

基于自抗扰的水厂加氯系统控制研究

张仁昊¹,周锁兰²,王桂林³,王冬生¹

1. 南京邮电大学 a. 自动化学学院;b. 人工智能学院,南京 210046

2. 北电爱思特(江苏)科技有限公司,常州 213000

3. 国家管网集团储能技术有限公司,上海 200131

摘要:目的 针对在进水水质和流量时变的情况下保证水厂加氯工艺充分有效地消毒问题,提出引入自抗扰控制技术和扩张观测器优化氯的加入量控制技术。方法 传统反馈控制策略无法应对进水水质和流量变化,选择采用自抗扰控制器来解决加氯系统的控制问题。自抗扰控制器利用扩展状态观测器及时估计系统中的总扰动,包括内部模型不准确性和外部扰动,从而有效应对不确定性和干扰,为控制决策提供精确的数据支持,实现对游离余氯的精准控制,以增强系统的鲁棒性和响应速度。结果 通过仿真分析发现,自抗扰控制策略相较传统控制策略,超调量、稳定时间和绝对误差积分等指标明显降低,在处理水质变化和外部干扰方面表现出显著优势,模型不匹配时也能表现出优异的控制效果,特别适用于对环境变化敏感和对控制精度要求高的情境。结论 结合自抗扰控制和扩张观测器的策略有效提高了水厂加氯工艺的适应性,能够快速响应变化,及时跟踪水质要求,实现了对游离余氯的精准控制,增强了系统的鲁棒性和响应速度,为应对水质和流量变化提供了有效的解决方案。有望在实际自来水生产领域中得到应用。

关键词:加氯控制;自抗扰控制;扩张观测器;自来水生产

中图分类号:O231.2 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2026.0001.016

Research on the Control of Chlorination System in Water Plants Based on Active Disturbance Rejection

ZHANG Renhao¹, ZHOU Suolan², WANG Guilin³, WANG Dongsheng¹

1. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China

2. Baic Electronics SK (Jiangsu) Technology Co., Ltd., Changzhou 213000, Jiangsu, China

3. Pipe China Energy Storage Technology Co., Ltd., Shanghai 200131, China

Abstract: Objective To ensure the thorough and efficient disinfection of the chlorination process amid fluctuating inlet water quality and flow, this study proposed the introduction of active disturbance rejection control technology and an extended state observer to optimize the control of chlorine dosage. **Methods** Traditional feedback control strategies are ineffective in dealing with variations in influent water quality and flow rate. Therefore, an active disturbance rejection controller was employed to address control issues in the chlorination system. The active disturbance rejection controller employed an extended state observer to promptly estimate total disturbances within the system, including inaccuracies in internal models and external disturbances. It effectively addressed uncertainties and disturbances, providing precise data support for control decisions. This enabled precise control of free residual chlorine, thereby enhancing system robustness

收稿日期:2024-03-11 **修回日期:**2024-05-18 **文章编号:**1672-058X(2026)01-0132-08

基金项目:苏州市水利水务科技项目(2023009)资助。

作者简介:张仁昊(1998—),男,河南信阳人,硕士研究生,从事控制理论研究。

通信作者:王冬生(1984—),男,黑龙江鸡西人,博士,副教授,从事理论控制与应用研究。Email: wangdongsheng@njupt.edu.cn

引用格式:张仁昊,周锁兰,王桂林,等.基于自抗扰的水厂加氯系统控制研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2026,43(1):132-139.

ZHANG Renhao, ZHOU Suolan, WANG Guilin, et al. Research on the control of chlorination system in water plants based on active disturbance rejection[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43 (1): 132-139.

and response speed. **Results** Through simulation analysis, it was found that the active disturbance rejection control strategy outperforms traditional control strategies in terms of metrics such as overshoot, settling time, and integral of the absolute error. It exhibited significant advantages in handling variations in water quality and external disturbances. Even in cases of model mismatch, it demonstrated excellent control effectiveness, making it particularly suitable for scenarios sensitive to environmental changes and requiring high control precision. **Conclusion** The integration of active disturbance rejection control and an extended state observer significantly enhances the adaptability of the chlorination process in water plants. This method can quickly respond to changes and timely track water quality requirements, achieving precise control of free residual chlorine while improving the robustness and response speed of the system. It provides an effective solution for coping with variations in water quality and flow rates and is expected to be applied in the field of tap water production. **Keywords:** chlorination control; active disturbance rejection control; extended state observer; tap water production

在自来水生产中,加氯系统对于保障水质安全和水厂运行至关重要。调节清水池的出水余氯浓度(Free Chlorine Residual, FCR)是确保自来水生产安全的重要措施之一^[1-2]。既要保证消毒效果,又要控制消毒副产品的生成。然而,水源水质和进水量的不断变化,以及前序水处理步骤的条件调整,使得清水池接收的水质和流量也相应波动^[3-5]。因此,在调整加氯量时,必须综合考虑进水的水质和流量的变化,以确保处理后水中游离余氯水平的稳定^[6-7]。

