厚为 0.23 mm，管外径 25 mm。

1.2 控制方程与边界条件

间接空冷塔在机组负荷、气象条件及循环水量稳定运行时，塔内外空气流场可以按稳态计算，空气运动方程见参考文献[23]。采用商业计算流体软件 FLUENT 对间接空冷塔的三维数学模型进行求解。动量方程中浮力是主要作用力，需要考虑浮力效应。空气流动和传热耦合求解。离散方程的求解采用分离变量法，速度与压力的解耦采用 SIMPLEC 算法。速度和温度场的离散格式采用 QUICK 格式。

气体的性质为理想不可压缩气体，在计算环境中设定环境压强和环境温度。采用厂址 1 月气象为冬季的研究条件，其干球温度-8.6 ℃，湿球温度-10.7 ℃，大气压 756.3 hPa。气体材料的比热采用 UDF 写成与温度相关的多项式函数或分段函数。

对于塔外区域的边界，底部为绝热边界。在有环境风情况下，进风面的边界为速度入口边界，其他面仍为压力出口边界。当防冻卷帘下落时，对应的高度设置为绝热的 WALL 边界。环境风速度随高度的变化呈指数关系，计算公式为

$$v_{w,H} = v_w \left(\frac{H}{10} \right)^{\alpha} \tag{1}$$

式中：$v_{w,H}$ 为 H 高度处的风速；v_w 为 10 m 高处的环境风速，m/s；H 为某点距地面的高度，m；α 为与地面粗糙度有关的系数。

对于塔内区域的边界，冷却塔壳体的外壁设置成绝热边界。散热器采用 Fluent 的 RADIATOR 模型，其热力阻力特性与散热器自身型式、型号有关，一般表达为与散热器迎风面质量流速有关的公式，本研究中采用的散热器为双流六排管程，翅片间距 3.6 mm，片厚为 0.23 mm，管外径 25 mm。其热力、阻力性能计算公式为：

$$K = \mathrm{A}\left(\rho v_g\right)^{\mathrm{m}} v_t^{\mathrm{n}} \tag{2}$$

$$\Delta p = \mathrm{C} V_g^{\mathrm{B}} \tag{3}$$

式中：K 为以散热器迎风面积为基准的传热系数，W/(m^2·℃)；v_g 为迎面风速，m/s；ρ 为进口空气密度，kg/m^3；v_t 为管内流速，m/s；Δp 散热器的阻力，Pa；A、B、C、m、n 为试验常数。

1.3 网格划分

采用 GAMBIT 软件进行三维模型的网格划分（图 1），计算域为 3 000×3 000×3 000 m，模型可分为塔内和塔外，塔外网格较稀疏，散热器周围网格较密集，经过网格敏感性分析，最终网格数约 800 万。

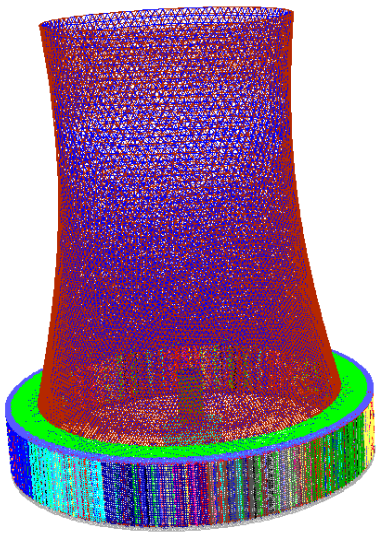


图 1 三维模型网格划分

Fig.1 Mesh generation of 3D model

2 结果与分析

2.1 防冻卷帘在不同风况下的效果

表 1 呈现了防冻卷帘下落距离与间接空冷塔出塔水温、进出水温差的响应关系。无环境风条件下，出塔水温与防冻卷帘下落距离呈正相关，与进出水温差呈显著负相关。无卷帘时，出塔水温仅为 4.52 ℃，远低于间接空冷塔冬季循环水防冻临界温度（20 ℃），表明自然工况下系统存在冻害风险。随着卷帘下落距离从 4 m 逐步增加至 40 m，出塔水

