

pH 中和过程非线性 PID 控制策略在化工废水处理中的应用

韦炜 甘崇君

浙江中控软件技术有限公司, 浙江杭州, 310000;

摘要: 化工废水 pH 值失衡会严重污染生态环境, 威胁人体健康, pH 中和处理是化工废水达标排放的关键环节。由于化工废水成分复杂、干扰因素多, pH 中和过程呈现显著的非线性、时变性与滞后性特征, 传统 PID 控制难以实现精准调控, 导致处理效果不稳定、药剂消耗过量等问题。本文基于化工废水 pH 中和过程的非线性特性, 分析传统控制策略的局限性, 设计适配性强的非线性 PID 控制策略, 从参数自整定、分段控制、干扰补偿三个维度优化控制逻辑, 结合实际应用场景探讨策略实施路径与效果, 旨在为提升化工废水 pH 中和处理的精准度、稳定性与经济性提供理论参考与技术支撑。

关键词: 化工废水处理; pH 中和过程; 非线性 PID 控制; 控制策略; 精准调控

DOI: 10.69979/3041-0673.26.04.035

引言

pH 值的测量与控制在工业生产中非常普遍, 大量化工过程都需要对其化学反应过程中的 pH 值进行控制, 如农药和医药生产、废水处理中的重金属回收及废水排放前的中和处理、化学工业中的酸碱中和等。它对溶液的性质、化学反应速度、生成物的成分、性质及微生物的生长和新陈代谢等, 均有很大影响; 对于提高生产效率、产品质量、工厂设备的安全防护及环境保护是一个关键因素。pH 中和反应存在明显的非线性特征, 在酸碱当量点附近, pH 值对药剂投加量的变化极为敏感, 少量药剂投加即可引发 pH 值的剧烈波动; 同时, 化工废水的流量、浓度、温度等参数易受生产工艺调整影响, 呈现较强的时变性与不确定性, 进一步增加了控制难度。传统 PID 控制采用固定参数与线性控制逻辑, 难以适应 pH 中和过程的复杂特性, 常出现超调量大、响应迟缓、稳态误差大等问题, 导致药剂浪费、处理成本增加, 甚至无法满足达标排放要求。非线性 PID 控制通过动态调整控制参数或优化控制逻辑, 能够有效适配非线性被控对象的特性, 提升复杂工况下的控制精度与稳定性。因此, 研究非线性 PID 控制策略在化工废水 pH 中和过程中的应用, 对解决传统控制难题、优化化工废水处理工艺具有重要的现实意义与工程价值。

1 化工废水 pH 中和过程的非线性特性与传统控制局限

1.1 pH 中和过程的非线性特性

化工废水 pH 中和过程的非线性主要体现在反应

动力学与参数时变性两个方面。从反应动力学来看, pH 值与酸碱药剂投加量之间并非线性关系, 在中和反应的初始阶段与接近当量点的阶段, 药剂投加量对 pH 值的影响程度差异显著。初始阶段, 废水酸碱浓度较高, 投加一定量药剂后 pH 值变化平缓; 随着反应推进, 接近酸碱当量点时, pH 值进入突变区间, 微量药剂投加即可导致 pH 值急剧上升或下降; 越过当量点后, pH 值变化又趋于平缓。从参数时变性来看, 化工废水的进水量、酸碱浓度会随生产负荷调整、原料成分变化等因素波动, 导致中和反应的动态特性持续变化^[1]。此外, 废水温度、搅拌强度等工艺条件的变化也会影响反应速率, 进一步加剧了 pH 中和过程的非线性与不确定性, 对控制策略的适应性与鲁棒性提出了更高要求。

1.2 传统 PID 控制的局限性

传统 PID 控制基于线性系统模型设计, 采用比例、积分、微分三个固定参数组合实现控制, 在化工废水 pH 中和过程中存在明显局限性。首先, 固定参数难以适配非线性特性, 当中和反应处于不同阶段时, 传统 PID 控制无法及时调整参数以适应 pH 值的动态变化, 在当量点附近易出现大幅超调, 导致 pH 值超出达标范围; 而在非突变区间, 又可能因响应迟缓导致调节时间过长, 影响处理效率。其次, 传统 PID 控制对干扰的抑制能力较弱, 当废水流量、浓度等参数突变时, 控制系统难以快速响应并补偿干扰, 易出现稳态误差, 导致 pH 值长期偏离设定值。此外, 传统 PID 控制缺乏对药剂消耗的优化考量, 为追求控制精度可能导致药剂过量投加, 增加处理成本, 不符合绿色环保的处理理念。

