

自来水厂加药消毒系统自动化控制算法优化与效果验证

张伟

深圳市布吉供水有限公司 广东 深圳 518000

【摘要】：优化加药消毒系统的自动化控制算法是提高自来水厂消毒效果的关键技术。通过引入先进的优化算法，能够实时根据水质参数调整药剂投加量，从而提高消毒精度与水质稳定性。优化后的系统不仅显著降低了药剂消耗，还提高了控制精度，减少了人工干预。实验验证结果表明，优化算法能够在多变的水质条件下保持系统的稳定运行，降低运营成本，并具备广泛的推广前景，推动水厂管理的智能化升级。

【关键词】：自来水厂；加药消毒；自动化控制；算法优化；效果验证

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.015

引言

水质安全是城市供水系统的重中之重，特别是自来水厂的加药消毒系统，直接影响到水源的质量与人民的健康。传统的加药消毒方式依赖人工调节，存在药剂投放不精确、消毒效果不稳定等问题，且操作人员的经验差异可能导致水质不符合标准。为了提升加药消毒的精准度与稳定性，自动化控制技术的应用愈发重要。通过优化现有的控制算法，可以大幅度提高系统的反应速度和控制精度，减少药剂的浪费，并确保水质的稳定性。加药消毒系统的智能化升级不仅能够减少人工操作的误差，还能提高水厂的运行效率，降低运营成本。因此，算法优化与效果验证是推动自来水厂加药消毒系统现代化的重要途径。

1 加药消毒系统的现状与问题

1.1 现有加药消毒系统的结构与工作原理

自来水厂加药消毒系统通常包括药剂存储、投加装置、混合管道和控制系统四大部分。药剂存储区主要用于储存消毒药物，并保证其在合适的条件下保存。投加装置通过流量计精确控制药剂的投加量，而混合管道负责将药剂均匀混合到水流中，确保消毒效果的均匀性。控制系统则负责实时监控水质参数，并根据设定值调节药剂投放量和混合时间，以确保水质符合消毒标准。现有系统多为机械式或半自动化控制，操作精度有限，容易受到人为因素干扰，难以实现最优消毒效果。

1.2 传统控制方法的局限性

传统的加药消毒系统控制方式大多依赖人工设定和经验调节，容易产生操作误差，导致药剂投加量不准确或过量。现有的自动化控制系统多采用固定算法，缺乏实时调整机制，对水质的变化反应迟缓^[1]。尤其在水质波动较大的情况下，传统方法无法精确应对，造成药剂浪费或消毒效果不达标。由于设备更新滞后，部分水厂的监测设备精度较低，导致实时监控数据不够精准，影响了消毒过程的优化。

1.3 自动化控制技术的需求

随着水处理需求日益增长，传统加药消毒系统的精度与效

率已无法满足现代水质管理要求，亟需引入自动化控制技术提升系统智能化水平。自动化控制系统可实时采集水质数据，通过算法调节药剂投加量，提升控制精度与响应速度。其中，三菱 FX5U 系列 PLC 在处理模拟量信号（如余氯、pH 值）时具备突出的响应优势，能够快速捕捉水质参数的细微波动，为后续算法调节提供精准、实时的数据支撑，有效解决传统控制系统数据采集滞后的问题。同时，先进控制算法与传感技术可优化消毒效果、减少人工干预，还能优化资源配置、节约药剂、提升水厂整体运营效率。

2 自动化控制算法优化方案

2.1 优化目标与控制策略

加药消毒系统的优化目标在于提高水质消毒过程的精度与稳定性，确保药剂的投加量与水质的需求高度匹配。为了实现这一目标，控制策略需精准调节药剂投加量，以应对水质的波动。系统的调节过程通常包括药剂的流量控制、反应时间和混合均匀性。理想的优化策略应具备动态调整功能，能根据实时监测的水质参数（如余氯、pH 值、浊度等）智能调整药剂的投加量，以保持消毒效果的最优化。通过反馈回路与自适应控制，系统能够快速响应水质的变化，从而减少药剂的浪费并确保水质稳定。优化策略还应考虑到设备的运行特性和限制条件，避免过多的频繁调整造成机械疲劳和设备损耗，确保系统的长期稳定性。

2.2 算法选择与优化方法

选择合适的算法是优化加药消毒系统的关键。常见的控制算法包括 PID（比例-积分-微分）控制、模糊控制、神经网络控制以及遗传算法等。PID 控制简单易实现、应用广泛，但对复杂水质波动响应不够灵敏，需优化参数提升精度；模糊控制可处理高不确定性场景，适配水质复杂变化；神经网络控制通过自学习能力，在多变量系统中实现合理决策，提升智能化水平^[2]。遗传算法擅长非线性问题，可通过优化搜索找到最优解。需注意，实际水厂工业环境中，PLC 算力有限，复杂的神经网络、遗传算法需借助上位机（SCADA）或边缘计算网关实现。