温从 5.16 ℃持续升至 22.47 ℃，印证了防冻卷帘通过遮挡空冷塔进风口，减少循环水与环境空气的换热，从而抑制循环水散热、提升出塔水温，实现主动防冻。在无环境风条件下卷帘下落距离 36 m 时可满足出水高于 20 ℃的防冻要求，此时对进风口进风高度遮挡了约 75%。

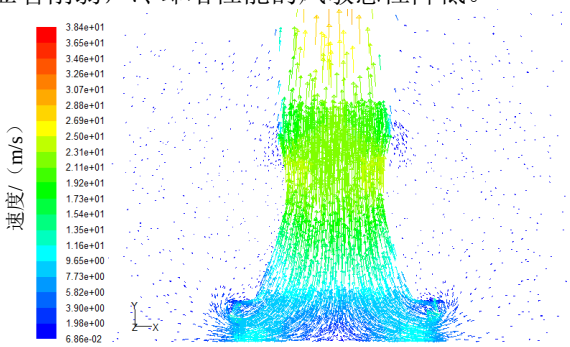
表 1 不同防冻卷帘下落距离下的循环水温差及出塔水温
Tab.1 Water temperature under different drop distances of anti-freeze roller shutter

防冻卷帘下降距离/m	循环水温差/℃		出塔水温/℃	
	无环境风	4 m/s	无环境风	4 m/s
0	25.48	25.31	4.52	4.69
4	24.84	24.20	5.16	5.80
8	23.81	23.24	6.19	6.76
12	22.51	21.92	7.49	8.08
16	20.95	20.25	9.05	9.75
20	19.20	18.36	10.80	11.64
24	17.32	16.58	12.68	13.42
28	15.26	14.53	14.74	15.47
32	13.09	12.46	16.91	17.54
36	9.33	9.07	20.67	20.93
40	7.53	7.44	22.47	22.56

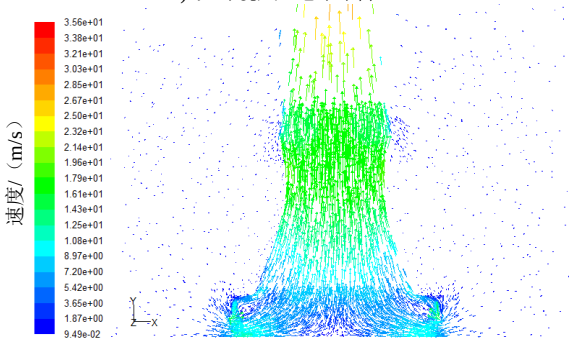
无卷帘工况下，4 m/s 环境风会轻微削弱冷却塔的冷却性能。无环境风条件下，循环水温差为 25.48 ℃；当环境风速度升至 4 m/s 时，循环水温差降至 25.31 ℃，环境风对冷却能力的影响幅度为 0.16 ℃。这是由于环境风干扰了塔内气流组织，导致气-水换热效率略有降低。进一步对比出塔水温，无环境风时出塔水温为 4.52 ℃，4 m/s 风时出塔水温为 4.69 ℃，二者均远低于防冻控制温度。需说明的是，仅依靠全塔平均的出塔水温无法完全评估冻结风险，环境风小幅恶化整体冷却效果，还造成了塔内各扇区循环水换热条件差异，引发不同扇区出水温度分布不均，后节将针对不同扇区出水温度开展细化对比分析，揭示局部结冰风险。

在环境风 4 m/s 时，防冻效果与防冻卷帘下落距离呈正相关，随下落高度增大，出塔水温显著上升、循环水温差持续减小。当卷帘下落距离从 4 m 增至 40 m 时，出塔水温从 5.80 ℃升至 22.56 ℃。从防冻角度看，下落高度 4~8 m 时，出塔水温仍处于 5~7 ℃的近冰点区间，防冻效果有限；下落高度超 16 m 后，出塔水温升至 9 ℃以上，远离冰点，防冻效果明显增强；下落高度达 36 m 时，出塔水温超过防冻控制温度（20 ℃），大幅减小了冻结风险。

