

污水处理厂自动化加药系统的精准控制技术研究

张金香

重庆市三峡水务有限责任公司 重庆 401123

摘要: 随着环境保护要求的不断提高, 污水处理厂的运行效率和处理效果成为关注的焦点。自动化加药系统作为污水处理过程中的重要环节, 其精准控制对于提高水质达标率、降低药耗成本具有重要意义。本文针对污水处理厂自动化加药系统的精准控制技术进行研究, 分析了影响加药精准度的因素, 提出了基于模型预测控制 (MPC) 和智能传感器技术的精准控制方案, 并通过实验验证了该方案的有效性。研究表明, 该精准控制技术能够显著提高加药系统的准确性和稳定性, 为污水处理厂的优化运行提供了有力支持。

关键词: 污水处理厂; 自动化加药系统; 精准控制; 模型预测控制; 智能传感器

1 影响加药精准度的因素分析

1.1 水质参数的变化

(1) 进水水质的波动

污水进水水质的波动范围极为广泛。工业废水的排放通常具有间歇性且成分复杂, 可能含有重金属、有机毒物等特殊污染物, 其浓度和种类的突然变化会严重影响进水水质。生活污水中, 随着居民生活习惯的改变, 如节假日用水量增加、洗涤剂使用量变化等, 也会导致污水中化学需氧量 (COD)、生化需氧量 (BOD)、悬浮物 (SS) 等主要水质参数出现大幅波动。这些进水水质的不稳定因素给加药系统的精准控制带来了极大挑战, 要求加药系统能够快速响应并调整加药量。

(2) 处理过程中水质的动态变化

在污水处理过程中, 水质并非静态不变。例如, 在生物处理阶段, 微生物的代谢活动会使污水中的有机物逐渐被分解, BOD值不断下降, 同时氮、磷等营养物质的含量也会发生变化。此外, 温度、溶解氧等环境因素的改变也会影响微生物的活性, 进而间接影响水质的动态变化。这些处理过程中的水质动态变化要求加药系统能够实时跟踪并根据变化调整加药策略, 以确保整个处理过程的高效性和稳定性^[2]。

1.2 加药设备的性能

(1) 计量泵的精度和稳定性

计量泵作为加药系统中的核心设备, 其精度和稳定性直接决定了加药的精准度。一些低质量的计量泵在长期运行过程中, 由于机械磨损、密封性能下降等原因, 会出现流量偏差, 导致实际加药量与设定值不符。而且, 计量泵的调节范围有限, 在面对水质变化较大需要大幅度调整加药量时, 可能无法满足精准控制的要求。例如, 某些计量泵的最小调节量过大, 当污水水质较

好、需要微量加药时, 难以实现精准控制。

(2) 搅拌装置的效果

搅拌装置的作用是确保药剂与污水充分混合, 使化学反应能够均匀、高效地进行。若搅拌装置设计不合理或运行不正常, 如搅拌桨叶磨损、搅拌速度不合适等, 会导致药剂在污水中分布不均匀, 部分区域药剂浓度过高, 而部分区域药剂不足, 从而影响污水处理效果。尤其是在处理大流量污水时, 搅拌效果不佳会使加药精准度大打折扣, 降低了药剂的利用率。

1.3 控制算法的适应性

(1) 传统控制算法的局限性

传统的PID控制算法在污水处理加药系统中应用广泛。然而, PID控制主要基于系统的当前误差进行调节, 对于具有较大滞后性和时变性的污水处理过程, 其控制效果并不理想。例如, 从加药到水质变化的反馈存在一定时间延迟, PID控制难以在这段时间内准确预测水质变化并提前调整加药量, 容易造成加药过量或不足。而且, PID参数一旦设定, 在面对复杂多变的水质时, 难以自适应调整, 限制了加药系统的精准控制能力。

(2) 复杂水质条件下的控制难度

在实际污水处理中, 水质条件极为复杂, 多种污染物相互作用, 其化学反应机理复杂。传统控制算法难以对这种复杂的水质情况进行全面、准确的描述和控制。例如, 当污水中同时存在多种重金属离子和有机污染物时, 不同污染物对药剂的反应特性不同, 传统控制算法无法根据这些复杂的反应特性实时调整加药策略, 导致加药精准度下降, 难以满足日益严格的水质排放标准。

2 精准控制技术方案

2.1 基于模型预测控制 (MPC) 的加药控制策略

(1) MPC原理及模型建立

模型预测控制 (MPC) 是一种先进的控制策略, 其核心思想是通过建立系统的预测模型, 预测系统未来的输出, 并根据预测结果和设定的控制目标, 在线优化控制输入序列。在污水处理加药系统中, 首先需要建立一个能够准确描述污水水质变化与加药量之间关系的数学模型。该模型可以基于质量守恒定律、化学反应动力学等原理, 考虑污水中各种污染物的浓度变化、反应速率以及加药后的化学反应过程。例如, 对于絮凝过程, 可以建立基于胶体化学理论的絮凝动力学模型, 描述絮凝剂添加量与悬浮物去除效果之间的关系。通过对历史数据的分析和模型参数的辨识, 不断优化模型, 提高其预测准确性。

