

Analysis on the Zero Discharge Treatment Technology and Engineering Compatibility of Desulfurization Wastewater in Thermal Power Plants

Hui Zhou Jianyang Wang

Zhejiang Zheneng Technology and Environmental Protection Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311100, China

Abstract

Under the strategic context of carbon peaking and carbon neutrality, energy conservation efforts in traditional thermal power plants are expanding from generation-side operations to comprehensive lifecycle energy management. As a critical auxiliary production component, water treatment systems have drawn increasing attention regarding their energy consumption ratios and carbon emission contributions. This study analyzes energy consumption characteristics across key processes in typical power plant water treatment systems—including water intake, purification, circulating cooling, chemical water treatment, and wastewater reuse—while identifying high-energy-consumption points and system coordination challenges. By establishing an integrated “source-grid-load-storage” optimization framework, the paper proposes multiple energy-saving and consumption-reduction technical pathways. The research findings provide technical support and practical solutions for energy conservation in non-power systems of power plants, holding significant practical implications for achieving green transformation in the power industry.

Keywords

carbon peak; power plant water treatment; energy saving and consumption reduction; system optimization; carbon emission reduction benefit

面向碳达峰的电厂水处理系统节能降耗技术优化研究

周辉 王建阳

浙江浙能科技环保集团股份有限公司, 中国·浙江 杭州 311100

摘要

在碳达峰、碳中和战略背景下,传统火电厂节能减排工作正从发电侧扩展至全生命周期系统用能管理,水处理系统作为辅助生产的重要组成,其能耗占比和碳排放贡献日益引起重视。本文基于典型电厂水处理系统运行现状,分析了其中取水、净化、循环冷却、化学水处理及废水回用等环节的能耗特征,剖析存在的高耗能点与系统协同问题。通过构建“源-网-荷-储”一体化优化框架,提出若干节能降耗技术路径。研究成果为电厂非动力系统节能降耗提供技术支撑与实践路径,对实现电力行业绿色转型具有重要现实意义。

关键词

碳达峰; 电厂水处理; 节能降耗; 系统优化; 碳减排效益

1 引言

在“双碳”战略全面推进的大背景下,电力行业作为能源消费和碳排放的主力领域,面临严峻的能效提升与减排压力。传统火电厂长期聚焦于锅炉、汽轮机、发电机等主机系统的节能改造,然而随着能效边际改善趋缓,电厂水处理系统所占能耗比例逐渐上升,成为亟需突破的节能降碳新阵地。水处理系统主要包括原水预处理、除盐水制备、循环冷却水处理、锅炉补给水处理及废水处理与回用等环节,运行过程中需依赖大量泵机设备、膜处理系统与化学药剂投加系

统,不仅能耗显著,还存在运行效率低下、设备选型不合理、控制策略粗放等问题。因此,本文以“源头削减—过程优化—末端提升”为基本策略,系统构建电厂水处理系统节能降耗的技术体系,综合考虑技术可行性、工程适配性与碳减排效益,为提升电厂综合能效与支撑碳达峰目标提供理论基础与实践方案^[1]。

2 电厂水处理系统能耗特征与结构现状

2.1 系统构成与工艺流程

电厂水处理系统作为保障机组安全运行与工艺用水质量的关键单元,其工艺设计与运行配置直接影响整体能源系统的负荷分布与碳排放水平。通常,燃煤电厂所依赖的水处理系统分为取水、预处理、精处理、除盐、冷却、废

【作者简介】周辉(1987-),男,中国浙江诸暨人,本科,工程师,从事电厂化学研究。

水处理与资源回收等多个环节，涵盖了物理分离、化学反应、膜分离、热交换及污泥处理等典型水处理单元操作（unit operation），形成完整的闭环循环体系。图1所示的工艺流程反映出水流从源头引入到末端回用的全过程，每一节点均关联多个动力设备与能耗源，是一个高度耦合的多维运行系统。在具体流程中，取水系统主要依赖大功率潜水泵或离心泵将水从地表水或地下水源抽取至厂内储水池，该环节常受地形高差与输水距离影响，存在较大的扬程与管网能耗损失。进入原水预处理系统后，需进行絮凝沉淀、加药调节与

砂滤等工艺，以初步去除悬浮颗粒、重金属与部分有机物，为后续膜处理创造良好进水条件。随后，水流分两路进入除盐水系统与循环冷却系统：前者采用反渗透（RO）、电渗析（ED）或混床离子交换等精细化处理技术，为锅炉供水提供高纯度补给水；后者则构成厂区最大的用水系统，以冷却塔与循环水泵为核心，实现机组余热交换与水资源的循环再利用。废水处理部分则依赖物化、生化及浓缩脱水等单元，将多源尾水统一处理并回用或排放，部分电厂已布局零排放系统。

