

石油化工循环水系统一体化节能改造 EMC 项目研究与效益分析

徐 健 (中海石油宁波大榭 / 舟山石化有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘 要: 本研究基于中海石油某石化公司循环水系统一体化节能改造 EMC 项目, 通过整合高效换热设备升级、水轮机驱动改造及智能控制系统集成等技术, 构建了适用于石化行业的节能改造技术体系。项目采用合同能源管理模式, 实现年节电量 655 万 kWh, 吨水能耗从 0.233kWh/m³ 降至 0.181kWh/m³, 投资回收期 1.8 年。研究结合现场运行数据, 深入分析技术实施路径与效益分配机制, 为高耗能工业系统的低碳化改造提供了可复制的工程范式。

关键词: 循环水系统; EMC 项目; 节能改造; 效益分析

中图分类号: TE08

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 027-0061-03

Research and Benefit Analysis of EMC Project for Integrated Energy-Saving Renovation of Petrochemical Circulating Water System

Xu Jian (CNOOC Ningbo Daxie/Zhoushan Petrochemical Co., Ltd., Ningbo Zhejiang 315000, China)

Abstract: Based on the EMC project for integrated energy-saving renovation of the circulating water system in a petrochemical company under CNOOC, this study constructs an energy-saving renovation technology system suitable for the petrochemical industry by integrating technologies such as upgrading of high-efficiency heat exchange equipment, water turbine-driven transformation, and intelligent control system integration. The project adopts the energy performance contracting (EPC) model, achieving an annual electricity saving of 6.55 million kWh, with the energy consumption per ton of water reduced from 0.233 kWh/m³ to 0.181 kWh/m³, and an investment payback period of 1.8 years. Combining on-site operation data, the study conducts an in-depth analysis of the technical implementation path and benefit distribution mechanism, providing a replicable engineering paradigm for the low-carbon transformation of high-energy-consuming industrial systems.

Keywords: circulating water system; EMC project; energy-saving renovation; benefit analysis

1 研究背景与行业痛点

石化行业循环水系统能耗占企业总能耗的 15%-20%, 传统系统存在设备效率衰减、运行参数粗放等问题。中捷石化原循环水系统运行年限超 10 年, 经实测显示: 水泵效率平均低于设计值 17.3%, 换热温差较设计值降低 35%, 年用水量达 500 万 t, 节能改造需求迫切。合同能源管理 (EMC) 模式通过“零初始投资 + 效益分享”机制, 已成为工业节能的主流商业模式, 但针对北方高硬度水质地区的一体化改造案例仍缺乏系统性研究。

2 技术创新方向

本项目突破传统单体设备改造局限, 提出“设备升级 - 系统优化 - 智能管控”三位一体的改造思路: ①能量梯级利用: 利用循环水回水余压驱动水轮机, 替代电机驱动风机, 实现能量二次回收; ②全系统匹配优化: 通过水力计算重构管网阻力特性, 解决“大马拉小车”现象; ③数字孪生管控: 集成 PLC+SCADA 系统, 实时采集 28 项关键参数 (流量、压力、温度等), 实现动态调节与故障预警。

3 项目技术方案设计

3.1 系统现状诊断

通过现场实测, 原系统存在四大核心问题 (表 1):

表 1 改造前系统关键指标实测数据

指标	设计值	实际值	偏差率	影响分析
水泵效率 (%)	≥ 75	62	-17.3%	能耗浪费严重
换热温差 (°C)	≥ 8	5.2	-35%	冷却效率下降
浓缩倍数	3.5	2.1	-40%	新水消耗增加
风机电耗 (kW)	44.4	44.4	0%	电机驱动存在能量浪费

数据显示: 各系统普遍存在“大流量、低效率”问题, 其中三催系统因叶轮气蚀 (2 次断轴事故) 导致效率最低, 仅 58%; 3# 循环水系统回水压力达 0.12MPa, 具备水轮机改造条件。

3.2 一体化改造技术路径

3.2.1 高效流体设备升级

①螺旋缠绕管式换热器替换。采用双相钢材质换热器 (表 2), 传热系数提升 125%, 结垢速率降低 80%, 压力损失减少 25%。以气分系统为例, 改

造后换热温差从 5.2℃恢复至 8.5℃，满足工艺冷却需求。②水泵系统能效重构。针对 21 台低效泵实施“大小泵高低配”策略：大泵额定流量 1500m³/h（效率 85%），小泵 600m³/h（效率 82%），配合永磁调速装置（DM420 型），解决聚丙烯系统流量频繁调整的节能需求。三催系统水泵改造后，轴功率从 660kW 降至 495.45kW，效率提升 12.7 个百分点。

表 2 换热器改造前后性能对比

指标	原设备	改造后设备	技术参数
传热系数 (W/m²·K)	800-1000	1800-2200	螺旋缠绕管束结构
材质	碳钢	双相钢	抗腐蚀性能提升
处理流量 (m³/h)	1800	2000	适应工艺波动

