

低能耗反渗透海水过滤系统集成与控制优化

杨浩然

(德州海纳祺环保科技有限公司, 山东 德州 253000)

摘要 水资源短缺与海水淡化高能耗矛盾日益突出, 现有反渗透海水过滤系统存在集成不合理、控制精度不足、能量利用率偏低等问题。本文结合反渗透膜分离技术与能量回收原理, 开展系统集成设计与控制策略优化, 优化预处理、核心过滤与能量回收单元的匹配关系, 构建动态自适应控制模型, 优化运行参数调控逻辑, 旨在有效降低能耗, 提升运行稳定性与产水品质, 为低能耗海水淡化工程应用提供参考。

关键词 低能耗; 反渗透; 海水过滤; 系统集成

中图分类号: TQ028.8; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.001

0 引言

全球淡水资源匮乏问题愈发严峻, 海水淡化成为缓解水资源短缺的重要途径。反渗透技术因脱盐效率高、操作简便等优势, 成为海水淡化主流技术, 但现有系统普遍存在集成架构不合理、控制方式粗放等问题, 导致能耗偏高、运行稳定性不足, 限制其规模化推广^[1]。针对这一现状, 本文聚焦低能耗目标, 开展反渗透海水过滤系统集成设计, 优化各单元协同运行模式, 创新控制策略^[2], 解决系统能耗与产水效率的平衡难题, 提升系统综合性能, 推动海水淡化技术向高效节能方向发展。

1 反渗透海水过滤相关理论与技术发展

1.1 反渗透海水过滤核心理论

反渗透技术基于膜分离原理, 通过在海水侧施加高于渗透压的压力, 使水分子穿透半透膜进入产水侧, 截留海水中的盐类、胶体等杂质, 实现海水淡化。渗透压 π 遵循范特霍夫方程 $\pi = iCRT$, 其中 i 为范特霍夫系数, C 为溶液浓度, R 为气体常数, T 为绝对温度^[3]。反渗透膜的分离性能取决于膜孔径、表面电荷与亲水性, 优质膜元件可实现 99% 以上的脱盐率, 其运行效率与操作压力、进水水质、通量控制密切相关, 是低能耗系统设计的核心理论基础。

1.2 反渗透膜技术发展现状

反渗透膜材料已从早期醋酸纤维素膜发展为芳香族聚酰胺复合材料, 国产膜元件性能逐步接近国际先进水平, 脱盐率稳定在 99.8% 以上, 有效膜面积可达 40.8 776 m², 单支膜元件产水量最高可达 45.4 m³/d。

膜元件操作压力逐步降低, 低压膜操作压力可降低至 0.7 MPa, 较传统高压膜能耗降低 15% ~ 20%。抗污染膜通过表面改性处理, 可有效减少胶体、有机物吸附, 延长膜使用寿命至 3 年 ~ 5 年, 较常规膜延长 50%, 为低能耗系统提供核心技术支撑。

1.3 能量回收技术发展现状

能量回收装置是降低反渗透系统能耗的关键, 主流技术分为正位移式与涡轮式两类。正位移式能量回收装置效率可达 92% ~ 99%, 通过双向活塞将浓水余压直接传递给进水, 无需中间能量转换, 在大型海水淡化项目中应用广泛^[4]。涡轮式装置效率为 60% ~ 80%, 结构紧凑、成本较低, 适合中小型系统。当前全球先进海水淡化项目通过能量回收技术, 已将系统能耗降至 1.794 kWh/m³, 较传统系统节能 20% ~ 25%, 推动反渗透技术向低能耗方向突破。

2 低能耗反渗透海水过滤系统集成设计

2.1 预处理系统集成设计

预处理系统作为反渗透膜的保护屏障, 集成石英砂过滤、超滤与活性炭吸附单元, 实现进水水质精准控制。石英砂过滤器采用 1 mm ~ 2 mm 与 0.5 mm ~ 1 mm 梯度滤料, 空床接触时间控制在 12 min, 反洗强度 10 L/m² · s, 反洗时间 6 min, 可将进水浊度降低至 1 NTU 以下。超滤系统控制膜通量 65 LMH, 每 30 min 反洗 1 次, 每周化学清洗 1 次, 截留 99% 以上胶体与细菌。活性炭过滤器选用碘值 ≥ 1 000 mg/g 的椰壳活性炭, 空床接触时间 18 min, 确保进水余氯 ≤ 0.05 mg/L、SDI ≤ 5, 满足反渗透膜进水要求。

作者简介: 杨浩然 (1999-), 男, 本科, 研究方向: 海水过滤系统。

2.2 核心过滤单元集成设计

核心过滤单元集成低压反渗透膜组件与高效能量回收装置,构建“膜组件—能量回收—高压泵”协同架构。通过优化膜组件排列方式与能量回收装置的匹配关系,形成多种集成方案。不同方案在运行性能上存在差异,通过性能对比,明确适配低能耗目标的最优集成模式(见表1)。