(2) 考虑水质变化的动态模型

为了更好地适应水质的动态变化, 所建立的模型需要具有动态特性。引入自适应机制, 根据实时监测的水质参数和加药量数据, 在线调整模型参数, 使模型能够及时跟踪水质变化。例如, 当进水水质突然发生变化时, 模型能够自动调整参数, 重新预测未来的水质变化趋势和所需的加药量。同时, 考虑到污水处理过程中的不确定性因素, 如微生物活性的随机变化、设备运行状态的波动等, 可以在模型中引入随机噪声项, 提高模型的鲁棒性, 确保在复杂多变的工况下仍能实现精准控制。

2.2 智能传感器技术的应用

(1) 传感器的选型与布置

智能传感器是实现精准控制的关键环节。在污水处理厂中, 需要选择能够快速、准确测量多种水质参数的传感器。例如, 采用基于光谱分析技术的COD传感器, 可以实时、在线地测量污水中的化学需氧量; 利用离子选择性电极传感器测量污水中的重金属离子浓度等。在传感器布置方面, 要根据污水处理工艺流程和水质变化特点, 合理选择测量点。在进水口、生物处理池的不同位置、出水口等关键部位布置传感器, 以全面、准确地获取水质信息。同时, 要确保传感器的安装和维护方便, 避免受到污水中杂质的干扰, 保证传感器的长期稳定运行。

(2) 实时监测水质参数的实现

通过建立数据传输网络, 将各个传感器采集到的水质参数实时传输到控制系统。采用无线传感器网络技术或工业以太网技术, 实现数据的快速、可靠传输。控制系统对采集到的实时数据进行分析处理, 利用数据融合算法提高数据的准确性和可靠性。例如, 将多个传感器测量的同一水质参数进行融合处理, 去除异常数据, 得到更准确的水质信息。基于这些实时、准确的水质数

据, 控制系统能够及时调整加药策略, 实现加药系统的精准控制^[3]。

2.3 控制系统的架构与功能

(1) 硬件组成

控制系统的硬件主要包括数据采集模块、控制器、执行机构和人机界面。数据采集模块负责收集智能传感器传输的水质参数和设备运行状态数据, 采用高性能的模数转换芯片, 确保数据采集的精度和速度。控制器选用具有强大计算能力和实时处理能力的工业控制器, 如可编程逻辑控制器 (PLC) 或工业计算机, 运行MPC算法和其他控制程序, 根据实时数据计算出最佳的加药量, 并输出控制信号。执行机构主要包括计量泵、阀门等, 根据控制器的指令精确控制加药量和药剂流量。人机界面采用触摸屏或计算机显示器, 为操作人员提供直观、便捷的操作界面, 可实时显示水质参数、设备运行状态、加药记录等信息, 并允许操作人员进行参数设置、控制模式切换等操作。

(2) 软件设计及人机界面

软件设计采用模块化结构, 包括数据采集与处理模块、模型预测控制模块、设备控制模块和人机交互模块。数据采集与处理模块负责对传感器数据进行实时采集、滤波、校准和存储, 为后续的控制算法提供准确的数据支持。模型预测控制模块实现MPC算法, 根据建立的水质预测模型和实时数据, 优化计算加药控制序列。设备控制模块根据控制器的输出信号, 驱动执行机构实现精准加药。人机交互模块提供友好的人机界面, 包括实时监控画面、参数设置界面、报警信息显示等功能。操作人员可以通过人机界面方便地监控系统运行状态, 调整控制参数, 对异常情况进行及时处理。

3 实验与结果分析

3.1 实验设计

(1) 实验装置与工艺流程

搭建了一套模拟污水处理实验装置, 该装置包括进水箱、模拟污水调配系统、生物处理池、絮凝沉淀池、消毒池和出水水箱等部分。模拟污水通过调配系统按照一定比例混合不同污染物, 以模拟实际污水的水质变化。生物处理池采用活性污泥法, 模拟实际污水处理厂的生物处理过程。絮凝沉淀池用于去除污水中的悬浮物和胶体物质, 消毒池采用二氧化氯消毒。在实验装置的关键位置安装了智能传感器, 如进水口的COD传感器、生物处理池的溶解氧传感器、出水口的水质综合传感器等, 实时监测水质参数。加药系统采用计量泵和搅拌装置, 根据控制系统的指令进行加药操作。

(2) 实验参数设置与测试方案

实验设置了不同的水质工况，包括进水水质的高、中、低浓度变化，以及不同的污染物组成。针对每种水质工况，分别采用传统PID控制和基于MPC的精准控制方案进行实验。在实验过程中，记录加药量、水质参数（如COD、BOD、SS、氨氮等）、设备运行状态等数据。每个工况下进行多次重复实验，以确保实验结果的可靠性。测试方案包括对加药精准度的测试，通过对比实际加药量与理论计算加药量的偏差来评估；对水质达标情况的评估，根据国家规定的污水处理排放标准，判断处理后的水质是否达标；对药耗成本的测试，计算不同控制方案下的药剂使用量和成本。

