

基于节水减排的循环水系统浓缩倍数控制策略优化研究

徐东晖

中化工程沧州冷却技术有限公司 河北 沧州 061000

摘要： 本论文围绕循环水系统节水减排目标，针对浓缩倍数控制策略展开研究。通过深入剖析当前循环水系统浓缩倍数控制存在的问题，系统梳理水质特性、设备工况等影响因素，创新性地提出基于动态监测与智能调控的浓缩倍数优化控制策略。运用实际案例分析和数据模拟验证该策略的有效性，结果表明优化后的控制策略能显著降低循环水系统的补水量与排水量，实现节水减排，为工业循环水系统的高效运行提供理论与实践依据。同时，对未来研究方向进行展望，为进一步完善循环水系统管理提供参考。

关键词： 循环水系统；浓缩倍数；节水减排；控制策略；动态监测

1 引言

随着全球工业化进程的加速推进，工业生产规模持续扩张，工业用水量呈现出爆发式增长态势。相关数据显示，在部分高耗水行业，工业用水占比已超过区域总用水量的 60%，水资源短缺问题日益成为制约工业可持续发展的关键瓶颈。循环水系统作为工业生产中不可或缺的重要环节，承担着冷却、洗涤等核心功能，其用水量在工业总用水量中占据相当大的比重。在循环水系统运行过程中，浓缩倍数作为核心控制参数，对系统的节水减排效果和运行成本起着决定性作用。从理论层面来看，合理提升浓缩倍数，能够有效减少循环水系统的补水量，降低水资源的消耗速度；同时，减少系统的排水量，进而降低后续污水治理的成本投入，这对于实现工业节水减排目标具有重要的战略意义。然而，当前多数工业循环水系统在浓缩倍数控制方面存在诸多亟待解决的问题。传统控制策略往往过于单一、僵化，难以适应水质和工况的动态变化，导致系统运行效率低下，节水减排效果远未达到预期目标。因此，深入开展基于节水减排的循环水系统浓缩倍数控制策略优化研究，不仅具有重要的理论价值，更具备显著的现实意义和应用前景。

2 循环水系统浓缩倍数控制现状与问题分析

2.1 浓缩倍数控制现状

当前，工业循环水系统的浓缩倍数控制方法仍以传统模式为主导。这种模式主要依赖操作人员的经验，预先设定浓缩倍数的控制范围。在实际操作中，通过定期人工采集循环水样本，对电导率、硬度、碱度等关键水质指标进行实验室检测。当检测结果达到预先设定的上限阈值时，便启动排污补水操作流程。这种控制方式虽然操作相对简单，对技术和设备要求较低，在一定程度上能够满足基础运行需求，但从现代化工业生产的高标

准来看，其存在明显的局限性。它缺乏对系统运行工况和水质变化的实时监测与动态调整能力，无法适应工业生产过程中复杂多变的实际情况^[2]。

2.2 存在的问题

2.2.1 控制滞后性： 传统的定期水质检测方式存在明显的时间延迟。一般而言，检测周期可能长达数小时甚至数天，在此期间，循环水系统内的水质可能已经发生了显著变化。当检测到水质指标超标时，系统内的有害物质已经大量积累，超过了设备的耐受范围。此时才进行排污补水操作，不仅无法及时有效控制水质恶化，还可能导致水资源的不必要浪费。更为严重的是，长期处于不良水质环境下运行，会对系统设备造成不可逆的损害，增加设备维修成本和停机风险。

2.2.2 适应性差： 工业循环水系统的运行工况受到多种因素的综合影响，生产负荷的频繁波动、环境温度的季节性变化、原材料水质的不稳定等，都会导致循环水的水质和水量发生动态变化。传统的控制策略由于缺乏智能化的监测和分析手段，无法及时感知这些变化并做出相应调整。在生产负荷突然增加时，系统的冷却需求增大，循环水的蒸发量和水质变化速度加快，而传统控制策略可能无法及时提高浓缩倍数，导致补水量增加，节水效果下降；反之，在生产负荷降低时，又可能因浓缩倍数过高而引发结垢、腐蚀等问题，难以保证系统在不同工况下都能实现高效节水减排。

2.2.3 缺乏系统性： 现有的浓缩倍数控制大多只关注单一水质指标，如仅以电导率作为主要控制依据，忽视了各水质指标之间的相互关联以及与系统运行工况的内在联系。实际上，循环水中的各种离子、物质之间存在着复杂的化学平衡关系，单一指标的变化往往会引发连锁反应。在追求高浓缩倍数以节水时，如果只关注硬

度指标,而忽略了碱度、pH 值等指标的协同变化,很容易打破水中的化学平衡,导致碳酸钙、磷酸钙等水垢析出,引发结垢问题;同时,某些离子浓度的升高还可能加剧设备的腐蚀,影响系统的安全稳定运行。

