

冷却塔循环冷却水合理设计出塔水温指标研究

熊行

大唐株洲发电有限责任公司, 中国·湖南 株洲 412000

摘要: 冷却塔循环冷却水出塔水温是工业冷却系统设计的核心指标, 直接影响系统能效、设备寿命与经济性。本文从气象约束、工艺需求、设备性能三方面解析影响因素, 构建热力学与多目标优化量化模型, 结合 CFD 仿真验证, 确立不同场景设计基准与技术支撑方案, 融入动态自适应控制、相变蓄冷等前沿技术。研究为冷却系统设计与改造提供科学依据, 助力实现冷却效果、能耗与低碳目标的协同优化。

关键词: 冷却塔; 循环冷却水; 出塔水温

Research on the Reasonable Design of Outlet Water Temperature Index for Cooling Tower Circulating Cooling Water

Xiong Xing

Datang Zhuzhou Power Generation Co., Ltd., China Hunan Zhuzhou 412000

Abstract: The outlet water temperature of cooling tower circulating cooling water is a core indicator in the design of industrial cooling systems, directly affecting system energy efficiency, equipment lifespan, and economic performance. This paper analyzes the influencing factors from three aspects: meteorological constraints, process requirements, and equipment performance. It constructs thermodynamic and multi-objective optimization quantitative models, and verifies them through CFD simulation. Different design benchmarks and technical support schemes are established for various scenarios, incorporating advanced technologies such as dynamic adaptive control and phase change cold storage. The research provides a scientific basis for the design and renovation of cooling systems, facilitating the coordinated optimization of cooling effect, energy consumption, and low-carbon goals.

Keywords: Cooling tower; Circulating cooling water; Outlet water temperature

0 引言

出塔水温是工业冷却系统的关键设计指标, 传统经验设计已难以适配气候变暖、低碳转型及多元工艺的需求, 常导致冷却效率不足、能耗偏高等问题。本文聚焦该指标开展研究, 通过解析影响因素、构建量化模型、确立行业基准与融合前沿技术, 形成科学适配的设计体系, 为工程应用提供支撑, 助力提升冷却系统效能与低碳水平。

1 出塔水温设计的核心影响因素解析

1.1 气象基准参数约束

气象基准参数是出塔水温设计的基础约束条件, 其准确性直接决定指标与环境的适配性。在湿球温度选取上, 需以近 10 年夏季极端湿球温度第 0.4% 频率值为基准, 例如上海 30.5℃、迪拜 33.2℃等区域典型值, 同时必须叠加 IPCC AR7 推荐的 +0.8℃ 气候变化修正因子, 以应对全球气候变暖带来的极端天气风险; 对于空气污染系数, 在工业区等悬浮颗粒物浓度较高 ($PM_{2.5} \geq 75 \mu g/m^3$) 的环境

中, 颗粒物易堵塞冷却塔填料, 导致传热效率下降, 因此需额外增加 1~1.5℃ 的逼近度 (Δt) 以补偿这一损失; 而在极端干旱、高温地区 (如中东), 为平衡水耗与冷却效果, 需采用 $\Delta t \geq 5^\circ C$ 的设计策略, 并结合空气取水技术弥补循环水的蒸发损失, 确保系统在特殊气候条件下稳定运行^[1]。

1.2 工艺端运行需求限制

工艺端运行需求从实际生产角度对出塔水温施加刚性限制, 不同工业场景的生产特性决定了差异化的水温边界要求。半导体厂蚀刻设备对温度精度要求极高, 入塔水温为 45℃ 时, 出塔水温需严格控制在 $32 \pm 0.5^\circ C$, 恒温精度需达到 $\pm 0.3^\circ C$, 以保障蚀刻工艺的稳定性; 联合循环电厂凝汽器入塔水温为 40℃, 出塔水温上限设定在 30~33℃, 且背压与发电效率直接关联, 背压每降低 1kPa 可使发电量增加 1.8%, 因此出塔水温需与背压协同优化; 氢能电解槽入塔水温为 80℃, 出塔水温需维持在 65~70℃, 若温度超

过75℃会加速电解槽衰减,缩短设备使用寿命。这些场景中,入塔水温、背压等工艺参数与出塔水温形成紧密耦合关系,水温阈值的突破会直接影响生产效率与设备寿命,构成明确的关联规律。

