

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.051

振动干扰下大负载 DJ 型架桥机机臂升降液压稳态控制

邵志元

(中铁十二局集团 第四工程有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要: 为了提升大负载 DJ 型架桥机机臂升降液压控制效率和稳定性, 提出大负载 DJ 型架桥机机臂升降液压稳态控制技术。等效分析 DJ 型架桥机机臂升降结构的振动特性。基于等效模型获得机臂升降结构的固有频率和相应振型, 避免传统方法整体振动分析的弊端。基于振动特性分析结果自适应调节 PID 液压控制器, 使其更好地适应机臂的振动干扰, 实现机臂升降液压稳态控制。实验结果表明: 应用该技术控制后的响应曲线变得平稳且具有较小的幅值输出, 当出现外界扰动时, 能够快速恢复到原始稳定状态, 平均控制时间为 2.91 s, 具有较好的机臂升降液压稳态控制效率和稳定性。

关键词: 大负载 DJ 型架桥机; 机臂升降结构; 动力学等效函数; 模态分析; PID 模糊控制器

中图分类号: TP271 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0251-05

Hydraulic Steady State Control of Heavy Load DJ Bridge Erecting Machine Arm Lifting under Vibration Interference

SHAO Zhiyuan

(The 4th Engineering Co., Ltd., China Railway 12th Bureau Group, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and stability of hydraulic control for the lifting and lowering of the arm of the heavy load DJ bridge erecting machine, a steady-state hydraulic control technology for the lifting and lowering of the arm of the heavy load DJ bridge erecting machine is proposed. Equivalent analysis is conducted on the vibration characteristics of the lifting structure of the DJ type bridge erecting machine arm. The natural frequency and corresponding vibration mode of the boom lifting structure is obtained based on an equivalent model avoiding the drawbacks of traditional methods for overall vibration analysis. Based on the analysis of vibration characteristics, the PID hydraulic controller is adaptively adjusted, better adapting to the vibration interference of the arm and achieving stable hydraulic control of arm lifting. The experimental results show that the response curve controlled by the proposed technology becomes stable and has a small amplitude output. When external disturbances occur, it can quickly recover to the original stable state with an average control time of 2.91 seconds, which has good hydraulic steady-state control efficiency and stability for arm lifting.

Keywords: DJ type bridge erecting machine with high load; arm lifting structure; dynamic equivalent function; modal analysis; PID fuzzy controller

0 引言

DJ 型架桥机在运输、安装、拆卸效率方面拥有较高的效率, 因此被工程单位广泛采用。机臂是其主要构件, 其液压控制过程的可靠性和稳定性需具备极高水平。为了确保机臂升降结构的稳态性, 研究 DJ 型架桥机的机臂升降液压稳态控制技术具有重要意义。

苏霄^[1]提出一种基于人机交互闭环力/位的架桥机机臂稳态控制方法, 利用机臂力/位闭环控制算法建立机臂稳态控制系统。该方法不能缓解机臂升降控制的抖动与振动等问题。张百寿等^[2]

采用基于扰动观测器的机臂神经网络滑模控制方法来解决机臂升降结构的稳态控制问题, 但该方法无法精准分析架桥机机臂升降液压稳态的影响因素, 导致其控制效率较低。尚东阳等^[3]将径向基(RBF)神经网络辨识方法引入到机臂振动抑制和稳态控制策略中, 以此实现机臂升降结构的稳态控制, 但是其控制精度有待进一步检测。

以上桥机机臂升降控制方法简单以整体振动参数设定暂停阈值, 缺少对不同区域的振动情况分析, 导致升降液压控制效率和控制稳定性较差。为了解决上述方法中存在的问题, 本文提出大负载 DJ 型架桥机机臂升降液压稳态控制技术。

基金项目: 陕西慧衡建设工程有限公司项目(91610113MAB0WNK44B)

作者简介: 邵志元(1983—), 男, 山西平遥人, 高级工程师, 本科, 研究方向为高速铁路公路桥梁设备, dearshaozy@163.com。

1 机臂升降过程中液压结构的振动特性等效分析

为了明确机臂升降液压稳态控制的目标,首先需要基于大负载 DJ 型架桥机机臂的液压结构组成和振动特点展开机臂升降中振动过程的等效分析。大负载 DJ 型架桥机的液压结构如图 1 所示。

