

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.050

基于 PID 参数优化的机械臂末端异常振动控制

李希元¹, 林春清², 陈海雷², 李宇博²

(1. 国网辽宁省电力有限公司 超高压分公司, 辽宁 沈阳 110055;

2. 国网大连供电公司, 辽宁 大连 116001)

摘要:当机械臂停止工作后,因柔性会产生残余振动,使得机械臂末端振动出现异常,不能精准到达期望位置。为了有效控制机械臂末端异常振动,提出基于 PID 参数优化的机械臂末端异常振动控制方法。计算机机械臂末端位置与期望位置之间的差异,根据该差异确定控制约束参数。在期望差异约束下引入免疫蜂群算法,对 PID 控制器参数进行优化。通过参数优化后的位置 PID 控制器实现机械臂末端异常振动控制。实验结果表明:所提方法应用后机械臂末端异常振动的振幅较低且变化较为稳定,机械臂角度差与偏移量均较低,响应时间短,能够实现对异常振动的精准快速控制。

关键词:PID 参数优化;机械臂;异常振动控制;期望差异约束;PID 控制器;免疫蜂群算法

中图分类号:TP241 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)06-0251-06

Abnormal Vibration Control of Robotic Arm end Effector Based on PID Parameter Optimization

LI Xiyuan¹, LIN Chunqing², CHEN Hailei², LI Yubo²

(1. Ultra High Voltage Branch, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110055, China;

2. State Grid Dalian Power Supply Company, DaLian 116001, China)

Abstract:When the robotic arm comes to a halt, residual vibrations occur due to flexibility, causing abnormal vibrations at the end of the robotic arm and failure in accurately reaching the desired position. To effectively control the abnormal vibrations at the end of the robotic arm, a control method based on PID parameter optimization is proposed. The difference between the actual position and the desired position of the robotic arm's end is computed, based on which control constraint parameters are determined. The immune-bee algorithm is introduced under the constraint of the desired difference to optimize the parameters of the PID controller. The positional PID controller, with the optimized parameters, is utilized to control the abnormal vibrations at the end of the robotic arm. The experimental results show that after the application of the proposed method, the amplitude of abnormal vibration at the end of the robotic arm is relatively low and the variation is relatively stable. The angle difference and offset of the robotic arm are both low, and the response time is short, which can achieve precise and fast control of abnormal vibration.

Keywords:PID parameter optimization; mechanical arm; abnormal vibration control; expectation difference constraint; PID controller; immune bee colony algorithm

0 引言

机械臂是一种用于代替人工进行操作的机器人装置,它具有多个关节和末端工具,可以模仿人的手臂运动,并完成各种复杂的任务^[1]。然而,由于机械臂的运动过程中可能会出现末端异常振动,这会影响机械臂的精确性和稳定性以及相关任务的完成质量。机械臂末端异常振动控制研究旨在解决或减少机械臂运动中的振动问题^[2-3]。通过分析机械臂结构和运动特性并应用控制理论与方法,研究人员可以设计和实现控制策略,使机

械臂在执行任务时能够降低或消除末端的振动幅度^[4]。而研究机械臂末端异常振动控制方法对于改善机器人技术的可靠性和稳定性具有重要意义,有助于提高其工作效率和扩大应用范围^[5-6]。

针对上述问题,刘一扬等^[7]提出了反演自适应模糊滑模控制器的设计方案。首先,对机械臂阀内流体的流动分布情况建立了非线性控制方程式;然后,将模糊逻辑系统和整形技术嵌入传统滑模控制器中,使其改进为反演自适应模糊滑模控制器;最后,利用李雅普诺夫函数确保控制器的理想稳定性。但该方法作业精度低。梅瑞麟等^[8]针

对机械臂的外部振动和负载问题提出了一种鲁棒有限时间控制方法。该方法使用第二类 Lagrange 方法建立机械臂外部振动的动力学方程,并将基底所受的振动看作一种不确定因素,利用隐式 Lyapunov 函数构造了有限时间控制器;通过 Lyapunov 理论和有限时间稳定性的融合,给出了控制器在有限时间内的收敛和稳定情况。但该方法作业效率低。马天兵等^[9]搭建了线结构光视觉测振系统,结合建立的数学模型完成了机械臂视觉标定。根据视觉标定和 PID 控制器进行了柔性臂振动主动控制。但是在实际应用中发现,这一方法存在控制效果差的问题,难以在相关领域得到进一步应用。

