

工业废水处理厂污泥含水率智能监测与 高效脱水技术优化

陈秀芳

佛山市南海西樵鑫龙水处理有限公司, 广东 佛山 528000

DOI: 10.61369/EAE.2025010007

摘要： 文章介绍了传统污泥含水率监测技术和脱水工艺的局限，阐述了多源感知数据融合方法、LSTM – CNN混合神经网络模型等创新技术在污泥含水率监测与脱水过程中的应用，还涉及多种技术对脱水效率的影响以及运行经济性对比等内容，指出当前研究的不足和未来方向

关键词： 污泥含水率；监测技术；脱水工艺

Optimization of Intelligent Monitoring and Efficient Dewatering Technology for Sludge Moisture Content In Industrial Wastewater Treatment Plant

Chen Xiufang

Foshan Nanhai Xiqiao Xinlong Water Treatment Co., LTD. Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This article introduces the limitations of traditional sludge moisture content monitoring technology and dewatering processes. It expounds on the application of innovative technologies such as multi-source perception data fusion methods and the LSTM–CNN hybrid neural network model in sludge moisture content monitoring and the dewatering process. It also covers the influence of various technologies on dewatering efficiency and the comparison of operation economics. Additionally, it points out the deficiencies of current research and future directions.

Keywords： sludge moisture content; monitoring technology; dewatering process

引言

随着环保要求的不断提高（如2023年发布的相关环保政策强调加强工业废水处理监管），工业废水处理厂污泥含水率的监测与脱水技术优化成为关键课题。传统的人工采样检测法和离线干燥法等含水率监测技术以及机械压滤和热干化等脱水工艺存在诸多局限，如监测时效性差、准确性受影响以及运行效率低下、能耗高且易造成二次污染等问题。在此背景下，多源感知数据融合方法、智能算法的应用以及对脱水机理的研究等为解决这些问题提供了新思路，对实现污泥含水率的智能监测与高效脱水技术优化具有重要意义。

一、工业污泥处理技术现状与问题分析

（一）传统含水率监测技术局限性

人工采样检测法和离线干燥法是传统的含水率监测技术，但存在诸多局限性。人工采样检测法需要人工定期采集污泥样本，然后在实验室进行分析，这一过程耗时较长，导致时效性差。而且在采样、运输和分析过程中可能会引入误差，随着时间推移误差不断累积，影响监测结果的准确性。离线干燥法同样需要较长时间来获取结果，不能及时反映污泥含水率的变化情况。此外，传感器单一参数监测也存在不足，仅依靠某一个参数来判断含水率可能会受到其他因素的干扰，无法全面、准确地反映污泥的真实含水率状况^[1]。

（二）脱水工艺运行效率瓶颈

机械压滤和热干化是常见的污泥脱水工艺，但存在诸多运行

效率瓶颈。机械压滤在处理大量污泥时，能耗会显著增加，同时处理量难以满足工业生产需求，导致整体效率低下^[2]。热干化工艺虽能有效降低污泥含水率，但能耗过高，限制了其大规模应用。此外，在污泥脱水过程中，为提高脱水效果，往往会过量投加药剂。这不仅增加了处理成本，还可能造成二次污染，对环境产生不利影响^[2]。这些问题严重制约了脱水工艺的运行效率，亟待解决。

二、污泥含水率智能监测系统构建

（一）多源感知数据融合方法

该部分主要探讨多源感知数据融合方法。为实现准确的污泥含水率监测，构建基于介电常数传感器、近红外光谱仪和图像识别技术的多模态数据采集系统。介电常数传感器可通过测量污泥

的介电特性来反映含水率^[9]。近红外光谱仪则利用近红外波段的光谱特征与污泥含水率之间的关系进行检测。图像识别技术可从污泥的图像中提取相关特征用于含水率分析。通过对这些不同来源的数据进行融合,综合考虑各传感器的优势和特点,能够更全面、准确地获取污泥含水率信息,为后续的智能监测和高效脱水技术优化提供可靠的数据基础。

（二）深度学习预测模型开发

构建 LSTM - CNN 混合神经网络模型用于污泥脱水过程的含水率预测与异常预警。LSTM（长短期记忆网络）善于处理时间序列数据,能捕捉到污泥脱水过程中含水率随时间变化的趋势^[14]。CNN（卷积神经网络）则在特征提取方面具有优势,可提取污泥相关数据中的关键特征。将两者结合,充分发挥各自优势。首先对污泥脱水过程中的相关数据进行收集与整理,包括污泥的初始性质、处理过程中的温度、压力等参数以及不同阶段的含水率实测值。然后对数据进行预处理,如归一化等操作,使其适合模型输入。接着构建 LSTM - CNN 混合模型,确定网络结构和各层参数。通过大量的训练数据对模型进行训练和优化,使模型能够准确预测污泥含水率,并在含水率出现异常时及时预警。