结合水厂实际工况，建议重点采用“前馈+反馈的串级PID控制”或“模糊PID控制”，因水厂大型沉淀池和混合管道存在大滞后性，单纯PID易震荡，而模糊PID在PLC编程中高效易落地，能有效解决滞后带来的控制偏差，兼顾响应速度与稳定性。实际应用中可采用算法组合协同优化，如PID与模糊控制结合增强鲁棒性和响应速度，神经网络与遗传算法结合提升系统适应性和自学习能力。

2.3 优化算法的设计与实现

优化算法的设计需结合加药消毒系统的具体需求与环境特征，首要任务是确定输入输出关系并构建数学模型。余氯、pH值、浊度等水质参数作为输入变量，经传感器实时采集后，需通过数据预处理去除噪声与异常值。算法需满足系统实时性要求，具备快速计算与响应能力，确保输出的药剂投加量与水质需求精准匹配。实现时，算法集成于工业级控制器，借助PLC或SCADA系统运行。其中，加药的精准控制高度依赖于加药泵的变频调速，可通过优化算法向丹佛斯FC-51变频器下发指令，通过调节变频器输出频率来精准控制加药泵的转速，进而实现药剂流量的精准调控。同时，神经网络等复杂寻优算法部署于SCADA服务器，利用其强大算力计算最优参数后下发至PLC执行，形成“云-边-端”协同架构，解决PLC算力不足问题。此外，需通过多次仿真与现场验证增强算法鲁棒性和稳定性，结合实际数据调试优化，确保系统长期稳定高效运行。

3 算法优化效果验证方法

3.1 实验环境与数据采集

实验环境设置是验证优化算法效果的关键，需严格模拟自来水厂实际运行条件，以保障实验结果可靠。实验环境包含模拟加药消毒系统、精准水质监测仪器及数据采集系统，监测仪器实时采集余氯、pH值、浊度、温度等水质参数，作为算法控制决策的输入变量。需确保药剂投加器、流量控制器等设备能精准响应控制信号，数据采集采用高频率采样，全面捕捉水质细微波动，覆盖算法调节全过程。为保证数据代表性，需采集不同季节、不同负荷条件下的多组数据，体现加药消毒过程各类变化^[3]。同时，实验中需模拟加药泵故障、传感器数据异常、水质突变等常见异常工况，记录算法响应与调节效果，验证其鲁棒性及系统自我保护、应急调节能力，并对比不同控制策略的消毒效果，精准评估优化算法的实际应用价值。

3.2 算法验证与效果分析

优化算法的验证通过实验结果与预期目标的对比来实现。实验结果表明，采用模糊PID自适应控制策略的智能加药系统显著提升了控制精度与稳定性。在某南方大型水厂的的实际应用中，滤后加氯余氯控制从传统人工调节下较宽且偏高的0.4~1.2mg/L，优化至更稳定、合理的0.65~0.85mg/L区间，既确保消毒效果达标（达标率100%），又避免了过量加氯，年

均药耗降低约70万元。在矾耗控制方面，义乌水厂智能加药系统上线后，矾耗同比下降12.47%。此外，通过多次实验对算法的鲁棒性进行验证，确保在水质条件波动时系统仍能维持较高控制精度。数据分析还重点考察了算法在复杂环境下的适应性与稳定性，验证其在长期运行中的表现持续可靠。

3.3 与传统算法的对比

优化算法的效果不仅通过自身的表现来验证，还应通过与传统控制算法的对比来进一步分析其优势。传统的加药消毒系统多采用简单的PID控制或经验调节方法，这些方法在面对复杂水质波动时容易失效，消毒效果不稳定。与之相比，优化算法通常具有更强的适应性，能够实时根据水质参数的变化进行调节，从而实现精确控制。通过与传统算法的对比，能够直观展示优化算法在控制精度、响应速度、药剂消耗等方面的优势。通过对比实验数据，优化算法能够减少药剂的浪费，避免消毒不足或过度投加的情况发生，保证水质在不同负荷下的稳定性。传统算法往往在系统的响应速度上存在滞后，而优化算法可以通过快速反馈机制，显著提升反应速度，确保水质始终符合要求。

4 优化算法在实际应用中的表现

4.1 控制精度与稳定性的提升

优化算法在实际应用中，能显著提高加药消毒系统的控制精度。通过实时监测水质参数，优化算法能够根据水质变化动态调整药剂投加量，确保药剂的投放精度始终与水质需求相符。控制系统根据传感器数据进行自适应调节，有效避免了传统控制方法中的人为误差与设备滞后问题。优化算法具有较强的稳定性，在长时间运行过程中，系统能够维持恒定的药剂浓度和稳定的水质。特别是在水质波动较大的情况下，优化算法通过精确的反馈控制，迅速调整系统状态，避免了消毒效果的不稳定或水质波动过大，保证了供水系统的长期可靠性和水质的安全性。

