

# 电厂循环冷却水系统优化运行与节能研究

贺雅兰

大唐陕西发电有限公司水电事业部石泉厂站 陕西 安康 725200

**摘要：**随着“双碳”战略目标的深入推进，电力行业对节能减排提出了更高要求。尽管水电站以清洁可再生能源著称，但其辅助系统如循环冷却水系统的能耗仍不可忽视。本文聚焦于水电站循环冷却水系统的运行特性与能效瓶颈，通过理论分析、现场调研与数值模拟相结合的方法，系统梳理了当前系统存在的主要问题，包括水泵选型不合理、控制策略粗放、水质管理滞后及热交换效率下降等。在此基础上，提出基于变频调速、智能控制算法、高效换热器改造及水质动态监测的综合优化方案。研究成果可为同类水电站循环冷却水系统的节能改造提供理论依据与实践参考。

**关键词：**水电站；循环冷却水系统；节能优化；变频调速；智能控制；水质管理

## 引言

水力发电作为我国重要的清洁能源形式，在国家能源结构转型中扮演着关键角色。其中，循环冷却水系统作为保障主变压器、发电机等关键设备安全稳定运行的重要辅助系统，其能耗通常占全厂厂用电的15%~25%，具有较大的节能潜力。传统水电站循环冷却水系统多采用定速水泵配合手动或简单启停控制，难以适应负荷波动和环境温度变化，导致“大马拉小车”现象普遍，能源浪费严重。此外，系统长期运行易受结垢、腐蚀、生物粘泥等问题影响，进一步降低换热效率，形成恶性循环。因此，开展循环冷却水系统的优化运行与节能研究，不仅有助于降低厂用电率、提升电站经济性，更是实现绿色低碳运行的重要举措。

## 1 水电站循环冷却水系统概述

### 1.1 系统组成与工作原理

水电站循环冷却水系统主要由以下几个部分构成：  
(1) 冷却水源：通常取自水库、尾水或专设冷却塔；  
(2) 循环水泵：提供系统所需压头与流量，是主要耗能设备；  
(3) 换热设备：包括油水冷却器、空气冷却器等，用于将主设备热量传递至冷却水；  
(4) 管道网络：连接各部件，形成闭式或开式循环回路；  
(5) 控制系统：包括阀门、传感器、PLC/DCS等，用于调节流量与温度；  
(6) 水处理装置（可选）：如加药系统、过滤器等，用于控制水质。系统工作原理为：循环水泵从水源抽取冷却水，经管道输送至各换热器，吸收主设备产生的热量后，升温的冷却水返回水源（开式系统）或经冷却塔降温后再次循环（闭式系统）。整个过程需维持稳定的流量与温差，以确保主设备在安全温度范围内运行。

### 1.2 系统运行特点

与火电、核电相比，水电站循环冷却水系统具有以下特点：  
(1) 负荷波动大：水电站常承担调峰任务，机组启停频繁，冷却需求随发电负荷剧烈变化；  
(2) 环境温度影响显著：尤其在海拔或寒带地区，冬季水温低可能导致油温过低，需采取防冻措施；  
(3) 水质条件复杂：天然水源含泥沙、藻类、微生物等，易造成管道堵塞与换热面污染；  
(4) 空间受限：地下厂房或紧凑布局限制了设备选型与改造空间<sup>[1]</sup>。这些特点决定了水电站冷却系统不能简单套用其他类型电厂的优化模式，需因地制宜制定策略。

## 2 当前系统存在的主要问题与能效瓶颈

### 2.1 水泵选型与运行不匹配

多数早期建设的水电站水泵按最大负荷设计，且采用工频定速运行。在低负荷或低温季节，实际所需流量远低于设计值，但水泵仍以额定功率运行，造成大量无效能耗。根据相似定律，水泵功率与转速立方成正比，若流量只需50%，理论上转速可降至79%，功率仅需50%左右，而实际运行中却接近满载，能效损失显著。

### 2.2 控制策略粗放

现有控制系统多依赖人工经验或简单温控启停逻辑，缺乏对多变量（如负荷、环境温度、进出水温差、油温等）的协同优化。例如，当环境温度骤降时，系统未能及时降低流量，导致油温过低，反而需启动加热装置，形成能源浪费。