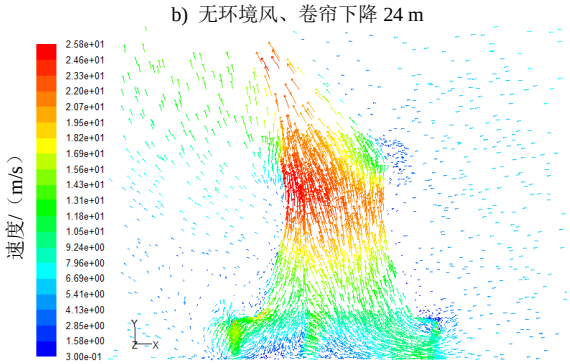
增加防冻卷帘后，随卷帘下落距离增加，环境风对冷却性能的影响整体呈先升高后下降的趋势。图 2 给出了不同环境风条件下，不同卷帘下落距离时的冷却塔截面速度矢量分布，可以看出环境风破坏流场均匀性、增加进风阻力，从而使冷却性能降低。增加防冻卷帘后，当卷帘下落距离较小时（4~28 m），冷却塔的气流通道被压缩，进风口流速增加，卷帘内侧形成一个低速旋涡区。随着卷帘进一步下降，进风口流速进一步增加，低速旋涡区范围加大，导致冷却塔性能进一步下降。随着卷帘下落距离变大（32~40 m），卷帘遮挡了约 70%的进风口面积，塔内气流稳定性提升，环境风对换热过程的干扰被显著削弱，冷却塔性能的风敏感性降低。



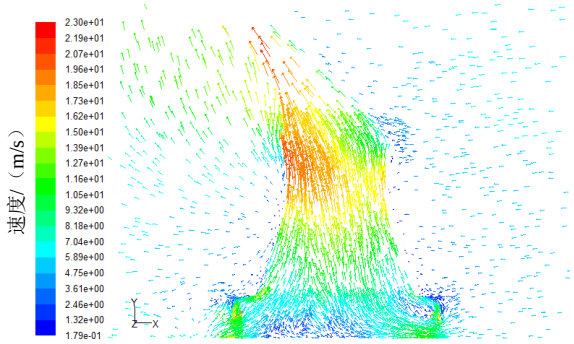
a) 无环境风、卷帘下降 12 m



b) 无环境风、卷帘下降 24 m



c) 环境风速 4 m/s、卷帘下降 12 m



d) 环境风速 4 m/s、卷帘下降 24 m

图 2 冷却塔截面速度矢量分布

Fig.2 Cross-sectional velocity vector distribution of cooling tower

2.2 防冻卷帘对各扇出塔水温的影响

增加防冻卷帘后横向风对扇区出水温度的影响分布趋势见图 3，其中扇区 1 为迎风侧的扇区，扇区 12 为背风侧的扇区。在相同卷帘下落距离下，无环境风时各扇区出水温度分布均匀；当存在 4 m/s 环境风时，分布均匀性被破坏，具体表现为迎风侧（扇区 1）和背风侧（扇区 12）出水温度下降，与风向垂直方向的扇区温度上升。且这种分布的不均匀性随卷帘下落距离的增加而逐渐减弱。

