

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.009

基于 AMESim-Simulink 的自适应模糊 PID 电液比例位置控制研究*

李延民¹, 刘锡山², 王 振¹, 庄天宇¹

(1. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 郑州大学 河南省资源与材料工业技术研究院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对压剪试验机水平剪切系统超大流量、超大输出力作用下的动态加载特性问题,对压剪试验机水平剪切系统阶跃响应、正弦实际工况加载精度、位移-力加载特性等方面进行了研究。分析了设备的剪切原理,并以电液比例位置控制系统为研究对象,采用 6 只电液比例阀并联控制,拟定了水平剪切系统子回路液压原理图;引入了自适应模糊 PID 控制,设计了模糊控制器,运用 AMESim 和 Simulink 联合优化了水平剪切模型,并进行了相应的仿真分析。研究表明:与普通 PID 控制相比之下,采用自适应模糊 PID 控制的系统可以实现更优的鲁棒性,系统可以在更短的时间内达到稳态,且具有更小的超调量;实际位移跟踪正弦期望信号,位移误差范围 $-2.6\% \sim 1.9\%$,位于误差允许范围 $\pm 5\%$ 之内。

关键词:压剪试验机;液压控制系统;AMESim;Simulink;自适应模糊 PID

中图分类号:TH137.7;TH873

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)12-1453-06

Adaptive fuzzy PID electro-hydraulic proportional position control based on AMESim-Simulink

LI Yan-min¹, LIU Xi-shan², WANG Zhen¹, ZHUANG Tian-yu¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Province Industrial Technology Research Institute of Resources and Materials,
Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problem of dynamic loading characteristics of the compression shear tester horizontal shear system under the influence of super large flow rate and output force, the step response of the horizontal shear system, the loading accuracy of the sinusoidal actual working condition and the x_p -F loading characteristic were studied. The shear principle of the equipment was analyzed, the electro-hydraulic proportional position control system was taken as the research object, six electro-hydraulic proportional valves were used for parallel control. The hydraulic schematic of the horizontal shear system sub-circuit was drawn, the adaptive fuzzy PID control was introduced, the fuzzy controller was designed, and the horizontal shear model was optimized and simulated with AMESim and Simulink. The results indicate that comparing with ordinary PID, the adaptive fuzzy PID control can achieve better robustness, the system can reach steady state in a shorter time and smaller overshoot, the actual displacement tracks the sinusoidal expected signal, the error is $-2.6\% \sim 1.9\%$, which is within $\pm 5\%$ of the allowable error range.

Key words: compression shear tester; hydraulic control system; AMESim; Simulink; adaptive fuzzy PID

收稿日期:2020-03-09

基金项目:河南省交通运输科技计划资助项目(2019J2)

作者简介:李延民,(1964-),男,河南开封人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事液压传动与控制方面的研究。E-mail:yml64@163.com

0 引 言

近些年,随着桥梁建设的不断发展,用于重型大跨度桥梁的支座日益增多,对用于支座力学性能检测的压剪试验机设备要求也越来越高。压剪试验机主要用于各种桥梁板式、盆式、球式等隔震橡胶支座在抗压、抗剪切力复合条件下的轴向径向抗压、抗剪、允许转角等力学性能试验^[1,2]。

液压控制系统是压剪试验机完成支座力学性能试验的核心组成部分,其控制性能的优劣直接关系到支座力学性能参数检测的精确度,影响到桥梁安全,因此,其对于设备液压控制系统性能的研究优化有着至关重要的作用。

吴天宇^[3]将直驱式泵控缸电液伺服液压控制系统应用于 20 MN 压剪试验机上,并通过调节 PID 控制参数,得到了系统的最佳响应;赵斌^[4]在位置同步误差不理想的情况下运用根轨迹校正的方法,优化了电液比例位置同步控制系统性能,减小了系统控制误差。

总结相关文献,鉴于常规 PID 控制精度较低、抗干扰能力差、调节较慢等特点^[5,6],笔者拟在水平剪切液压力子回路中,采用多只同规格电液比例阀并联形成阀控缸系统,同时在系统中引入自适应模糊 PID 控制,利用 AMESim-Simulink 软件联合仿真实现 PID 参数的在线最优整定,对系统动态响应性、正弦实际工况加载精度、位移-力加载特性等方面进行研究。