Polycarpou 等^[8]在研究中提出了水质的反馈控制方法,提供了一种有效的实践方案,能够应对不同水质波动和水处理厂的特定需求。不足之处是传统的反馈控制方法在面对水质和流量波动较大的情况下表现不佳,难以满足实时调节的需求。

Tabes 等^[9]使用遗传算法优化水配送网络中的氯注入剂量,为提高水配送网络的效率和水质管理提供了新的思路。但是遗传算法等优化方法可能受到计算复杂度的限制,在实际应用中可能存在运算效率不高的问题。

Hong 等^[10]则应用神经模糊比例-积分-微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制器来实现水处理厂的后加氯控制。这些方法在一定程度上改善了传统后加氯控制的精度和稳定性,提高了水质的控制效果。然而神经模糊 PID 控制器的设计和调试需要较高的专业知识,不易于普及和推广。

本文采用了自抗扰控制器来实现加氯系统的控

制,该控制器关键在于利用扩展状态观测器(Extended State Observer, ESO)快速估计系统内的“总扰动”,包括内部模型不准确性和外部扰动。在提高复杂系统监控与控制的效率和精确度方面,观测器的设计发挥着关键作用^[11-12]。自抗扰控制器基于广义扰动概念,结合 ESO 强大功能,有效处理大范围不确定性,实现预期性能。自提出以来,自抗扰控制器已成功应用于多个领域,比如飞行系统^[13]、机器人系统^[14-15]、电机系统^[16-17]和其他系统^[18-20]。

尽管自抗扰控制技术在多个领域取得了成功应用,但在水厂加氯系统中的应用尚未得到充分的探索。本文旨在借助自抗扰控制的优势,设计一种高效、稳定的水厂加氯系统控制策略。与传统 PID 控制策略相比,自抗扰控制在处理水质波动和外部干扰时具有更好的性能。本文的研究成果有望为水厂加氯系统的控制提供一种先进、创新的解决方案,并为类似的复杂系统控制提供借鉴和参考。

1 系统需求与控制器设计

1.1 系统需求

自来水生产工艺如图 1 所示,后氯化过程对水处理工艺至关重要,直接影响到水质的消毒效果。这一过程包括快速的氯消耗阶段和较慢的氯衰变阶段。在后氯化过程中,氯化后水的 FCR 是一个至关重要的控制目标。但是快速消耗期往往很短,导致难以准确测量,而对较慢的氯衰变期可以进行建模。

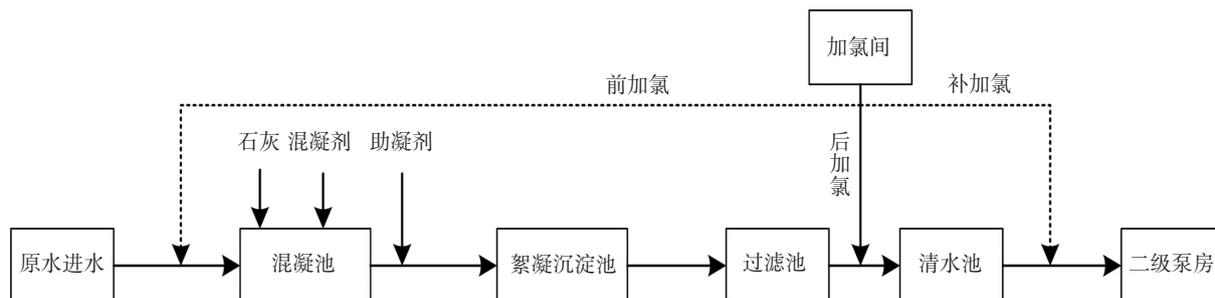


图 1 自来水生产工艺

Fig. 1 Process of tap water production

在自抗扰控制器 (Active Disturbance Rejection Control, ADRC) 框架下, 将自来水生产的 FCR 视为控制目标, 并将后氯用量作为操纵变量。传统的 PID 控制器往往难以处理动态过程中的复杂不确定性和扰动, 因此选择了 ADRC 作为一种更为灵活和鲁棒的控制方法。

ADRC 控制设计基于处理水的动态特性, 能够应对系统中的不确定性和扰动。ADRC 框架的应用使得能够实现对于后氯化过程的精确控制, 从而确保水质稳定

性和消毒效果的可控性。同时, ADRC 方法的使用也降低了控制系统的复杂性, 提高了实际操作的可行性和可靠性。通过 ADRC, 可以更有效地应对自来水生产过程中的动态特性, 为提高水质安全和生产效率做出更大的贡献。

1.2 控制器设计

1.2.1 自抗扰控制(ADRC)