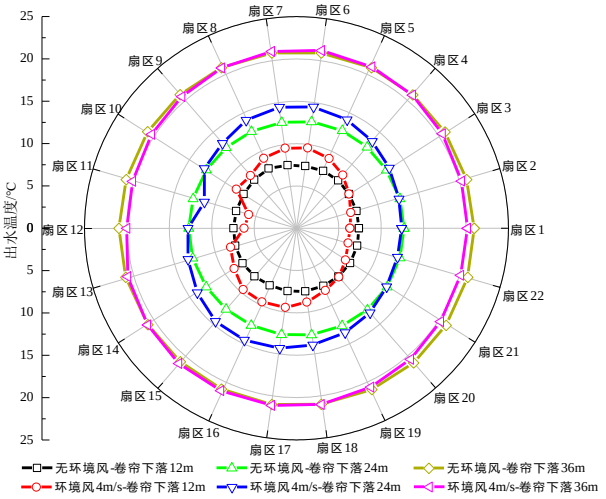


图 3 扇区出水温度分布

Fig.3 Outlet water temperature distribution of each sector

随卷帘下落距离增加，各扇区出水温度整体呈升高趋势。低下落距离（如 12 m）时，出水温度的扇区分布不均匀性较明显，曲线形态不规则；随着下落距离增加（如 36 m），分布逐渐趋于均匀。这种变化源于防冻卷帘下落距离对冷却塔气流组织和换热环境的调控：下落距离较小时，环境风对塔内气流扰动依然较大，各扇区换热差异显著，导致分布不均；下落距离较大时，一定程度上减弱了环境风的影响，扇区间的换热差异被削弱，分布趋于均匀，同时换热效率降低，出水温度整体升高。

表 2 给出了环境风速 4 m/s 时不同卷帘下落距离下的各扇区水温，通过与出塔水温对比，有环境风时扇区 1-4、扇区 9-13、扇区 19-22 的水温低于出塔水温，即迎风侧 110°范围、背风侧 65°范围内的扇区在冬季防冻运行中更加不利，不利扇区的水温最大偏低约 3 ℃，调控时需要重点关注。

表 2 环境风速 4m/s 时各扇区水温

Tab.2 Water temperature of each sector at a wind speed of 4m/s

扇区号	扇区水温/℃				
	卷帘下落 0 m	卷帘下落 4 m	卷帘下落 8 m	卷帘下落 12 m	卷帘下落 20 m
1	1.93	3.48	4.72	6.29	10.35
2	2.48	3.93	5.16	6.67	10.57
3	3.37	4.81	5.99	7.39	11.13
4	4.44	5.91	7.03	8.32	11.82
5	5.33	6.87	7.9	9.09	12.45
6	5.81	7.41	8.41	9.56	12.88
7	5.82	7.44	8.37	9.55	12.91
8	5.59	6.94	7.83	9.11	12.42
9	5.64	6.1	6.9	8.25	11.53
10	5.66	6.12	7.03	8.44	11.64
11	3.08	3.72	4.37	5.85	9.96
12	3.33	4.44	5.58	6.17	9.54
13	5.63	6.29	7.14	8.08	11.44
14	5.84	6.96	7.41	8.77	12.34
15	6.15	7.63	8.25	9.58	12.96
16	6.05	7.49	8.3	9.61	12.99
17	5.84	7.27	8.12	9.43	12.73
18	5.21	6.59	7.49	8.81	12.25
19	4.27	5.69	6.72	8.09	11.76
20	3.65	5.05	6.14	7.63	11.4
21	2.71	4.16	5.33	6.89	10.79
22	2.04	3.53	4.74	6.33	10.38

2.3 冬季运行卷帘调控方案

在冬季运行时，可以根据防冻要求的目标出塔水温，对防冻卷帘下落距离进行适应性调控，本工程无环境风时时防冻卷帘的下落距离与出塔水温可按式(4)计算，环境风速 4 m/s 时防冻卷帘的下落距离与出塔水温可按式（5）计算。

$$h_1 = -0.071T_{out}^2 + 3.993T_{out} - 14.87 \quad (4)$$

$$h_2 = -0.059T_{out}^2 + 3.742T_{out} - 15.33 \quad (5)$$

式中，T_{out} 为出塔水温，℃；h_1 为无环境风时卷帘下落距离，m；h_2 为环境风速 4 m/s 时卷帘下落距离，m。

当有环境风时扇区水温分布不均匀，因此运行时可适当增加不利扇区防冻卷帘的下降距离，环境风 4 m/s 时卷帘每下降 1 m，出水温度约上升 0.5 ℃，结合前节不利扇区的水温最大偏低约 3 ℃，针对防冻效果保守估算，运行中迎风侧 110°范围、背风侧 65°范围内的扇区在冬季防冻调控时，可在上式计算的基础上进一步下降约 6 m，也可根据各扇区的监测水温对每个防冻卷帘的下落高度分别进行更细致的调控，但其热力性能是否满足负荷要求需校核。

