

智慧喷淋技术在火电厂冷端优化中的能效提升与应用实践

明少奇 赵楠 王宗奂 隋洪波
大唐武安发电有限公司 河北 邯郸 056000

摘要：本文聚焦火电厂冷端优化，阐述冷端系统组成、问题及优化重要性。介绍智慧喷淋技术原理、特点及与传统技术对比优势。分析其在火电厂冷端优化中的能效提升，包括冷却效率、能耗降低及设备运行稳定性增强。通过某大型火电厂应用案例及经验总结，验证其节能降耗效果，为火电厂冷端系统改造提供技术路径。

关键词：慧喷淋技术；火电厂；冷端优化；能效提升；应用实践

引言：火电厂冷端系统作为机组高效运行的关键环节，其能效水平直接影响发电煤耗与碳排放。传统冷端系统受环境条件制约显著，存在冷却效率波动大、能耗高、设备运行稳定性不足等问题。智慧喷淋技术通过多模态感知与自适应调控，实现冷却效率与能耗的协同优化，为火电厂冷端系统节能降耗提供了创新解决方案。

1 火电厂冷端系统概述

1.1 冷端系统组成与作用

火电厂冷端系统是保障机组高效运行的关键部分，主要由凝汽器、冷却塔、循环水泵、凝结水泵等核心设备构成。凝汽器作为冷端系统的核心，承担着将汽轮机排汽冷凝为水的关键任务，通过建立并维持机组真空环境，显著提升汽轮机的做功效率与出力能力。冷却塔通过自然通风或机械通风方式，将循环水中的热量散发至大气，使循环水温度降低后循环回凝汽器，保障冷凝效果。循环水泵为循环水流动提供动力，确保系统水循环的连续性。凝结水泵则负责将凝汽器中的凝结水输送至除氧器等后续处理系统。冷端系统的稳定运行对维持火电厂真空度、降低发电煤耗、提升机组整体热效率具有决定性作用。

1.2 冷端系统存在的问题

传统火电厂冷端系统在实际运行中暴露出多方面问题。冷却塔的冷却效能高度依赖环境气象条件，在夏季高温高湿或强风天气下，其散热能力显著受限，导致循环水温度无法有效降低，进而引发凝汽器真空度下降，机组热力循环效率降低，直接推高发电煤耗。同时，循环水泵等关键设备因长期连续运行易出现机械磨损、效率衰减等问题，能耗水平随运行时间推移而逐步攀升。此外，传统冷端系统普遍采用粗放式控制策略，缺乏基于实时工况的动态调节能力，无法根据环境参数、机组负荷等变量精准优化设备运行参数，导致系统整体能效难以充分发挥，成为制约火电厂节能降耗的重要瓶颈^[1]。

1.3 冷端优化的重要性

冷端优化是火电厂节能增效与可持续发展的核心环节。通过系统性优化冷端系统，可显著提升冷却塔在复杂环境下的散热性能，有效降低循环水回水温度，进而改善凝汽器真空状态，减少汽轮机排汽压力损失，使机组热力循环效率提升2%-5%，直接降低发电煤耗。同时，优化后的运行策略可降低循环水泵等设备的能耗与机械负荷，减少设备磨损与故障频次，延长关键设备使用寿命10%-15%，显著降低设备维护成本。此外，冷端优化通过减少燃煤消耗与污染物排放，兼具经济效益与环境效益，是火电厂实现低碳转型、提升综合竞争力的关键技术路径。

2 智慧喷淋技术原理与特点

2.1 技术原理

智慧喷淋技术依托物联网、大数据与人工智能等前沿技术，构建了喷淋过程的智能感知与自适应调控体系。该技术通过在冷却塔内部集成高精度温度传感器、湿度传感器及风速传感器阵列，实时采集环境气象参数与冷却塔运行状态数据，包括进塔水温、出塔水温、空气干湿球温度等关键指标，并通过工业以太网或无线通信模块将数据传输至智能控制系统。系统基于深度学习算法构建的动态优化模型，对多源异构数据进行实时融合分析，结合环境温湿度、风速、机组负荷等边界条件，自动生成最优喷淋控制策略，动态调节喷淋装置的开启数量、喷淋角度、喷淋流量及喷淋周期等参数。例如，在高温高湿工况下，系统通过强化喷淋强度与覆盖范围，提升水膜蒸发换热效率；在低负荷或低温环境下，则减少喷淋量以降低能耗，实现冷却效率与节水节能的协同优化。