跟踪微分器、非线性误差反馈控制律和扩张观测器构成了自抗扰控制(ADRC)的主体, 其结构如图 2 所示。

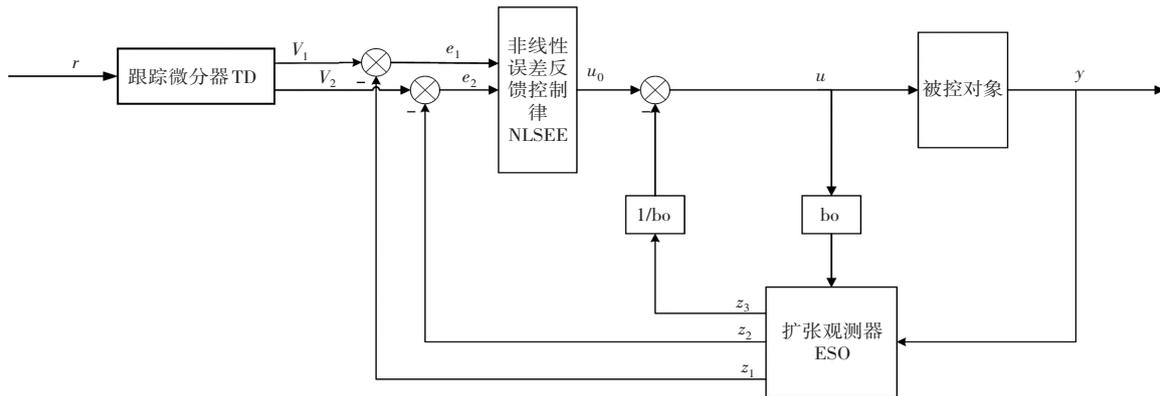


图 2 自抗扰控制器结构图

Fig. 2 Structure diagram of active disturbance rejection controller

在传统的 PID 控制过程中很容易就发生超调现象, 原因在于初始误差过大, 如使用阶跃信号作为输入时传统 PID 算法超调量较大。为了更合理地提取目标跟踪信号的一阶导, 优化此过程, ADRC 采用安排过渡过程的方法, 改进了提取目标跟踪信号微分的这一细节。

对于二阶系统, 被控对象为

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}, \omega, t) + bu, y = x \quad (1)$$

其中, ω 为外部扰动值, f 为系统总扰动值, u 为系统的控制量。

安排过渡过程:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hf_{st}(v_1(k) - v_0, v_2(k), r, h_0) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, h 为采样周期, $v(k)$ 为第 k 时刻的输入信号, v_0 为设定的常数值, r 为决定跟踪快慢的参数, 其中最速控制综合函数 f_{st} 为

$$\begin{cases} a = \begin{cases} \frac{(a_0 - d)}{2}, & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ f_{st} = \begin{cases} \frac{ra}{d}, & |a| \leq d \\ r \operatorname{sgn}(a), & |a| > d \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $d = rh; d_0 = dh; y = x_1 + hx_2; a_0 = (d^2 + 8r|y|)^{\frac{1}{2}}$, r 与 h 的定义与式(2)中相同, x_1, x_2 为系统状态。

对加氯系统建模为二阶系统, 二阶非线性反馈的形式为

$$u = \beta_0 f_{a1}(e_0, \alpha_0, \delta) + \beta_1 f_{a1}(e_1, \alpha_1, \delta) + \beta_2 f_{a1}(e_2, \alpha_2, \delta) \quad (4)$$

其中, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 和 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ 为系统设定参数, e_0, e_1, e_2 为误差, δ 为线性段的区间长度。

其中非线性函数 f_{a1} 为

$$f_{a1}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \operatorname{sgn}(e), & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (5)$$

对于二阶系统, 估计状态和总扰动, 扩张观测器的基本模型为

$$\begin{cases} e_1 = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_0 e_1) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_1 f_{a1}(e_1, \alpha_1, \delta) + bu(k)) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_2 f_{a1}(e_1, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $z(k)$ 为扩张观测器 k 时刻的状态变量, $y(k)$ 为 k 时刻的输出。

控制量的形成: 系统的状态误差是通过非线性跟踪微分器的输出和扩张状态观测器的状态反馈获得的, 并利用这些信息构建系统的非线性反馈控制律。具体为

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2 = v_2(k) - z_2(k) \\ u_0 = \beta_0 f_{al}(\varepsilon_1, \alpha_1, \delta) + \beta_1 f_{al}(\varepsilon_1, \alpha_2, \delta) \\ u(k) = u_0 - \frac{z_3(k)}{b} \end{cases} \quad (7)$$

其中, b 为系统设置参数。

1.2.2 PID 串级控制

在许多过程控制系统中,工厂通常可以被视为级联系统。在传统的反馈控制中,直到受控变量偏离设定点才开始对干扰的校正动作。因此,标准反馈控制环路有时无法为这些具有强扰动的系统提供足够好的性能。串级控制相对于单环控制而言,能够显著提升系统的性能。作为工业过程中常见的控制策略之一,串级控制能有效减小扰动响应的最大偏差和积分误差,从而改善控制性能。串级控制的基本特征是在单环反馈控制的基础上增加了反馈控制的从环。通过上

述从环可以抑制频繁的扰动,并且还可以提高控制系统的动态响应,从而能够对受控过程进行粗调。反馈控制的主回路完成对受控过程的微调,最终达到受控目标。串级控制可以大大缩短被控过程的响应时间,及时监测扰动,并快速做出相应调整。从后加氯节点到清水池进水口 FCR 监测节点,进水水质和流量变化对后加氯的影响是完全的,因为氯大部分被溶解和消耗。此外,与整个氯后加药过程相比,这段时间的长度更短。