三、高效脱水工艺优化机理研究

（一）脱水过程关键参数解析

1. 污泥微观结构演变规律

通过 SEM-EDS 联用技术研究絮体结构、孔隙率与脱水效率的关联机制。污泥微观结构对脱水过程至关重要,絮体结构的完整性和孔隙率大小直接影响水分的脱出效率。研究发现,结构紧密且孔隙率适中的絮体更有利于脱水。SEM 技术可直观呈现絮体的微观形态,分析其颗粒大小、形状及排列方式。EDS 则能确定元素组成及分布,进一步揭示污泥的化学特性。综合两者结果,深入了解絮体结构与脱水效率之间的内在联系,为高效脱水工艺的优化提供理论依据^[15]。

2. 压力场 - 温度场耦合效应

在高效脱水工艺中,压力场与温度场的耦合效应至关重要。机械压滤过程中,压力的施加促使污泥中的水分排出,同时,热力作用改变了污泥的物理化学性质,如降低其黏度,增强水分的流动性^[6]。这种耦合效应使得脱水过程更加高效。压力场的分布影响着水分在污泥中的迁移路径,而温度场则通过改变污泥内部的分子运动状态来促进水分的分离。两者相互协同,在合适的压力和温度条件下,能够打破污泥中水分与固体颗粒之间的吸附力和结合力,从而实现更好的脱水效果。深入研究这种耦合效应,对于优化脱水工艺参数,提高脱水效率具有重要意义。

（二）脱水药剂智能调控策略

1. 新型复合调理剂研发

开发基于生物炭基的阳离子聚合物 - 纳米材料复合调理体系。将生物炭与阳离子聚合物及纳米材料复合,利用生物炭的大比表面积和吸附性能,增强对污泥中水分的吸附和固定作用^[7]。阳离子聚合物可中和污泥颗粒表面的负电荷,促进颗粒聚集,减

少颗粒间的静电斥力,从而有利于脱水过程。纳米材料的加入则进一步改善了复合调理剂的性能,可能通过其特殊的物理化学性质,如小尺寸效应、表面效应等,增强对污泥结构的破坏和水分的释放。这种复合调理体系有望提高污泥的脱水效率,为工业废水处理厂污泥含水率的降低提供新的技术手段。

2. 动态加药控制系统

构建模糊 PID 控制算法实现药剂投加量与污泥性质的实时匹配是动态加药控制系统的关键。该算法结合了模糊控制和 PID 控制的优点,能够根据污泥的实时性质,如含水率、粘度等,准确地调整药剂投加量^[8]。模糊控制部分用于处理不确定的污泥性质信息,通过模糊规则和推理,将污泥性质的模糊描述转化为药剂投加量的模糊调整量。PID 控制部分则用于对模糊调整量进行精确的调节,确保药剂投加量能够快速、稳定地达到最佳值。通过这种方式,实现了药剂投加量与污泥性质的实时匹配,提高了脱水效率,降低了药剂消耗。

四、质量控制与工程应用验证

（一）监测系统可靠性验证

1. 数据采集误差控制

在数据采集误差控制方面,采用卡尔曼滤波算法消除传感器信号噪声。该算法通过对系统状态的最优估计,有效降低了噪声对测量数据的干扰,提高了数据的准确性和可靠性^[9]。同时,建立三级校准体系。一级校准在传感器生产环节进行,确保传感器的初始精度;二级校准在安装前进行,针对安装环境对传感器进行微调;三级校准在运行过程中定期开展,以适应设备老化和环境变化等因素带来的影响。通过这一系列措施,从数据采集源头严格控制误差,为工业废水处理厂污泥含水率的智能监测提供了高质量的数据基础。

2. 模型泛化能力测试

为验证模型的泛化能力,采用迁移学习方法对不同行业废水处理厂进行验证。首先收集多个行业废水处理厂的污泥含水率数据以及相关运行参数数据,构建多源数据集。将预训练模型应用于这些数据集,观察模型在不同行业场景下的性能表现。通过对比不同行业数据上的预测准确率、均方误差等指标,评估模型的泛化能力。结果表明,经过迁移学习优化后的模型在不同行业废水处理厂中均能取得较好的预测效果,证明了模型具有较强的泛化能力,可适用于多种行业的污泥含水率智能监测,为工业废水处理厂污泥含水率监测系统的可靠性提供了有力支撑^[10]。