3 循环水系统浓缩倍数的影响因素分析

3.1 水质特性

循环水的原水水质是影响浓缩倍数的基础因素。水中的硬度(主要由钙、镁离子组成)、碱度、pH 值、悬浮物等指标,直接决定了循环水在浓缩过程中是否容易产生结垢、腐蚀等问题。当水中钙、镁离子含量较高时,随着浓缩倍数的不断增加,水中的钙、镁盐类浓度逐渐升高,当超过其溶解度时,就会形成碳酸钙、硫酸钙等水垢,附着在设备表面,降低设备的传热效率,增加能耗。水中的氯离子、硫酸根离子等腐蚀性离子含量过高时,会破坏金属表面的保护膜,加速设备的腐蚀进程,缩短设备使用寿命。此外,pH 值对水质稳定性也有着重要影响,酸性环境下设备易发生腐蚀,碱性环境下则容易产生结垢现象。

3.2 设备工况

循环水系统的设备类型、运行参数等工况因素对浓缩倍数的合理控制起着关键作用。换热器作为循环水系统中的核心设备,其材质(如不锈钢、铜合金等)、结构(板式、管式等)和传热效率的不同,对水质要求也存在差异。传热效率高的换热器,其表面温度相对较高,更容易促使水中的钙、镁离子结晶析出,形成结垢,因此需要更严格地控制浓缩倍数以防止结垢发生。冷却塔的通风条件、淋水密度等运行参数同样会影响循环水的水质变化和浓缩过程。通风不良会导致循环水温度升高,加速水中微生物的繁殖和化学反应的进行;淋水密度过大或过小都会影响水的蒸发效率 and 水质均匀性,进而影响浓缩倍数的控制。

3.3 运行管理

循环水系统的运行管理水平直接关系到浓缩倍数控制策略的实施效果。操作人员的专业素质和操作规范程度对系统运行起着决定性作用。具备丰富专业知识和实践经验的操作人员,能够及时发现系统运行中的潜在问题,并采取有效的应对措施;反之,操作不当可能会导致系统运行异常,影响浓缩倍数控制效果。维护保养措施的落实情况也至关重要,定期对设备进行清洗、检修,能够及时清除设备表面的污垢和腐蚀产物,保证设备正常运行,为合理控制浓缩倍数创造良好条件。此外,水质监测的频率和准确性直接影响控制策略的调整及时性和有效性,只有确保水质数据的准确可靠,才能

制定出科学合理的浓缩倍数控制方案。

4 基于节水减排的浓缩倍数控制策略优化

4.1 动态监测系统构建

为实现对循环水系统的全面、实时监测,构建基于先进传感器技术和物联网技术的动态监测系统。在循环水系统的关键部位,如冷却塔出水口、换热器进出口、循环水泵进出口等,安装高精度的电导率传感器、pH 传感器、硬度传感器、腐蚀速率传感器、温度传感器、流量传感器等多种在线监测设备。这些传感器能够实时采集循环水的各项水质指标和设备运行参数,并将数据通过物联网技术,以无线或有线的方式传输至数据处理中心。数据处理中心构建三级数据处理架构,采用流式计算框架 Flink 与分布式存储系统 Hadoop 相结合的技术体系,对循环水系统中 pH 值、电导率、浊度、微生物含量等传感器采集的分钟级数据进行实时处理。通过建立基于机器学习的 LSTM 预测模型和关联规则挖掘算法,不仅能精准捕捉水质参数间的耦合关系,还可提前 72 小时预测结垢风险、腐蚀倾向等异常情况。同时引入数字孪生技术,将循环水系统三维可视化建模,通过动态热力图直观呈现冷却塔、换热器等关键设备的运行效率。在数据展示层面,开发定制化的 BI 看板系统,设置基础参数监控、趋势预测分析、异常告警三大模块。操作人员可通过交互式仪表盘实时查看浓缩倍数与补水流量的动态平衡曲线,管理人员则可通过时空热力图掌握全厂区循环水系统的能耗分布。系统自动生成的异常诊断报告,包含故障概率、影响范围及处置建议,结合专家知识库实现智能化决策支持,将传统经验驱动的运维模式升级为数据驱动的精准调控^[4]。

4.2 智能调控模型建立

基于动态监测系统采集的数据,结合循环水系统的运行原理和水质变化规律,运用人工智能和机器学习技术,建立智能调控模型。该模型以节水减排为核心目标函数,将水质指标(如电导率、硬度、碱度、pH 值、腐蚀性离子浓度等)、设备工况参数(如换热器传热效率、冷却塔通风量、循环水泵流量等)以及环境参数(如温度、湿度等)作为约束条件。在数据预处理阶段,通过数据清洗剔除异常值和缺失值,运用主成分分析(PCA)对 COD、pH 值、浊度等 20 余项水质参数进行降维处理,构建包含 3000 组样本的特征工程数据集。模型训练过程中,采用 LSTM 神经网络结合注意力机制搭建时序预测模型,同时引入粒子群优化算法(PSO)对支持向量机(SVM)的核函数参数进行调优,最终经交叉验证显示,LSTM 模型对浊度和硬度的预测误差控制在

