

火力发电冷端系统智慧喷淋优化策略研究与应用

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

摘要：本论文聚焦火力发电冷端系统智慧喷淋优化策略，深入剖析冷端系统运行现状与喷淋技术存在的问题，结合智能控制、数据监测等先进技术，研究并提出一系列智慧喷淋优化策略。通过实际案例分析，展示优化策略在提升系统效率、降低能耗、保障设备稳定运行等方面的显著成效，为火力发电行业冷端系统的优化升级提供理论与实践参考。

关键词：火力发电；冷端系统；智慧喷淋；优化策略；应用实践

引言

在能源需求持续增长与节能减排要求日益严格的双重背景下，火力发电作为我国电力供应的重要支柱，其能效提升与绿色发展至关重要。冷端系统作为火力发电过程中的关键环节，直接影响机组的热效率与运行经济性，而喷淋技术在冷端系统的冷却散热中发挥着重要作用。传统喷淋方式存在控制粗放、能耗高、适应性差等问题，难以满足当前高效、节能、智能化的发电需求。因此，开展火力发电冷端系统智慧喷淋优化策略的研究与应用，对提升火力发电效率、降低运营成本、推动行业可持续发展具有重要意义。

1 火力发电冷端系统及喷淋技术概述

火力发电冷端系统主要由凝汽器、冷却塔、循环水泵等设备组成，其核心功能是将汽轮机排出的乏汽冷凝成水，维持机组真空，保证热力循环的连续进行。喷淋技术通过向冷却介质（如空气、水）喷洒水滴，增加换热面积，强化热交换过程，是冷端系统实现高效冷却的重要手段。在实际应用中，传统喷淋系统通常采用定时或定流量的控制方式，根据经验设定喷淋时间与水量。例如，一些小型火电厂在冷却塔喷淋运行时，无论环境温度、机组负荷如何变化，均按照固定的喷淋时长和流量工作，这种方式虽然操作简单，但无法根据实际工况动态调整，导致在低负荷或低温环境下，存在水资源浪费、能耗增加等问题，同时也影响了冷却效果和设备的运行稳定性^[1]。

2 冷端系统喷淋技术存在的问题分析

2.1 控制方式缺乏灵活性

传统喷淋系统依赖人工经验与简单定时装置设定运行参数。运行人员依据过往经验设定喷淋时间与流量，此类控制方式难以适应复杂多变的环境与机组工况。火力发电厂所处地域不同，气象条件差异显著，即便同

一地区，昼夜温差、瞬时风速风向变化也会影响冷却需求。机组运行时，负荷在电网调度下频繁调整，从低负荷调峰到满负荷发电，排汽量与热量释放差异极大。以北方某火电厂为例，夏季午后环境温度超35℃且伴有强风，此时机组若处于高负荷运行，冷却需求剧增，但因传统喷淋系统无法实时感知环境温度与风速变化，喷淋量未及时增加，导致凝汽器真空度下降，机组热效率降低，发电煤耗上升。夜间气温骤降至20℃，机组负荷降低，喷淋系统仍按原设定运行，大量水资源被浪费，水泵持续高负荷运转，增加不必要的电能消耗。

2.2 能耗与水资源浪费严重

控制不精准致使喷淋系统过度运行，造成能耗与水资源浪费。循环水泵、喷淋泵等设备长时间维持高功率运转，即便在冷却需求较低时，也难以降低运行强度。喷淋过程中，大量水未充分参与热交换便流失。部分水在喷头喷出后，因雾化效果差、风力作用等因素，直接飞溅出冷却塔范围；部分水在与空气短暂接触后，未经充分热交换便因蒸发散失。南方某沿海火电厂数据显示，因喷淋系统不合理运行，每年水资源浪费量达3.2万吨。在设备能耗方面，循环水泵与喷淋泵每年多消耗电能约80万千瓦时，增加运营成本超50万元。这不仅造成资源浪费，还增加了电厂污水处理与能源供应压力，影响企业经济效益与可持续发展能力。

2.3 设备维护难度大

传统喷淋系统设备长期处于复杂运行环境，维护面临诸多难题。水质对喷头、管道影响显著，若循环水未经严格处理，含有大量杂质、钙镁离子等，运行一段时间后，喷头与管道易出现结垢、堵塞现象。工业环境中的腐蚀性气体、液体，会侵蚀管道与喷头金属材质，导致管壁变薄、喷头损坏。实际运行中，缺乏有效监测手段，难以察觉设备早期故障。某中型火电厂曾因喷头堵