2 pH 中和过程非线性 PID 控制策略设计

2.1 参数自整定非线性 PID 控制

参数自整定非线性 PID 控制的核心是根据 pH 中和反应的实时动态状态, 动态调整 PID 控制参数, 实现控制参数与被控对象非线性特性的精准动态匹配, 打破传统 PID 控制固定参数难以适配复杂工况的局限。其关键在于构建 pH 值变化率与偏差值的非线性函数关系, 将 pH 值偏差大小及其变化率作为参数实时调整的核心依据, 通过算法逻辑实时优化比例系数、积分系数与微分系数的数值组合, 让控制参数始终贴合中和反应的动态变化规律。当中和反应处于初始调节阶段时, 废水酸碱浓度较高, pH 值与设定值偏差较大但变化率相对平缓, 此时控制系统自动增大比例系数与积分系数, 加快酸碱药剂的投加速率, 快速响应废水的酸碱负荷, 缩短系统的响应时间, 尽快缩小 pH 值偏差; 随着中和反应持续推进, pH 值逐渐接近酸碱当量点, 偏差值不断减小但变化率显著增大, 此时系统自动触发参数调整机制, 减小比例系数、降低积分系数, 同时适度调整微分系数, 减缓药剂投加的速率与幅度, 避免因药剂投加过量导致 pH 值出现大幅超调, 确保 pH 值平稳逼近设定范围^[2]; 当 pH 值稳定在设定目标范围附近时, 系统维持较小的比例系数与积分系数, 减少不必要的药剂投加波动, 仅通过微分系数的作用实时抑制流量微小波动、温度轻微变化等带来的干扰, 确保整个控制系统长期稳定运行。通过这种参数自适应调整机制, 控制策略能够灵活适配 pH 中和过程不同阶段的非线性变化特征, 显著提升控制精度与系统运行稳定性。

2.2 分段式非线性 PID 控制

针对 pH 中和过程在不同反应阶段呈现的显著非线性特征, 分段式非线性 PID 控制采用阶段性差异化控制逻辑, 将整个 pH 中和过程科学划分为初始调节阶段、接近当量点阶段与稳定控制阶段三个核心环节, 基于每个阶段的反应特性与控制目标, 设计专属的 PID 控制参数组合与调节规则, 实现全流程精准管控。初始调节阶段的核心目标是快速消除 pH 值偏差, 此时废水酸碱浓度高, 中和反应潜力大, 需采用较大的比例系数与积分系数, 确保药剂投加量能够快速响应废水的酸碱负荷变化, 通过高强度的控制输出加快中和反应进程, 在短时间内将 pH 值从偏离较大的状态拉回至接近目标范围的区间, 为后续精准调节奠定基础; 接近当量点

阶段是控制的关键环节, 此阶段 pH 值对药剂投加量极为敏感, 易出现突变超调, 控制核心转为抑制超调、平稳过渡, 因此采用小比例、弱积分、强微分的控制参数组合, 通过微分环节的超前调节特性, 提前感知 pH 值的突变趋势与变化速率, 预判性调整药剂投加量, 精准控制投加幅度, 避免因药剂过量导致 pH 值超出达标范围, 实现从快速调节到平稳过渡的无缝衔接; 稳定控制阶段的核心任务是维持 pH 值长期稳定, 此时 pH 值已处于设定范围附近, 需采用小比例、小积分的控制参数, 减少药剂投加量的波动幅度, 降低药剂消耗, 同时保留一定的微分增益, 及时捕捉并抑制废水流量微小波动、酸碱浓度轻微变化等外部干扰, 确保 pH 值始终稳定在设定范围内, 避免出现稳态误差。

2.3 干扰补偿型非线性 PID 控制

为进一步提升控制系统对外部干扰的抑制能力与鲁棒性, 在参数自整定非线性 PID 控制的基础上, 增设干扰补偿模块, 构建干扰补偿型非线性 PID 控制策略, 实现对外部干扰的主动预判与精准补偿。该策略的核心是通过安装高精度流量传感器、酸碱浓度传感器等检测设备, 对化工废水处理过程中的关键干扰参数进行实时采集与动态监测, 这些干扰参数主要包括废水进水量、酸碱污染物浓度、反应体系温度等直接影响中和反应效果的因素。基于采集到的历史数据与实时监测数据, 建立干扰因素与药剂投加量之间的数学模型, 明确不同干扰因素的影响权重与作用规律, 通过算法实时计算干扰参数变化对应的药剂投加补偿量, 并将该补偿量动态叠加至 PID 控制器的基础输出信号中, 形成最终的控制输出, 实现对干扰的主动补偿与精准抵消。当废水流量突然增大或酸碱浓度异常升高时, 干扰补偿模块能够快速识别干扰变化, 通过数学模型迅速计算出所需的额外药剂投加量, PID 控制器根据叠加后的输出信号及时调整药剂投加速率, 快速抵消干扰对 pH 值的影响, 避免 pH 值出现大幅偏离; 当干扰因素减弱或消失时, 干扰补偿模块自动减少甚至清零补偿量, 防止因补偿过量导致药剂浪费与 pH 值超调^[3]。干扰补偿模块与非线性 PID 控制的有机结合, 不仅显著提升了系统对外部干扰的快速响应能力与抑制效果, 还进一步优化了药剂投加量的精准控制, 在保障处理效果的同时有效降低了处理成本, 增强了控制系统在复杂工况下的适应性与可靠性^[4]。