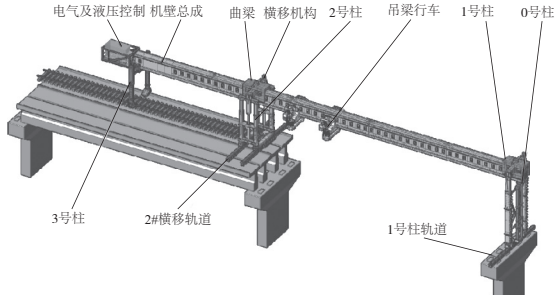


图 1 DJ 型架桥机液压结构

图 1 中,架梁作业时,机臂通过液压调节,承载 T 梁质量载荷和转矩^[4]。根据液压结构进行振动等效分析,其过程如下。

1) 液压杆件振动等效分析

为了准确描述液压杆件上某点的振动情况,并了解其相对于整个系统的姿态信息,通过计算描述点在体坐标系中的旋转状态,精准定位液压杆件的姿态信息,进而对液压杆件振动等效分析。液压杆件上第 i 个点位置的计算过程为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \vartheta_G & -\sin \vartheta_G \\ \sin \vartheta_G & -\cos \vartheta_G \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (x_G, y_G) 表示体坐标系的质心坐标; $\bar{x}_i$ 和 $\bar{y}_i$ 表示液压连杆第 i 个点的位置; ϑ_G 表示 (x_G, y_G) 相对于一个固定的绝对坐标系的欧拉角。

设定杆件第 i 个点作用于三维空间中 x 轴、 y 轴, F_{xi} 与 F_{yi} 分别表示该点对于作用方向所产生的力,则杆件的振动行为可表示为

$$\begin{cases} F_{xG} = \sum_i F_{xi} \\ F_{yG} = \sum_i F_{yi} \\ F_{zG} = \sum_i (\alpha_{xi} F_{xi} + \alpha_{yi} F_{yi}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_{xG} 、 F_{yG} 分别表示 (x_G, y_G) 中杆件第 i 个点作用于 x 轴、 y 轴方向所产生的力; F_{zG} 表示质心作用于 z 轴所产生的转矩; α_{xi} 、 α_{yi} 分别表示第 i 个节点在 x 轴、 y 轴方向上的旋转角度。

2) 转动铰振动等效分析

架桥机机臂的两液压杆件之间通过转动铰连接^[5],其沿着 x 轴、 y 轴的两个连接处端口作用力

计算公式为

$$\begin{cases} F_{xi} = k_x(x_{a2} - x_{a1}) + b_x(v_{x2} - v_{x1}) \\ F_{yi} = k_y(y_{a2} - y_{a1}) + b_y(v_{y2} - v_{y1}) \\ F_{x2} = -F_{x1} \\ F_{y2} = -F_{y1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_x 、 k_y 和 b_x 、 b_y 分别表示在 x 轴、 y 轴方向转动铰连接处的弹性系数和阻尼参数; x_{a1} 、 y_{a1} 、 v_{x1} 、 v_{y1} 和 x_{a2} 、 y_{a2} 、 v_{x2} 、 v_{y2} 分别表示 x 轴、 y 轴方向上端口 1 和端口 2 的位移和速度。由此获取不同端口转动铰连接处转矩 T_1 、 T_2 振动等效函数:

$$\begin{cases} T_1 = k_z(\vartheta_1 - \vartheta_2) + b_z(\xi_1 - \xi_2) \\ T_2 = -T_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_z 和 b_z 分别表示 z 轴方向转动铰连接处的弹性系数和阻尼参数; ϑ_1 、 ϑ_2 和 ξ_1 、 ξ_2 分别表示端口 1、端口 2 的欧拉角和旋转向量。