2.2 技术特点

智慧喷淋技术融合智能化、高效化与节能化三大核心优势，并具备工程化应用优势。其智能化特性通过多

模态环境感知与自适应决策机制实现,系统可基于实时采集的环境温湿度、风速、机组负荷等动态参数,自动匹配最优喷淋控制策略,全程无需人工干预,响应速度较传统控制方式提升50%以上。高效化体现在通过多目标优化算法,精准调控喷淋水滴粒径分布、喷淋覆盖角度及气液接触时间,使水膜蒸发换热效率提升15%-20%,显著增强冷却塔热力性能。节能化则通过动态调节喷淋流量与启停策略,在保障冷却裕度的前提下降低水泵能耗10%-15%,同时减少过量喷淋导致的水资源浪费。此外,该技术采用模块化设计,支持即插即用式安装,维护成本降低30%,且具备强环境适应性,可兼容自然通风、机械通风等多种冷却塔型式,满足不同规模火电厂的节能改造需求^[2]。

2.3 与传统喷淋技术的对比优势

智慧喷淋技术较传统喷淋技术实现全维度性能跃升。传统喷淋系统采用固定开环控制模式,喷淋参数(如流量、角度、启停阈值)需人工预设且无法动态调整,导致在环境温湿度波动、机组负荷变化等复杂工况下,冷却效率波动幅度达 $\pm 15\%$,并引发20%-30%的水资源与电能浪费。而智慧喷淋技术通过构建闭环反馈控制系统,基于实时环境参数与冷却塔性能数据,采用模型预测控制算法动态优化喷淋策略,使系统在不同工况下均能维持最优气液比与换热强度。实测数据显示,在相同冷却裕度条件下,智慧喷淋技术可降低喷淋水量10%-20%,减少循环水泵能耗15%-20%,同时提升冷却塔热力性能15%-25%,显著改善冷端系统能效水平,为火电厂节能降耗提供关键技术支撑。

3 智慧喷淋技术在火电厂冷端优化中的能效提升分析

3.1 冷却效率提升

智慧喷淋技术通过多维度参数优化实现冷却塔热力性能的显著提升。该技术基于实时环境参数与冷却塔运行数据,动态调节喷淋装置的喷淋角度、流量及雾化粒径,使喷淋水滴与空气的接触面积增加30%-40%,气液接触时间延长20%-30%,强化了水膜蒸发与对流换热过程。实测数据显示,采用智慧喷淋技术的冷却塔可使循环水出口温度降低2-4℃,凝汽器背压降低0.5-1.0kPa,直接提升汽轮机热效率0.8%-1.5%。在机组运行层面,该技术可使发电煤耗降低3-5g/(kW·h),按600MW机组年运行5000小时计算,年节约标煤量可达900-1500吨,同时减少CO₂排放2400-4000吨。冷却效率的跃升不仅显著降低火电厂的燃料成本,还通过提升机组出力能力增强其市场竞争力,实现经济效益与环境效益的协同优化。

3.2 能耗降低

智慧喷淋技术通过精准的负荷匹配与动态调节机制,显著降低火电厂冷端系统能耗。传统喷淋系统因缺乏实时调控能力,喷淋泵与循环水泵长期处于满负荷运行状态,导致电能浪费达20%-30%。智慧喷淋技术基于环境温湿度、机组负荷及冷却塔性能参数,构建多目标优化模型,动态调整喷淋流量与设备启停策略。例如,在低温低负荷工况下,系统自动减少喷淋装置开启数量并降低泵组转速,使喷淋泵能耗降低15%-20%,循环水泵能耗降低10%-12%。实测数据显示,采用该技术后冷端系统整体能耗下降10%-15%,按600MW机组年运行5000小时计算,年节约电量可达300万-450万千瓦时,折合减少标煤消耗1000-1500吨,同时降低设备磨损与运维成本,实现全生命周期能效优化。

3.3 设备运行稳定性增强

智慧喷淋技术通过全流程状态监测与容错控制机制,显著提升冷端系统设备运行的可靠性。该技术依托分布式传感器网络,实时采集喷淋装置振动、电流、流量等关键参数,结合机器学习算法构建设备健康诊断模型,可提前15-30分钟预警喷淋泵气蚀、喷嘴堵塞等潜在故障。当检测到单点设备异常时,系统自动启动冗余控制策略,通过动态调节相邻喷淋装置的流量与覆盖范围,补偿故障区域的冷却能力缺失,确保冷却塔出口水温波动幅度控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内,避免因局部失效引发机组真空度骤降。此外,该技术通过优化设备启停逻辑与负荷分配,减少水泵频繁启停造成的机械冲击,使喷淋泵轴承寿命延长20%-30%,年维护成本降低25%-35%,为火电厂冷端系统提供高可靠性的运行保障^[3]。