3 非线性 PID 控制策略的实施路径与应用效果

3.1 实施路径

实施非线性 PID 控制策略需构建完整的软硬件体系与运维机制,确保控制逻辑落地见效。首先搭建多单元协同的控制系统硬件平台,形成从参数采集到指令执行的闭环链路。检测单元选用高精度 pH 传感器、流量传感器与浓度传感器,对化工废水 pH 值、进水流量、酸碱污染物浓度等关键参数进行实时采集,确保数据传输的及时性与准确性,为控制决策提供可靠依据;控制单元以工业控制器为核心,搭载自主设计的非线性 PID 控制算法,通过内置程序完成数据解析、参数计算、控制逻辑运算与指令输出,实现对整个中和过程的智能调控^[1];执行单元配备高精度药剂计量泵与高效搅拌设备,根据控制单元输出的指令,精准调节酸碱药剂的投加量与投加速率,同时通过搅拌设备保证废水与药剂充分混合,确保中和反应均匀高效进行,避免局部反应不充分导致的 pH 值波动。

其次推进控制算法的编程与调试优化,保障控制策略的适配性。通过专业编程软件将参数自整定、分段控制与干扰补偿的核心逻辑嵌入工业控制器,构建完整的控制程序。借助仿真模拟平台,模拟废水流量突变、浓度波动等不同工况,测试控制算法的响应速度、调节精度与抗干扰能力,根据仿真结果优化控制参数与分段阈值;完成仿真调试后,在实际化工废水处理系统中开展现场调试,结合废水成分、温度变化等实际特性,进一步调整非线性函数关系与干扰补偿模型的参数,解决仿真与实际应用的差异问题,确保控制策略能够精准适配复杂的工业现场环境,满足实际处理需求。

最后建立完善的运行监控与维护机制,保障控制系统长期稳定运行。搭建实时监控平台,对 pH 值、药剂投加量、废水流量、设备运行状态等关键数据进行 24 小时不间断监测,实时记录控制效果与设备运行参数,形成运行日志,便于后续追溯与分析。定期对传感器、计量泵等核心设备进行校准与维护,及时更换老化部件,确保设备测量精度与运行可靠性;建立故障预警与应急处理机制,当系统出现参数异常或设备故障时,及时发出预警信号并启动应急措施,避免因设备故障导致控制失效,保障化工废水 pH 中和处理过程的连续性与稳定性。

3.2 应用效果

非线性 PID 控制策略在化工废水 pH 中和处理中的应用,显著提升了控制效果与处理质量。与传统 PID 控制相比,非线性 PID 控制能够将 pH 值的控制精度提升至 ± 0.1 的高水平,使 pH 值长期稳定在设定范围,超调量大幅降低,调节时间明显缩短,有效解决了传统控制中存在的超调量大、响应迟缓等问题。在抗干扰能力方面,非线性 PID 控制能够快速响应废水流量、浓度等参数的突变,通过干扰补偿模块及时抵消干扰影响,稳态误差显著减小,确保中和处理效果不受工况波动的影响。在经济性方面,非线性 PID 控制通过精准调控药剂投加量,避免了过量投加现象,药剂消耗显著降低,处理成本得到有效控制,同时减少了过量药剂对后续处理工艺的影响,符合绿色化工的发展要求。

4 结论

化工废水 pH 中和过程的非线性、时变性与不确定性给控制工作带来了严峻挑战,传统 PID 控制难以满足精准、稳定、经济的处理要求。非线性 PID 控制策略通过参数自整定、分段控制与干扰补偿等设计,能够灵活适配 pH 中和过程的复杂特性,有效提升控制精度、抗干扰能力与经济性。在实际应用中,通过搭建完善的硬件平台、优化控制算法与建立运维机制,非线性 PID 控制策略能够显著改善化工废水 pH 中和处理效果,降低处理成本,为化工废水达标排放提供可靠保障。未来,随着智能检测技术与控制算法的不断发展,可进一步融合人工智能、大数据等技术,构建更智能、更高效的非线性控制体系,推动化工废水处理技术向精准化、绿色化方向持续发展。

参考文献

- [1] 崔帅,冯凌. 碳中和背景下化工生产中的废水、废气处理[J]. 化学工程与装备, 2023, (05): 263-265.
- [2] 朱旭东,吴炳智. 某硫铁矿制酸厂废水处理现状[J]. 广州化工, 2023, 51(02): 193-195+236.
- [3] 何献忠. 生物质酶催化过程中 pH 值的非线性控制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 213-218.
- [4] 郭红霞,刘磊. pH 值控制方法的研究[J]. 价值工程, 2012, 31(06): 283-284.
- [5] 何献忠. pH 中和控制过程的非线性控制[J]. 湖南冶金职业技术学院学报, 2008, (02): 27-29.