### 2.3 换热效率下降

由于水质管理不到位，换热器内壁易形成水垢、生物膜或腐蚀产物，热阻增加，传热系数下降。实测数据显示，结垢厚度达0.5mm时，换热效率可降低

15%~20%，迫使系统提高流量以维持冷却效果，进一步增加泵功耗。

#### 2.4 缺乏状态监测与预测维护

系统运行数据分散，未建立统一的数据平台，难以实现故障预警与能效评估。设备往往“带病运行”，直至失效才进行维修，影响可靠性并增加运维成本。

### 3 循环冷却水系统优化运行与节能技术路径

针对上述问题，本文提出“三位一体”的综合优化框架：设备层升级+控制层智能+管理层精细。

#### 3.1 设备层：高效水泵与换热器改造

##### 3.1.1 水泵变频调速技术深化应用

传统定速运行模式下，水泵始终以额定工况输出，难以适应水电站因调峰调度带来的负荷剧烈波动，导致大量能源在低需求时段被无效消耗。变频调速技术通过调节电机转速，使流量输出与实时冷却需求精准匹配，从而显著降低功耗。依据流体力学中的相似定律，水泵轴功率与转速呈立方关系，这意味着当实际所需流量仅为设计值的70%时，理论上功耗可降至原值的34%左右。然而，这一理想节能效果的实现依赖于系统整体水力特性的匹配。若管道阻力过高、阀门节流严重或换热器压降过大，将限制变频调节的有效区间，甚至引发低频运行下的机械共振或汽蚀风险<sup>[2]</sup>。因此，在实施变频改造前，必须对整个循环回路进行水力平衡分析，必要时对老旧管路进行清洗、优化布局或更换高阻部件。此外，变频器本身的技术选型亦至关重要，应优先选用具备高功率因数、低谐波畸变及完善保护功能的高压矢量型产品，并确保电机绕组绝缘等级满足变频供电要求。对于新建或深度改造项目，还可考虑引入永磁同步电机，其在宽负载范围内均保持高效率，尤其适合负荷变化频繁的水电站应用场景。

##### 3.1.2 高效换热器选型与集成

换热器的性能直接决定了热量传递的效率与系统运行的稳定性。传统壳管式换热器虽然结构坚固，但其传热系数较低，且内部流道易受水中悬浮物、微生物及结垢物影响，长期运行后热阻显著增加，迫使系统不得不提高流量以维持冷却效果，间接推高泵功耗。相比之下，板式换热器凭借其紧凑结构、高湍流度和大比表面积，传热系数可达壳管式的3至5倍，同时压降更低，更适合变流量运行。在水电站主变压器油冷却等关键场合，推荐采用全焊接板式或钛材板式换热器。前者取消了橡胶密封垫片，避免了高温老化泄漏风险；后者则凭借优异的耐腐蚀性能，有效应对高矿化度或含氯水源带来的腐蚀挑战。值得注意的是，换热器的选型不应仅关

注初始性能参数，还需兼顾可维护性。模块化、双回路并联设计允许在不停机状态下切换清洗，极大提升了系统可用性。此外，换热器与水泵、管道的集成也需统筹考虑，避免因局部阻力突变造成流动不均或振动问题，确保整个冷却回路在高效区稳定运行。

#### 3.1.3 管道系统阻力优化

管道网络作为连接各设备的“血管”，其阻力特性直接影响系统总扬程需求与泵送能耗。长期运行中，管道内壁会因水质问题逐渐沉积水垢、泥沙或生物膜，导致流通截面缩小、粗糙度增加，进而抬高沿程阻力。同时，早期设计中常见的急弯、缩径、多级阀门等也会产生显著的局部损失。这些因素叠加，使得系统实际运行点偏离水泵高效区，即使加装变频器也难以充分发挥节能潜力。因此，有必要对服役超过十年的管道系统开展内窥检测与水力建模，量化阻力增量，并制定针对性的优化方案。例如，采用高压水射流或环保型化学清洗剂清除内壁沉积物；将90°直角弯头替换为大曲率半径弯管以降低涡流损失；在关键支路加装静态平衡阀，实现各换热器间的流量均匀分配，避免“近端过流、远端欠流”的不均衡现象。经工程实践验证，合理的管道阻力优化可使系统总压降降低15%~25%，不仅直接减少泵功耗，还为后续智能控制策略的实施提供了更宽裕的调节空间。

#### 3.2 控制层：智能优化控制策略

##### 3.2.1 多源数据融合与冷却需求建模

智能控制的前提是系统具备对运行状态的全面感知与对未来需求的准确预判。传统温控启停逻辑仅依赖单一油温信号，响应滞后且缺乏前瞻性。现代优化控制则需融合来自DCS系统、气象站及冷却水本体的多维数据，包括机组有功功率、主变油温、环境温度、进/出水温差、流量等，构建动态冷却负荷模型。借助机器学习方法，如长短期记忆网络（LSTM）或梯度提升树（XGBoost），可从历史运行数据中挖掘负荷与环境变量之间的非线性关系，实现对未来15至60分钟冷却需求的高精度预测<sup>[3]</sup>。这一前馈信号为后续的优化决策提供了关键输入，使控制系统能够“未雨绸缪”，提前调整运行参数，避免因响应延迟导致的温度超限或能源浪费。

