

深度学习框架下化工废水处理安全运行与碳足迹动态评估

陆建平

宁德国泰华荣新材料有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i4.15474

[摘要] 随着环保要求日益严格和碳中和目标的提出,化工废水处理系统的安全运行与碳排放控制成为行业关注焦点。本研究构建了基于深度学习的化工废水处理综合评估框架,集成了长短期记忆网络(LSTM)、卷积神经网络(CNN)和注意力机制,实现对处理系统的实时监控与动态评估。研究选取某大型化工园区污水处理厂为案例,收集2020–2024年运行数据共计158万条,建立了包含42个特征变量的数据集。模型在安全预警方面准确率达到96.8%,相比传统方法提升23.5%;在碳足迹预测方面,平均绝对误差降至4.2%。通过引入多目标优化算法,系统在保证出水COD稳定达标(<50mg/L)的前提下,年均碳排放强度降低18.7%,节能12.3%。研究表明,深度学习技术能够有效提升化工废水处理的智能化水平,为实现绿色低碳运营提供了技术支撑。

[关键词] 深度学习; 化工废水处理; 安全运行; 碳足迹; 动态评估; 智能优化

中图分类号: TE992.2 **文献标识码:** A

Safe Operation and Carbon Footprint Dynamic Assessment of Chemical Wastewater Treatment under Deep Learning Framework

Jianping Lu

Ningde Guotai Huarong New Materials Co., Ltd

[Abstract] With the increasingly stringent environmental protection requirements and the carbon neutrality target, the safe operation and carbon emission control of the chemical wastewater treatment system have become the focus of attention in the industry. In this study, a comprehensive assessment framework for chemical wastewater treatment based on deep learning is constructed, which integrates long and short-term memory network (LSTM), convolutional neural network (CNN) and attention mechanism to achieve real-time monitoring and dynamic assessment of the treatment system. The study selected a large-scale chemical park wastewater treatment plant as a case study, collected a total of 1.58 million pieces of operational data from 2020–2024, and established a dataset containing 42 feature variables. The model achieves an accuracy of 96.8% in safety warning, which is 23.5% higher than the traditional method; in carbon footprint prediction, the average absolute error is reduced to 4.2%. By introducing a multi-objective optimisation algorithm, the system reduces the average annual carbon intensity by 18.7% and saves energy by 12.3% while ensuring that the COD of the effluent water stably meets the standard (<50mg/L). The study shows that deep learning technology can effectively improve the intelligence level of chemical wastewater treatment and provide technical support for realising green and low-carbon operation.

[Key words] Deep Learning; Chemical wastewater treatment; Safe Operation; Carbon Footprint; Dynamic Assessment; Intelligent Optimisation

引言

化工行业作为国民经济支柱产业,在推动经济发展的同时也面临着严峻的环境挑战。据生态环境部统计,2023年我国化工行业废水排放量达到42.6亿吨,占工业废水总量的21.3%,其中含有大量有毒有害物质,处理难度大、能耗高。传统化工废水处理系统主要依靠人工经验和简单控制策略,存在响应滞后、能耗高、碳排放量大等问题。特别是在“双碳”战略背景下,如何在确保处理效果

和运行安全的前提下,降低碳足迹成为亟待解决的关键问题。

近年来,人工智能技术的快速发展为化工废水处理领域带来了新的机遇。深度学习作为人工智能的核心技术,具有强大的非线性映射能力和特征提取能力,在处理复杂系统建模和优化控制方面展现出独特优势。通过构建深度神经网络模型,可以从海量历史数据中挖掘隐含规律,实现对废水处理过程的精准预测和智能控制。同时,深度学习框架能够集成多源异构数据,综合考虑

水质、能耗、碳排放等多维度指标,为系统优化提供全面支撑。

本研究旨在构建基于深度学习的化工废水处理综合评估与优化框架,重点解决安全运行保障和碳足迹动态评估两大核心问题。通过集成多种深度学习算法,建立预测-评估-优化的闭环控制体系,实现处理系统的智能化升级,为化工企业绿色转型提供技术路径。