塞未及时发现,导致局部冷却效果下降,凝汽器局部温度异常升高,虽未立即引发严重事故,但造成机组运行不稳定,增加了后续检修难度与成本。设备故障被动维修,不仅打乱正常生产计划,还可能因维修不及时,引发其他设备连锁故障,威胁冷端系统整体安全稳定运行^[2]。

2.4 缺乏系统协同优化

冷端系统各设备紧密相连,而传统喷淋技术未充分考虑协同配合。喷淋量变化直接影响循环水温度与流量,进而影响凝汽器换热效率。当喷淋量增加,循环水温度降低,但流量可能因管道阻力变化而改变,若凝汽器与循环水泵运行参数未相应调整,会导致凝汽器换热效率无法达到最优。在机组负荷调整时,喷淋系统、循环水泵与凝汽器未实现联动优化。机组降负荷运行,排汽量减少,喷淋系统若不降低喷淋量,循环水温度过低,会影响凝汽器内部汽水换热平衡;循环水泵若不降低流量,会造成能源浪费与设备磨损。各设备运行参数独立设定,缺乏整体优化,使得冷端系统难以在不同工况下均达到最佳运行状态,限制了发电效率提升与能耗降低。

3 火力发电冷端系统智慧喷淋优化策略

3.1 智能监测与动态控制策略

(1) 传统喷淋系统依赖人工经验设定运行参数,难以应对复杂多变的工况。智能监测与动态控制策略通过部署多类型传感器,构建实时数据采集网络。在环境参数监测方面,于冷却塔周边安装高精度温湿度传感器、风速风向仪。这些设备以分钟级频率采集环境数据,其中温度传感器精度可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,湿度传感器误差范围控制在 $\pm 3\%\text{RH}$,风速风向仪可实时捕捉 $0\sim 60\text{m/s}$ 的风速变化及 360° 风向信息。(2) 机组运行参数监测则涉及多个关键节点。在汽轮机排汽口安装压力传感器与温度传感器,实时获取排汽压力与温度数据;在凝汽器进出口布置流量传感器与温度传感器,精确监测循环水流量与温度;通过真空传感器实时反馈凝汽器真空度。这些传感器采集的数据通过工业以太网或无线传输模块,以毫秒级延迟传输至数据处理中心。(3) 数据处理中心采用大数据分析平台,整合环境与机组运行数据。利用机器学习算法中的回归分析模型,建立环境参数、机组负荷与冷却需求之间的量化关系。以某百万千瓦火电机组为例,通过对历史运行数据的学习,模型可准确预测不同工况下的最佳喷淋量与喷淋频率。当监测到环境温度从 25°C 升至 35°C ,且机组负荷从60%提升至90%时,系统依据模型计算,自动将喷淋量从 $1200\text{m}^3/\text{h}$ 提升至 $1800\text{m}^3/\text{h}$,喷淋频率由每分钟1次增加至每分钟1.5次,使凝汽器真空度稳定

维持在 -92kPa 至 -95kPa 区间,较传统控制方式提升热效率约 1.2% ^[3]。

3.2 能耗与水资源优化策略

(1) 能耗与水资源优化策略从设备改造、系统优化及资源回收三方面入手。在设备改造上,对循环水泵与喷淋泵实施变频调速技术改造。以某60万千瓦机组为例,原循环水泵电机功率 800kW ,采用变频调速装置后,在低负荷工况下,电机转速可从额定 1480r/min 降至 1000r/min 左右,功率消耗从 650kW 降低至 300kW ,年节约电量约300万千瓦时。(2) 喷淋系统管路设计优化注重流体力学原理的应用。通过调整管道走向与管径,减少弯头数量与局部阻力,使循环水流动阻力降低约 $15\%\sim 20\%$ 。喷头选型方面,采用新型雾化喷头替代传统实心锥喷头。新型喷头在相同流量下,水滴平均粒径从 $500\mu\text{m}$ 减小至 $150\mu\text{m}$,雾化角从 90° 扩展至 120° ,有效增大了气水接触面积,提升换热效率 $10\%\sim 15\%$,从而使喷淋水使用量减少 $15\%\sim 20\%$ 。(3) 水资源回收再利用系统包含收集、处理与回用环节。在冷却塔底部设置集水池,收集喷淋过程中的溢流水与冷凝水。经初步沉淀后,水流进入处理系统,依次经过过滤、消毒与软化处理。处理后的水质达到循环水补水标准后,重新回用于喷淋系统。某沿海火电厂实施该系统后,年回收水量达2.8万吨,相当于减少18%的新鲜水取用量。