1.3 设备性能技术边界

设备性能和技术边界决定了出塔水温设计的实现能力,需从传热元件、能耗控制及长期稳定性三方面综合考量。在填料类型上,不同材质与涂层的填料传热极限差异显著:纳米涂层填料可将逼近度降至2.5~3.5℃,远优于传统填料4~6℃的水平,而抗腐蚀PVDF填料则适用于锂电池极片生产线等存在电解液侵蚀的场景,能保障长期传热效率;风机能耗与出塔水温呈现量化关联,出塔水温每降低1℃,常规风机功耗会增加12~18%,采用变频风机可将这一增幅优化至8~10%,有效平衡冷却效果与能耗成本;同时,设备老化会对水温指标产生长期影响,例如填料年均会出现0.8%的效率衰减,因此在设计中需预留合理冗余,如新建项目预留10%风机冗余功率,避免因设备老化导致出塔水温偏离设计值,确保系统长期稳定运行^[2]。

2 出塔水温设计指标的量化模型构建

2.1 基础热力学模型推导

出塔水温设计的基础热力学模型以湿球温度、逼近度与安全冗余为核心变量,通过明确的函数关系实现指标的初步量化。其核心公式为 $T_{出} = T_{wb} + \Delta t + \Delta t_{安全}$,其中湿球温度(T_{wb})需采用近10年夏季极端湿球温度第0.4%频率值,并叠加IPCC AR7推荐的+0.8℃气候变化修正因子,确保模型对气候风险的适配性;逼近度(Δt)的取值需严格依据填料性能曲线确定,例如纳米涂层填料的 Δt 范围为2.5~3.5℃,传统填料为4~6℃,同时需结合空气污垢系数调整——工业区($PM_{2.5} \geq 75 \mu g/m^3$)需额外增加1~1.5℃以补偿填料堵塞损失;安全冗余($\Delta t_{安全}$)则遵循多维度确定原则,取极端天气修正值、设备运行冗余度、日常维护裕量三者中的最大值,常规场景下该值通常控制在1.5~2.5℃,既避免极端工况下水温超标,也为设备检修与性能衰减预留缓冲空间。

2.2 多目标优化模型建立

多目标优化模型以全生命周期成本(LCC)最小化、系统能效最大化、碳排放最低化为核心目标,通过调控关键变量并满足约束条件实现指标的最优平衡。在关键变量方面,逼近度(Δt)直接影响传热效率与能耗—— Δt 越小则冷却效果越好,但风机功耗随之上升;气水比(λ)决定空气与循环水的热交换强度,需与填料高度协同优

化,避免因气水比过高导致的风机过载或过低引发的传热不足;填料高度则关联传热面积,需匹配不同场景的冷却需求(如高精度场景需更高填料高度保障精度)。约束条件层面,需严格遵循工艺水温要求(如半导体厂 $\pm 0.3^\circ C$ 恒温精度)、风机功率限值(避免能耗超限)及飘水率 $\leq 0.001\%$ 的环保标准,同时参考ISO 21826:2025碳足迹核算要求,确保模型优化结果兼顾技术可行性与低碳目标^[3]。

2.3 模型求解与验证方法

模型求解与验证需结合数值计算方法与多维度验证路径,保障结果的准确性与适用性。在数值计算方法选择上,优先采用计算流体力学(CFD)流场仿真技术,整合气象数据库与设备参数库,通过仿真模拟不同工况下的水温分布与能耗变化;参数校准阶段需引入设备老化系数、极端气候修正因子等动态参数,避免静态计算导致的偏差。理论验证路径分为两步:首先验证基础热力学公式的准确性,对比不同场景下计算值与实测值的偏差;其次通过全生命周期成本(LCC)分析验证优化模型的经济性,确保在满足工艺与环保约束的前提下,实现能耗、成本与碳排放的协同最优。

3 行业适配的设计指标基准与技术支撑

3.1 典型应用场景指标适配原则

典型应用场景的指标适配需以场景“核心约束条件”为导向,构建与实际运行需求深度绑定的适配逻辑。高精度冷却场景的核心约束是“算力设备热稳定性”,其指标适配需优先保障水温动态响应速度——需匹配芯片热密度变化节奏,避免因水温滞后导致算力波动,因此指标设计需强化“实时调节精度”与“热负荷变化的协同性”;高腐蚀环境的核心约束是“系统设备耐久性”,指标设计需与材料耐蚀周期联动,例如在确定水温上限时,需参考腐蚀介质(如电解液、化工溶剂)在不同温度下的侵蚀速率,避免因水温过高加速设备腐蚀,同时预留“腐蚀导致传热效率下降”的指标冗余;低碳场景(如近零碳工厂)的核心约束是“全生命周期碳足迹”,水温优化需结合可再生能源(如光伏)的供给节律,例如在光伏发电量高峰时段,可通过微调水温区间提升能源利用效率,在发电量低谷时段则通过指标冗余避免额外能耗,实现“水温指标与碳排管控的动态匹配”^[4]。