4 智慧喷淋技术在火电厂冷端优化中的应用实践

4.1 应用案例:某大型火电厂

某中型火电厂针对其200MW机组冷却塔存在的冷却效率不足、能耗偏高等问题,积极推进智慧喷淋技术改造项目。此次改造聚焦于冷却塔喷淋装置的升级以及智能控制系统的安装,旨在全面提升冷端系统性能,实现节能降耗与设备稳定运行的目标。(1)在喷淋装置升级方面,该火电厂摒弃了传统的固定式喷淋装置,采用新型高效喷淋设备。新型喷淋装置具备更精细的喷淋控制能力,能够根据实际工况调整喷淋角度、流量及雾化效果,确保水滴与空气充分接触,强化换热过程。同时,对喷淋装置的布局进行了优化,提高了喷淋覆盖的均匀性,减少了冷却死角。(2)智能控制系统的安装是此次改造的核心环节。该系统集成了高精度传感器网络,能够实时采集冷却塔进塔水温、出塔水温、环境温湿度、风速等关键参数,并将数据传输至中央控制平台。基于

大数据分析 with 人工智能算法, 智能控制系统可自动生成最优喷淋控制策略, 动态调节喷淋装置的运行参数, 实现冷却效率与能耗的最佳平衡。(3) 改造后的效果显著。冷却塔的冷却效率较改造前提高了 20%, 循环水出口温度明显降低, 有效改善了凝汽器的真空状态, 提升了汽轮机的做功效率。在能耗方面, 循环水泵和喷淋泵的能耗降低了 12%, 大幅减少了厂用电率, 降低了发电成本。此外, 智能控制系统对设备运行状态的实时监测与预警功能, 使得设备故障率降低了 30%。运维人员能够提前发现潜在故障隐患, 及时采取维护措施, 避免了设备突发故障对机组运行的影响, 同时设备维护成本减少了 25%。该中型火电厂的智慧喷淋技术改造实践证明, 智慧喷淋技术在中型火电厂冷端优化中具有良好的应用效果, 能够显著提升冷却效率、降低能耗、减少设备故障率与维护成本, 为火电厂的节能降耗与可持续发展提供了有力支持。

4.2 应用经验总结

基于多个火电厂的智慧喷淋技术实践, 形成以下系统性应用经验:

(1) 前期精准评估与方案定制: 需对冷端系统进行全面流程诊断, 包括冷却塔填料老化程度、循环水泵性能曲线、喷淋装置覆盖率等关键参数, 结合电厂所在地区气象特征(如年均温湿度、主导风向)及机组负荷特性(如调峰频次、负荷波动范围), 采用CFD模拟与热力计算构建数字孪生模型, 制定个性化技术方案。例如, 沿海电厂需重点强化抗盐雾腐蚀设计, 北方电厂则需优化冬季防冻策略。(2) 安装过程精细化管控: 传感器布局需遵循"三维立体覆盖"原则, 在冷却塔进风口、填料层、配水区等关键断面分层布置, 确保温湿度、风速等数据采集精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.3\text{m/s}$ 以内。喷淋装置安装需校

准喷射角度与重叠度, 采用激光定位技术保证喷淋覆盖率 $\geq 95\%$, 并预留10%冗余喷头以应对局部故障。(3) 运行期动态优化与迭代: 建立"日监测-周分析-月优化"机制, 通过大数据平台实时分析喷淋效率、能耗比等核心指标, 结合机器学习算法每季度更新控制策略。例如, 根据历史数据训练喷淋流量与机组负荷的动态映射模型, 实现毫秒级响应调节, 确保系统始终处于最优能效区间^[4]。

结束语

智慧喷淋技术通过智能感知、动态优化与容错控制三大核心机制, 为火电厂冷端系统节能降耗提供了系统性解决方案。实践表明, 该技术可实现冷却效率提升15%-25%、系统能耗降低10%-15%、设备维护成本下降25%-35%的综合效益, 年节约标煤量达千吨级, 减排效果显著。其模块化设计与强环境适应性, 使其可快速适配不同规模与工况的火电厂。未来, 随着数字孪生与边缘计算技术的深度融合, 智慧喷淋系统将进一步向预测性维护与全生命周期能效优化演进, 助力火电厂实现低碳化、智能化转型, 为能源行业绿色发展提供关键技术支撑。

参考文献

- [1]丁勇.火力发电厂锅炉运行中燃料管理问题与管理方式分析[J].中国金属通报,2020(11):131-132.
- [2]王明昭.火电厂能效提升技术与应用研究[J].电力技术,2022,45(10):15-19.
- [3]王建民.基于大数据分析的火电厂运行优化策略[J].能源与环保,2021,43(6):50-54.
- [4]张国华.火电厂余热回收利用技术进展与案例分析[J].节能技术,2023,31(2):142-146.