3.2 实验结果与分析

(1) 加药精准度的对比分析

实验结果表明，基于MPC的精准控制方案在加药精准度方面明显优于传统PID控制。在不同水质工况下，传统PID控制的加药偏差较大，平均偏差达到15%-20%，而基于MPC的精准控制方案加药偏差可控制在5%以内。这是因为MPC能够根据水质预测模型提前调整加药量，有效应对水质变化的滞后性，而PID控制主要依赖当前误差进行调节，无法及时适应水质的动态变化。例如，在进水水质突然升高时，MPC控制方案能够迅速增加加药量，使加药量与水质变化相匹配，而PID控制则需要一定时间才能调整到合适的加药量，导致加药偏差较大。

(2) 水质达标情况的评估

在水质达标方面，采用基于MPC的精准控制方案处理后的污水，各项水质指标达标率显著提高。在模拟的复杂水质工况下，传统PID控制的水质达标率约为70%-80%，而基于MPC的精准控制方案水质达标率可达到95%以上。特别是对于一些难以处理的污染物，如高浓度有机废水和含重金属废水，MPC控制方案能够根据水质变化实时调整加药策略，确保处理后的水质满足排放标准。例如，在处理含重金属离子的污水时，MPC控制方案能够精确控制絮凝剂和重金属捕集剂的添加量，使重金属离子的去除率达到98%以上，有效提高了水质达标率。

(3) 药耗成本的降低效果

通过实验对比了两种控制方案的药耗成本。结果显示，基于MPC的精准控制方案在保证水质达标的前提下，药耗成本降低了20%-30%。这是因为MPC能够精准控制加药量，避免了传统PID控制中因加药过量或不足导致的药剂浪费。在实际运行中，药耗成本是污水处理厂的重要运营成本之一，基于MPC的精准控制方案能够有效降低药耗成本，提高污水处理厂的经济效益。例如，

在处理中等浓度污水时，传统PID控制每月的药耗成本约为5万元，而采用基于MPC的精准控制方案后，药耗成本可降低至3.5万元左右。

4 运用

因CT污水处理厂从2022年开始需执行地方标准，出水TP从0.5mg/l降至0.3mg/l。仅凭生物除磷已无法满足需要，必须辅助进行化学除磷。CT污水处理厂着手于PAC投加系统改造，通过RTC智能投加系统，致力于出水TP稳定达标排放，同时降低PAC单耗，实现节能绿色运行的效果。RTC系统如（图1），即实时控制（Real Time Control）系统，是一种基于数学模拟和动态数学控制模型的智能污水工艺实时控制优化技术，以应对日益严格的污水排放要求和节能降耗的挑战。RTC系统以实时水质工况和动态数学模拟控制模型为基础，根据工艺运行实际状态，实现对污水工艺的实时过程控制。这种控制方式能够削峰减排，有效应对高进水冲击负荷，确保污水排放稳定达标。通过优化工艺参数，如控制硝化和脱硝过程中的曝气量，减少不必要的能源消耗。同时，系统还能根据污染物负荷精确计算药剂投加量，减少药剂消耗，从而降低运行成本。HACH PROGNOSYS系统会对测量值进行智能分析，确保RTC系统控制的可靠性。当测量值可靠性较低时，系统会自动采用备用方案参与优化控制，以保证系统的稳定运行。



图1 CT污水处理厂RTC系统

RTC系统自运行后，可根据目标值（生物池0.17mg/l；高效池0.08mg/l），处理水量及磷酸盐反馈浓度，实时调节除磷剂投加量，并在磷酸盐浓度低于一定值时，停止除磷剂的投加，实现实时优化控制；RTC在确保出口TP达标的基础上，可优化除磷剂投加量，实现除磷剂节约12.53%；且在此前提下，出口TP浓度波动程度也较手动投加时小。自动控制较手动投加出水总磷值更稳定。每年节约成本约10万元。

5 前景

随着环保要求的不断提高和智能化技术的发展，精准控制技术在污水处理领域前景广阔，可用于新建厂，

也能升级现有厂加药系统，提升效率与效果。未来研究方向要优化模型预测控制算法，应对不确定性；加强智能传感器研发，拓展监测指标；借助大数据和人工智能优化加药策略；探索在不同规模、类型污水处理厂的应用模式，为实际工程应用提供更具针对性的解决方案。

参考文献

[1]张帅,矫忠直,周俊强,等.精确除磷加药控制系统模型在宿迁市某污水厂的应用[J].广东化工.2023,50(9).

DOI:10.3969/j.issn.1007-1865.2023.09.058.

[2]张帅,矫忠直,周俊强,等.精确反硝化除氮加药控制系统在污水厂的应用[J].广东化工.2023,50(15).DOI:10.3969/j.issn.1007-1865.2023.15.041.

[3]刘亭亭,刘宝成,田春雨.城镇污水处理厂精确曝气与碳源精准投加系统的应用[J].节能与环保.2022,(12).DOI:10.3969/j.issn.1009-539X.2022.12.036.