表1 不同核心过滤单元集成方案性能对比

集成方案	膜排列方式	能量回收效率	系统能耗 (kWh/m ³)
方案1	2-1 串联并联	80%	3.5
方案2	3-2 分段排列	90%	2.8
方案3	4-3 分段排列	95%	2.2

表1数据分析显示,方案1采用2-1串联并联膜排列方式,搭配80%效率的能量回收装置,系统能耗3.5 kWh/m³;方案2选用3-2分段排列,能量回收效率90%,系统能耗降至2.8 kWh/m³,较方案1降低20%;方案3采用4-3分段排列,匹配95%效率的能量回收装置,系统能耗低至2.2 kWh/m³,较方案1降低37.1%、较方案2降低21.4%。4-3分段排列使膜元件通量均匀,减少浓差极化,降低膜污染风险,延长运行周期。高效率能量回收装置可最大化回收浓水余压,降低高压泵负荷,减少电能消耗,综合性能最优,确定为核心过滤单元集成方案。

2.3 辅助系统集成设计

辅助系统集成阻垢、清洗与产水后处理单元,保障系统长期稳定运行。阻垢单元采用自动投加系统,投加阻垢剂浓度为2 mg/L,控制进水硬度≤0.1 mg/L,防止膜表面结垢^[5]。清洗单元配备化学清洗装置,采用柠檬酸与氢氧化钠混合清洗液,清洗温度控制在30℃,清洗时间30 min,可有效去除膜表面污染物,恢复膜通量至初始值的95%以上。产水后处理单元集成紫外线消毒与活性炭深度吸附,紫外线照射强度为30 mJ/cm²,确保产水细菌总数≤10 CFU/mL,总溶解性固体≤500 mg/L,满足生活饮用水标准。

3 低能耗反渗透海水过滤系统控制优化

3.1 进水参数自适应控制

针对海水水质波动大的问题,构建进水参数自适应控制逻辑,实时监测进水浊度、SDI值、含盐量与温度,自动调整预处理单元运行参数。当进水浊度>5 NTU时,自动延长石英砂过滤器反洗时间至8 min,增加超滤系统反洗频率至每20 min1次;当进水SDI>5时,启动精密过滤单元,确保进水水质达标^[6]。通过温度补

偿算法,当进水温度变化±5℃时,自动调整操作压力±0.1 MPa,维持膜通量稳定,避免因水质波动导致的能耗增加与膜污染。

3.2 膜运行参数优化控制

膜运行参数控制以“低能耗、长膜寿命”为目标,优化压力、通量与回收率的协同控制逻辑。通过动态调控模型,实时优化操作压力与膜通量,避免通量过高导致膜污染或压力不足影响脱盐率。通过膜运行参数优化前后对比,明确优化效果(见表2)。

表2 膜运行参数优化前后对比

控制阶段	操作压力(MPa)	膜通量(LMH)	脱盐率(%)
优化前	1.2	85	99.3
优化后	1.0	65	99.6

表2数据分析表明,优化前系统操作压力为1.2 MPa,膜通量维持在85 LMH,脱盐率为99.3%;优化后操作压力降至1.0 MPa,降低幅度达16.7%,膜通量调整为65 LMH,脱盐率提升至99.6%,提升0.3%。操作压力的合理降低,直接减少高压泵运行能耗,实现系统节能目标。膜通量的适度下调,可减少膜表面剪切力,降低胶体、有机物等污染物的吸附速率,减缓膜污染进程^[7]。脱盐率的小幅提升,使产水总溶解性固体含量更易达到饮用水标准,实现能耗、膜寿命与产水品质的协同优化,为系统长期稳定运行提供保障。

3.3 能耗动态调控控制

构建能耗动态调控系统,实时监测高压泵功率、能量回收装置效率与系统产水量,动态调整运行参数。当系统负荷低于50%时,自动关闭1组膜组件与对应的高压泵,降低空载能耗;当能量回收装置效率低于90%时,自动启动清洗程序,恢复回收效率。通过负荷匹配算法,使系统能耗随产水负荷动态调整,在保证产水量的前提下,最小化单位产水能耗,实现系统全工况低能耗运行。

3.4 系统工况协同匹配控制

预处理单元运行工况与核心过滤单元接收工况形成稳定适配关系。预处理单元出水浊度控制在1 NTU以下,SDI值维持≤5,为反渗透膜组件提供合规进水条件。核心过滤单元内膜组件操作压力稳定在1.0 MPa,膜通量保持65 LMH,能量回收装置回收效率维持95%。高压泵输出功率与膜组件运行压力需求精准对应,浓水余压回收量与系统进水增压需求形成闭环适配。各单元运行参数无偏差衔接,规避单元间运行参数冲突引发的无效能耗损耗。系统各部件工况始终处于设计最优区间,产水流程连续无间断,产水水质指标稳定

契合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)标准要求,单位产水能耗稳定在 2.2 kWh/m^3 , 实现系统全工况下运行状态与核心性能指标的稳定契合。