柔性机械臂不可避免地会应用谐波减速机、关节力矩传感器等柔性元件,使柔性协作机械臂成为一个具有较强刚柔耦合特性的非线性系统。由于外部干扰的存在以及模型精度偏差等问题,过大的轨迹加速度会造成轨迹跟踪误差过大的情况。而当机械臂停止工作后,由于柔性的存在也会产生一定的残余振动,使得机械臂末端不能快速稳定地到达期望位置,造成异常振动。所以考虑到该问题,本文提出了一种基于 PID 参数优化的机械臂末端异常振动控制方法,通过实验验证了该方法的有效性。

1 机械臂末端异常振动控制方法设计

1.1 机械臂末端位置期望差异计算

结合机械臂的几何结构、运动学模型和拉格朗日动力学原理,考虑外部力和扰动的影响^[10],利用数学工具进行推导和计算,获取对机械臂的动力学方程如下:

$$\beta = \rho_b A_b \frac{\partial^2 \omega}{\partial \gamma^2} + E_b I_b \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^4} = M_a \frac{\partial^2 R(x)}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: ρ_b 表示质量密度; A_b 表示机械臂横截面矩形面积; E_b 表示弹性模量; I_b 表示机械臂的转动惯量; $R(x)$ 表示广义位置函数; x, γ 分别表示位置向量和位移向量; M_a 表示机械臂驱动向量^[11]; ω 表示横向位移,表达式为

$$\omega = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(x) \eta_j(\gamma) \quad (2)$$

式中 $\varphi_j(x)$ 、 $\eta_j(\gamma)$ 分别表示第 j 阶模态振型^[12]以及广义位移时间函数。

假设机械臂末端在 T 时刻下的位移为 $z(T)$,机械臂末端在 $x=W$ 处的弯曲控制位移为 $w(x,$

$\gamma)$,则点 W 处的期望控制位移为

$$P(x, \gamma) = z(T) + w(x, \gamma) \quad (3)$$

机械臂的真实控制位移为

$$Q = \frac{1}{2} m_b \dot{z}^2(T) + \frac{1}{2} m_t [\dot{\omega} z(T) + \dot{w}(K_t, \gamma)]^2 + \frac{\beta}{2} \quad (4)$$

式中: m_b 表示机械臂的质量; $\dot{w}(K_t, \gamma)$ 表示机械臂末端移动速率; K_t 表示位移增益; m_t 表示非线性特征参数^[13]; d 表示离散参数。

机械臂末端期望差异约束结果表示为

$$W = \int_0^K P(x, \gamma) - Q \left(\frac{\partial^2 w(x, \gamma)}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (5)$$

1.2 基于PID参数优化的异常振动控制

位置 PID 控制器是一种基于位置误差的 PID 控制算法。在机械臂末端异常振动控制中,将期望差异信息作为约束条件,反馈给位置 PID 控制器,位置 PID 控制器根据末端位置与期望位置之间的差异,计算出相应的控制信号来减小或消除异常振动。位置 PID 控制器在异常振动控制中具有减小振动幅度、快速响应、抑制抖动和自适应性强等优势。它是一种常用的控制算法,可为机械臂提供稳定、精确的运动控制。位置 PID 控制器原理如图 1 所示。

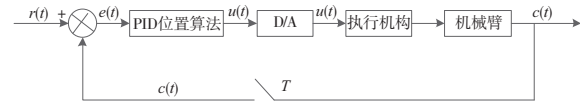


图1 位置PID控制器原理

位置PID控制器的表达式如下:

$$u(t) = K_p W e(t) + K_i \sum_{j=0}^k T r(t) + K_d [e(t) - e(t-1)] \quad (6)$$

式中: T 表示采样周期; $e(t)$ 、 $e(t-1)$ 分别表示第 t 、 $t-1$ 次的采样系统输入的误差值; $r(t)$ 表示采样系统当前输入; K_p 、 K_i 、 K_d 表示比例、积分、微分参数。