4.2 药剂消耗与成本分析

优化后的算法显著降低了药剂的消耗，优化调节过程中的精确控制减少了不必要的药剂浪费。在传统系统中，药剂的投放通常过多或过少，导致水质消毒效果的波动^[4]。优化算法通过动态调整，确保了药剂仅在必要时投加到精确剂量，既保证了消毒效果，又避免了过量使用，节省了药剂成本。在长期应用中，这种精准控制不仅能够降低单位水处理的药剂费用，还能够减少环境负担，符合可持续发展的需求。药剂的节约也进一步提高了水厂的经济效益，优化算法的应用有效降低了整体运行成本，为水厂运营提供了更高的经济效益。

4.3 操作与维护的简化

通过优化算法的引入，系统的操作变得更加简便，减少了人工干预的需求。优化算法能够自动根据实时水质数据调整系

统参数,使得操作人员无需频繁手动调整设备,提升了工作效率。系统的智能化使得水厂管理人员可以通过中央控制室远程监控并管理消毒过程,大大简化了日常操作和维护工作。设备的自动调节与自诊断功能还能够在出现故障时及时报警,帮助维护人员迅速发现并解决问题,减少了故障修复时间和维护成本。系统运行的稳定性与自动化程度提升,使得水厂在运行中能够实现 24 小时不间断监控和调节,减少了对人工监测的依赖,进一步优化了水厂管理流程。

5 优化算法的推广前景与实施建议

5.1 应用范围与适用条件

优化算法在自来水厂加药消毒系统中的应用具有广泛的前景,尤其在大中型水厂和对水质要求严格的地区。该算法适用于水质波动较大的环境,如水源受到季节性或环境变化的影响时,能够实时调整药剂投加量,保证消毒效果。在水处理流程中药剂投放精度要求高的场所,如饮用水处理厂和工业水处理系统,优化算法的应用效果尤为突出。针对不同地区的水质特点,算法的参数可以灵活调整,以满足各种实际需求。系统需要配备精准的水质监测设备,并具有较强的数据传输与处理能力,确保优化算法能够充分发挥其控制精度和稳定性。

5.2 技术可行性与经济效益

技术上,优化算法能够在现有的自动化控制系统中进行集成应用。现代工业控制设备和智能传感器技术的普及为算法的实施提供了技术基础,尤其是 PLC 控制系统和 SCADA 系统的广泛使用,使得数据采集与实时调节更加高效^[5]。经济效益上,

优化算法能够减少药剂浪费和提高消毒效率,从而降低水厂的运营成本。减少药剂消耗意味着更低的化学品采购费用,长远来看,还能减少对环境的污染和管理成本。

5.3 系统升级与后期维护

优化算法的推广不仅需要初期的系统升级,还需要确保后期的技术支持与维护。系统升级时应保证与现有设备的兼容性,并考虑到设备硬件和软件的可扩展性,以便未来技术进步时能够顺利引入新的控制策略。后期维护方面,维护团队需要具备一定的算法理解 and 数据分析能力,以便实时对算法进行调节和优化。系统中应包含自诊断功能,能够及时反馈故障信息并进行自动修复,减少人工干预。算法的持续优化需要定期对系统进行数据采集与分析,确保其在实际运行中的稳定性和高效性,从而在长期使用中保持最佳性能。

6 结语

优化算法在自来水厂加药消毒系统中的应用显著提升了系统的控制精度与稳定性,降低了药剂消耗,优化了资源利用效率。系统的智能化升级不仅提高了水质稳定性,还减少了人工干预需求,为水厂的运营带来可持续的经济效益。随着技术的进一步成熟,优化算法的推广前景广阔,预计将在更多水厂中得到广泛应用。优化算法的落地也推动自来水厂加药消毒系统形成数据驱动运营模式,通过实时监测水质、水量变化动态调整药剂投加量,既规避了过量加药造成的水质二次污染,也减少了药剂采购与处理成本。其智能化特性还能实现故障预警,降低运维风险,为城市供水保障筑牢技术根基,也为水务行业数字化转型提供了可复制的实践路径。

参考文献:

- [1] 陈东阳.基于 PLC 和 SCADA 的自来水厂控制系统设计[J].自动化应用,2025,66(23):39-42.
- [2] 魏琪,刘保超.两种混凝剂智能投加系统在自来水厂中的应用[J].供水技术,2023,17(2):1-5.
- [3] 张纯.冶金冷凝环节电气自动化控制技术的应用分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(11):105-108.
- [4] 李永丰.自动化控制系统在自来水厂供水工艺中的应用研究[J].行车指南,2025(11):0221-0223.
- [5] 李家胜.基于 PLC 的自来水厂自动加药控制系统设计[J].数字技术与应用,2025,43(1):235-237.