由此可见,从回路的监控节点设置是合理的。梯级控制的主回路可以从清水池入口到出水处构建。出水处理后的 FCR 是后加氯工艺的最终控制目标。主控制器将处理水的实测 FCR 与其参考值进行比较,为从控制器提供清水池入口的 FCR 参考。从控制器操纵后氯剂量以从主控制器获得参考。后氯用量梯级控制结构如图 3 所示。

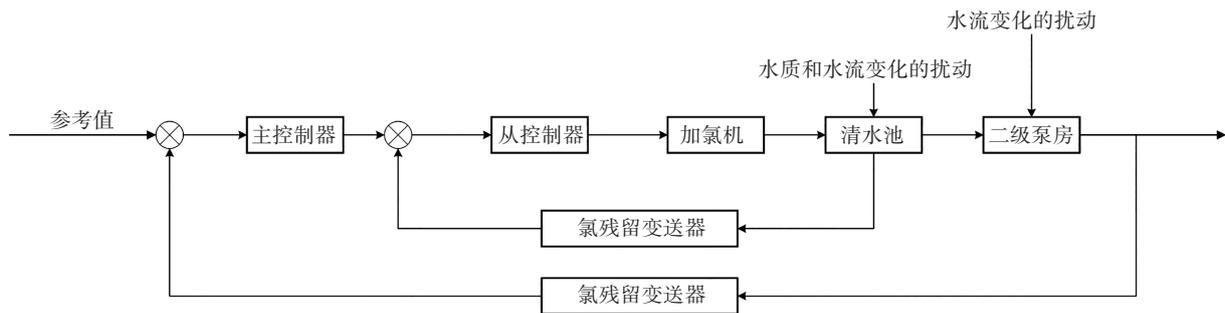


图 3 加氯串级控制结构

Fig. 3 Cascade control structure of chlorination

PID 串级控制方案由布置在主回路和从回路中的两个控制器组成。主回路中,第一个 PID 控制器由处理水的实测 FCR 与其参考值的差值驱动,并计算从控制器所需的清水水库入口 FCR 参考值。从回路中 PID 操纵后氯用量,以跟踪主控制器提供的清水池入口 FCR 的时变参考。 G_{p1} 和 G_{p2} 是主环和从环的氯化后过程:

$$G_{p1}(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \quad (8)$$

$$G_{p2}(s) = \frac{K_2}{T_2 s + 1} \quad (9)$$

1.2.3 基于 ESO 的串级 PID 控制

PID 控制的设计简单,对系统的控制比较好,工业上应用也比较广泛。目前,对于加氯过程,大多数水厂都采用 PID 反馈控制。这种控制策略可以解决实际工业控制过程中 90% 左右的控制问题。但由于近年来工业的不断发展,许多系统表现出多变量、非线性、强耦合和纯时滞等特性,这使得采用经典的 PID 控制难

以取得令人满意的控制效果。

在实际水厂的应用中,因为器件老化,模型不准确等干扰条件下,单独的 PID 控制已经跟不上时代的变化。串级 PID 的设置使得控制效果得以提升,在串级 PID 控制中,基于 ESO 的串级 PID 控制是一种更为先进和高效的控制策略。ESO 可以实时估计不确定系统的各状态量,拥有很好的抗干扰能力。通过引入 ESO 到串级 PID 控制系统中(PIDPID-ESO),可以对系统的状态量进行很好的跟踪,并且可以对各种不确定扰动进行补偿,提高加氯系统的控制精度。

设由不精确的模型引发的扰动和其他扰动的和为 f ,则二阶控制系统的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (10)$$

已知式(10)的参数 b 并不精确,可使用数值与之接近的值 b_0 代替,若完全不知道参数 b 的信息,通常会取 $b_0 = 1$ 。这样处理从理论推导上来讲是合理的,即将所

有未知的部分都合并到 f 中。

将未知部分 f 扩张为新的状态量:

$$\begin{cases} x_3 = f \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \end{cases} \quad (11)$$

则扩张后的系统状态可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (12)$$

将扩张后的状态量的估计值设为 $Z = [z_1 z_2 z_3]^T$, 可以建立如下状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_0 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_1 f_{al}(e, \alpha_1, \delta) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_2 f_{al}(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (13)$$

设 $\dot{x}_3 = \omega(t)$ 为常数值 ω_0 , 则系统式 (10) 和式 (11) 的误差方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta_0 e_1, e_1 = z_1 - y \\ \dot{e}_2 = e_3 - \beta_1 f_{al}(e_1, \alpha_2, \delta), e_2 = z_2 - x_2 \\ \dot{e}_3 = \omega_0 - \beta_2 f_{al}(e_1, \alpha_2, \delta), e_3 = z_3 - x_3 \end{cases} \quad (14)$$

当进入稳态时, 方程式 (14) 右侧全收敛为 0, 即:

$$\begin{cases} 0 = e_2 - \beta_0 e_1 \\ 0 = e_3 - \beta_1 |e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(e_1) \\ 0 = \omega_0 - \beta_2 |e_1|^{\frac{1}{4}} \text{sign}(e_1) \end{cases} \quad (15)$$