3) 移动铰振动等效分析

设定两个端口的几何约束以及运动约束,其中移动铰角度的约束关系(相对转角)为

$$R_{es}(z_1) = \vartheta_4 + \beta_4 - \vartheta_3 - \beta_3 \quad (5)$$

式中: ϑ_3 、 ϑ_4 分别表示端口 3 和端口 4 所在液压杆件上的欧拉角; β_3 、 β_4 分别表示两个端口在移动铰运动轴线上的欧拉角。由此获取振动铰位移约束:

$$R_{es}(z_2) = x_{r4} \sin \beta_4 + y_{r4} \cos \beta_4 + (x_3 - x_4) \sin(\vartheta_4 + \beta_4) - (y_3 - y_4) \cos(\vartheta_4 + \beta_4) + x_{r3} \sin(\vartheta_4 + \beta_4 - \beta_3) - y_{r3} \cos(\vartheta_4 + \beta_4 - \beta_3) \quad (6)$$

式中: x_{r3} 、 y_{r3} 、 x_{r4} 、 y_{r4} 分别代表端口 3、端口 4 的相对坐标; x_3 、 y_3 、 x_4 、 y_4 分别代表端口 3、端口 4 的运动位移。

4) 液压升降传导结构等效分析

在进行等效分析时,使用平面机构库,将液压连接臂的机构进行了简化处理,并通过建立类似于液压伸缩臂的连杆机构来代替原有的连接臂机构。机臂液压升降系统分为液压传动系统和液压控制系统。图 2 展示了等效后的液压升降传动系统等效振动模型。

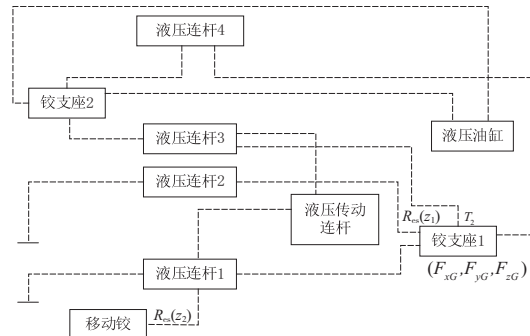


图 2 液压升降传导系统的等效振动模型

由图 2 可知,液压连杆通过液压油缸获得动力,通过液压传动连杆将上几节计算出的力值传导给机臂,实现液压升降,在液压传动过程中振动等效。

2 基于振动特性分析的机臂升降液压稳态控制

在机臂升降过程中,频繁的冲击和振动会给机械结构带来额外的应力和变形,加速材料的疲劳损伤。长此以往,这可能导致机械零部件的裂纹、断裂或失效,影响机臂的工作能力和安全性。为了确保机臂在升降过程中的安全性和稳定性,有必要采取措施来减少冲击和振动的影响。在上述振动等效分析的基础上,可以采用液压 PID 模糊控制算法^[6],将振动特性分析结果作为液压 PID 控制系统参数选择的依据,帮助控制系统控制器根据实时的振动参数进行自适应调节,使其更好地适应冲击和震动环境。模糊控制结构如图 3 所示。

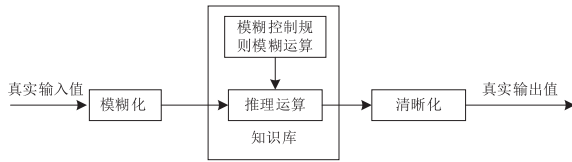


图 3 模糊控制结构

针对机臂液压升降结构的液压 PID 模糊控制系统如图 4 所示。

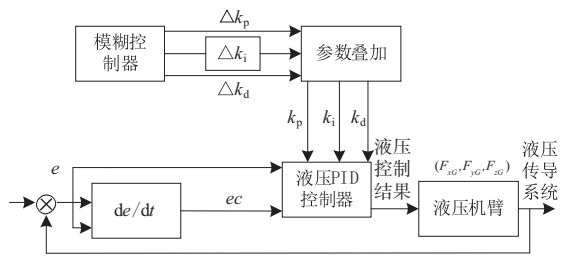


图 4 机臂升降液压 PID 模糊控制系统

图 4 中:对 e 输入误差和 ec 误差变化率进行模糊化处理,构建模糊子集 (E, EC) ,将精准量 $(\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d)$ 与 PID 参数叠加运算,最终获取 k_p, k_i, k_d 并将结果传输给机臂,进而实现机臂液压升降稳态控制。各环节的具体过程如下。

1) 模糊化输入量和输出量

针对架桥机机臂的升降液压控制,对输入的振动等效参数进行模糊控制,并设置相关论域为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$;对输出量 $\Delta k_p, \Delta k_i$ 进行模