$\pm 3\%$ 以内, SVM 模型对电导率的预测精度达到 97.6%。实际应用时, 部署于边缘计算节点的智能调控模型以 10 秒为间隔实时采集循环水泵频率、换热器进出口温差等运行参数, 结合气象数据(环境温湿度、蒸发量)构建动态工况矩阵。当检测到冷却塔风机转速突变或生产负荷波动超过阈值时, 模型通过强化学习算法在 1 秒内完成 1000 次蒙特卡洛模拟, 计算出最优排污-补水组合策略。系统集成电动调节阀开度控制模块, 通过 Modbus 协议与 PLC 系统通信, 实现排污阀开度 0.1% 级调节精度, 补水流量控制误差小于 $\pm 0.5\text{m}^3/\text{h}$ 。经某石化企业现场测试, 该智能调控系统使循环水浓缩倍数从 4.2 提升至 5.8, 年节水量达 120 万吨, 排污量减少 43%, 同时通过在线腐蚀监测仪反馈数据显示, 系统金属腐蚀速率始终维持在 0.07mm/a 的安全阈值内^[3]。

4.3 优化后的控制策略实施

在实际运行过程中, 优化后的控制策略依托先进的自动化控制系统, 构建起闭环式智能调控体系。系统首先通过在线水质分析仪实时监测循环水中的电导率、pH 值、硬度等关键指标, 结合预先设定的浓缩倍数目标阈值与系统运行参数, 将数据传输至智能调控模型。该模型基于模糊控制算法与机器学习技术, 动态分析数据并计算出当前工况下的最优排污量与补水量。随后, 模型向执行机构发送精细化控制指令: 电动排污阀依据指令自动调节开度, 通过精准控制排污流量, 及时排出系统中累积的高浓度盐分与杂质; 电动补水阀同步响应, 按照计算需求补充新鲜水源, 确保系统水量平衡。为避免调节过程中的波动, 系统采用 PID 调节技术, 对阀门开度进行渐进式微调, 实现浓缩倍数的平滑过渡。同时, 系统配置故障诊断模块, 当检测到执行机构异常或水质突变时, 立即触发报警并启动应急调节预案, 保障循环水系统在全工况下稳定运行, 持续实现节水减排目标。同时, 结合人工巡检和数据分析, 对系统运行情况进行定期评估和优化调整。操作人员按照规定的巡检路线和

标准, 对系统设备进行日常检查, 及时发现设备运行中的异常情况, 如管道泄漏、设备振动异常等, 并将信息反馈至控制系统。数据分析人员定期对系统运行数据进行深入分析, 评估控制策略的实施效果, 根据实际情况对智能调控模型的参数进行优化调整。当发现系统出现结垢、腐蚀等异常情况时, 及时调整控制策略, 并采取相应的化学处理措施, 如投加缓蚀剂、阻垢剂等, 确保系统的正常运行^[1]。

结束语

本论文通过对循环水系统浓缩倍数控制现状与问题的深入分析, 系统探讨了影响浓缩倍数的各种因素, 并在此基础上提出了基于动态监测与智能调控的浓缩倍数优化控制策略。通过实际案例分析和数据模拟, 验证了该策略在实现节水减排、提高循环水系统运行效率方面的显著效果。然而, 循环水系统的运行工况复杂多变, 受到多种不确定因素的影响。未来的研究需要进一步完善动态监测系统, 提高传感器的精度和可靠性, 拓展监测参数的范围, 实现对循环水系统更全面、更精准的监测。同时, 持续优化智能调控模型, 引入更先进的人工智能算法, 增强模型对复杂工况的适应能力和预测准确性。加强对特殊工况下浓缩倍数控制策略的研究, 如极端天气条件、突发水质污染等情况, 为不同工业领域循环水系统的高效运行和节水减排提供更有利、更全面的技术支持, 推动工业循环水系统向智能化、绿色化方向发展。

参考文献

- [1] 董萍,李健。工业循环水系统节水减排技术研究进展[J]. 水处理技术,2020, 46 (5): 1 - 6.
- [2] 何哲,赵鹏飞。循环水系统浓缩倍数控制与水质管理[J]. 工业水处理,2019, 39 (8): 12 - 16.
- [3] 刘丽。工业循环水系统节水减排策略研究[J]. 化工进展,2021, 40 (10): 1123 - 1129.
- [4] 刘达,冯建刚。大数据分析在循环水系统优化中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置,2023, 54 (3): 45 - 50.