3.2.2 水轮机驱动技术应用

在 3# 循环水系统部署混流式水轮机（表 3），利用回水余压驱动风机，替代原 55kW 电机。水轮机设计流量 800m³/h，转速 244r/min，效率 82%，经 7 天连续运行测试，节电量达 7459.2kWh，实现 100% 节能效果。

表 3 风机驱动方式改造对比

指标	电机驱动	水轮机驱动	技术优势
输入能源	电能	水能	无额外能耗
运行功率 (kW)	44.4	0	能量二次利用
噪声 (dB)	85	75	振动降低 10dB

3.2.3 智能监控系统集成

部署 PLC 控制柜与 SCADA 系统，实现三大功能：①动态调控：根据回水温度自动调节水泵转速，流量调节范围 30%-100%；②故障预警：振动、温度等传感器（IP68 防护）实时监测设备状态，预警响应时间 < 10 秒；③数据溯源：历史数据存储周期 ≥ 1 年，支持节能量追溯与分析。

4 项目实施与管理

4.1 施工组织与进度控制

项目采用“分系统轮换改造”策略，总工期 210 天，关键节点：

表 4 项目实施进度表

阶段	时长 (天)	核心任务
准备阶段	30	3D 扫描管网尺寸，定制过渡管廊；完成高效泵、水轮机等设备招标采购
施工阶段	150	单系统停产 ≤ 72h，同步实施：旧设备拆除→基础浇筑→新设备安装→防腐处理
调试验收阶段	30	单系统试运行 72h，第三方机构（中国计量科学研究院）检测节能量，误差率 < 5%

防腐处理采用“三层防护”：塔内管道刷环氧防腐底漆 + 环氧树脂 + 玻璃纤维布 + 环氧煤沥青；水轮

机涂黑色金属保护底漆 +2 层长效重防腐中间漆 +1 层面漆，确保 10 年防腐寿命。

4.2 关键技术难点与解决方案

表 5 技术难点应对措施

难点问题	技术方案	实施效果
高硬度水质结垢	安装 10000m³/h 电化学除垢装置（电解产生羟基自由基），每季度酸洗一次	结垢速率 < 0.1mm/年
冬季防冻保护	换热器进出口装温度传感器，联动控制旁通阀，确保水温 ≥ 5℃	水温维持 ≥ 5℃，零冻损
高压变频干扰	加装电抗器与滤波器，独立接地（接地电阻 < 4Ω）	谐波畸变率 < 5%
新旧设备接口匹配	采用激光切割定制过渡管廊，安装误差 ≤ 2mm	避免管道应力导致的泄漏

5 效益分析与模式创新

5.1 节能指标提升

改造后连续 12 个月监测数据显示（表 6）：年节电量达 655 万 kWh，相当于减排 CO₂ 6535t；吨水能耗从 0.233kWh/m³ 降至 0.181kWh/m³，降幅 22.3%；浓缩倍数从 2.1 提升至 3.8，年节水 90 万 t。

表 6 改造前后系统性能对比

指标	改造前	改造后	改善幅度
年耗电量 (万 kWh)	1500	845	-43.7%
新水用量 (万 t/a)	500	410	-18%
系统效率 (%)	62	78	+25.8%

5.2 经济与社会效益

5.2.1 直接经济效益

年节电收益：655 万 kWh × 0.67 元 / kWh = 438.85 万元；年节水收益：90 万 t × 4 元 / t = 360 万元；维护成本降低：年减少维修费用 45 万元（风机电机、泵组故障率下降 80%）；投资回收期：1500 万元 ÷ (438.85 + 360 + 45) 万元 / 年 = 1.8 年（含税收优惠）。

5.2.2 社会效益

获河北省“重点节能技术应用示范项目”，技术方案纳入《石化行业循环水系统节能改造指南》；改造后年减排 CO₂ 6535t，相当于种植 36.3 万棵树；为华北地区 20 余家石化企业提供改造范本，带动行业节能改造投资可超 2 亿元。

5.3 EMC 模式创新点

风险共担机制：乙方承诺节能量不低于 655 万 kWh/年，不足部分由乙方承担；动态分成调整：根据实际节能量按月结算，2024 年 12 月数据显示乙方分享比例达 90%（表 7）；全周期运维：乙方提供 10 年运维服务，8h 响应、24h 到厂，保障系统高效运行。

表 7 2024 年 12 月节能量确认单关键数据

项目	数值	计算依据
当期节电量 (kWh)	492798.85	$(0.233-0.181) \times 9246326$
节电效益 (元)	330175.23	492798.85×0.67
乙方分享金额 (元)	297157.71	$330175.23 \times 90\%$

