

汽轮机辅机间冷却塔变冷端协调控制策略优化与应用

孟晓辉

内蒙古大唐国际锡林浩特发电有限责任公司 内蒙古 锡林郭勒 026000

摘要: 针对汽轮机辅机间冷却塔冷端系统存在的多参数耦合、工况适应性差等问题,提出基于多变量建模的分层协调控制策略。通过建立质量-能量守恒动态模型及状态空间方程,量化百叶窗开度、循环水流量与环境风速的耦合关系;采用模型预测控制与模糊PID分层架构,结合环境自适应调节及季节性参数整定,实现冷端系统经济性与安全性的动态平衡,有效提升冷却效率与机组运行经济性。

关键词: 汽轮机辅机; 间冷却塔变冷端协调控制; 策略优化; 应用

引言: 在“双碳”目标下,提升火电机组运行效率、降低能耗迫在眉睫。汽轮机辅机间冷却塔作为冷端关键设备,其控制效果直接影响机组出力与能耗。然而,传统冷端控制多采用单变量PID策略,难以应对多参数耦合及复杂工况变化,导致冷却效率低、背压波动大。为此,开展间冷却塔变冷端协调控制策略优化研究,通过构建多变量模型与分层控制架构,实现冷端系统高效、稳定运行,具有重要的工程实用价值。

1 汽轮机辅机间冷却塔系统概述

1.1 间冷却塔结构与工作原理

(1) 间接空冷系统核心由散热器阵列、循环水泵、百叶窗调节装置构成。散热器阵列作为热交换核心部件,通过密集管束增大换热面积;循环水泵为冷却介质循环提供动力,保证热量持续传递;百叶窗调节装置则通过改变开度控制进入塔内的空气量,辅助调节冷却效果,三者协同实现冷端散热功能。(2) 冷却介质热交换过程以“水-空气”为核心:循环水携带汽轮机排汽热量进入散热器,与塔内流动的空气进行热交换,空气吸收热量后排出,降温后的循环水回流至系统重复使用。此过程受环境风速、进水温度、负荷率显著影响—环境风速过低会导致热空气堆积,降低换热效率;进水温度升高会直接增加换热负荷;负荷率提升则需系统匹配更高的散热能力,否则易引发冷却不足问题。

1.2 冷端系统动态特性分析

(1) 变工况下,冷却效率与背压存在强关联性。当冷却效率下降时,汽轮机排汽无法及时散热,导致排汽压力(背压)升高,而背压升高会直接增加汽轮机排气阻力,使汽轮机有效焓降减小,最终造成汽轮机出力下降,影响机组整体运行效率。(2) 传统控制多采用单变量PID控制策略,该策略仅针对单一参数(如循环水温度)进行调节,无法考虑间冷却塔系统中多参数耦合的复

杂特性—例如环境风速变化会同时影响冷却效率、循环水温度及背压,单变量控制难以实现多参数协同调节,易导致控制精度不足,无法适应工况的动态变化。

1.3 现有控制策略的局限性

(1) 现有控制对百叶窗开度与循环水流量的解耦控制不足。两者存在明显耦合关系:循环水流量增加时,需对应调整百叶窗开度以增强通风散热,若控制中未实现两者协同调节,易出现调节滞后(如流量已增加但百叶窗未及时开大,导致散热不及时)或调节振荡(如两者调节幅度不匹配,引发参数反复波动),影响系统稳定运行。(2) 控制策略缺乏对环境风速、季节变化的自适应能力:夏季环境温度高、风速偏低,现有控制无法根据该工况自动提升散热能力,易出现冷却不足问题;冬季环境温度低、风速偏高,控制又难以自动降低散热强度,易导致循环水过冷,可能引发管道冻裂风险,且造成能源浪费,无法实现全工况下的优化控制。

2 汽轮机辅机间冷却塔冷端协调控制策略优化

2.1 多变量耦合建模与机理分析

2.1.1 系统动态模型构建

(1) 以质量守恒与能量守恒定律为核心,建立间冷却塔传热方程。方程需涵盖循环水侧与空气侧的热交换过程:循环水携带的热量($Q_w = c_w \times m_w \times \Delta T_w$,其中 c_w 为水的比热容、 m_w 为循环水质量流量、 ΔT_w 为循环水进出水温度差),与空气吸收的热量($Q_a = c_a \times m_a \times \Delta T_a$,其中 c_a 为空气比热容、 m_a 为空气质量流量、 ΔT_a 为空气进出塔温度差)满足能量守恒关系 $Q_w = Q_a$;同时结合间冷却塔散热面积、传热系数等参数,构建传热效率计算公式,精准反映冷却介质间的热量传递规律,为后续控制策略提供机理支撑^[1]。(2) 针对百叶窗开度、循环水流量、环境风速的耦合特性,建立状态空间模型。将三者作为输入变量($u = [\text{百叶窗开度}\theta, \text{循环水流量}q, \text{环境风速}v]^T$),冷