但是在实际应用过程中发现,位置PID控制器无法适应期望差异参数变化,参数调整困难,敏感性和不稳定性较高^[14],导致机械臂多自由度协调困难。为了有效解决这一问题,本文引入免疫蜂群算法对位置PID控制器参数进行了优化。免疫蜂群算法是一种基于蜜蜂行为和人工免疫学原理的优化算法。它模拟了蜜蜂的觅食行为和蜜蜂群体的协作过程,通过分析和学习环境中的信息

来寻找最优解。在位置PID控制器参数优化方面具有全局搜索能力强、避免陷入局部最优解、适应性强和并行处理能力等优点。它可以辅助优化位置PID控制器的参数,提高控制效果。

利用免疫蜂群算法对于位置PID控制器期望差异参数进行优化过程中设置了相关的目标函数,具体如下:

$$J = \int_0^{\infty} |u(t) - e(t)| dt \quad (7)$$

将免疫蜂群算法中期望差异参数的适应度与反映系统振动性能指标的 J 准则联系起来后,从而可以得到期望差异参数的适应度计算结果,具体的计算公式如下:

$$f_k = \frac{1}{J_k} \quad (8)$$

式中 J_k 表示位置PID控制器采用期望差异参数 k 提供的PID参数的系统输出预期值。

基于免疫蜂群算法位置PID控制参数优化的具体步骤如下。

1) 根据位置PID控制器运行数据,确定 K_p 、 K_i 、 K_d 取值范围,并将算法种群数量设置为 M 。

2) 从免疫蜂群算法的记忆库之中找出与位置PID控制器参数相关的期望差异,并对这些期望差异参数进行初始化处理。

3) 根据式(8)对于期望差异适应度进行计算,经过多次对比将差异种群中适应度最大的个体作为精英期望差异。

4) 结合蜂群食物源的收益效率选择食物源,食物源被选择的概率用下式计算:

$$p_i = \frac{f(i)}{\sum_{i=1}^n f(i)} \quad (9)$$

式中 $f(i)$ 表示蜂群食物源的收益效率。

5) 蜂群食物源位置更新公式如下:

$$v_{ij} = x_{ij} + \alpha(x_{ij} - x_{kj}) \quad (10)$$

式中: x_{ij} 表示蜂群食物源的当前位置; x_{kj} 表示蜂群食物源的初始位置。

6) 计算更新后蜂群食物源的收益效率,并将其与精英约束条件的适应度进行比较,若是该值大于精英期望差异的适应度,则将期望差异取代精英期望差异。如此迭代找出最优期望差异参数。

7) 最优期望差异浓度利用下式计算:

$$a_i(t+1) = \frac{1}{1 + \exp(0.5 - A_i(t))} \quad (11)$$

式中 $A_i(t)$ 表示 t 时刻的期望差异浓度水平。

8) 如果一个食物源在循环一定的次数后依然没有改进,则被蜜蜂抛弃,此时蜜蜂需要跳出食物源所在的位置,具体公式如下:

$$x_i^j = x_{\min}^j + \text{rand}(0, 1)(x_{\max}^j - x_{\min}^j) \quad (12)$$

式中 $x_{\max}^j$ 、 $x_{\min}^j$ 分别表示新的食物源位置的最大值和最小值。

9) 判断算法是否满足目标函数,若不满足,则跳到3)继续;若满足则输出最优的位置PID控制器参数,实现PID参数优化。基于PID参数优化的机械臂末端异常振动控制原理如图2所示。