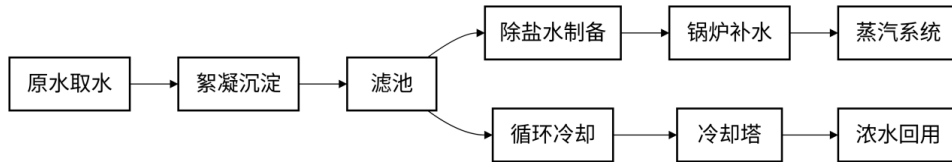


图1 电厂水处理系统典型工艺流程图

2.2 能耗构成分析

根据典型600MW级亚临界燃煤机组的运行监测数据与能效审计结果，电厂水处理系统总体能耗已成为辅助系统的重要组成部分，其对总厂用电率的贡献值接近4%~5%，在部分配置冷却岛或实行浓水回用的电厂中甚至突破6%。相较于主机系统节能空间逐步收窄，水处理系统因涉及设备运行时间长、启停频次高、系统能效冗余较大，反而成为当前节能减排的重点领域^[2]。如表1所示，系统各环节的能耗分布呈现出显著的不均衡性。

表1 国内典型600MW亚临界燃煤电厂运行数据统计

系统单元	平均电耗占比 (%)	主要能耗来源
原水取水系统	12.4	远距离输水泵机
原水预处理系统	9.6	絮凝搅拌与加药系统
除盐水制备系统	28.1	反渗透膜与混床运行
循环冷却水系统	35.2	冷却塔风机与补水泵
废水回用与排放系统	14.7	浓水提升与污泥脱水设备

其中，占比最高的循环冷却水系统主要能耗来源包括大功率补水泵、冷却塔机械通风装置及循环水调节阀组，其运行受负荷波动、环境温度与工况需求影响较大，存在明显的季节性与波动性特征。冷却塔风机在高温季节常以满负荷运行，对整个系统的电力需求产生持续负担。而除盐水制备系统中，反渗透高压泵组、电导率监控与混床再生装置则为主要能耗点，特别是RO系统的高压侧存在能耗集中、压力不稳定与膜污染引起的能效下降等典型问题。从能耗效率角度来看，原水预处理与废水处理系统尽管电耗占比略低，但单位水处理电耗（kWh/m³）偏高，尤其在水质波动或药剂投加失调情况下，易造成运行效率降低与处理不达标问题。此外，不同厂型之间系统结构差异也造成能耗水平参差不齐。例如，部分老旧电厂仍采用双级混床加热脱盐流程，其电能与热能消耗远高于现代RO+EDI系统；而新建环保达

标项目中集中布置的MVR蒸发、真空浓缩系统虽实现废水回用目标，但因过程热源多依赖蒸汽换热或电加热装置，整体单位能耗不降反升，造成新的能效挑战。

3 电厂水处理系统节能降耗关键技术路径

随着电厂运行能效管理逐步向系统协同与智能控制转型，传统单点节能改造方式已无法满足碳达峰目标下的整体能效优化需求。为实现水处理系统的系统性节能降耗，需从技术路径、系统架构与控制策略等多维度综合施策。以下围绕关键环节展开优化路径探讨。

3.1 高效设备选型与智能调控

设备本体能效是系统节能的基础，尤其是水泵、风机、压缩机等长时间运行的动力设备，选型不当与运行控制粗放将直接造成能耗冗余。首先，在设备选型阶段应优先采用符合《GB30253-2013 高效电机能效等级》标准的IE3及以上等级电机，结合泵体结构优化（如无背叶片设计、轴封优化等）提升整体水力效率。其次，应大力推广变频调速系统（VFD）应用，以实现设备流量、扬程与频率的动态调节，避免“满负荷+节流运行”带来的能耗浪费^[3]。

在控制策略方面，可基于用水负荷变化趋势，构建流量-能耗映射模型，部署智能控制模块，动态调整泵组组合运行方案与启停逻辑。例如，冷却水系统可采用模糊控制或预测控制算法，在保证换热效率的同时，减少风机与泵组的高频启停；反渗透系统则可通过自动压差控制策略，调节预处理出水流量与膜压差，确保处于最佳工作区间。此外，实时监测设备运行参数（如电流、电压、转速、振动、温升等）并建立健康评估模型，有助于实现设备能效在线评估与维护策略优化。

