

燃气轮机进气冷却系统运行优化与维护策略

安 斌

广东大唐国际肇庆热电有限责任公司 广东 肇庆 526105

【摘 要】：燃气轮机进气冷却系统在不同环境工况下存在运行效率低、能耗高、设备易故障等问题，本文结合重庆钢铁、西北沙漠电站等工程实例，系统分析进气冷却系统工作原理、工艺构成及环境参数对运行效率的影响，明确系统优化核心目标与约束条件。负荷匹配自适应、制冷设备参数调控、实时数据监测三种优化方法为研究重点，同步建立分级定期维护、传感器校准、故障预警应急三大维护体系。优化后系统冷却效率、机组净出力显著提升，能耗与设备故障率大幅降低，可为燃气轮机进气冷却系统高效、安全、稳定运行提供理论支撑与工程参考。

【关键词】：燃气轮机；进气冷却系统；运行优化；维护策略；环境适应性

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.086

引言

燃气轮机作为高效动力设备，广泛应用于电力、冶金等领域，出力与效率高度依赖进气参数，夏季高温、高湿及高海拔等恶劣环境易导致机组出力下降、能耗增加，严重影响运行经济性与稳定性。进气冷却系统降低压气机入口温度提升进气密度，是改善燃气轮机运行性能的关键技术。当前多数冷却系统工况适配性差、能耗偏高、维护不规范，难以适应复杂多变的环境条件。本文结合工程实际，研究进气冷却系统运行特性、优化方法及维护策略，解决实际运行中的痛点，提升系统运行效益，为同类系统设计及运维提供借鉴。

1 燃气轮机进气冷却系统运行特性与优化基础

1.1 进气冷却系统工作原理与工艺构成

燃气轮机进气冷却系统降低压气机入口温度，提升进气密度与质量流量，助力机组出力和效率提升，核心原理为蒸发吸热或换热制冷^[1]。主流工艺分四类，Mee Fog 喷雾冷却系统由进水处理、高压泵站等模块构成，进水经两级过滤为除盐水，加压雾化后在进气道蒸发降温，疏水系统排出游离水保护叶片。重庆钢铁5号三菱燃机采用该工艺，优化喷嘴布局，解决原设计与实际环境偏差问题，保障系统稳定运行。

1.2 环境参数对冷却系统运行效率的影响

环境温度、相对湿度、大气压力对系统效率呈非线性耦合影响。温度每升10℃，燃气轮机出力降约9%，25℃升至45℃时，空气焓值增103%，冷却负荷增125%。湿度决定蒸发冷却极限，干燥地区效率达92%，高温高湿地区不足50%，需复合制冷。大气压力每降1kPa，进气密度减1.2%，风机能耗增3%-5%，西北沙漠电站风机功耗较平原高15%。重庆地区年均湿度70%-80%、极端温42.2℃，常规蒸发冷却效率不足60%，需优化制冷配比。

1.3 系统运行优化的核心目标与约束条件

优化核心目标是最大化净出力增益、最小化单位能耗、保障设备安全稳定，实现“出力提升-能耗控制-寿命延长”的平衡^[2]。净出力增益为燃机出力增量与冷却系统能耗的差值，PG9171E型机组进气温度每降10℃，出力上升9%，扣除制冷能耗后净增7.5%-8%。约束条件涵盖设备性能极限、环境边界、安全阈值及经济指标：喷嘴雾化压力不超150bar，避免水滴过大损伤叶片；进气温度最低不低于5℃，防止结冰；溴化锂制冷机组冷却水温度不超32℃，避免COP值低于1.0；投资回收期控制在3-5年，西北某300MW电站优化后回收期1.8年，年净收益超2000万元。压气机入口温度均匀性偏差需≤±1℃，防止气流畸变引发振动。

2 燃气轮机进气冷却系统运行优化方法

2.1 负荷匹配与工况自适应优化

基于机组负荷率与环境参数动态匹配冷却容量，构建“气象-负荷-冷却量”三维自适应模型。采用分级喷雾与制冷容量阶梯调节策略，Mee Fog系统设4级喷雾，PLC根据进气温度、湿度及机组负荷信号，0-100%负荷区间自动投切泵组与喷嘴数量，低负荷（≤50%）仅投1级喷雾，高负荷（≥80%）满投4级并联驱动制冷机组。重庆钢铁三菱燃机夏季高温高负荷时段，自适应调节将进气温度稳定控制在20℃±1℃，负荷响应速度提升20%，避免低负荷过冷却能耗浪费与高负荷冷却不足导致的出力受限。西北沙漠电站昼夜温差大（45℃/20℃），采用分时负荷匹配，白天满负荷冷却，夜间低负荷降容，日均能耗降低30%。

2.2 制冷机组与换热设备运行参数优化

制冷机组核心优化是COP值提升与运行参数调控，换热设备侧重温差匹配与结垢防控。溴化锂吸收式制冷机组以汽轮

机抽汽为热源,优化发生器蒸汽压力(0.6-0.8MPa)与溶液浓度(58%-62%),48℃环境下COP值稳定 ≥ 1.3 ,余热利用率达85%。压缩式制冷机组通过变频调节压缩机转速,冷凝温度控制在30-32℃、蒸发温度5-7℃,较定频运行能耗降低25%。换热设备定期优化清洗周期,蒸发器/冷凝器每月高压水冲洗1次,采用防结垢涂层,换热效率维持在90%以上;喷雾喷嘴采用陶瓷材质,每15天化学清洗1次,防止结垢堵塞,重庆钢铁通过喷嘴优化,雾化均匀度提升至95%,冷却效率提高8%。