糊控制,并设置相关论域为 $[-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6]$ 。

在模糊推理中,针对所设置论域细化构建模糊语言变量(负大、负中、负小、零、正小、正中、正大),用 $[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]$ 表示,进一步获取控制器的输入量和输出量的隶属度。

2) 模糊规则设计

在升降过程中,通过上一章节分析可知,负载位置的改变或运动状态的变化,引起不稳定的力和力矩,导致产生摆动和偏移,以此设定机臂升降液压 PID 模糊控制规则为:当振动等效参数波动过大,取较大的 $\Delta k_p, \Delta k_i$ 和较小的 Δk_d 适当调整;当 e 中等,缩小 Δk_i ;当 e 过小,增大 $\Delta k_p, \Delta k_i$ 并缩小 Δk_d 。

3) 模糊推理模块

采用 Mamdani 型模糊控制规则^[7],根据模糊集合 E'_i, EC'_i, k'_{pij} 的最小约束关系生成模糊蕴含关系 $Q_{ij}(E, EC, \Delta k_p)$,数学表达式为 $Q_{ij}(E, EC, \Delta k_p) \in E'_i \times EC'_i \times k'_{pij}$,其中 $i=1, \dots, 7, j=1, \dots, 7$ 代表的是模糊集语言值;其模糊关系 Q 则由 n 条模糊蕴含关系 Q_{ij} 并构形成,具体表达式为

$$Q = \bigcup_{i=1, j=1}^{i=7, j=7} Q_{ij}(E, EC, \Delta k_p) \quad (7)$$

以上述推理为基础,根据机臂升降液压模糊控制输入量和输出量的隶属度函数,得到下式:

$$\begin{cases} D_1 = E'_i(PB)EC'_i(NS) \\ Q_1 = Q\Delta k_p\Delta k_i\Delta k_d \end{cases} \quad (8)$$

由此完成 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的模糊推理,得到其存在的模糊规则。

4) 清晰化模块

通过重心法完成清晰化处理,表达式为

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=0}^n \nu_c(Z_i) Z_i}{\sum_{i=0}^n D_1 \nu_c(Z_i)} \quad (9)$$

式中: Z_0 表示液压控制器映射结果的输出值; Z_i 表示论域内模糊控制量的量化值; $\nu_c(Z_i)$ 表示离散化论域内模糊控制量化值;经过清晰化后得到 $(\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d)$ 的精确值,在模糊液压 PID 控制器中,设定液压 PID 的最终调整参数:

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + Z_0 \Delta k_p k_{\Delta k_p} \\ k_i = k_{i0} + Z_0 \Delta k_i k_{\Delta k_i} \\ k_d = k_{d0} + Z_0 \Delta k_d k_{\Delta k_d} \end{cases} \quad (10)$$

式中: k_p, k_i, k_d 均为液压 PID 控制器的调整参数; k_{p0}, k_{i0}, k_{d0} 均为相对应的初始参数。将各个调整

量分别代入上式中,即可得到液压 PID 控制器的各控制参数。

3 实验与分析

为了验证大负载 DJ 型架桥机机臂升降液压稳态控制技术的整体有效性,需要对其展开测试。以某大负载 DJ 型架桥机机臂为实验对象,其姿态是俯仰角为 $-10^{\circ} \sim +70^{\circ}$,横滚角为 $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$,偏航角为 $-360^{\circ} \sim +360^{\circ}$,当前负载为 200 kg,最大负载为 500 kg,当前升降速度为 1.5 m/min,最大速度为 5 m/min,实际位置为(15,-3,2),期望位置为(6,-2,3),机臂工作环境如图 5 所示。



图 5 机臂工作测试环境

实验所用位移传感器的型号为 XYZ-123,测量范围为 0~100 mm,精确度为 0.01 mm;PID 控制器的比例系数为 1.4,控制量的饱和上限为 100%,饱和下限为 5%,积分时间为 0.8 s,微分时间为 0.2 s。控制软件选用 Rockwell Automation (罗克韦尔自动化) 系统。Rockwell Automation 提供了一系列成套控制系统,包括可编程逻辑控制器(PLC)和工业网络解决方案,其可以用于液压控制系统的自动化控制,将本文控制算法拷入该软件。传感器和控制器安装位置如图 6 所示。