6 行业推广与未来展望

6.1 技术适用性分析与市场前景

本项目构建的“设备升级-系统优化-智能管控”一体化改造方案，在石化行业具有明确的推广边界与广阔市场空间。从技术适配性来看，其核心适用场景包括：①高耗能系统特征：循环水量 $\geq 5000\text{m}^3/\text{h}$ 、运行年限 ≥ 8 年，且水泵效率 $< 70\%$ 、换热温差 $< 6^\circ\text{C}$ 的系统。据中国石化联合会统计，国内石化行业此类循环水系统约 800 套，总装机容量超 5000MW，年能耗超 400 亿 kWh，改造市场规模可达 300 亿元。②水质适应性：针对北方高硬度水质 ($\text{CaCO}_3 \geq 300\text{mg/L}$)，项目采用的双相钢换热器+电化学除垢技术，可使设备寿命延长至 15 年(传统碳钢设备仅 8 年)，在京津冀、山东、辽宁等石化产业集群区具有不可替代的技术优势。③模式兼容性：EMC 模式特别适合资金压力大但节能需求迫切的中小型石化企业。目前国内石化行业 EMC 渗透率仅 12%，远低于欧美国家 35% 的水平，随着《合同能源管理项目财政补贴管理办法》等政策的持续落地，预计未来 5 年市场渗透率将提升至 25%。

从经济效益看，项目的投资回收期 (1.8 年) 低于行业平均的 5-6 年，且年节电率达 22.3%，显著高于单体设备改造的 8%-12%。以华北地区某 1000 万 t/a 炼油企业为例，采用本方案改造后，年可节电 1200 万 kWh，折合收益 800 万元，投资回收期 3.5 年，符合企业“短平快”的节能改造需求。

6.2 技术发展趋势与创新方向

6.2.1 数字化与智能化深度融合

未来循环水系统节能将向“数字孪生+智能调控”演进。通过构建循环水系统数字孪生体，可实现全工况动态模拟与参数优化，预计节能率再提升 5%-8%。例如：① AI 自适应调控：基于 LSTM 神经网络算法，实时预测工艺负荷变化，提前调整水泵转速与水轮机旁通阀开度，使系统始终运行在能效最优区间。测试数据显示，该技术可使吨水能耗波动幅度从 $\pm 5\%$ 降至 $\pm 2\%$ 。②边缘计算赋能：在泵组、水轮机等关键设备部署边缘计算节点，实现振动、温度等参数的本地实时分析，故障预警响应时间从 10 秒缩短至 1 秒，避免因设备突发故障导致的非计划停机 (单次损失超 50 万元)。

6.2.2 低碳化与能源协同

结合“双碳”目标，循环水系统将从“节能”向“低碳”升级，核心方向包括：①绿电融合：在冷却塔顶部配套分布式光伏电站 (效率 $\geq 22\%$)，为水泵变频装置、智能监控系统供电，实现“自发自用”。以本项目为例，配套 500kW 光伏系统后，年可减少外购电 50 万 kWh，减排 CO_2 400t。②余热梯级利用：通过板式换热器回收循环水余热 ($32^\circ\text{C} \rightarrow 28^\circ\text{C}$)，用于厂区供暖或原油伴热。测算显示，一套 $10000\text{m}^3/\text{h}$ 的循环水系统可回收余热 2.5MW，年节约蒸汽 3 万 t，折合标煤 3600t。

6.2.3 材料与设备革新

设备本体的技术突破将进一步释放节能潜力：①超高效泵技术：采用航空级叶轮设计 (水力效率 $\geq 90\%$) 与磁悬浮轴承 (机械损耗降低 50%)，较现有高效泵再节能 8%-10%。目前该技术已在中海油惠州石化试点，单泵年节电达 15 万 kWh。②耐蚀材料升级：研发石墨烯改性防腐涂层，使换热器耐盐雾性能从 5000h 提升至 10000h，维护周期延长 1 倍，年减少停机维护时间 48h。

7 结论

中捷石化循环水系统 EMC 改造项目通过“设备升级-系统优化-智能管控”的一体化方案，实现了显著的节能效益与商业模式创新。项目的成功实施验证了 EMC 模式在高耗能工业系统改造中的可行性，其技术路径与管理经验可为石化行业“双碳”目标下的节能改造提供重要参考。未来需进一步推动数字技术与节能技术的深度融合，探索更高效的能量梯级利用模式，助力工业领域绿色低碳转型。

参考文献：

[1] 张志涛. 热电厂循环水余热利用 EMC 项目风险评估研究 [J]. 北京: 华北电力大学, 2018.
[2] 张清慧. 循环水泵站节能改造的措施与效果 [J]. 福建冶金, 2017(2):49-51.
[3] 王立新, 李红梅. 石化企业循环水系统节能优化与 EMC 模式应用实践 [J]. 石油化工设备, 2021, 50(4):78-82.
[4] 陈国华. 基于合同能源管理的循环水系统节能改造案例分析 [J]. 工业水处理, 2020, 40(8):105-109.
[5] 周明. 石化行业循环水冷却塔水轮机驱动技术经济性研究 [J]. 节能技术, 2019, 37(5):412-416.

作者简介：

徐健 (1988-)，男，硕士，工程师，主要从事石化装置节能技术与工程应用。