

火力发电汽轮机供水冷却技术改进与效果评估

庞驰宸 张 锐

黄陵矿业沮源发电有限公司 陕西 延安 727307

摘 要：火力发电汽轮机供水冷却技术对机组运行至关重要。当前该技术存在冷却效率不足、水资源利用不合理、能源消耗过高等问题。本文提出改进措施，包括冷却塔与凝汽器结构优化、水资源节约循环利用、能源效率提升等方面。通过建立多维度评估指标体系，采用综合评估与对比分析等方法，对改进效果进行科学评估。结果表明，改进技术可提升冷却效率、节约水资源、降低能源消耗，具有显著的经济效益与安全效益，为火力发电汽轮机冷却技术优化提供参考。

关键词：火力发电；汽轮机；冷却技术；节水节能；效果评估

引言：火力发电中，汽轮机供水冷却系统是保障机组安全稳定运行的关键。其运行状况直接影响汽轮机排汽压力与效率，关乎机组整体发电效率。然而，现有供水冷却技术存在诸多问题，如冷却效率受环境等因素制约、水资源利用不合理且浪费严重、能源消耗过高增加运行成本等。这些问题在水资源匮乏地区更为突出，制约了火力发电的可持续发展。因此研究火力发电汽轮机供水冷却技术改进措施并评估其效果具有重要的现实意义。

1 火力发电汽轮机供水冷却技术概述

1.1 汽轮机供水冷却系统组成与工作原理

火力发电汽轮机供水冷却系统是保障汽轮机安全稳定运行的核心辅助系统，主要由凝汽器、冷却塔、循环水泵、供回水管路及水质处理装置等核心部件组成，各组件协同运作形成完整的冷却循环。其工作原理以热量交换为核心，循环水泵将冷却水源（地表水、地下水或再生水）输送至凝汽器，与汽轮机排出的高温乏汽进行间接换热，高温乏汽冷却凝结为水后回收至锅炉循环利用，吸收热量后的冷却水则被输送至冷却塔，通过蒸发散热、对流散热等方式释放热量，温度降至合理范围后重新进入循环系统，实现冷却介质的重复利用^[1]。该系统的运行稳定性直接决定汽轮机的排汽压力与效率，是火力发电机组高效运转的重要保障，同时需根据机组容量、地域气候及水资源条件优化系统配置。

1.2 供水冷却技术对汽轮机运行的影响

供水冷却技术对汽轮机运行的安全性、经济性 & 稳定性具有决定性影响，其技术水平直接关联机组整体发电效率。从运行效率来看，冷却技术的优劣决定凝汽器真空度，若冷却效果不佳，汽轮机排汽压力升高，会导致机组热耗率上升，发电煤耗增加，据测算，冷却水温每升高1℃，机组效率约下降0.1%~0.2%。从运行安

全来看，冷却系统故障或冷却效果不足，会使汽轮机内部部件温度异常升高，加速转子、叶片等关键部件的磨损与老化，严重时引发机组跳闸停机，造成生产损失。同时，冷却水质处理技术不到位，会导致凝汽器管道结垢、腐蚀，降低换热效率的同时缩短设备使用寿命，增加维护成本。不同冷却技术适配性存在差异，如湿式冷却受地域湿度、温度影响较大，干式冷却则受风速等气象条件制约，适配不当会影响汽轮机运行稳定性，因此需结合实际工况选择适宜的冷却技术及参数。

2 火力发电汽轮机现有供水冷却技术存在的问题分析

2.1 冷却效率问题

当前火力发电汽轮机现有供水冷却技术普遍存在冷却效率不足的问题，且受多种因素制约难以实现高效换热。传统湿式冷却塔采用自然通风蒸发冷却方式，冷却效率易受环境温度、湿度影响，夏季高温高湿天气下，冷却塔散热能力下降，导致冷却后水温偏高，无法满足凝汽器高效换热需求，进而降低汽轮机真空度。部分老旧机组的凝汽器设计参数落后，换热面积不足、管板布局不合理，加之长期运行后管道结垢、腐蚀，进一步削弱换热效果，使冷却效率逐年下降。干式冷却系统虽无需依赖水资源，但换热系数较低，冷却效率远低于湿式冷却，且在低负荷运行时易出现冷却不均问题。冷却系统与汽轮机机组的匹配度不足，部分机组为追求产能盲目调整运行参数，导致冷却系统负荷超出设计范围，冷却介质流量、温度控制精度不足，形成“冷却滞后”现象，无法及时带走汽轮机排出的热量，严重影响机组运行效率与冷却效果^[2]。