1 加载系统

1.1 加载系统技术要求

最大竖向力:20 MN;最大水平剪切力:4 MN;最大水平位移:300 mm(以工件初始位置向两侧运动最大位移为 300 mm)。在分析了实际工况的情况下,笔者根据 JB/T 11582-2013 标准,确定了剪切系统剪切频率为 0.067 Hz,平均剪切速度为 80 mm/s,加载次数为 11 次。

1.2 加载原理

在水平剪切过程中,支座在竖向作动器压紧恒定力作用下,水平剪切作动器带动剪切板对其实现往复剪切运动,用以检测支座的剪切模量、等效阻尼比等力学参数。

此处仅对水平剪切系统加以研究。该系统为实现动态加载,水平作动器采用双出杆双作用对称液压缸(规格:630 mm/400 mm)。优点是提供两侧对称的液压力,便于实现双向控制。为使剪切系统平稳运行,快

速响应,达到较高的控制精度要求,笔者采用电液比例闭环位置控制,同时加入自适应模糊 PID 控制,从而使实际的加载路径能更好地跟踪期望的信号。

水平剪切加载原理如图 1 所示。

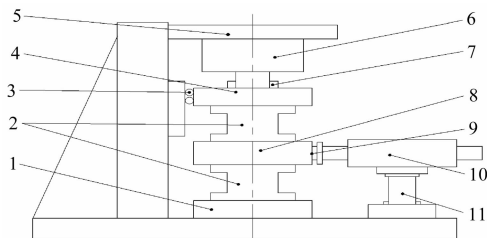


图 1 水平剪切加载原理

1—下压板;2—试件;3—导向块;4—上压板;5—框架;
6—竖向作动器;7—竖向力、位移传感器;8—水平剪切板;9—
水平力、位移传感器;10—水平作动器;11—升降作动器

图 1 以双剪工况为例,在此压剪试验机竖向压紧、水平剪切的过程中,采用竖向力和位移传感器检测竖向作动器输出力和竖向位移,水平力传感器和位移传感器检测水平作动器的剪切力和切向位移。

根据 GB/T 20688.1-2007 标准所述,系统在不变的竖向压力下对桥梁支座的水平剪切性能完成水平剪切测定。剪切过程中,竖向压力允许波动范围为 $\pm 10\%$,水平位移允许波动范围为 $\pm 5\%$ ^[7]。

1.3 剪切子回路液压原理图

剪切系统液压力子回路原理图如图 2 所示。

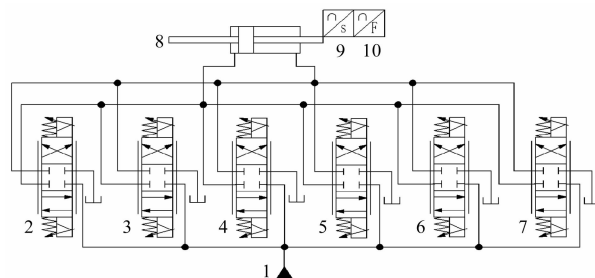


图 2 剪切系统液压力子回路原理图

1—液压源;2,3,4,5,6,7—电液比例阀;8—水平剪切作动器;9—位移传感器;10—力传感器

图 2 中,剪切加载系统以工件初始位置为原点,左、右两方向运动工况相同,作动器采用双出杆双作用液压缸,实现对称加载,简化系统加载控制难度;

当加载系统工作达到 1 262.6 L/min 的瞬时超大峰值流量时,采用单只液压阀不能满足其流量需求,因此,笔者拟采用电液比例方向控制阀“并联”工作;

对比期望信号与实施位移,将信号差经处理器处理后传递给电液比例方向阀,控制方向阀的开口流量,实现对流量的准确控制,进而达到对作动器位置的精

确控制。

1.4 载荷分析

桥梁支座通常置于桥面和桥墩中间,作为两者之间的柔性连接部件,除了承受来自桥面的重量之外,还要承受来自横桥向和顺桥向由于震动等因素造成的剪切力。因此,检测桥梁支座承受剪切的性能参数至关重要。