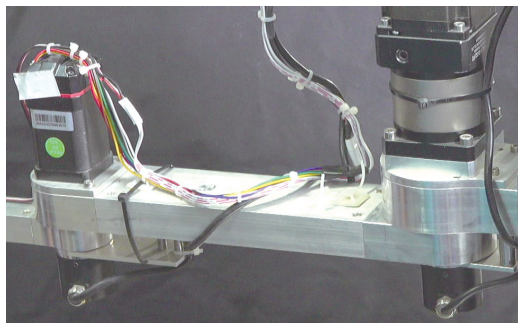


图 6 传感器与机臂安装位置

首先通过 Rockwell Automation 程序输出采用所提方法和文献[1]方法、文献[2]方法对架桥机机臂升降结构展开振动分析后的响应曲线,对比

3 种方法的振动分析效果,如图 7 所示。

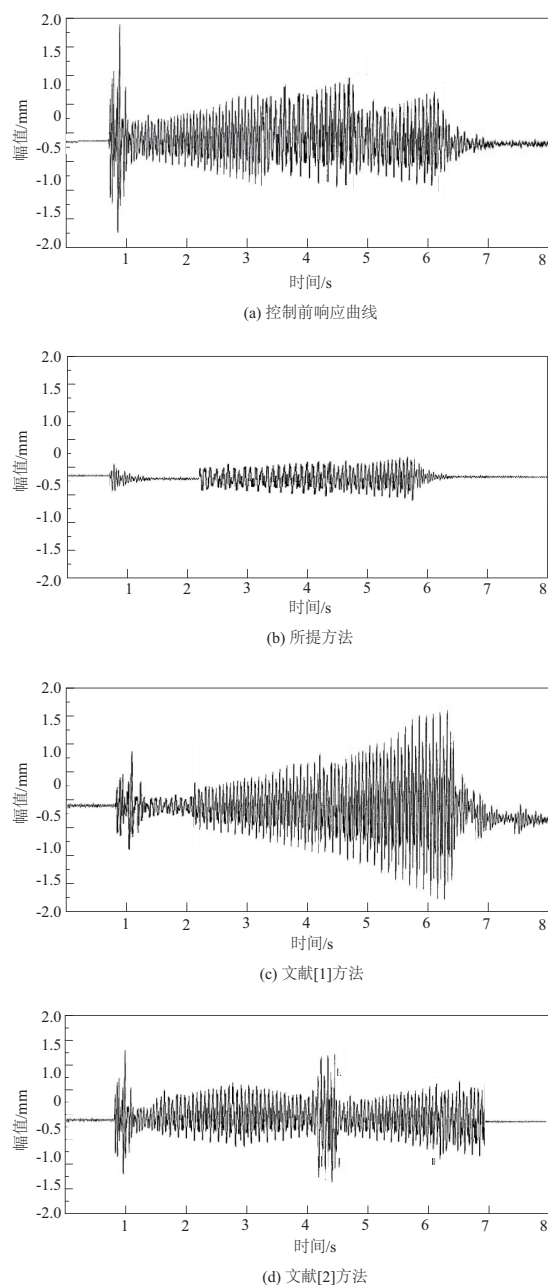


图 7 不同方法稳态控制效果

由图 7 可知,在未加控制前,机臂升降结构振动波动较大,达到 $-2 \sim 2$ mm,说明此时的机臂稳定性较差。经本文振动等效方法控制后,响应曲线变得平稳,将波动幅值缩小至 $-0.5 \sim 0.5$ mm,说明所提方法能够有效地控制机臂升降结构稳定输出;文献[1]方法控制后的波动幅值为 $-1.85 \sim 1.85$ mm;文献[2]方法控制后的波动幅值为 $-1.25 \sim 1.25$ mm。证明本文方法具有稳定控制优势。