2.2 水资源利用问题

水资源利用不合理、浪费及适配性不足是现有供水冷却技术面临的核心问题之一，尤其在水资源匮乏地

区矛盾更为突出。传统湿式冷却技术需消耗大量水资源，每百万千瓦机组每小时耗水量可达数千吨，其中大部分水资源通过蒸发、风吹损失，水资源利用率仅为60%~70%。部分电厂未建立完善的水资源循环利用系统，冷却废水直接排放，既造成水资源浪费，又可能对周边水环境造成污染。同时，部分电厂对冷却水源选择单一，过度依赖地下水或地表水，未充分利用再生水、海水等替代水源，在水资源管控趋严的背景下，易面临供水不足风险。水质处理技术不完善，部分电厂仅采用简单的过滤、杀菌处理，无法有效去除水中杂质、硬度成分，导致冷却系统结垢、腐蚀，不仅影响冷却效果，还间接增加水资源消耗，形成“浪费-损耗”恶性循环。

2.3 能源消耗问题

现有供水冷却技术存在显著的能源消耗过高问题，增加了火力发电机组的整体能耗与运行成本。循环水泵作为冷却系统的核心动力设备，传统机组多采用定速运行模式，无论汽轮机负荷高低，水泵均维持额定转速运转，造成大量电能浪费，尤其在机组低负荷工况下，能源浪费现象更为严重。冷却塔风机也存在类似问题，多数采用工频控制，无法根据环境温度、冷却需求动态调整转速，导致风机能耗居高不下。另外，部分冷却系统辅助设备老化，如水泵密封件磨损、风机叶片变形等，不仅降低设备运行效率，还进一步增加能源消耗。干式冷却系统虽节水，但需配备大型换热设备与驱动装置，自身能耗远高于湿式冷却系统，且在冬季低温环境下，需额外消耗能源防止换热管道冻裂，综合能源消耗优势不明显，制约了其推广应用。

3 火力发电汽轮机供水冷却技术改进措施

3.1 冷却塔改进技术

针对冷却塔冷却效率不足、能耗偏高的问题，可从结构优化与技术升级两方面着手改进。对于湿式冷却塔，采用高效填料替代传统填料是关键举措。新型高效填料具有比表面积大、通风阻力小的显著特点，能大幅提升气液接触效率，增强散热效果。优化冷却塔内部气流组织也至关重要，通过调整进风口角度、增设导流装置，可有效减少气流短路现象，提高冷却均匀性。引入变频调速技术，为冷却塔风机配备变频控制器，根据环境温度、冷却水温差等参数动态调整风机转速，在满足冷却需求的同时降低能耗。对于干式冷却塔，优化换热管束结构是提升效率的重点，采用螺旋翅片管束替代光管管束，可显著提升换热系数。改进通风系统，采用高效节能风机，降低风机运行负荷。另外，采用干湿联合冷却技术，夏季高温时启用湿式冷却模式保障冷却效

率，冬季低温时切换至干式冷却模式节约水资源，兼顾了冷却效果、节水与节能需求，能适配不同工况条件。

3.2 凝汽器改进技术

凝汽器作为换热核心设备，其改进重点在于提升换热效率、减少结垢腐蚀。优化凝汽器结构设计是基础，扩大换热面积，合理调整管板布局与管束排列方式，缩短冷却介质流动路径，可增强换热效果^[1]。采用高强度、耐腐蚀的换热管材，如钛合金管、不锈钢管等替代传统碳钢管，能延长设备使用寿命，减少腐蚀损耗。引入在线清洗技术是关键，安装自动清洗装置，定期对凝汽器管道进行物理清洗或化学清洗，及时清除管道内结垢、杂质，避免换热效率下降，且无需停机即可完成清洗，保障机组连续运行。改进凝汽器真空控制系统也很重要，采用高精度压力传感器与自动调节阀门，实时监测凝汽器真空度，动态调整冷却介质流量，使凝汽器始终处于最佳运行状态。优化凝汽器排水系统，减少凝结水过冷度，提高凝结水回收利用率，能进一步提升机组整体效率。

3.3 水资源节约与循环利用技术

为解决水资源利用不合理问题，构建完善的水资源节约与循环利用体系迫在眉睫。推广再生水、海水等替代水源利用技术是重要方向。针对再生水水质特点，优化预处理工艺，采用超滤、反渗透等深度处理技术，可有效去除水中有机物、重金属等杂质，使其满足冷却用水标准。对于沿海电厂，采用海水淡化与冷却一体化技术，海水经淡化处理后部分用于冷却，冷却废水再回收用于淡化补充水，实现水资源梯级利用。建立冷却废水循环利用系统也十分必要，对冷却塔排水、凝汽器排水进行收集，经沉淀、过滤、消毒等处理后重新送入冷却系统，能提高水资源重复利用率，减少新鲜水消耗。优化水质稳定处理技术，添加高效阻垢剂、缓蚀剂，可抑制管道结垢腐蚀，减少因设备损耗导致的水资源浪费，实现节水与设备保护的双重目标。