在支座的分析过程中,将支座水平剪切过程简化为一个弹簧-阻尼模型。水平作动器在剪切过程中不只提供支座剪切所需要的的水平力,还要克服惯性力、粘性阻尼力以及弹簧力等。

加载模型如图 3 所示。

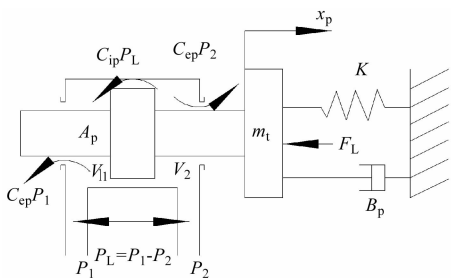


图 3 加载模型

作动器的输出力和负载平衡方程为:

$$A_p p_L = m_t \frac{d^2 x_p}{dt^2} + B_p \frac{dx_p}{dt} + K x_p + F_L \quad (1)$$

式中: m_t —作动器-负载系统质量; B_p —作动器-负载系统粘性阻尼系数; K —系统负载弹簧刚度; F_L —作用在活塞上的任意外负载力。

2 自适应模糊 PID 控制

2.1 常规 PID 与自适应模糊 PID 控制

常规 PID 控制是人为手动调整参数以获得良好的系统控制性能,但是其控制精度低,抗干扰能力差。为使系统具有更好的自适应性,笔者在常规 PID 控制基础上,结合模糊规则进行模糊推理,完成在线最优整定 PID 参数的要求,使系统具有更好的动态性能、更高的控制精度以及较好的鲁棒性^[8-12]。

常规 PID 控制如图 4 所示。

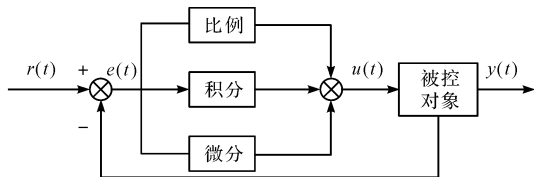


图 4 常规 PID 控制

自适应模糊 PID 控制如图 5 所示。

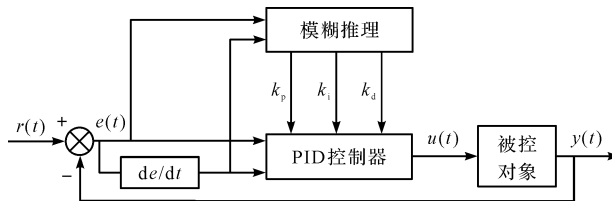


图 5 自适应模糊 PID 控制

自适应模糊 PID 控制的核心在于模糊 PID 控制器的设计。其工作原理是将输入的偏差信号 $e(t)$ 和偏差信号 $e(t)$ 的微分 de/dt 传递给模糊 PID 控制器,控制器进行模糊推理,以及 PID 参数的在线整定^[13]。

其原理如下式所示:

$$k_p = k'_p + \Delta k_p \quad (2)$$

$$k_i = k'_i + \Delta k_i \quad (3)$$

$$k_d = k'_d + \Delta k_d \quad (4)$$

2.2 模糊控制器的设定

该模糊 PID 控制器^[14,15] 设置两输入 - 三输出,与方式 (and method) 为 minimum,或方式 (or method) 为 maximum,推理方式 (implication) 为 minimum,合成方式 (aggregation) 为 maximum,解模糊方式 (defuzzification) 为 centroid; 定义模糊规则输入变量 $e(t)$ 和 de/dt 的模糊集合为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 对应的域为 $[-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6]$, 定义模糊规则输出变量 k_p, k_i, k_d 的模糊集合为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 对应的域为 $[-6, 6]$ 。

模糊 k_p 参数规则表如表 1 所示。

表 1 模糊 k_p 参数规则表

$e(t)$	de/dt						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

模糊 k_i 参数规则表如表 2 所示。

表 2 模糊 k_i 参数规则表

$e(t)$	de/dt						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	PM	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB

模糊 k_d 参数规则表如表 3 所示。

表 3 模糊 k_d 参数规则表

$e(t)$	de/dt						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZO	ZO	NS	ZO	PB
NM	NS	NS	NS	NS	NS	ZO	NS
NS	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
ZO	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	PS
PS	NB	NM	NS	NS	PS	ZO	PS
PM	NM	NS	NS	NS	PS	ZO	PS
PB	PS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	PM