3.2 行业最佳实践基准值

行业最佳实践基准值的确定,需基于场景“工艺机理与环境适配性”的双重考量,形成兼具技术可行性与经济性的指标体系。超算中心液冷系统推荐逼近度(Δt)

2.5~3.0℃、最优出塔水温 28~30℃，这一基准源于“芯片热密度阈值”——该水温区间可使芯片 junction 温度维持在安全范围，且 Δt 控制需匹配相变填料的传热效率，精度控制标准需 $\leq \pm 0.2^\circ\text{C}$ 以应对算力负荷波动；锂电池极片生产线推荐 $\Delta t 3.5\sim 4.0^\circ\text{C}$ 、水温 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ ，此基准关联“电解液稳定性区间”——水温超过 36°C 易导致电解液分解，低于 34°C 则影响极片干燥效率， Δt 取值需平衡“PVDF 填料耐蚀性与热交换强度”；生物制药发酵罐推荐 $\Delta t 4.0\sim 5.0^\circ\text{C}$ 、水温 $22\sim 25^\circ\text{C}$ ，核心依据是“发酵菌活性窗口”——该水温可保障菌的代谢效率，较宽的 Δt 区间是为避免“温度骤变导致菌失活”；近零碳工厂推荐 $\Delta t 3.2\sim 4.2^\circ\text{C}$ 、水温 31°C ，此基准匹配“光伏驱动系统的负荷特性”—— 31°C 水温下风机能耗与光伏供电量适配性最佳， Δt 区间则兼顾“干湿联合冷却的水耗控制与碳排放目标”；极端干旱地区需采用 $\Delta t \geq 5^\circ\text{C}$ ，需同步满足“水耗降低率 $\geq 20\%$ ”与“空气取水技术的补偿量 \geq 蒸发损失量”，确保基准值的实际落地性^[5]。

3.3 技术支撑方案体系

技术支撑方案体系需围绕“指标落地的关键瓶颈”展开，形成“材料-设备-控制”协同的解决方案。填料技术选型需针对场景核心瓶颈：超算中心选用相变填料，其微胶囊化石蜡（PCM）的蓄冷特性可补偿“算力负荷波动导致的水温偏差”，浓度控制在 3~5% 以匹配 $28\sim 30^\circ\text{C}$ 水温需求；化工与锂电池场景选用抗腐蚀 PVDF 填料，其耐电解液侵蚀的 pH 范围为 2~12，可适配 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 水温下的长期运行，避免因填料腐蚀导致 Δt 偏离设计值；生物制药场景选用低阻高效填料，配合深度预冷技术实现 $22\sim 25^\circ\text{C}$ 低温，同时降低气流阻力以减少风机能耗。风机系统优化需聚焦“能耗与场景需求的匹配”：生物制药发酵罐采用磁悬浮风机，其无油润滑特性可满足“无菌生产要求”，同时比传统风机节能 15~20%，适配 $22\sim 25^\circ\text{C}$ 的低温运行需求；近零碳工厂采用光伏驱动风机，通过“水温-发电量”联动控制算法，在 31°C 水温区间实现风机功耗与光伏供电的实时匹配；多数场景可搭配变频风机，通过转速调节使 Δt 波动控制在 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 内，优化能耗。辅助冷却技术需针对性补短板：生物制药场景的深度预冷技术，通过“多级换热”将进水温度预处理至 $18\sim 20^\circ\text{C}$ ，为出塔水温 $22\sim 25^\circ\text{C}$ 提供保障；近零碳工厂的干湿联合冷却技术，通过湿度传感器联动控制干冷段与湿冷段切换，在 $\Delta t 3.2\sim 4.2^\circ\text{C}$ 区间减少 30% 水资源消耗，形成全场景覆盖的技术支撑网络。