3.3 设备智能维护策略

(1) 设备智能维护策略基于状态监测与故障预测技术。在喷淋系统关键设备上密集部署传感器:在喷头处安装压力传感器,监测喷头内部压力变化;在管道外壁粘贴应变片传感器,监测管道应力分布;在水泵轴承座位置安装振动传感器与温度传感器,实时采集振动加速度与温度数据。这些传感器采集的数据通过边缘计算设备进行初步处理,提取特征参数后,利用5G网络上传至云端服务器。(2) 云端服务器采用深度学习故障诊断算法,对设备运行数据进行分析。以喷头堵塞故障预测为例,通过对正常运行与堵塞状态下的压力数据进行对比学习,建立故障特征模型。当压力传感器监测到的压力波动幅度超出正常范围 30% ,且持续时间超过10分钟时,系统判定喷头存在堵塞风险,立即发出预警,并生成包含故障位置、严重程度及处理建议的工单推送至维护人员手机端。(3) 某火电厂应用该策略后,设备故障提前预警准确率达 90% 以上,预防性维护使设备平均故障间隔时间从3000小时延长至5000小时,单次故障维修成本降低约 40% ,有效减少了设备非计划停机时间,保障了冷端系统稳定运行^[4]。

3.4 系统协同优化策略

(1) 系统协同优化策略以构建一体化控制平台为核心。该平台通过工业通信协议(如Modbus TCP、OPC UA)实现喷淋系统、凝汽器与循环水泵等设备的信息互联互通。平台采集各设备运行参数,包括喷淋量、循环水流量、凝汽器真空度、排汽压力等,存储于实时数据库中。(2) 控制算法层面,采用模型预测控制(MPC)算法。该算法基于冷端系统动态模型,对未来一段时间内的工况变化进行预测,并计算出各设备的最优运行参数组合。以机组负荷变化为例,当机组负荷从80%降至50%时,模型预测控制算法根据排汽量减少趋势,协同调整喷淋量、循环水泵流量与凝汽器冷却水量。将喷淋量从1500m³/h降至1000m³/h,循环水泵流量从8000m³/h降至5000m³/h,同时优化凝汽器冷却水管束的阀门开度,使凝汽器真空度稳定在-90kPa左右,较传统独立控制方式降低发电煤耗约1.5g/kWh。

3.5 多场景适应性优化策略

(1) 多场景适应性优化策略针对不同季节、天气与机组工况制定差异化方案。夏季高温时段,系统自动切换至强化冷却模式,将喷淋量提升至最大设计值的110%-120%,并启动备用喷淋管路,同时增加喷淋频率。通过实时监测环境温度与机组负荷,动态调整冷却塔风机转速,确保冷却塔出口空气温度与环境温度差值维持在5-8℃,保障机组在高温环境下安全稳定运行。(2) 冬季低温时段,系统采用防冻优先策略。当环境温度降至5℃以下时,启动管道伴热装置,维持管道内水温在8-10℃。同时,根据环境温度与循环水温度,精确控制喷淋量,避免因喷淋过量导致结冰。当环境温度低于0℃时,停止

非必要区域喷淋,采用间断喷淋模式,确保设备不发生冻损。(3) 针对机组调峰、启停等特殊工况,系统预设专用运行模式。机组调峰过程中,根据负荷变化速率,提前调整喷淋系统运行参数,避免因负荷波动导致凝汽器真空度大幅变化。在机组启动阶段,优先启动辅助冷却设备,待机组负荷稳定后,再逐步切换至正常喷淋模式;机组停机过程中,按顺序关闭喷淋设备,防止水锤效应损坏管道与设备^[5]。

结语

火力发电冷端系统智慧喷淋优化策略通过智能监测、动态控制、系统协同等手段,切实解决了传统喷淋技术的弊端。实际应用数据表明,该策略有效提升了冷端系统运行效率,降低能耗与水资源浪费,延长设备使用寿命。在保障机组稳定运行的同时,也为企业带来显著的经济效益与社会效益。随着智能技术持续进步,冷端系统智慧喷淋技术将不断迭代升级,为火力发电行业绿色低碳转型和“双碳”目标实现注入更强动能。

参考文献

- [1]陈录,齐全友,吴扬扬,等.智慧电厂建设与智能发电技术应用探讨[J].科技创新与应用,2021,11(23):174-176.
- [2]尚文静.智慧电厂建设管理平台的设计与思考[J].中国新通信,2022,24(13):28-30.
- [3]张洪莉.关于水电厂智慧电厂建设的思考[J].广西电力,2020,(3):30-32.
- [4]周士博,庞凯元,张宝琴.火电机组汽轮机冷端系统优化改造技术分析[J].仪器仪表用户,2024,31(5):77-79.
- [5]王奉霆.火力发电厂汽轮机冷端系统优化分析[J].建筑工程技术与设计,2020(12):3665-3666.