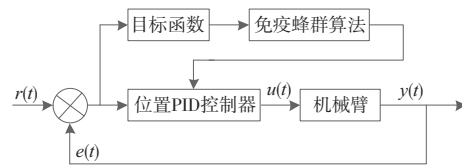


图2 基于PID参数优化的机械臂末端异常振动控制原理

2 实验测试

为了验证所提方法在实际应用中是否可以对机械臂末端异常振动取得理想的自动控制效果,搭建了相关实验系统,实验系统架构如图3所示。

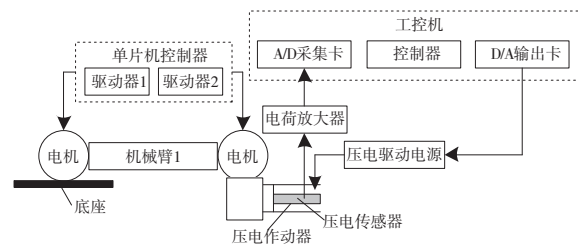


图3 实验系统框图

实验仪器及设备参数如表1所示。

表1 实验仪器及设备参数

名称	型号/规格	数量
压电元件/片	TC75S67TU51/50 mm×30 mm×1mm	2
步进电机/套	57BYGH250B	2
电机驱动器/套	2HB504MA	2
工控机/台	IPC-623	1
A/D、D/A卡/块	PCL-818L	1
单片机系统/块	AT89S52 系统板	1
电荷放大器/台	DHF-4	1
压电驱动电源/台	DWY-3	1

实验系统中的硬件主要包含机械臂、固定在机械臂上的压电传感器和压电作动器。实验系统还包括压电驱动电源、A/D采集卡、电荷放大器、工控卡和D/A输出卡,这些设备组成了计算机数据采集控制系统。另外,单片机系统、步进电机和电机驱动器构成了步进电机运动控制系统。实验所用机械臂如图4所示。



图4 实验所用机械臂

实验所用机械臂技术参数如表2所示。

表2 实验所用机械臂技术参数

技术参数	参数描述
安装方式	台面安装
最大工作范围/mm	640
运动自由度	6
可重复定位精度标准/mm	±0.05
本体质量/kg	32
最大运动范围/(°)	第一节为±170 第二节为+150~-142 第三节为+165~-130 第四节为±150 第五节为±135 第六节为±360
额定运动速度/(°/s)	第一节为 150.0 第二节为 112.5 第三节为 150.0 第四节为 204.5 第五节为 225.0 第六节为 360.0
最大负载/kg	5
额定负载/kg	3