可得扩张观测器的稳态误差为

$$\begin{aligned} |e_1| &= \left(\frac{\omega_0}{\beta_2}\right)^4, |e_2| = \beta_0 \left(\frac{\omega_0}{\beta_2}\right)^4, \\ |e_3| &= \beta_1 \left(\frac{\omega_0}{\beta_2}\right)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

只要 β_2 足够大于 ω_0 , 这些估计误差都会足够小。只要扰动是有界的, 总能选取合适的参数来保证扩张状态观测器的收敛。

2 仿真实验与结果分析

2.1 模型匹配的情况

加氯系统随着实际工况的变化而不同, 本文采用在线辨识方法对加氯系统进行建模:

$$G(s) = \frac{0.5}{21s^2 + 10s + 1} \quad (17)$$

控制目标是设计一个控制器, 保证余氯误差在 0~120 min 的仿真时间内最终收敛到 0。控制器设计应考虑模型不匹配和扰动等因素。本文在 MATLAB 环境下进行模拟, 在模拟中, 余氯参考值 x_{ref} 从 0~60 min 被设置为保持恒定在 1 mg/L, 并在 120 min 模拟结束时保持

该值。在模拟过程中, 初始设置出水余氯参考值 x_{ref} 为 1 mg/L。模拟 60 min 后, 出水余氯参考值变为 2 mg/L。这个新值将一直保持到 120 min 模拟结束。使用超调量(在阶跃输入作用下, 被调量的瞬时最大偏差值与稳态值之比, 用百分比表示)、调节时间(响应到达并保持在稳态值内所需时间, $\Delta = 0.02$ min)和绝对误差积分(Integral of the Absolute Error, I_{AE})作为量化指标来评估控制方案。

$$I_{AE}(t) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y_r(t) - y(t)| \quad (18)$$

仿真步长设置为 $h = 0.01$ s, β_0 一般设置为仿真步长的倒数, 即 $\beta_0 = 100$, δ 和 h 数值相同为 0.01。根据韩京清^[21]对参数变化范围取值的经验设置参数为 $\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.25, \delta = 0.01, h_0 = 5 * h$ 。 β_1 过小会带来发散, 过大会产生高频噪声, 一般设置为 3 倍 β_0 。 β_2 过大会产生震荡, 过小会降低跟踪速度, 一般设置为 10 倍 β_0 。再根据输出曲线进行微调, 设置 $\beta_1 = 200, \beta_2 = 800$ 。 r 越大, 快速性越好, 但是稳定性会受到影响。如图 4 所示, 当 r 过大时快速性有一点提升但是达到稳定的时间会变久, r 过小时快速性就会减弱, 所以设置 $r = 49$ 。

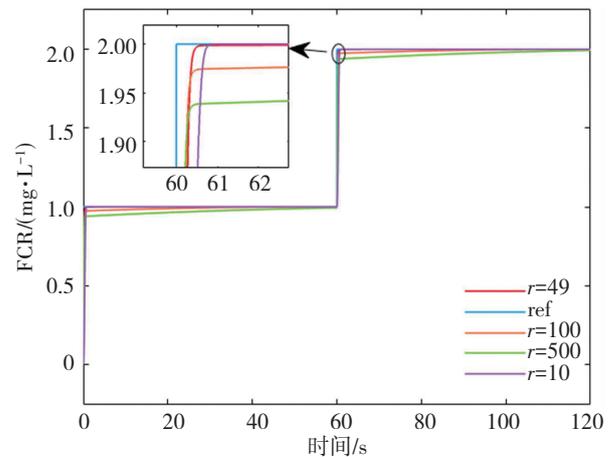


图 4 系统参数 r 对输出的影响

Fig. 4 Effect of system parameter r on output

式 (19) 和式 (20) 分别用于串级控制方案的主回路和从回路。首先根据从回路参数的类型, 按经验法调整好从回路控制器的参数。设置从回路的 $P = 5, I = 2, D = 0$ 。然后按单回路调节器参数方法整定主回路控制器参数。使用 MATLAB 软件自带的 PID 调节器来调节主回路的参数, 再根据输出曲线微调参数。自动 PID 调节器给的参数为 $P = 8.1, I = 5.5, D = 1.9$ 。经过多次微调得出最佳参数为 $P = 7.6, I = 6.4, D = 2.1$ 。如图 5 所示。