3 液压回路 AMESim-Simulink 联合仿真

MATLAB/Simulink 是一款计算功能极其强大的仿真软件。但其在对液压系统建模时,需要做很多的简化工作,忽略很多的影响因素,使仿真结果与实际差别较大;而 AMESim 是专门应用于液压/机械系统的建模仿真软件,利用面向对象的图形化,可视化建模方式,使设计者更能专注于系统的设计,同时 AMESim 提供了同其他软件联合的丰富接口^[16]。运用 Simulink 和 AMESim 进行联合建模仿真,可以得到更准确的仿真结果。

根据加载系统工况设计要求,笔者建立 AMESim-Simulink 水平剪切位移反馈仿真模型,同时建立 Simulink 控制模块。

AMESim-Simulink 水平剪切位移反馈仿真模型如图 6 所示。

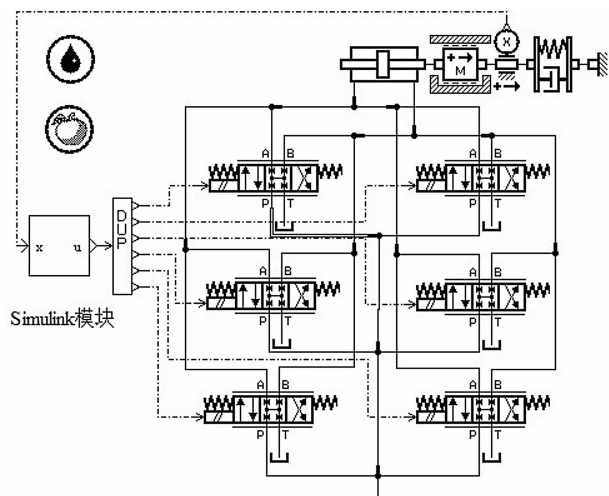


图 6 AMESim-Simulink 水平剪切位移反馈仿真模型

Simulink 控制模块如图 7 所示。

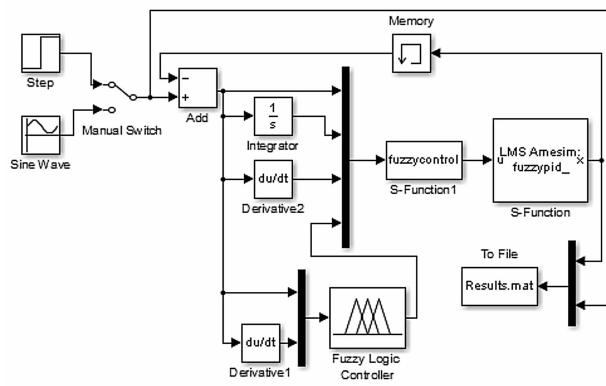


图 7 Simulink 控制模块

系统主要参数如表 4 所示。

表 4 系统主要参数

名称	单位	数值
液压源压力 p	MPa	28
活塞及负载总质量 m_t	kg	5 000
液压缸缸径 D	mm	630
活塞杆直径 d	mm	400
液压油弹性模量 β_e	MPa	800
液压油密度 ρ	kg/m ³	850
比例阀额定流量 Q	L/min	260

在系统中,输入幅值为 0.1,在 1 s 处阶跃的阶跃信号,使用试凑法确定 $k_p=6$, $k_i=0.1$, $k_d=0.01$,先后在系统普通 PID 控制和自适应模糊 PID 控制下进行仿真,仿真时间 4 s,步长 0.01 s。

阶跃响应如图 8 所示。

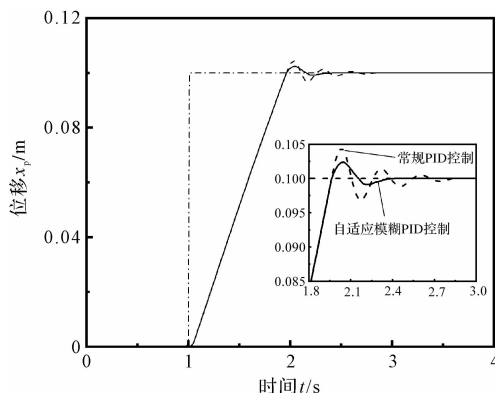


图 8 阶跃响应

从图 8 可以看出:引入自适应模糊 PID 控制后,系统超调量、震荡次数显著降低;常规 PID 控制曲线历时 1.82 s 达到稳态,自适应模糊 PID 控制曲线历时 1.36 s 达到稳态,达到稳态时间明显缩短,并且系统超