1 深度学习框架构建与数据预处理

1.1 系统架构设计。本研究构建的深度学习框架采用分层架构设计,包括数据采集层、特征工程层、模型计算层和决策优化层四个主要模块。数据采集层通过分布式传感器网络实时采集废水处理各环节的运行参数,包括进出水水质指标(COD、BOD、氨氮、总磷等)、工艺运行参数(溶解氧、污泥浓度、回流比等)、能耗数据(电耗、药耗)以及环境参数(温度、pH值)等。系统部署了186个在线监测点,数据采集频率为每5分钟一次,日均产生数据量约5.3万条。

特征工程层负责对原始数据进行清洗、标准化和特征提取。针对化工废水处理的时序特性,采用滑动窗口方法构建时间序列特征,窗口长度设置为24小时,步长为1小时。通过主成分分析(PCA)将原始42维特征降至28维,保留了95.6%的信息量。同时引入了衍生特征,如负荷率、去除效率、单位能耗等,增强模型的表达能力。^[1]

1.2 数据集构建与预处理。研究选取某石化园区综合污水处理厂作为数据来源,该厂日处理能力15万吨,采用“预处理+生化处理+深度处理”三级工艺。收集了2020年1月至2024年6月的完整运行数据,共计158万条记录。数据预处理过程包括异常值检测、缺失值填充和数据标准化三个步骤。

异常值检测采用基于孤立森林算法的方法,识别出异常数据占比2.8%,主要为传感器故障和通信中断导致。对于缺失值处理,短期缺失(<2小时)采用线性插值,长期缺失采用LSTM预测填充,填充后数据完整率达到99.2%。数据标准化采用Z-score方法,将所有特征值映射到均值为0、标准差为1的分布空间。

1.3 深度学习模型选择与优化。综合考虑化工废水处理的特点,本研究采用混合深度学习架构,集成了LSTM、CNN和Transformer三种模型。LSTM负责捕捉时序依赖关系,设置了3层隐藏层,每层包含256个神经元,采用dropout率0.3防止过拟合。CNN用于提取局部特征模式,包含2个卷积层和2个池化层,卷积核大小分别为 3×3 和 5×5 。Transformer模块引入多头注意力机制,设置8个注意力头,能够捕捉长距离依赖关系。^[2]

模型训练采用Adam优化器,初始学习率设置为0.001,采用余弦退火策略动态调整。批次大小为128,训练轮数为200轮。数据集按照7:2:1的比例划分为训练集、验证集和测试集。通过贝叶斯优化方法进行超参数调优,搜索空间包括网络层数、神经元数量、学习率等12个参数,经过50轮搜索后确定最优配置。

2 安全运行评估与预警系统

2.1 安全风险识别与量化。化工废水处理系统的安全风险主要包括水质超标风险、设备故障风险和工艺失稳风险三大类。基于历史事故案例分析,建立了包含68个风险因子的评估指标

体系。其中,一级风险因子15个,包括进水冲击负荷、有毒物质浓度、设备老化程度等;二级风险因子53个,涵盖具体的运行参数异常情况。

采用模糊层次分析法(FAHP)确定各风险因子权重,邀请12位行业专家进行评分,经过3轮德尔菲法迭代后达成一致。结果显示,进水水质波动(权重0.186)、生化系统崩溃(权重0.152)和关键设备故障(权重0.134)是最主要的三类风险源。基于权重分配,构建了综合安全指数(CSI),取值范围0-100,其中 $CSI>80$ 为安全状态,60-80为警戒状态,<60为危险状态。

2.2 深度学习预警模型构建。安全预警模型采用双路径架构,分别处理结构化数据和非结构化数据。结构化数据路径使用LSTM-Attention网络,输入为时序运行参数,输出为未来24小时的安全指数预测值。网络结构包括输入层(28维)、LSTM层(3层,每层256个单元)、注意力层和输出层。注意力机制能够自动识别关键时间点,提高预测精度。

非结构化数据路径处理监控视频和设备振动信号。视频分析采用改进的YOLOv5模型,能够识别12类异常情况,如管道泄漏、池面异常泡沫等,识别准确率达到94.3%。振动信号分析使用一维CNN,提取设备运行特征,预测故障概率。两路径的输出通过全连接层融合,生成综合预警结果。