为进一步体现所提方法的可靠性,测试 3 种控制方法的抗干扰性能和稳定性能。在外界扰动

情况下,3 种方法的位移误差响应曲线如图 8 所示。

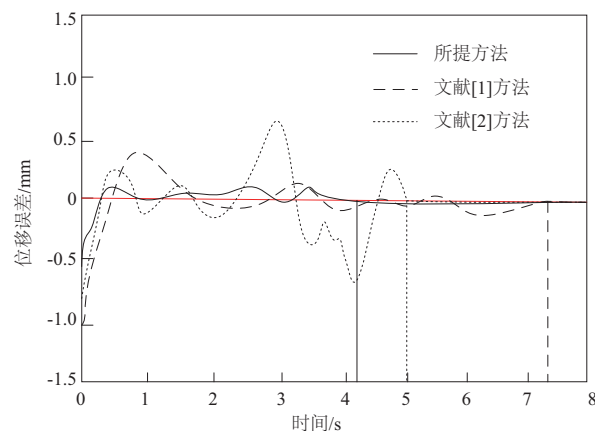


图 8 不同方法抗干扰测试结果

由图 8 可知,当出现外界扰动时,所提方法能够在 4.2 s 内将位移误差控制为 0,且最大位移误差为 0.5 mm;而文献[1]方法和文献[2]方法将误差控制为 0 的时间分别为 7.3 s 和 5 s。所提方法具有更小的机臂升降位移误差和更快的响应速度,具有较好的抗干扰性和稳定性。

最后通过控制效率指标衡量 3 种控制方法的优劣性,随机选取架桥机机臂 10 次升降作业时的振动情况,采用上述 3 种方法展开测试,得到如表 1 所示的对比结果。

表 1 不同方法控制时间 单位:s

项目	所提方法	文献[1]方法	文献[2]方法
实验 1	2.87	10.02	5.14
实验 2	3.04	8.45	4.88
实验 3	2.99	8.74	5.87
实验 4	3.14	7.77	6.01
实验 5	3.25	10.25	4.87
实验 6	2.78	9.25	4.28
实验 7	2.55	9.14	5.14
实验 8	3.32	8.99	5.26
实验 9	3.02	7.89	5.98
实验 10	2.14	9.01	6.02
平均用时	2.91	8.95	5.35

根据表 1 可得,在相同的测试条件下,所提方法的控制时间远远低于文献[1]方法和文献[2]

方法,其平均控制时间为 2.91 s,其他两种传统方法的平均控制时间为 5.35 s 和 8.95 s。由此可以说明所提方法具有更好的机臂升降结构稳态控制效果,能够进一步提高其工作效率。

4 结语

本文提出了大负载 DJ 型架桥机机臂升降结构稳态控制技术,在建立机臂升降结构动力学等效函数的基础上,对机臂升降作业时影响其稳态的振动特性展开分析,将其输入到 PID 模糊控制器中,构建机臂升降结构稳态控制器,从而实现对各参数的稳态控制,最终得到一个良好的控制结果,平均控制时间为 2.91 s,使架桥机整体的稳态性得到保证。

参考文献:

- [1] 苏霄.重载机械臂控制系统设计与研究[J]. 制造技术与机床,2021(12):55-61.
- [2] 张百寿,杜亚江,李宗刚,等. 基于扰动观测器的机械臂神经网络滑模控制[J]. 控制工程,2021,28(8):1540-1546.
- [3] 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.
- [4] 轩康乐,江宏亮,张新文,等. CB890QL 钢履带式起重臂架用热轧管坯控轧工艺分析[J]. 特殊钢,2022,43(4):36-40.
- [5] 王亚楠,郑凯.一种多缸液压升降装置的智能控制系统设计[J]. 机械制造与自动化,2023,52(2):189-192.
- [6] 秦本双,徐永海.多虚拟同步机并网系统功频振荡模态分析[J]. 中国电机工程学报,2021,41(19):6570-6581.
- [7] 任工昌,王乐,桓源,等. 针对机械手抓取皮革位置的研究[J]. 中国皮革,2022,51(5):31-35.
- [8] 邱志成.柔性机械臂的振动测量和控制研究进展综述[J]. 信息与控制,2021,50(2):141-161.
- [9] 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.
- [9] 贾玉文,段晓,张厚明,等. 研究堆 Mamdani 型模糊控制器设计优化方法[J]. 原子能科学技术,2021,55(6):1091-1097.

收稿日期:2023-10-11