$$G_{p1}(s) = \frac{2}{12s + 1} \quad (19)$$

$$G_{p2}(s) = \frac{0.2}{32s + 1} \quad (20)$$

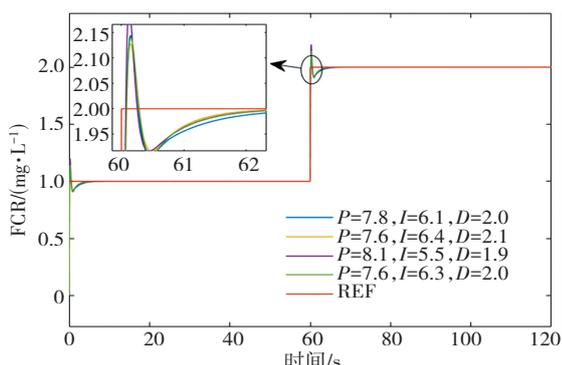


图 5 串级 PID 控制的主回路参数设置

Fig. 5 Parameter settings of the main loop controlled by cascade PID

在串级 PID 控制的基础上加上 ESO, PID 参数不变, ESO 各参数与自抗扰控制器的 ESO 参数相同。仿真结果如图 6 所示, 量化指标如表 1 所示。由图 6 可以看出, 本文提出的基于扩张观测器的控制效果都不错, 可以很好地跟踪处理后水的游离氯残留量 (FCR)。自抗扰控制、串级 PID 控制、基于扩张观测器的串级 PID 控制都能较快速地跟踪输入设定值。在模型匹配且无干扰的情况下, 3 个控制器的控制效果都比较可观。表 1 中的量化指标支持图 6 的观察结果, 通过这些指标的综合分析, 可以更全面地评估各种控制方法的性能。

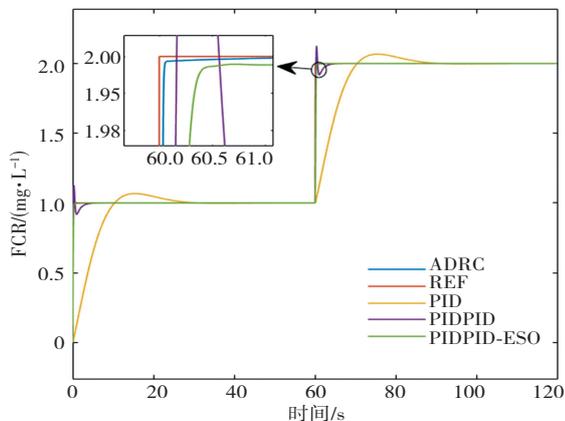


图 6 模型匹配无干扰情况仿真结果

Fig. 6 Simulation results of model matching without interference

表 1 模型匹配无干扰控制性能指标

Table 1 Control performance indicators for model matching without interference

控制方法	0~60 min 控制性能指标			60~120 min 控制性能指标		
	超调量/%	稳定时间/min	绝对误差积分/(mg·L ⁻¹)	超调量/%	稳定时间/min	绝对误差积分/(mg·L ⁻¹)
ADRC	0	0.1	0.003 2	0	0.1	0.003 2
PID	6.8	24	0.080 8	3.4	23.7	0.080 8
PIDPID	10.4	2.1	0.002 8	5.2	1.9	0.002 8
PIDPID-ESO	0	0.3	0.001 7	0	0.3	0.001 7

在实际水厂加氯系统的应用中, 考虑原水水质、水量变化、传感器信号波动、设备老旧等问题, 会对加氯系统产生一定的扰动。因此在模拟仿真中加入了幅度为 0.05, 频率为 0.1 的正弦信号模拟扰动。

仿真结果如图 7 和表 2 所示。可以看出 ADRC 的控制效果是最佳的, 串级 PID 控制器加入扩张观测器后, 控制效果有所提升。这表明扩张观测器的引入对于改善串级 PID 控制器的性能是有效的。ADRC 控制器相对于传统的串级 PID 控制器在鲁棒性、适应性和应对信号突变的能力上具有优势。而加入扩张观测器的串级 PID 控制器虽然能够在一定程度上改善控制性能, 但与 ADRC 相比仍然存在差距。在需要更高控制精度和鲁棒性的应用场景下, ADRC 可能是更好的选择。ADRC 控制器在应对信号突变的情况时更加有效。

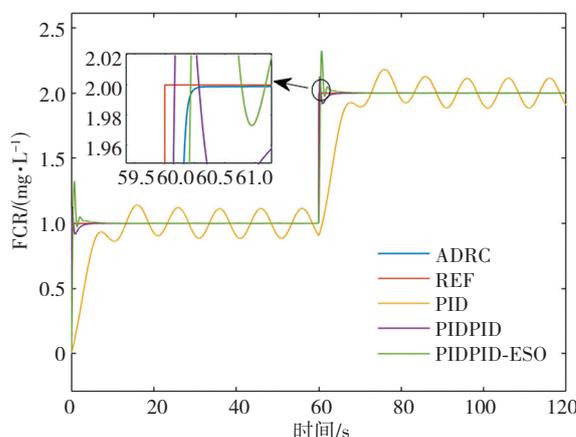


图 7 模型匹配受干扰仿真结果

Fig. 7 Simulation results of model matching with interference

表 2 模型匹配受干扰控制性能指标

Table 2 Control performance indicators for model matching with interference

控制方法	0~60 min 控制性能指标			60~120 min 控制性能指标		
	超调量/%	稳定时间/min	绝对误差积分/(mg·L ⁻¹)	超调量/%	稳定时间/min	绝对误差积分/(mg·L ⁻¹)
ADRC	0	0.4	0.003 4	0	0.3	0.003 2
PID	/	/	0.121 6	/	/	0.132 1
PIDPID	33.5	2.6	0.012 2	16.9	2.5	0.012 0
PIDPID-ESO	12.8	2.5	0.004 2	6.4	1.8	0.004 0