##### 3.2.2 多目标协同优化控制算法

在获得冷却需求预测后，控制系统需在保障设备安全与最小化能耗之间寻求最优平衡。这本质上是一个带约束的多目标优化问题：既要确保所有主设备油温不超过安全上限（如65℃），又要使水泵总功耗最低，同时还需考虑水质稳定性与设备寿命。模型预测控制

(MPC)因其显式处理约束与多变量耦合的能力,成为解决此类问题的理想工具。通过在滚动时域内求解优化目标函数,MPC可生成未来一段时间内的最优控制序列,并仅执行首步动作,随后根据新观测数据重新优化,形成闭环反馈。在工程实现中,可采用分层架构:上层MPC负责生成全局最优流量设定值,下层则由自适应PID或模糊控制器快速跟踪该设定值,兼顾优化性与实时性。这种“规划+执行”的控制模式,显著优于传统的单回路PID控制,尤其在负荷快速变化或环境扰动频繁的场景下表现更为稳健。

### 3.2.3 季节性与极端工况应对策略

水电站运行环境复杂多变,系统控制策略必须具备良好的鲁棒性与适应性。夏季高温期需优先保障散热能力,可适当放宽能耗约束;而冬季低温环境下,则需防止油温过低导致润滑油黏度升高,影响设备启动,此时应设定最小流量阈值并联动电加热装置。在汛期高含沙水流条件下,还需自动提升过滤器反洗频率,降低换热器流速以减轻磨损。这些差异化策略可通过状态机或规则引擎嵌入控制系统,根据实时环境参数自动切换运行模式。如此,系统不仅能在常规工况下高效运行,也能在极端条件下保持安全稳定,真正实现“智能随动、按需调节”。

## 3.3 管理层:水质动态监测与预防性维护

### 3.3.1 智能化水质监控体系

水质劣化是导致系统能效缓慢衰减的“隐形杀手”。传统人工取样方式周期长、代表性差,难以及时发现初期结垢或微生物滋生迹象。部署多参数在线水质监测系统,可实现对pH、浊度、电导率、氧化还原电位(ORP)及余氯等关键指标的连续采集。这些数据经边缘计算单元初步处理后,可利用异常检测算法识别水质突变趋势,如浊度骤升可能预示滤网堵塞,ORP持续下降则暗示生物膜形成风险<sup>[4]</sup>。一旦触发预警,系统可自动推送维护建议或联动加药装置,将问题遏制在萌芽阶段。

### 3.3.2 精准加药与绿色水处理

在水质干预方面,应摒弃粗放的“定时定量”加药模式,转向基于实时水质数据的精准投加。例如,阻垢

剂的投加量可根据水中钙硬度与碱度动态调整,杀菌剂剂量则与ORP和浊度正相关。同时,鼓励采用环境友好型药剂,如可生物降解的聚天冬氨酸替代传统磷系阻垢剂,减少对水体生态的影响。部分先进电站已开始试点物理水处理技术,如电子除垢或超声波灭藻,这类技术无需添加化学药剂,从源头上避免二次污染,契合绿色电厂的发展方向。

### 3.3.3 数字孪生驱动的全生命周期管理

最终,所有设备、控制与水质数据应汇聚于统一的数字孪生平台。该平台不仅可视化展示系统实时运行状态与能效KPI,还能基于历史数据评估设备健康度、预测故障风险、生成预防性维护计划。运维人员可通过平台进行能效对标分析,识别改进空间;管理层则可据此优化投资决策与资源配置。通过数据驱动的闭环管理,循环冷却水系统从“被动响应”走向“主动优化”,真正实现安全、经济、绿色的高质量运行。

## 4 结语

本文系统研究了水电站循环冷却水系统的优化运行与节能路径。研究表明:当前系统普遍存在水泵“大马拉小车”、控制粗放、换热效率下降等问题,节能潜力巨大;通过“设备升级+智能控制+精细管理”三位一体优化策略,可实现系统能效显著提升。未来研究方向包括:深化数字孪生与人工智能在冷却系统中的应用,实现自学习、自优化;探索与风光储一体化电站的协同冷却策略;开发适用于高寒、高沙等特殊环境的专用冷却技术。水电作为清洁基荷电源,其自身运行的绿色化同样重要。持续推进辅助系统的节能改造,是实现水电高质量发展的必由之路。

## 参考文献

- [1]王云.电厂循环冷却水系统节水及零排放技术研究[J].中国新技术新产品,2023,(17):77-79.
- [2]胡允炜,朱张盈.某海滨电厂循环冷却水系统设计要点探讨[J].科学技术创新,2024,(11):29-32.
- [3]赵巍巍.电厂循环冷却水系统节水及零排放技术研究[J].中国资源综合利用,2020,38(07):182-184.
- [4]汪雪蛟.电厂循环冷却水系统节水及零排放技术研究[J].中国新技术新产品,2021,(05):68-70.