2.3 基于数据监测的实时调节策略

构建多源数据监测网络,依托PLC与SCADA系统实现参数实时采集、分析与闭环调节。监测参数涵盖进气温度/湿度/压力、喷嘴压力/流量、制冷机组功耗、压气机振动/温差等,采样频率1次/秒,通过数据挖掘建立能耗与出力预测模型。进气温度波动 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 或压气机温差偏差 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 时,系统自动微调喷雾压力或制冷容量;喷嘴流量偏差超5%,触发单喷嘴清洗或更换指令。西北某电站部署实时监测系统,温度控制精度达 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$,设备故障率下降40%,年减少非计划停机损失超500万元。重庆钢铁接入气象数据联动调节,提前预判高温时段,预启动制冷机组,避免温度骤升导致的出力波动(见图1)。

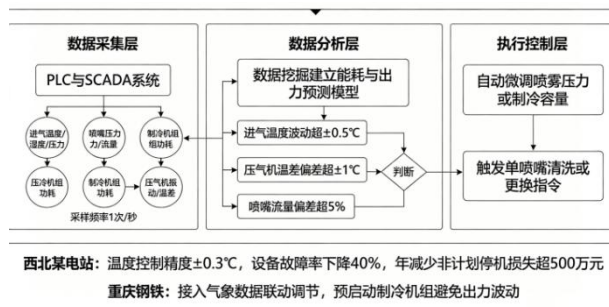


图1 基于数据监测的实时调节策略

3 燃气轮机进气冷却系统维护策略

(1) 关键设备定期维护体系: 建立分级定期维护机制, 核心设备执行“日巡检、周保养、月检修、年大修”制度。高压泵站每日检查泵体振动、压力稳定性及密封泄漏, 陶瓷活塞每5000小时更换, 不锈钢高压管每季度检测壁厚; 喷雾矩阵

每周检查喷嘴雾化状态, 堵塞或磨损(流量偏差 $\geq 5\%$)立即更换, 框架紧固件每月紧固一次。换热设备每月化学清洗除垢, 采用防结垢涂层维持换热效率, 每年拆解检查管束腐蚀情况, 重庆钢铁将喷嘴维护周期优化为15天, 设备故障率下降35%。疏水系统每日清理滤网, 每月检查逆止阀灵活性, 防止卡涩引发空气倒吸, 疏水管道每年做防腐处理, 保障运行稳定。

(2) 传感器与执行机构校准维护: 传感器与执行机构精度直接影响调节可靠性, 实施“定期校准、故障预警、及时更换”策略^[3]。温度、湿度、压力传感器每3个月校准1次, 采用标准气体或恒温槽比对, 误差超 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.5\%\text{RH}$ 立即更换; 流量传感器每季度校验, 确保测量精度达 $\pm 1\%$ 。PLC模块与执行机构(电磁阀、调节阀)每半年功能测试, 电磁阀动作响应时间 ≤ 2 秒, 调节阀开度偏差 $\leq \pm 1\%$ 。重庆钢铁建立传感器台账, 定期校准后数据准确率达99.5%, 避免因参数失真导致的调节失误。

(3) 故障预警与应急处理机制: 基于运行数据构建故障预警模型, 识别喷嘴堵塞、泵体故障、换热结垢、传感器异常等典型故障特征, 提前72小时预警。喷嘴堵塞预警依托流量压力曲线畸变判定, 泵体故障预警通过振动频谱分析识别, 换热结垢预警由进出口温差异常判断。制定分级应急预案: 一般故障(单喷嘴堵塞、传感器漂移)在线处理, 不停机完成更换或校准; 重大故障(泵体泄漏、制冷机组停机)立即降负荷, 切换备用设备排查修复; 极端故障(压气机进水、结冰)紧急停机, 切断水源, 排水解冻并检查叶片损伤。西北某电站应用预警系统后, 故障处理时间缩短50%, 非计划停机次数减少60%。

4 结语

燃气轮机进气冷却系统高效运行是保障机组出力与经济性的核心, 运行特性受环境参数、设备性能等多因素耦合影响, 优化与维护工作需兼顾科学性与实用性。本文提出的负荷自适应匹配、制冷参数调控、实时监测调节等优化方法, 可有效提升系统冷却效率、降低能耗; 建立的分级维护、传感器校准及故障预警机制, 能显著减少设备故障与非计划停机损失。工程实例验证显示, 相关优化与维护措施切实可行, 可实现机组“出力提升-能耗控制-寿命延长”的平衡。

参考文献:

- [1] 王辉, 张佳伟, 李保毅, 等. 不同气象条件下的燃气轮机进气系统热管理研究进展[J]. 内燃机与配件, 2025, (13): 61-64.
- [2] 张朝宇. 燃气轮机进气喷雾冷却数值模拟与参数优化研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2025.
- [3] 赵河山, 徐海波, 安维峥, 等. 海上平台燃气轮机发电机组进气冷却技术应用研究[J]. 制冷与空调, 2025, 25(02): 11-15.