2.2 模型不匹配的情况

在实际的饮用水处理过程中, 进水水质和流量随气候、天气和污水排放量的变化而变化。这可能导致氯化后工艺的操作条件与先前建立的模型不匹配。为了验证所提出的控制方案的模型失配情况, 将 K 和 T 参数增加 20% 代表氯化后工艺变化后的实际操作情况, 从而得到传递函数:

$$G(s) = \frac{0.72}{30.24s^2 + 12s + 1} \quad (21)$$

串级控制的主从回路相应传递函数为

$$G_{p1}(s) = \frac{2.4}{14.4s + 1} \quad (22)$$

$$G_{p2}(s) = \frac{0.24}{38.4s + 1} \quad (23)$$

在模型失配的情况下,控制器各参数不变,仿真流程与模型匹配的情况相同。仿真结果如图 8 和表 3 所示。由图 8 和表 3 可以看出,在模型不匹配的情况下,单 PID 控制受到了一定程度的影响。这是因为单 PID 控制器对系统的精确建模要求较高,一旦存在模型不匹配,控制性能就会受到影响。与单 PID 控制相比,其他控制方法对模型不匹配的鲁棒性更好。ADRC 控制器的控制效果最优,这表明 ADRC 控制器具有较强的鲁棒性和适应性,能够有效地应对模型不匹配带来的挑战。进一步证明了其在面对系统动态变化和不确定性时的优越性。

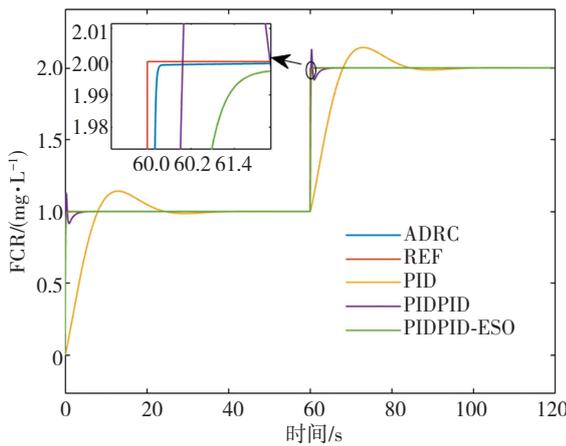


图 8 模型不匹配无干扰仿真结果

Fig. 8 Simulation results of model mismatch without interference

表 3 模型不匹配无干扰控制性能指标

Table 3 Control performance indicators for model mismatch without interference

控制方法	0~60 min 控制性能指标			60~120 min 控制性能指标		
	超调量/%	稳定时间/min	绝对误差积分/(mg·L ⁻¹)	超调量/%	稳定时间/min	绝对误差积分/(mg·L ⁻¹)
ADRC	0	0.1	0.000 6	0	0.1	0.000 4
PID	14.2	22.2	0.084 1	7.1	20.6	0.083 9
PIDPID	13.1	2.6	0.004 1	6.6	1.9	0.003 9
PIDPID-ESO	0	0.3	0.001 9	0	0.3	0.001 7

在模型失配的情况下,再加上干扰,仿真结果如图 9 和表 4 所示。ADRC 控制器在模型失配和外部干扰

存在的情况下仍能实现较好的跟踪信号控制。这说明 ADRC 控制器具有很强的鲁棒性,能够有效地抑制外部干扰对系统的影响,并且能够在一定程度上对模型失配进行补偿。ADRC 控制器相比于其他控制方法在模型失配和外部干扰的情况下表现更优。这表明 ADRC 控制器在面对系统的不确定性和外部干扰时具有更强的适应性和抑制能力。

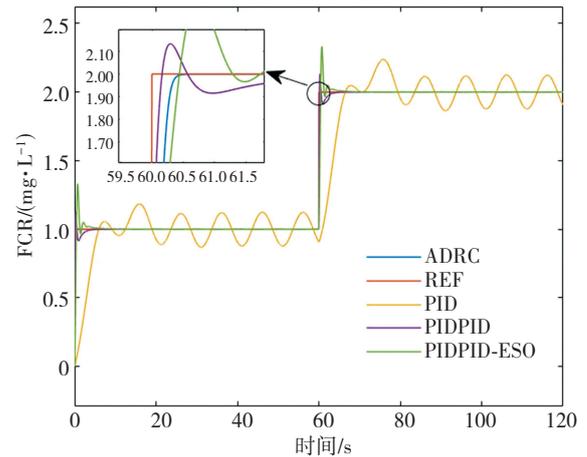


图 9 模型不匹配受干扰仿真结果

Fig. 9 Simulation results of model mismatch with interference

表 4 模型不匹配受干扰控制性能指标

Table 4 Control performance indicators for model mismatch with interference

控制方法	0~60 min 控制性能指标			60~120 min 控制性能指标		
	超调量/%	稳定时间/min	绝对误差积分/(mg·L ⁻¹)	超调量/%	稳定时间/min	绝对误差积分/(mg·L ⁻¹)
ADRC	0	0.4	0.003 3	0	0.3	0.003 2
PID	—	—	0.116 8	—	—	0.131 3
PIDPID	33.2	2.8	0.009 1	16.6	2.4	0.008 9
PIDPID-ESO	13.3	2.5	0.004 3	6.7	1.8	0.004 1