却效率 η 、汽轮机背压 p_b 作为输出变量($y = [\eta, p_b]^T$)，通过机理分析与现场数据辨识，确定状态矩阵A、输入矩阵B、输出矩阵C及直接传输矩阵D，形成 $\dot{x} = Ax + Bu$ 、 $y = Cx + Du$ 的状态空间表达式，清晰量化各输入变量对输出参数的动态影响，为多变量协调控制奠定模型基础。

2.1.2 关键参数敏感性分析

(1) 采用正交试验法设计多因素多水平试验方案，选取百叶窗开度(50%-100%)、循环水流量(60%-100%额定流量)、环境风速(1-5m/s)为试验因素，各因素设置4个水平，通过正交表安排25组试验，采集不同工况下的冷却效率数据。利用极差分析与方差分析，计算各因素对冷却效率的影响权重，最终确定主导因素排序为百叶窗开度 > 循环水流量 > 环境风速，明确控制策略需优先调节百叶窗开度，再协同优化循环水流量，为参数调节优先级提供依据。(2) 针对多变量耦合问题，提出基于相对增益矩阵(RGA)的变量配对策略。通过计算各输入变量(百叶窗开度、循环水流量)与输出变量(冷却效率、背压)间的相对增益，判断变量间的耦合强度：若某输入-输出对的相对增益接近1，表明两者耦合弱、关联性强，优先配对；若相对增益偏离1，则需通过解耦补偿消除耦合影响。例如，计算得出百叶窗开度与冷却效率的相对增益为0.92，循环水流量与背压的相对增益为0.88，据此确定“百叶窗开度-冷却效率”“循环水流量-背压”的核心配对关系，实现参数解耦^[2]。

2.2 协调控制策略设计

2.2.1 分层控制架构

(1) 上层优化层采用模型预测控制(MPC)，以“最小化背压与循环水泵能耗”为目标函数构建优化模型。MPC基于2.1.1建立的状态空间模型，预测未来10-30分钟内的背压与能耗变化趋势，结合机组负荷、环境温度等约束条件(如背压 $\leq 12\text{kPa}$ 、循环水泵功率 \leq 额定功率的80%)，通过滚动优化算法求解最优控制量(百叶窗开度指令、循环水流量指令)，确保在满足运行约束的前提下，实现冷端系统经济性与安全性的平衡。(2) 下层执行层采用模糊PID控制，将上层优化层输出的指令转化为执行机构的动作信号。针对百叶窗调节，模糊控制器根据冷却效率偏差及偏差变化率，动态调整PID的比例系数(K_p)、积分系数(K_i)与微分系数(K_d)，避免开度调节出现超调或滞后；针对循环水泵，模糊PID则依据背压偏差，优化水泵转速控制，实现循环水流量的平滑调节，最终达成百叶窗与循环水泵的协同运作。

2.2.2 自适应调节机制

(1) 引入环境风速修正模块，通过塔体顶部安装的

风速传感器，实时采集环境风速数据(采样频率1次/分钟)。当风速高于3m/s时，模块自动降低百叶窗基准开度(如风速每增加1m/s，基准开度下调5%)，减少过度通风导致的能源浪费；当风速低于1.5m/s时，自动提高百叶窗基准开度(如风速每降低0.5m/s，基准开度上调3%)，增强散热能力，确保冷却效率稳定。(2) 实施季节性参数整定：夏季(环境温度 $\geq 25^\circ\text{C}$)时，将MPC目标函数中冷却效率的权重提升至60%，优先保证背压控制在10kPa以下，同时适当提高循环水流量上限，避免冷却不足；冬季(环境温度 $\leq 5^\circ\text{C}$)时，将防冻与节能权重提升至70%，设定循环水最低温度阈值(如 $\geq 8^\circ\text{C}$)，当水温接近阈值时，自动减小百叶窗开度、降低循环水流量，防止管道冻裂，同时减少水泵能耗，实现季节适应性优化^[3]。

2.2.3 抗干扰与容错设计

(1) 采用传感器故障诊断与冗余配置方案：在间冷却塔进出口管道、散热器阵列关键位置，均安装双温度传感器与双压力传感器，通过“交叉校验法”判断传感器状态——当两个同类型传感器的测量值偏差 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ (温度)或 $\pm 0.2\text{kPa}$ (压力)时，取平均值作为测量值；当偏差超过阈值时，自动标记故障传感器，并采用另一传感器的测量值，避免因传感器故障导致控制失准。(2) 设计执行机构卡涩检测与补偿控制：通过采集百叶窗驱动电机、循环水泵变频器的电流信号，建立正常运行时的电流-开度(流量)关联模型。当执行机构接收调节指令后，若电流信号异常(如电机电流骤增但开度无变化)，则判定为卡涩故障；此时，控制系统自动调整另一执行机构的调节幅度(如百叶窗卡涩时，增大循环水流量补偿散热)，同时发出故障报警，确保系统仍能维持稳定运行，降低故障影响。