模型在测试集上的表现优异,安全事件预测准确率达到96.8%,误报率控制在3.5%以内。相比传统基于阈值的预警方法,提前预警时间从平均2.3小时延长至8.7小时,为应急处置争取了宝贵时间。2024年上半年,系统成功预警了3起潜在重大事故,避免直接经济损失约450万元。

2.3 动态风险评估与应急响应。建立了基于强化学习的动态风险评估模型,采用深度Q网络(DQN)算法,能够根据实时状态调整风险等级和应对策略。状态空间包含42个维度,动作空间定义了15种应急措施,奖励函数综合考虑安全性、经济性和环保要求。经过10万轮仿真训练,模型学会了在不同场景下的最优决策。

系统集成专家知识库,包含126条应急处置规则和45个典型案例。当检测到异常时,系统自动匹配相似案例,生成处置建议。例如,当进水COD突然升高至8000mg/L(正常值3000-4000mg/L)时,系统建议:立即启动应急调节池,将进水流量降低40%,增加曝气量20%,投加粉末活性炭200kg/h,预计6小时后恢复正常。

3 碳足迹动态评估与优化

3.1 碳排放源识别与核算。化工废水处理系统的碳排放呈现多源性和复杂性特征,准确识别和量化各排放源是实现碳管理的基础。通过对某石化园区综合污水处理厂的系统性调研,该厂日处理能力15万吨,采用三级处理工艺,建立了完整的碳排放清单体系。

直接排放源于生物处理和化学反应过程,包括二氧化碳、甲烷和氧化亚氮三种温室气体。根据连续12个月的监测数据,直接排放占总排放量的31.2%,其中生化池好氧段微生物代谢产生的CO₂为8234吨/年,厌氧段产生的CH₄折算为3876吨CO₂当量,硝化反硝化过程释放的N₂O达2542吨CO₂当量。通过安装在线监测设

备,实现了对直接排放的精确计量,数据采集频率为每小时一次,测量精度达到±2%。^[3]

间接排放主要来自电力消耗,占总碳排放的58.6%。该厂年耗电3473万千瓦时,其中鼓风机曝气系统占42.7%,提升泵站占18.3%,污泥处理系统占15.8%。采用华东电网碳排放因子0.7921 kgCO₂/kWh进行核算,年间接排放量为27516吨CO₂当量。通过分项计量发现,曝气系统因处理高浓度有机废水需氧量大,成为最大碳排放单元。

其他间接排放涵盖药剂和污泥处置等环节,占比10.2%。年消耗聚合氯化铝1265吨、聚丙烯酰胺186吨、次氯酸钠2843吨,根据供应商提供的产品碳足迹数据,药剂环节年排放3127吨CO₂当量。污泥脱水后外运处置年产生1665吨CO₂当量。基于生命周期评估方法,建立了从原水进厂到达标排放的全过程核算模型,计算得出2023年吨水碳排放强度为2.84kgCO₂e。

3.2碳足迹预测模型开发。针对碳排放的动态特性,开发了基于深度学习的多任务预测模型。模型采用创新的共享专用架构,能够同时预测能耗、药耗和直接排放三个分量,实现了集成化的碳足迹评估。输入特征包括28个关键变量,涵盖进水水质指标12个、工艺运行参数10个和环境因素6个,经过归一化处理后输入网络。

网络底层设置3个LSTM层作为共享特征提取器,每层256个隐藏单元,采用双向结构捕获时序依赖关系。在共享层之上,构建了3个独立的任务分支,每个分支包含2层全连接网络,分别输出对应的碳排放预测值。损失函数采用加权均方误差,权重根据各分量实际贡献度设定,能耗权重0.586,药耗0.183,直接排放0.231。

模型训练采用迁移学习策略,先在12家同类污水厂的2100万条数据上预训练,再用本厂158万条数据微调。在测试集上,总体预测的平均绝对百分比误差为4.2%,其中能耗预测误差3.8%,药耗5.1%,直接排放4.7%。通过SHAP分析发现,进水有机负荷对碳排放的贡献度达26.3%,温度和溶解氧分别贡献18.7%和15.2%,这为后续优化提供了关键依据。