3 结 论

针对内陆核电间接空冷塔冬季运行时，低温与横向风对防冻策略的耦合影响，通过三维数值模拟系统地开展了防冻卷帘的调控性能研究，分析了不同卷帘高度下的水温，明确了该新型措施在不同风况下的调控参数，为冬季运行提供参考，得到主要结论如下：

1）防冻卷帘具有良好的风况适配性，其下落距离与出塔水温呈显著正相关。针对本塔型，下降距离为进风口高度 75%时可满足防冻要求。

2）横向风会导致间接空冷塔各扇区水温分布不均，防冻卷帘在较大下落距离时，通过压缩进风通道降低横向风的不利影响，均衡各扇区气流分布。

3）基于本工程提出了 2 种风况下卷帘下落距离与出塔水温的卷帘整体调控计算公式。针对迎风侧 110°、背风侧 65°范围内的不利扇区，建议在整体调控基础上额外增加 6 m 下落距离，或根据各个扇区实时水温进行逐个卷帘的精细调控，进一步提升防冻可靠性。

[参 考 文 献]

[1] 张利, 荆涛, 王子豪, 等. 火电机组间接空冷塔冬季防冻措施模拟研究[J]. 节能技术, 2022, 40(1): 43-51.
Zhang L, Jing T, Wang Z H, et al. Simulation study on anti-freezing measures of indirect air-cooling tower in thermal power unit in winter[J]. Energy Conservation Technology, 2022, 40(1): 43-51.

[2] 李满, 徐士倩, 李陆军, 等. 主辅机共塔条件下间接空冷塔流场特性分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2021, 19(02): 221-228.
Li M, Xu S Q, Li L J, et al. Numerical analysis of fluid dynamics of main-auxiliary combined indirect cooling tower[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(02): 221-228.

[3] 菅佳乐, 周春灌, 李陆军, 等. 瞬时不利气象对自然通风冷却塔及机组稳定运行的影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2025, 23(03): 226-233.
Jian J L, Zhou C G, Li L J, et al. The impact of sudden adverse weather on the stable operation of natural draft cooling towers and power plants[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2025, 23(03): 226-233.

[4] 张学镭, 周兰欣, 陈海平, 等. 基于模糊层次分析法的直接空冷凝汽器防冻性能监测[J]. 动力工程学报, 2012, 32(10): 809-814.
Zhang X L, Zhou L X, Chen H P, et al. Antifreezing performance monitoring of direct air-cooled condenser based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Joumnal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(10): 809-814.

[5] 温新宇, 赵宏伟. 带表面式凝汽器间接空冷系统散热器循环水管束冻裂原因分析[J]. 热力发电, 2003, (8): 38-39+42-70.
Wen X Y, Zhao H W. Cause analysis of radiator tube bundles' frost-crack for indirect air-cooled system with surface condenser[J]. Thermal Power Generation, 2003, (8): 38-39+42-70.

[6] 徐冬. 660MW 间接空冷系统机组冬季防冻措施[J]. 科技展望, 2015, 31: 36-38.
Xu D. Winter anti-freezing measures for 660mw indirect air-cooling system units[J]. Science and Technology, 2015, 31: 36-38.

[7] 王雪波. 环境风影响下间接空冷系统循环水流量分配优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 40-41.
Wang X B. Optimization study of water flow distribution for natural draft dry cooling system under crosswinds[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 40-41.

[8] Kong Y Q, Wang W J, Yang L J, et al. Water redistribution among various sectors to avoid freezing of air-cooled heat exchange[J]. International Journal of Heat &Mass Transfer, 2019, 141:294-309.