3.2 膜分离系统节能集成技术

膜处理技术作为现代电厂水质保障的重要手段，其高能耗特征主要源于高压驱动与膜污染频发带来的周期性反

洗与更换。在节能优化方面,可从膜材料、系统配置与工艺联动三方面入手。一是膜材料优化。应优先选用低压运行的高通量 RO 膜元件,结合纳滤(NF)膜或陶瓷膜预处理,降低系统操作压力,减少能耗。同时,增强膜抗污染性能可有效延长运行周期、降低化学清洗频率^[4]。二是系统集成设计。推荐采用“二级 RO+浓水回收+能量回收装置”组合架构,前级 RO 系统去除大部分离子后将浓水引入回收段进行二次提取,配置能量回收装置(如压力交换器 PX 或涡轮能量回收器)以回收浓水剩余压力用于前级进水加压,能耗可下降 25% 以上。三是工艺协同联动。通过与药剂加药系统、温控系统、流量调节系统进行联动设计,实现在线阻垢、在线除菌、恒温运行等多参数协同控制,有效减少膜结垢与生物污染风险,提高膜通量与使用寿命。

3.3 水系统协同控制与智能化能效管理

电厂水处理系统能耗高企的根本原因之一在于各子系统之间缺乏实时协同调度与动态负荷响应机制。传统管理多依赖经验设定运行参数,未能实现“水质—水量—能耗”一体化管理,导致运行偏离最佳效率区间。为解决此问题,可构建面向水处理系统的能效协同控制平台,集成 SCADA、DCS 与 EMS(能量管理系统)平台数据,搭建统一的数据采集与分析中台^[5]。在控制架构上,采用“感知—评估—优化—执行”四层闭环结构,实现从流量监测、能耗建模到优化调度的全过程闭环。该模型中,能耗建模模块可采用线性回归、灰色预测、BP 神经网络等方式构建各单元能耗预测模型,多目标优化调度模块则通过遗传算法、粒子群算法等对系统运行方案进行全局寻优,确保在保障水质与安全的前提下,实现最低能耗运行。

3.4 废水回用与低碳排放技术路径

为满足环境标准并实现用水闭路循环,电厂普遍部署废水处理与回用系统,然而在能耗控制与碳减排方面仍存在提升空间。传统废水处理工艺如 A/O、Fenton 氧化、机械脱水等在能效方面表现不佳,且部分高盐废水难以处理,需采用高能耗的热处理或蒸发工艺。

针对这一问题,本文提出基于多级膜蒸馏(MD)+零排放(ZLD)系统的高效处理路径^[6]。膜蒸馏技术可在低温条件下实现蒸汽驱动分离,适宜余热利用场景;ZLD 系统

则可通过浓缩结晶实现盐分资源化,减少环境负荷。同时,通过结合太阳能集热、烟气余热回收等能源集成路径,显著降低处理能耗,助力电厂实现“绿色废水处理”。针对部分无法回用的浓盐水,还可探索碳捕集与矿化反应联合路径,通过调控 pH 与温度条件,使得碳酸根离子与钙镁等离子结合沉淀,形成碳酸钙等低碳固体产物,实现“废水+废气”的资源化联动处理,开辟水处理与碳减排协同的新方向。

4 结语

本文围绕碳达峰背景下电厂水处理系统的节能降耗问题,系统分析了各典型环节的能耗结构与运行特征,明确了设备效率低、系统协同差、控制策略滞后等关键制约因素。基于此,提出了涵盖高效泵机、膜系统优化、智能控制与废水资源化的多维技术路径,并结合典型案例验证了整体节能效果与碳减排效益。研究表明,水处理系统具备显著的节能潜力,单位能耗可降低 10% 以上,年碳排放可减少数百吨。优化不仅体现在局部设备升级,更依赖于系统层级的集成调控与数据驱动能力。相关技术路径具备良好适应性与工程可行性,可为电厂辅助系统节能改造提供现实参考。未来应进一步推进智能感知、能耗建模与多系统协同机制的融合,拓展水处理与主系统间的耦合控制空间,以实现电厂整体运行的绿色低碳转型。

参考文献

- [1] 罗雪明. 电厂化学水处理存在的问题及应对措施[J]. 科技与创新, 2025, (10): 160-163. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2025.10.044.
- [2] 王静. 燃煤电厂化学水处理中反渗透膜技术的运用[J]. 当代化工研究, 2025, (10): 107-109. DOI: 10.20087/j.cnki.1672-8114.2025.10.034.
- [3] 贾兰, 刘兴华, 刘鹏, 等. 电厂化学水处理系统现状及技术创新应用研究[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(14): 48-53. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2025.14.011.
- [4] 李茂清. 全膜分离技术在电厂化学水处理中的运用探讨[J]. 电气技术与经济, 2024, (03): 103-104.
- [5] 王意恒. 电厂化学水处理设备设施腐蚀问题对策分析[J]. 中关村, 2024, (03): 110-111.
- [6] 刘媛媛. 全膜分离技术在电厂化学水处理中的应用[J]. 清洗世界, 2023, 39(12): 79-81.