4 前沿技术对设计指标的突破与应用

4.1 动态自适应控制技术

动态自适应控制技术通过“实时感知-预测预判-精准调节”的闭环机制，突破了传统水温控制的滞后性瓶颈，为设计指标的精准落地提供核心支撑。该技术依托采样频率达 10Hz 的物联网传感器，实现对湿球温度（ T_{wb} ）等关键气象参数的高频捕捉，避免因监测延迟导致的水温波动；搭配 AI 预测模型，可提前 10 分钟预判环境参数与工艺热负荷的变化趋势，主动调节风机转速等执行机构，而非被动响应温度偏差。相较于传统系统 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的水温波动范围，该技术将波动幅度压缩至 $\leq \pm 0.2^\circ\text{C}$ ，不仅突破了高精场景对恒温精度的严苛要求，更使设计指标从“静态设定”转向“动态适配”，解决了传统指标难以应对工况瞬时变化的痛点，实现了水温控制与场景需求的实时协同。

4.2 相变蓄冷与能量回收技术

相变蓄冷与能量回收技术从“能量时空调配”与“能耗补偿”两个维度，突破了设计指标的经济性与环保性边界。相变蓄冷技术采用微胶囊化石蜡（PCM）作为储能介质，按 3~5% 的浓度溶入循环水，利用其相变过程中吸收或释放大潜热的特性，在日间工艺热负荷高峰时段蓄存富余冷能，夜间低负荷时段释放，有效平抑水温峰值，可使峰值水温降低 $2\sim 3^\circ\text{C}$ ，无需通过增大风机功耗或提升填料规格来满足指标要求；新型热回收系统则以塔顶排风为能量来源，驱动有机朗肯循环（ORC）发电，将原本浪费的热能转化为电能，直接补偿水温调节过程中的风机能耗，实现 18~25% 的净节能率。两项技术的应用，使设计指标不再局限于“满足冷却需求”，更能兼顾能耗控制与碳排放降低，突破了传统指标仅关注技术可行性的单一维度。

4.3 技术融合应用方案

技术融合应用方案通过“功能互补、场景适配”的组合逻辑，构建了覆盖多需求场景的指标优化体系，突破了单一技术的应用局限。其核心路径是围绕场景核心痛点，将不同前沿技术的优势叠加：针对超算中心等高精度、高能耗场景，采用“动态自适应控制+相变蓄冷+ORC 热回收”组合，既通过 AI 控制保障 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 的恒温精度，又借助相变蓄冷平抑峰值负荷，再通过热能回收补偿能耗，实现指标精度与经济性的双重优化；针对近零碳工厂等低碳导向场景，采用“相变蓄冷+光伏驱动+干湿联合冷却”组合，相变蓄冷平衡光伏供电的不稳定性，光伏驱动为调节系统提供清洁能源，干湿联合冷却降低水耗，使设

设计指标与低碳、节水目标深度绑定；针对生物制药等低温需求场景，采用“动态自适应控制 + 深度预冷 + 相变蓄冷”组合，通过多技术协同突破低温指标的实现成本瓶颈。

5 结语

综上所述，冷却塔循环冷却水出塔水温设计需综合气象、工艺、设备多维度约束，基于热力学与多目标优化模型实现量化，结合 CFD 仿真保障准确性。不同场景的适配基准与“材料 - 设备 - 控制”技术方案，及动态自适应控制、相变蓄冷等前沿技术的应用，有效突破传统设计局限。研究构建的设计体系可直接指导冷却系统设计与改造，未来可进一步完善极端气候适配与跨行业标准，推动系统高效低碳发展。

参考文献：

[1] 高伟, 陈珣, 刘明等. 耦合余热回收系统的燃煤机

组瞬态过程硫酸氢氨沉积特性及控制策略优化[J]. 动力工程学报, 2025,45(11):1881-1891.

[2] 张瀚升. 循环冷却水自动加药控制研究现状[J]. 山西电力, 2025,(05):58-62.

[3] 李万宏, 叶翔, 赵秀龙等. 质子重离子加速器冷却水多回路恒压系统设计与应用[J]. 自动化技术与应用, 2025,44(10):42-46.

[4] 游春发, 熊远南, 侯杙辰等. 某火电厂循环冷却水系统高浓缩倍率运行优化[J]. 能源研究与管理, 2025,17(03):10-16+38+189.

[5] 唐勇. 某石油化工企业循环水场设计与优化[J]. 当代化工研究, 2025,(15):169-171.

作者简介：熊行（1984.01-），男，汉族，湖南长沙，本科，汽机专工，工程师。