机械臂末端异常振动控制实验过程如下。

1) 参数调整:根据实验需求,选择适当的位置PID控制器参数。使用经验法设定初始参数,并

通过实验和调整来优化控制器参数。

2) 设置期望值:给定机械臂末端位置的期望值作为目标参考,将机械臂移动轨迹设置为特定轨迹运动。

3) 实验数据采集:利用实验系统获取机械臂末端位置的实际数据并为机械臂施加驱动力矩,以便模拟异常工况。将数据记录下来以便后续分析。

4) 根据位置PID控制器的算法和实际末端位置数据,计算相应的控制信号。

5) 控制信号发送:将计算得到的控制信号传输给实验系统,从而控制机械臂末端运动。

6) 振动监测与分析:通过传感器或振动监测设备对机械臂末端的振动进行实时监测,并记录相关数据。分析实验数据,评估振动控制效果。

机械臂末端异常振动控制前、PID控制以及PID参数优化后的机械臂末端异常振动控制效果如图5所示。

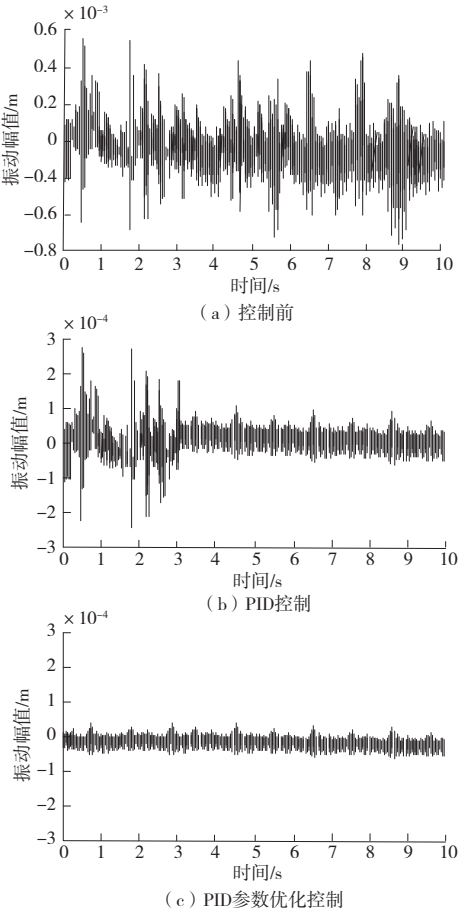


图5 机械臂末端异常振动控制效果

从图5可以看出控制前的机械臂末端异常振动幅值较大,且变化不稳定。而利用PID控制对

于机械臂末端异常振动控制进行控制后,应用所提方法控制后的振动幅值出现明显的衰减趋势,大约在第3 s时,机械臂末端振幅趋于稳定,异常振动得到了有效抑制,但是此时机械臂末端的异常振幅依旧较高,控制效果不佳。而利用PID参数优化控制后,机械臂末端振幅即刻趋于稳定,且此时的机械臂末端异常振动幅值较低,说明利用本文方法进行机械臂末端异常振动控制效果好。

机械臂位置误差是评估机械臂控制精度的重要实验指标,它反映了机械臂末端实际位置与期望位置之间的差异程度,如角度差、偏移量等。

机械臂角度差是指机械臂关节实际角度与期望角度之间的差异,是用来评估机械臂关节运动精度和控制性能的重要指标。机械臂末端异常振动控制前、PID控制以及PID参数优化后的机械臂角度差如表3所示。

表3 机械臂角度差 单位:(°)

关节	控制前	PID 控制	PID 参数优化控制
第一关节	0.96	0.25	0.10
第二关节	0.58	0.38	0.05
第三关节	0.85	0.47	0.09
第四关节	0.67	0.38	0.04
第五关节	0.64	0.41	0.06
第六关节	0.66	0.37	0.07

经过计算可知,控制前机械臂角度差均值为 0.73° ,PID控制下的机械臂角度差均值为 0.38° ,PID参数优化控制下的机械臂角度差均值为 0.07° ,角度差最小,控制精度最高。

机械臂偏移量通常是指机械臂末端实际位置与期望位置之间的差距或偏移,用来描述机械臂的定位准确性和执行任务的偏差程度。机械臂末端异常振动控制前、PID控制以及PID参数优化后的机械臂偏移量如表4所示。

表4 机械臂偏移量 单位:mm

关节	控制前	PID 控制	PID 参数优化控制
第一关节	1.22	0.56	0.05
第二关节	1.14	0.41	0.03
第三关节	1.63	0.53	0.04
第四关节	1.25	0.48	0.03
第五关节	1.66	0.46	0.03
第六关节	1.24	0.43	0.02

经过计算可知:控制前的机械臂偏移量均值为1.36 mm,PID控制下的机械臂偏移量均值为0.48 mm;PID参数优化控制下的机械臂偏移量均值为0.03 mm,偏移量是最低的。从而证明该方法有较好的控制精度与控制效果。

机械臂末端异常振动控制前、PID控制以及PID参数优化后的机械臂末端异常振动响应时间如表5所示。

表5 机械臂末端异常振动响应时间 单位:s

实验次数/次	控制前	PID 控制	PID 参数优化控制
20	2.36	1.63	0.55
40	2.41	1.47	0.75
60	2.33	1.58	0.72
80	2.17	1.17	0.68
100	1.85	1.56	0.71

由表5中的数据可知:控制前的机械臂末端异常振动响应时间最大值达到了2.41 s,利用PID控制后机械臂末端异常振动响应时间最大值有所下降,但是也达到了1.63 s。而利用PID参数优化控制后,机械臂末端异常振动响应时间大幅度下降,最大值仅为0.75 s,说明应用本文方法可以更快地抑制振动,提高控制性能。

3 结语

在机械臂运动过程中,由于激励源、不稳定性或控制系统设计不当等原因,末端可能会出现异常振动,影响机械臂运动的精确性、稳定性和操作安全性。因此,研究机械臂末端异常振动成为提高机械臂控制性能和工作效率的重要课题。针对该问题,本文提出了一种基于PID参数优化的机械臂末端异常振动控制方法。通过实验证明:该方法可以实现对机械臂异常振动的自动控制且机械臂末端异常振动响应时间短,取得了较好的实际应用效果。该方法通过调整控制器参数、优化控制策略,有效抑制和减小了机械臂末端的振动幅度,提升了控制精度,对于更好地理解振动特性、设计合适的控制策略具有重要意义。

参考文献:

- [1] 郭宇飞,许盛悦,李慧子,等. 基于改进滑模趋近律的振动基机械臂的有限时间轨迹跟踪控制[J]. 振动与冲击,2022,41(20):86-92,194.
- [2] 尚东阳,李小彭,尹猛,等. 采用RBF神经网络辨识的

- 柔性机械臂抑振控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 76-84.
- [3] 丁力,姚勇,巢渊,等. 面向水质采样的绳驱动空中机械臂抗干扰控制[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 452-458.
- [4] 刘铠源,杨明. 基于改进有源阻尼的柔性关节机械臂伺服系统振动抑制策略[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(7): 20-28.
- [5] 陈泓宇,董秀成,杨勇,等. 全局收敛的带有输出约束柔性关节机械臂分段控制[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(12): 3697-3702, 3708.
- [6] 姬周珂,徐巧玉,王军委,等. 一种深度强化学习的机械臂控制方法[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 19-24, 3.
- [7] 刘一扬,郑香金,王良文. 新型变刚度电液串联弹性机械臂振动控制仿真研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(10): 160-165.
- [8] 梅瑞麟,郭宇飞,王志刚,等. 负载不确定振动基机械臂的有限时间鲁棒镇定控制[J]. 振动工程学报, 2023, 36(1): 128-137.
- [9] 马天兵,宫晗,杜菲,等. 基于线结构光和优化PID的压电柔性机械臂振动控制[J]. 光学精密工程, 2021, 29(11): 2661-2671.
- [10] 夏长高,杨鹏程,韩江义,等. 基于遗传算法优化的除草机械臂模糊PID控制研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(12): 15-21.
- [11] 赵伟,张晓晖,杨松楠. 基于动力学模型分块逼近的水下机械臂RBF滑模控制算法研究[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(4): 555-561.
- [12] 王建平,王刚,毛晓彬,等. 基于深度强化学习的二连杆机械臂运动控制方法[J]. 计算机应用, 2021, 41(6): 1799-1804.
- [13] 陈晓彤,祁文哲,孟建军,等. 一种改进差分进化算法的单关节机械臂控制方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(7): 38-41, 47.
- [14] 罗彩玉,刘明. 基于人工鱼群算法的二辊液压轧机辊缝PID控制器优化[J]. 中国工程机械学报, 2022, 20(4): 310-314.

收稿日期:2023-07-27

(上接第250页)

4 结语

随着高精度步进电机使用范围的不断增加,对步进电机伺服系统开展复合自抗扰控制就显得尤为重要。为此,提出高精度步进电机机械驱动伺服系统复合自抗扰控制方法。基于步进电机伺服系统结构分析结果,明确系统各项参数并建立系统动力学模型,获取系统当前状态;以此为基础,设计一种自抗扰控制器;通过控制器完成电机伺服系统的自抗扰控制。通过实验证明该方法具有较高的控制精度、稳定性和效率,控制效果较好。

参考文献:

- [1] 张曼玲,汪钊旭,穆旭阳,等. 基于单片机的步进电机控制系统探究[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(3): 133-135, 145.
- [2] 陈薇薇,郭默佳,张洪岩. 混合式步进电机自定位转矩的二维有限元仿真设计研究[J]. 微特电机, 2022, 50(8): 23-26, 30.
- [3] 张臻,周扬忠. 永磁同步电机位置伺服系统改进变结

构自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 263-271.

- [4] 蔡改贫,周小云,刘鑫. 改进PSO算法优化的电液位置伺服系统自抗扰跟踪控制[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(12): 1904-1912.
- [5] 冯宾,樊卫华. 基于摩擦补偿的直流伺服系统变增益自抗扰控制器[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(1): 35-43.
- [6] 蒋赞,陈机林,侯远龙,等. 基于AFSMC的步进电机伺服系统控制研究[J]. 电气自动化, 2020, 42(2): 90-93.
- [7] 史耕金,李东海,丁艳军. 基于概率鲁棒的改进自抗扰控制器设计[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(10): 57-64.
- [8] 蒲明,刘鹏,熊皓. Fal函数的改进及3种新型非线性扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1655-1662.
- [9] 赵丽,希望·阿不都瓦依提. 基于锁相环的改进型滑膜频率偏移孤岛检测法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(10): 104-108, 293.

收稿日期:2023-08-07