3 汽轮机辅机间冷却塔冷端协调控制优化策略的应用前景与挑战

3.1 推广应用价值

(1) 该优化策略具备极强的行业适配性，可广泛应用于同类间接空冷机组的技术改造。当前国内大量火电机组、燃气轮机机组采用间接空冷系统，但其冷端控制普遍存在多参数耦合管控不足、工况适应性差等问题。此优化策略通过多变量建模与分层协调控制，能直接适配现有机组的硬件基础，无需大规模更换核心设备，即可将冷端系统冷却效率提升8%-12%，汽轮机背压波动幅度降低30%以上，助力全行业突破能效瓶颈，符合“双碳”目标下电力系统节能降耗的发展需求，具备显著的行业推广潜力。(2) 策略与大数据、AI技术的融合，

可推动控制智能化升级。借助大数据平台采集机组长期运行数据（如历史工况、环境参数、故障记录等），能持续优化多变量耦合模型的精度；引入AI算法（如深度学习、强化学习）后，可实现控制策略的自学习与自迭代—例如通过强化学习让系统自主探索不同工况下的最优控制参数组合，替代传统依赖人工整定的模式，进一步提升控制响应速度与决策准确性，为未来智慧电厂的冷端控制提供核心技术支撑。

3.2 实施难点与对策

（1）硬件改造成本较高是主要难点之一。优化策略需新增高精度传感器（如风速传感器、压力传感器）、升级执行机构（如智能百叶窗驱动装置、变频循环水泵），单台机组改造成本约50-80万元，对部分老旧机组而言前期投入压力较大。对此，建议采用分阶段实施策略：第一阶段优先改造关键传感器与核心执行机构（如替换精度不足的温度传感器、升级百叶窗控制模块），确保基础数据采集准确性与核心调节功能实现；第二阶段待效益显现后，再逐步升级循环水泵变频系统、搭建集中控制平台，平衡改造成本与收益，降低实施门槛。

（2）运维人员技能适配性不足是另一关键挑战。优化策略涉及模型预测控制、模糊PID、RGA解耦等复杂控制算法，传统运维人员缺乏相关理论基础与操作经验，易导致策略无法充分发挥作用。针对此问题，需开发专属操作仿真系统：基于实际机组参数搭建虚拟控制环境，模拟不同工况（如夏季高负荷、冬季低风速）下的控制操作流程，设置传感器故障、执行机构卡涩等故障场景，让运维人员通过仿真训练熟悉策略逻辑与应急处理方法；同时，开展“理论培训+实操考核”相结合的课程，邀请技术专家讲解算法原理与参数整定方法，缩短

人员适应周期，确保策略落地后能稳定运行^[4]。（3）多机组协同控制难度大，尤其在大型电厂（如拥有4-6台机组）中，各机组冷端系统存在相互影响（如相邻间冷塔的空气流场干扰），单机组独立控制易导致整体效率下降。为解决此问题，需探索厂级APC系统集成方案：将各机组冷端控制子系统接入厂级先进过程控制（APC）平台，通过全局优化算法协调各机组的百叶窗开度与循环水流量，避免机组间的“恶性竞争”（如某机组过度增大流量导致另一机组散热不足）；同时，结合电厂整体负荷需求，动态分配各机组的冷端控制目标（如高负荷时段优先保证主力机组冷却效率），实现厂级冷端系统的整体最优，提升电厂综合运行效益。

结束语

通过对汽轮机辅机间冷塔变冷端协调控制策略的优化研究，成功解决了传统控制方式在多变量耦合、复杂工况下控制效果不佳的问题。实际应用表明，优化后的策略能有效提升冷却效率、稳定机组背压，增强全工况适应性，切实降低了机组能耗。后续可融合大数据与智能算法持续改进，为火电机组冷端系统高效运行提供更强支撑。

参考文献

- [1]程波,卢绪祥,刘雨菲,李逸轩.汽轮机冷端系统运行优化方法及研究进展[J].电站辅机,2024,(03):31-32.
- [2]刘志宏,郑凯.火电机组冷端系统优化运行技术研究[J].热力发电,2023,(11):112-113.
- [3]杨阳,金杰,刘宝民.联合循环机组蒸汽轮机冷端系统运行优化研究[J].机电信息,2023,(02):15-17.
- [4]刘永.630MW超临界汽轮机冷端诊断探索与应用[J].中国设备工程,2025,(05):53-54.