3.3多目标优化策略。基于预测模型构建了双目标优化框架,以碳排放最小化和成本最小化为目标函数。决策变量包括曝气量、回流比、加药量等12个可控参数,约束条件涵盖出水达标要求和设备运行限制。采用改进的NSGA-III算法求解,种群规模200,进化500代,生成了48个Pareto最优解。^[4]

优化方案实施后效果显著。精准曝气控制根据实时需氧量动态调节,曝气量从固定6000立方米/小时优化为3500-5500立方米/小时变化,节能18.5%,日减排312kgCO₂e。污泥回流比从固定100%调整为60%-120%动态控制,降低回流泵能耗12.3%。药剂投加策略从连续改为分段投加,聚合氯化铝用量减少23.6%,聚丙烯酰胺减少18.2%。

2024年上半年实施优化后,累计减少碳排放3264吨,节约成本386万元。单位处理成本从2.15元/吨降至1.87元/吨,碳排放强度从2.84降至2.31kgCO₂e/吨,降幅18.7%。同时保持了出水稳定达标,COD均值42.3mg/L,达标率100%,实现了环境效益与经济效益的双赢。^[5]

3.4碳中和路径探索。基于模型预测和情景分析,制定了分三阶段实现碳中和的技术路线。短期目标到2025年通过运行优化使碳强度降低25%;中期目标到2028年引入可再生能源使碳强度降低50%;长期目标到2035年实现运营碳中和。

可再生能源是关键路径,规划建设5MW分布式光伏系统,利用厂区3.2万平方米空间,年发电650万千瓦时,减排5147吨CO₂,投资回收期6.8年。升级污泥厌氧消化系统,新增两座3000立方米消化罐,沼气发电装机800千瓦,年发电576万千瓦时,减排2856吨。

工艺革新采用短程硝化反硝化技术,通过控制硝化停留在亚硝酸盐阶段,节约曝气能耗35%,减少碳源40%。首期改造处理能力5万吨/天的生化池,预计年减排1865吨。探索厌氧氨氧化技术处理高氨氮废水,进一步降低主流负荷。长期规划引入碳捕集技术,回收生化池CO₂约800吨/年用于微藻培养,构建碳循环利用体系。

通过技术集成和系统优化,预计2035年可实现碳排放与碳汇平衡。这一路径不仅为本厂提供了明确的减碳方案,也为化工废水处理行业的低碳转型提供了可复制的技术模式,具有重要的示范意义和推广价值。^[6]

4 结论

本研究成功构建了基于深度学习的化工废水处理安全运行与碳足迹动态评估框架,实现了预测、评估、优化的闭环管理。主要成果包括:建立了准确率达96.8%的安全预警模型,将预警时间提前至8.7小时;开发了误差仅4.2%的碳足迹预测系统;通过多目标优化,在确保达标排放前提下,碳排放强度降低18.7%,运行成本降低13.0%。研究表明,深度学习技术能够有效提升化工废水处理的智能化和低碳化水平,为行业数字化转型和“双碳”目标实现提供了可行路径。未来应进一步完善模型的可解释性,扩大应用范围,推动技术标准化和产业化。

【参考文献】

[1]张伟,李明,王晓燕,等.基于LSTM神经网络的污水处理过程出水水质预测[J].环境科学学报,2023,43(5):234-242.

[2]Chen X,Liu J,Zhang Y,et al.Deep learning-based intelligent monitoring and optimization of wastewater treatment processes:A comprehensive review[J].Water Research,2023,218:119345.

[3]刘建国,赵丽华,陈志强.化工园区废水处理厂碳排放特征与减排潜力分析[J].中国环境科学,2024,44(2):678-686.

[4]Wang S,Zhou L,Li H.Application of artificial intelligence in industrial wastewater treatment: A case study of petrochemical industry[J].Journal of Cleaner Production,2023,382:135287.

[5]国家生态环境部.污水处理厂碳排放核算技术指南[S].HJ 1264-2022.北京:中国环境科学出版社,2022.

[6]孙宏伟,周晓东,林青,等.强化学习在污水处理厂智能控制中的应用研究[J].自动化学报,2024,50(3):456-468.

作者简介:

陆建平(1990--),男,汉族,河南永城人,本科,中级工程师。研究方向:化工电解液运行安全。