[9] 金庆辉, 宋传教, 杨建明, 等. 自然通风冷却塔预热式防冻系统控制研究[J]. 发电设备, 2022, 36(01): 58-65.
Jin Q H, Song C J, Yang J M, et al. Research on control for preheating antifreeze system of a natural draft cooling tower[J]. Power Equipment, 2022, 36(01): 58-65.

[10] 杨立军, 贾思宁, 卜永东, 等. 电站间冷系统空冷散热器翅片管束流动传热性能的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(32): 50-57.
Yang L J, Jia S N, Bu Y D, et al. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of finned tube bundles for air-cooled heat exchangers of indirect dry cooling systems in power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(32): 50-57.

[11] 张薇, 杜小泽, 杨立军. 空冷散热器开缝翅片管束外空气流动传热特性研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016, 47(03): 452-455.
Zhang W, Du X Z, Yang L J. Study on characteristics of flow heat conduction outside the pipe bundle of air-cooled radiator with slotted fins[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 47(03): 452-455.

[12] Kong Y Q, Yang L J, Du X Z, et al. Effects of continuous and alternant rectangular slots on thermo-flow performances of plain finned tube bundles in in-line and staggered configurations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 93: 97-107.

[13] Kong Y Q, Yang L J, Du X Z, et al. Impacts of geometric

structures on thermo-flow performances of plate fin-tube bundles[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 107: 161-178.

[14] 王伟佳, 孔艳强, 温新宇, 等. 电站间接空冷散热器管束防冻预测模型及数值验证和实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6357-6368.
Wang W J, Kong Y Q, Wen X Y, et al. Anti-freezing predicting models, numerical verification and experimental research for air-cooled heat exchanger tube bundles of natural draft dry cooling system in power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6357-6368.

[15] 张明玉, 王晓静, 关欣, 等. 间接空冷翅片管束临界防冻特性及防冻裕量研究[J]. 热力发电, 2024, 53(04): 92-101.
Zhang M Y, Wang X J, Guan X, et al. Anti-freezing characteristics and margin of indirect air-cooled finned tube bundle[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(04): 92-101.

[16] 李昊, 罗云, 李瑞东, 等. 基于粒子群优化算法优化 BP 神经网络模型的间接空冷散热器性能监测[J]. 动力工程学报, 2019, 39(12): 973-980.
Li H, Luo Y, Li R D, et al. Performance monitoring of indirect air-cooled radiators based on particle swarm optimization BP neural network model[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(12): 973-980.

[17] 贾贺. 间接空冷系统循环水流量分配优化及防冻策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024: 32-33.
Jia H. Water flow distribution an anti-freezing strategy of natural draft dry cooling system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024: 32-33

[18] Chen L, Yang L J, Du X Z, Yang Y P. Anti-freezing of air-cooled heat exchanger by air flow control of louver in power plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106: 537-550.

[19] 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(04): 474-480.
Kang W D, Li G C, Wang Z H, 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(04): 474-480.

[20] 李春山. 600MW 机组间接空冷系统冬季防冻措施[J]. 热力发电, 2010, 39(10): 110-111.
Li C S. Winter anti-freezing measures for 600mw indirect air-cooling system units[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(10): 110-111.

[21] 刘培忠, 杨志军. 高寒地区间接空冷机组散热器防冻预暖措施[J]. 中国电力, 2013, 46(05): 18-22.
Liu P Z, Yang Z J. Anti-freezing and pre-heating measures for radiator in indirect air-cooling units in cold areas[J]. Electric Power, 2013, 46(05): 18-22.

[22] 李勇萍, 黄汉杰. 强风下百叶窗翅片风致响应的风洞试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(3): 220-224.
Li Y P, Huang H J. Wind tunnel experiment research on strong-wind induced response of louver fins[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(3): 220-224.

[23] 赵顺安. 冷却塔工艺原理[M]. 1 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 240-263.
ZHAO Shunan. Cooling tower technology principle[M]. . 1th ed. Beijing, China Building Industry Press.2015: 240-263.

（责任编辑　XXX）