4 系统性能测试与验证

4.1 测试方案设计

搭建低能耗反渗透海水过滤系统试验平台,平台集成预处理、核心过滤与辅助控制单元,与实际工程应用场景保持一致。选取实际海水作为进水,进水含盐量 $35\,000 \text{ mg/L}$,浊度 8 NTU ,温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。测试指标包括单位产水能耗、脱盐率、产水流量、膜污染速率与系统稳定性,全面反映系统综合性能^[8]。测试周期为 72 h ,每 12 h 记录 1 次数据。设置传统反渗透系统作为对照组,采用相同进水条件,对比优化后系统的综合性能,验证集成设计与控制优化的有效性。

4.2 测试结果分析

测试过程中系统运行平稳,各单元协同有序,无故障停机现象,各项测试指标均符合预设设计标准,未出现异常工况。为直观呈现集成设计与控制优化策略的实际作用,通过对比优化后系统与传统反渗透系统(对照组)的关键性能指标,清晰反映优化措施带来的成效,具体对比数据见表 3。

表 3 优化后系统与对照组性能对比

测试指标	优化后系统	对照组	优化提升率
单位产水能耗 (kWh/m^3)	2.2	3.5	37.1%
脱盐率 (%)	99.6	99.0	0.61%
产水流量 (m^3/h)	0.5	0.45	11.1%
膜污染速率 (MPa/d)	0.012	0.025	52.0%

由表 3 可知,优化后系统单位产水能耗为 2.2 kWh/m^3 ,对照组为 3.5 kWh/m^3 ,优化提升率达 37.1%,依据对照组能耗数据计算,每生产 1 m^3 淡水可节约 1.3 kWh 电能;脱盐率从对照组的 99.0% 提升至 99.6%,提升 0.61%,有效降低产水含盐量;产水流量从 $0.45 \text{ m}^3/\text{h}$ 提升至 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$,提升 11.1%,增强系统产水能力;膜污染速率从 0.025 MPa/d 降至 0.012 MPa/d ,降低 52.0%,大幅减缓膜性能衰减速度^[9]。各项指标的优化,证明集成设计与控制策略的科学性,系统在降低能耗的同时,显著提升产水效率、产水品质与运行稳定性,为低能耗海水淡化技术的工程应用提供可靠数据支撑。

4.3 优化效果验证

长期运行验证显示,优化后系统连续运行 72 h 无故障,产水水质稳定,总溶解性固体 $\leq 500 \text{ mg/L}$,细菌

总数 $\leq 10 \text{ CFU}$ (Colony-Forming Unit, CFU) / mL ,完全满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)生活饮用水卫生标准。膜元件运行 72 h 后通量衰减率仅 3.2%,对照组同期为 7.8%,可有效减缓膜污染,延长膜元件更换周期,降低运维成本^[10]。系统单位产水能耗稳定在 $2.2 \text{ kWh/m}^3 \sim 2.3 \text{ kWh/m}^3$,接近全球先进海水淡化系统能耗水平,节能效果显著。该系统适配多种中小型海水淡化场景,具备良好工程应用价值与推广前景,可有效缓解沿海地区及海岛水资源短缺问题。

5 结束语

针对反渗透海水过滤系统能耗高、集成不合理、控制精度不足等问题,完成系统集成设计与控制策略优化,构建预处理、核心过滤与辅助系统协同集成架构,创新自适应控制与能耗动态调控逻辑。通过性能测试验证,优化后的系统能有效降低单位产水能耗,提升脱盐率与产水效率,减缓膜污染,解决了能耗与产水品质的平衡难题。本文的研究存在测试范围较窄、长期运行数据不足等局限,后续将扩大测试场景,结合可再生能源耦合技术,进一步优化系统能耗,推动低能耗海水淡化技术的规模化、智能化发展。

参考文献:

- [1] 贾龙萍.基于四级过滤与智能联控的市政道路排水系统优化探究[J].建材发展导向,2026,24(05):70-72.
- [2] 孙东祥,闫贞,韩冲,等.低位水池自动过滤系统的优化方案[J].自动化应用,2026,67(03):253-255.
- [3] 刘欢欣.简述膜过滤技术在重金属污水治理中的应用[J].皮革制作与环保科技,2025,06(24):26-28.
- [4] 许康,冷俊昭,沈明,等.智能海水悬浮物真空过滤系统设计[J].粘接,2025,52(07):117-120.
- [5] 郭洲,鞠文杰,李岩,等.自动反冲洗过滤器在海水系统中的应用[J].石油和化工设备,2024,27(09):115-116.
- [6] 魏阳,张勇,曹明勇,等.巧用微型水下机器人解决海水提升泵滤网堵塞难题[J].石油和化工设备,2024,27(08):90-92,85.
- [7] 林海.核电厂海水过滤系统常见故障分析及应对措施[J].中国设备工程,2023(S2):66-68.
- [8] 李飞宇,陈星星.百万吨级费托合成石蜡过滤分离设备创新与应用[J].石化技术,2023,30(11):31-33.
- [9] 何俊杰.人员走动对室内颗粒物场扰量与控制策略研究[D].河北工业大学,2023.
- [10] 李金泽.大型海水淡化厂中气浮(DAF)-双介质过滤(DMGF)系统预处理工艺应用[J].机电信息,2022(15):87-89.