（二）脱水工艺优化效果评估

1. 能耗比评价模型

构建单位处理量综合能耗指标体系,涵盖机械能、热能及药剂消耗,以评估脱水工艺优化效果。机械能主要考虑污泥脱水设备运行所需电耗等;热能涉及加热过程中的能量损耗;药剂消耗则包括在污泥处理中各类化学药剂的使用量。通过精确测量和统计这些能耗指标,建立能耗比评价模型。该模型可综合反映脱水工艺在实际运行中的能耗情况,对比优化前后的数据,直观展现

工艺优化对能耗的影响。同时，依据模型分析结果，可进一步挖掘节能潜力，为持续优化脱水工艺提供有力依据，实现工业废水处理厂污泥脱水过程的高效节能。

2. 脱水产物特性分析

检测优化后污泥的资源化利用指标至关重要。污泥热值是衡量其能源潜力的关键因素，通过精确测量发现，经过脱水工艺优化后，污泥热值有所提升，这为其后续可能的能源化利用提供了更好的基础。同时，重金属固化率也是不容忽视的指标。优化后的工艺使得重金属固化率提高，减少了重金属在环境中的迁移性和生物可利用性，降低了对环境的潜在危害。这些指标的改善表明脱水工艺优化不仅在降低含水率方面有成效，还在提升污泥资源化利用价值和环境安全性上具有积极作用。

(三) 工程示范应用研究

1. 智能脱水车间建设

某工业园区废水处理厂进行了全流程自动化改造，其中智能脱水车间建设是关键部分。该车间采用先进的智能监测设备，对污泥含水率进行实时精准监测。通过传感器等技术，将数据及时反馈至控制系统。在设备方面，选用高效节能的脱水设备，并进行合理布局，以提高脱水效率。同时，建立了完善的自动化控制系统，可根据监测数据自动调整设备运行参数，确保脱水效果稳定。车间还配备了专业的维护团队，定期对设备进行检查和维护，保障设备正常运行。此外，对车间的运行数据进行详细记录和分析，以便不断优化工艺，提高智能脱水车间的整体性能，实

现污泥含水率的有效降低和处理效率的提升。

2. 运行经济性对比

对工业废水处理厂污泥含水率智能监测与高效脱水技术优化后的系统与传统工艺进行运行经济性对比。从年度运维成本来看，智能监测与优化技术可能减少了人工频繁检测的成本以及因监测不及时导致的设备故障维修成本。同时，高效脱水技术可能降低了脱水设备的能耗以及相关化学药剂的使用量，从而减少药剂采购成本。在处理效率方面，智能监测能够实时反馈数据，使操作人员可及时调整参数，提高污泥处理的整体效率，减少处理时间，进而可能降低整体运营成本。通过这些关键指标的对比，可直观体现该技术优化的经济优势。

五、总结

工业废水处理厂污泥含水率的监测与脱水技术优化至关重要。多源感知与智能算法为含水率监测带来创新，可更精准地获取数据。机械-化学协同脱水机理的揭示，有助于提高脱水效率。基于数字孪生的污泥处理系统则为未来发展指明方向，能更好地模拟和优化处理过程。然而，当前研究在复杂水质适应性和设备耐久性方面存在改进空间。复杂水质条件下监测技术的准确性和脱水技术的有效性需进一步提升，同时设备的耐久性也关乎技术的长期稳定运行，这都是后续研究需要重点关注方向，以实现污泥含水率的智能监测与高效脱水技术的进一步完善。

参考文献

[1] 徐佩佩. 建筑泥浆高效综合脱水技术研究 [D]. 东南大学, 2015.
[2] 罗文培. 泥浆电渗脱水试验与理论研究 [D]. 郑州大学, 2022.
[3] 马旭. 化学调理剂对市政污泥脱水性能及理化性质的影响研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2018.
[4] 朱红敏. 电渗脱水污泥热干化特性研究 [D]. 天津大学, 2013.
[5] 何足道, 王电站, 颜成, 等. 城市污泥生物沥浸法和化学法调理的效果比较——对污泥理化性质及其深度脱水性能的影响研究 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(03): 1019–1025.
[6] 苗起璋. 污泥高效脱水技术在国内污泥处理中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2013.
[7] 王喻, 李磊, 刘帅, 等. 不同化学调理剂对市政污泥脱水性能及脱水机理的研究 [J]. 环境科学与管理, 2022, 47(02): 107–112.
[8] 康华珊. 污泥调理对污泥理化性质及脱水性能影响的研究 [D]. 燕山大学, 2018.
[9] 吴春旭, 唐明悦, 张鸿涛, 等. 我国不同地区市政污泥理化性质及其对脱水性能的影响 [J]. 环境工程学报, 2021, 15(01): 271–278.
[10] 唐健, 张欢, 曹晶, 等. 市政污泥脱水技术的发展及展望 [J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(08): 106–114.