3 结论与展望

本研究对水厂加氯系统的控制问题进行了深入研究,并提出了一种先进的控制方案,即自抗扰控制(ADRC)技术。通过对该系统进行建模和仿真分析,发现其受到多种外部因素和不确定性的影响。研究结果表明:采用 ADRC 技术的加氯系统在扰动抑制、控制精度和系统稳定性方面表现更佳,相比传统控制方法具有明显优势。未来重点关注将 ADRC 技术应用到实际水厂自来水生产中,并验证其性能表现。同时,还将探索 ADRC 技术在其他水处理系统中的应用潜力,以及与其他先进控制方法的组合应用,为提高水质安全和生产效率做出更深入的贡献。

参考文献(References):

- [1] BOND T, GRAHAM N. Predicting chloroform production from organic precursors[J]. *Water Research*, 2017, 124(1): 167-176.
- [2] LEE K, LEE W. Effects of pH, water temperature and chlorine dosage on the formation of disinfection byproducts at water treatment plant[J]. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 2015, 37(9): 505-510.
- [3] ROCCARO P, CHANG H S, VAGLIASINDI F G A, et al. Differential absorbance study of effects of temperature on chlorine consumption and formation of disinfection by-products in chlorinated water[J]. *Water Research*, 2008, 42(8-9): 1879-1888.
- [4] ABDULLAH M P, YEE L F, ATA S, et al. The study of interrelationship between raw water quality parameters, chlorine demand and the formation of disinfection by-products[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2009, 34(13-16): 806-811.
- [5] MUNAKATA N, HUITRIC S J, TANG C C, et al. Evaluating free chlorine disinfection of viruses in recycled water: Effects of free chlorine CT, dose, residual, and contact time [J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2011(3): 147-156.
- [6] HAIDER H, HAYDER S, SAJID M, et al. Framework for optimizing chlorine dose in small- to medium-sized water distribution systems: A case of a residential neighbourhood in Lahore, Pakistan[J]. *Water SA*, 2015, 41(5): 614-623.
- [7] FARENHORSTA, LI R, JAHAN M, et al. Bacteria in drinking water sources of a First Nation reserve in Canada[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575(1): 813-819.
- [8] POLYCARPOU M M, UBER J G, WANG Z, et al. Feedback control of water quality[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22(3): 68-87.
- [9] TABESH M, AZADI B, ROUZBAHANI A. Optimization of chlorine injection dosage in water distribution networks using a genetic algorithm[J]. *Journal of Water and Wastewater*, 2011, 22(1): 2-11.
- [10] HONG S T, LEE A K, LEE HH, et al. Application of neuro-fuzzy PID controller for effective post-chlorination in water treatment plant[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2012, 47(1-3): 211-220.
- [11] 高俊岭, 张翔, 丁昇. 模糊超扭曲滑模观测器在 PMSM 中的研究与应用[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(3): 27-33.
- GAO Jun-ling, ZHANG Xiang, DING Sheng. Research and application of fuzzy super-twisted sliding mode observer in PMSM[J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2023, 40(3): 27-33.
- [12] 郎佳红, 马振亚, 张泽, 等. 基于 Luenberger 观测器的 SVG 三矢量预测直接功率控制研究[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(4): 1-9.
- LANG Jia-hong, MA Zhen-ya, ZHANG Ze, et al. Research on SVG three-vector prediction direct power control based on Luenberger observer [J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2021, 38(4): 1-9.
- [13] XIA Y, ZHU Z, FU M, et al. Attitude tracking of rigid spacecraft with bounded disturbances [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 58(2): 647-659.
- [14] SU J, MA H, QIU W, et al. Task-independent robotic uncalibrated hand-eye coordination based on the extended state observer[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2004, 34(4): 1917-1922.
- [15] TALOLE S E, KOLHE J P, PHADKE S B. Extended-state-observer-based control of flexible-joint system with experimental validation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 57(4): 1411-1419.
- [16] LIU H, LI S. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 59(2): 1171-1183.
- [17] SUN M, WANG Z, WANG Y, et al. On low-velocity compensation of brushless DC servo in the absence of friction model [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 60(9): 3897-3905.
- [18] VINCENT J, MORRIS D, USHER N, et al. On active disturbance rejection based control design for super conducting RF cavities [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 643(1): 11-16.
- [19] LI S, LI J, MO Y. Piezoelectric multimode vibration control for stiffened plate using ADRC-based acceleration compensation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(12): 6892-6902.
- [20] TANG H, LI Y. Development and active disturbance rejection control of a compliant micro-/nanopositioning piezostage with dual mode [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 61(3): 1475-1492.
- [21] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术 [J]. *控制工程*, 2002, 9(3): 13-18.
- HAN Jing-qing. From PID technology to active disturbance rejection control [J]. *Control Engineering*, 2002, 9(3): 13-18.

责任编辑:陈芳