调量由 4.4% 降至 2.38%。由此可见,该系统的控制特性得到了很好的优化。

根据 GB/T 20688.1-2007 橡胶支座第一部分:隔震橡胶支座试验方法规定,理想加载路径为正弦函数曲线,平衡位置为 0.4 m,幅值为 0.3 m,加载频率为 0.067 Hz,设置仿真时长 160 s,步长为 0.01 s。

加载位移图如图 9 所示。

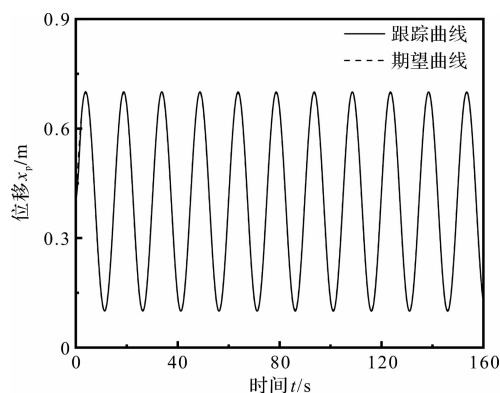


图 9 加载位移图

加载位移局部放大图如图 10 所示。

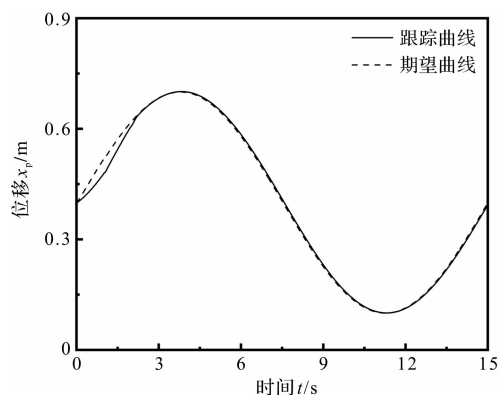


图 10 加载位移局部放大图

位移偏差图如图 11 所示。

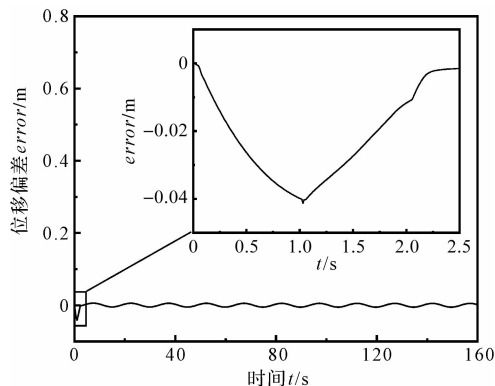


图 11 位移偏差图

从图 11 的仿真结果可以看出:使用自适应模糊 PID 控制算法,通过 AMESim-Simulink 联合仿真,在开始运动的 2.5 s 内偏差较大,之后跟踪曲线与期望曲线基本吻合,曲线跟踪效果良好;

最大误差发生在 1.05 s 时,数值为 -41 mm;系统位移的稳态偏差维持在 -7.8 mm ~ 5.7 mm,偏差范围为 -2.6% ~ 1.9%,完全在剪切位移的允许误差范围 $\pm 5\%$ 之内;

期望曲线是正弦曲线,作动器在往复运动过程中存在加速和减速的阶段,因此系统稳态偏差有些许的波动。

位移-力滞回曲线如图 12 所示。

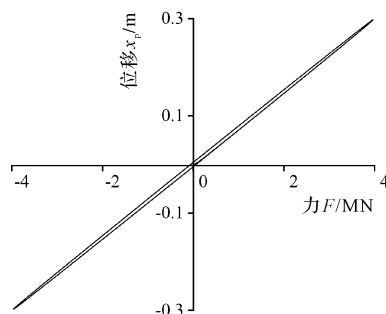


图 12 位移-力滞回曲线

从图 12 可以看出:由于支座阻尼的存在,位移与力的加载变化关系并不是通过原点一条直线,而是存在一定量的滞后。

4 结束语

为了解决压剪试验机水平剪切系统存在超大流量、超大出力作用下的动态加载特性问题,笔者对压剪试验机的加载特性等方面进行了研究,并以电液比例位置控制系统为研究对象,采用自适应模糊 PID 控制应用于水平剪切比例位置控制系统中,研究结果表明:

(1)在自适应模糊 PID 控制下,系统达到稳态的时间较常规 PID 控制缩短了 0.46 s;

(2)自适应模糊 PID 控制下,超调量由 4.4% 降至 2.38%,震荡次数明显减少,系统的响应性得到了很好的优化;

(3)实际工况正弦加载下,稳态偏差在 -2.6% ~ 1.9%,位于剪切位移允许偏差 $\pm 5\%$ 之内,符合系统的设计要求;

(4)得到了较好的系统位移-力滞回曲线,可为超

大吨位压剪试验机的研制提供理论方面的指导。

在下一阶段,本研究将在压剪试验机制造完成后进行工程实际试验,进一步验证自适应模糊 PID 控制在超大流量、超大出力水平剪切系统中的合理性以及控制精度特性等问题。

参考文献 (References):

- [1] 王 龙. 减隔震橡胶支座压剪试验机的设计与研究[D]. 长春: 长春工业大学机电工程学院, 2018.
- [2] 张颖周. 新型桥梁支座力学性能试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学土木工程学院, 2018.
- [3] 吴天宇. 直驱式电液伺服控制系统及其在 20MN 压剪试验机上的应用[D]. 吉林: 吉林大学机械科学与工程学院, 2018.
- [4] 赵 斌. 基于电液比例技术的液压同步控制系统研究[D]. 昆明: 昆明理工大学机电工程学院, 2007.
- [5] 毛 尾, 纪朱珂, 韦海利, 等. 电液比例伺服系统模糊 PID 复合控制应用研究[J]. 液压与气动, 2019(1): 95-99.
- [6] 侯勇严, 孙 瑜, 郭文强. 一种自适应模糊 PID 控制器的仿真研究[J]. 陕西科技大学学报, 2004, 22(2): 48-52.
- [7] GB/T 20688. 1-2007. 橡胶支座第一部分: 隔震橡胶支座试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [8] 葛 蕾, 郭津津, 胡建飞. 基于 AMESim/Simulink 的工业蝶阀电液伺服控制系统的仿真分析[J]. 天津理工大学学报, 2019, 35(2): 9-13.
- [9] 付甜甜, 朱玉川, 顾亚军. 基于 MATLAB-AMESim 的电液伺服系统模糊 PID 控制[J]. 机床与液压, 2016, 44(20): 144-146, 154.
- [10] 刘二东, 郑建明, 黄建强, 等. 直驱泵控电液位置伺服系统模糊 PID 控制仿真与实验研究[J]. 液压与气动, 2015(5): 67-71.
- [12] 刘汉忠, 俞 鹏. 模糊 PID 自适应控制在微型齿轮泵恒流控制系统中的应用[J]. 流体机械, 2018, 46(12): 59-62, 93.
- [11] 韩 江, 黄迪森, 夏 链, 等. 基于模糊 PID 控制的新型伺服液压机位置控制系统研究[J]. 液压与气动, 2012(2): 87-90.
- [13] ESFANDYARI M, FANAEEI M A, ZOHREIE H. Adaptive fuzzy tuning of PID controllers [J]. **Neural Computing and Applications**, 2013, 23(1): 19-28.
- [14] LEE Y H, KOPP R. Application of fuzzy control for a hydraulic forging machine [J]. **Fuzzy Sets and Systems**, 2001, 118(1): 99-108.
- [15] BARAI R K, NONAMI K. Optimal two-degree-of-freedom fuzzy control for locomotion control of a hydraulically actuated hexapod robot [J]. **Information Sciences**, 2006, 177(8): 1892-1915.
- [16] 梁 全, 谢基晨, 聂利卫. 液压系统 AMESim 计算机仿真进阶教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

[编辑: 程 浩]

本文引用格式:

李延民, 刘锡山, 王 振, 等. 基于 AMESim-Simulink 的自适应模糊 PID 电液比例位置控制研究[J]. 机电工程, 2020, 37(12): 1453-1458.

LI Yan-min, LIU Xi-shan, WANG Zhen, et al. Adaptive fuzzy PID electro-hydraulic proportional position control based on AMESim-Simulink [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(12): 1453-1458.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>