3.4 能源效率提升技术

能源效率提升需从设备升级、智能控制两方面入手，以降低冷却系统整体能耗。对循环水泵进行节能改造是重要举措，更换为高效节能水泵，同时配备变频调速装置，根据汽轮机负荷、冷却需求动态调整水泵转速，替代传统定速运行模式，可降低水泵能耗30%-50%。优化冷却系统智能控制策略是关键，构建集中控制系统，整合温度、压力、流量等多维度监测数据，通过算法模型自动调节循环水泵转速、冷却塔风机转速及冷却介质流量，实现冷却系统与汽轮机机组的协同运行，

最大化降低能耗。对老化辅助设备更新换代也不容忽视，更换磨损密封件、变形风机叶片等部件，可提升设备运行效率，减少能源损耗。利用余热回收技术，收集冷却系统排出的低品位余热，用于厂区供暖、热水供应等，实现能源梯级利用，能进一步提升整体能源效率。

4 火力发电汽轮机供水冷却技术改进效果评估

4.1 评估指标体系建立

为科学、全面且精准地评估冷却技术改进效果，构建一个多维度、量化的评估指标体系至关重要，该体系需涵盖效率、资源、能源、经济以及安全这五大核心维度。效率指标是评估的核心内容之一，包含凝汽器真空度提升率、冷却水温差变化量、换热效率提升幅度等。凝汽器真空度提升率能直观反映改进后凝汽器的工作性能，真空度越高，说明换热效果越好；冷却水温差变化量体现了冷却系统对水温的调节能力；换热效率提升幅度则直接衡量了改进后冷却系统的换热能力是否增强。资源指标主要评估节水效果与水资源利用的合理性，涵盖水资源重复利用率、新鲜水消耗量降低率、废水排放量减少量。水资源重复利用率越高，说明水资源循环利用程度越好；新鲜水消耗量降低率和废水排放量减少量则从不同角度反映了节水成效。能源指标用于衡量节能成效，包括循环水泵能耗降低率、冷却塔风机能耗降低率、冷却系统综合能耗下降幅度。这些指标能清晰展现改进技术在降低能源消耗方面的作用。经济指标评估改进技术的经济效益，包含设备改造投资回收期、年运行成本降低额、维护费用节省量。投资回收期越短，说明经济效益越好；年运行成本降低额和维护费用节省量则体现了长期的经济优势。安全指标保障改进后系统运行的稳定性，包括设备故障发生率下降率、管道结垢腐蚀程度减轻量、机组连续运行时间延长量。各指标需明确量化标准与计算方法，结合机组实际工况设定合理基准值，以确保评估结果客观准确。

4.2 评估方法选择

结合评估指标体系的特点，选择综合评估法与对比分析法相结合的方式，能够确保评估结果全面且可靠。对比分析法通过对比改进前后各项指标的变化情况，如冷却效率、能耗、耗水量等，直观地反映改进效果。

它可分为纵向对比与横向对比。纵向对比针对同一机组改进前后的数据，能清晰看到该机组在改进后的性能提升；横向对比则是与同类型、同容量机组的冷却系统运行数据相比，这样可以排除外界因素的干扰，更准确地评估改进技术的优势与不足。综合评估法采用层次分析法确定各指标权重^[4]。根据指标的重要程度赋予不同权重，例如效率指标和安全指标对于冷却系统的运行至关重要，因此权重较高；资源指标和能源指标次之；经济指标作为补充。通过加权求和计算综合评估得分，从而量化改进效果的等级，使评估结果更具科学性和系统性。同时，结合现场测试法，对改进后的冷却系统进行长时间连续运行测试。在测试过程中，实时监测各项指标数据，收集运行参数、维护记录等资料。通过现场测试，可以验证评估结果的真实性与可靠性，发现实际运行中可能存在的问题，为后续的技术优化与推广提供有力的数据支撑，确保改进技术能够在实际应用中发挥最佳效果。

结束语

火力发电汽轮机供水冷却技术改进研究具有重要意义。通过实施冷却塔、凝汽器改进，水资源节约循环利用以及能源效率提升等一系列措施，有效解决了现有技术存在的冷却效率、水资源利用和能源消耗等方面的问题。建立的多维度评估指标体系与科学的评估方法，全面、客观地验证了改进技术的显著效果。未来，应持续优化改进技术，进一步推广应用，推动火力发电行业向节水节能、高效安全的方向发展，提升行业整体竞争力与可持续发展能力。

参考文献

- [1]徐磊.火力发电厂汽轮机运行管理及优化策略分析[J].电脑爱好者(电子刊),2023(8):1616-1617.
- [2]杨奥飞.火力发电厂汽轮机常见故障分析与检修研究[J].电力系统装备,2022(8):141-143.
- [3]邱鹏飞.火力发电厂汽轮机驱动给水泵节能分析[J].探索科学,2020(4):29-30.
- [4]周学宗.电厂集控运行中汽轮机运行优化策略探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(10):48-49.