

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210520

模糊PID在带电作业机器人液压系统中的研究*

王华建¹ 李鹏^{1,2} 花国祥^{1,2}

(1.南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2.无锡学院自动化学院 无锡 214105)

摘要: 随着我国智能电网的快速发展,逐步采用带电作业机器人代替人工完成日常维护和事故检修任务。但带电作业机器人存在着控制精度低和抖动问题,影响作业任务的完成质量和效率。为了解决该问题,设计了模糊PID控制器实现带电作业机器人输出位移精确控制。首先,分析带电作业机器人的结构与液压系统原理,建立液压系统主要元件的数学模型,并推导出系统的传递函数模型;其次,基于模糊规则设计带电作业机器人输出位移的闭环模糊PID控制器;最后,在Simulink环境中建立原系统、PID、模糊PID不同控制方案的仿真模型进行仿真分析,并对样机进行实验测试。仿真结果表明:相较于原系统和PID控制系统,模糊PID控制系统的调节时间相对缩短了81.3%和30.8%,超调量降低0.064,达到了无超调,并具有较好的位置跟踪能力;此外样机实验数据结果与仿真结果相一致,表明采用模糊PID控制器应用效果更好。

关键词: 带电作业机器人;液压系统;模糊PID控制器;Simulink仿真;样机实验

中图分类号: TP242;TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

Research on fuzzy PID in hydraulic system of live working robot

Wang Huajian¹ Li Peng^{1,2} Hua Guoxiang^{1,2}

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Automation, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

Abstract: With the rapid development of my country's smart grid, live robots are gradually being used to replace manual tasks for routine maintenance and accident repairs. However, there are problems of low control precision and jitter in live work robots, which affect the quality and efficiency of work tasks. In order to solve this problem, a fuzzy PID (proportion intergration differentiation) controller is designed to realize the precise control of the output displacement of the live working robot. Firstly, the structure of the live working robot and the principle of the hydraulic system are analyzed, the mathematical model of the main components of the hydraulic system is established, and the transfer function model of the system is deduced. Secondly, the closed-loop fuzzy PID controller of the output displacement of the live working robot is designed based on fuzzy rules. Finally, the simulation models of the original system, PID and fuzzy PID control schemes are established in the Simulink environment for simulation analysis, and the prototype is tested experimentally. The simulation results show that: compared with the original system and the PID control system, the adjustment time of the fuzzy PID control system is relatively shortened by 81.3% and 30.8%, and the overshoot is reduced by 0.064, achieving no overshoot and having better position tracking ability. In addition, the experimental data results of the prototype are consistent with the simulation results, indicating that the fuzzy PID controller has better application effect.

Keywords: live working robot; hydraulic system; fuzzy PID controller; Simulink simulation; prototype experiment

0 引言

随着我国电网建设的高速发展,各行各业对停电的承受能力越来越低,越来越需要通过带电作业完成日常维护

和事故检修任务^[1]。目前传统人工带电作业容易引发人身伤亡事故和完成工作效率低等问题,采用机器人代替人工方法能有效解决以上问题。但带电作业机器人控制精度低、有抖动,导致了带电作业机器人使用率低、实用化程度

收稿日期:2022-06-29

* 基金项目:江苏省重点研发计划社会发展项目(BE2015692)资助

低^[2]。因此,如何提高系统的控制精度、稳定性是带电作业机器人的重点研究方向。

带电作业机器人是由机械手、液压控制系统、箱体组成,其中液压系统是带电作业机器人实现位置控制的关键子系统。液压系统具有体积小、重量轻、控制精度高、响应快、驱动力大等优点,广泛应用于机器人、汽车、航空航天等领域^[3-6]。针对液压系统的控制问题,国内外学者做了大量的研究^[7-10]。刘志刚等^[11]采用分段PID(proportion intergration differentiation)控制方法,将液压缸位移行程分为快速、中速和慢速3段进行控制并建立液压控制系统仿真模型,仿真结果表明提高了系统的控制精度和响应速度,但响应速度调节过大会引起系统的超调。赵岩等^[12]、董蒙等^[13]将在遗传算法结合到PID控制方法中,对PID控制器参数进行再调整,使得液压控制系统的综合性能进一步提升。闵磊等^[14]提出了一种反馈线性理论与滑模变结构相结合的控制策略,采用反馈线性理论将非线性因素线性化,利用滑模变结构算法控制系统,结果显示,不仅系统位置的控制精度得到提高,而且系统的抖动也随之减少。Jin等^[15]将模糊PID控制方法应用到移栽机的液压控制系统中,提高移栽机的控制精度。

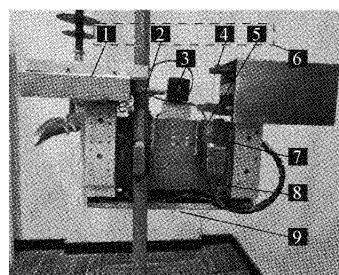
在控制系统中,调节时间、超调量、相角裕度等是衡量控制系统的重要指标。带电作业机器人工作时,抓手需要精确到达指定位置完成带电作业任务,因此需要保证抓手的控制精度,即系统的超调量尽可能达到最低。本文通过设计模糊PID控制器来提高带电作业机器人液压系统的控制品质,既要降低系统的超调量,还要缩短系统的稳定时间,使系统达到控制精度高和响应速度快的目标。以带电作业机器人为研究对象,对带电作业机器人结构与液压系统原理进行分析,构建液压系统数学模型,在原有的机器人液压系统中设计模糊PID控制器,最后在MATLAB/Simulink平台上建立仿真模型和样机实验,比较模糊PID控制方法、传统PID控制方法及原系统输出位移的控制效果,验证该方法的有效性。

1 带电作业机器人的结构与模型

1.1 带电作业机器人整体结构

带电作业机器人结构如图1所示,其主要是由摄像头3、执行机构6、天线7、固定机构8、箱体9组成。工作原理是先通过摄像头3确定机器人当前位置,接着固定机构8将机器人固定在输电导线上,抵达作业地点,然后天线7将接收到的操作指令传输给箱体9内部的液压系统,最后液压系统驱动执行机构6完成带电作业。执行机构6是由四部分构成,其中辅助推杆2和夹持推杆5起到固定目标物体的作用,主推杆4的伸缩可以将目标物体从滑台1处脱离,各部件相互配合完成带电作业任务。

当机器人工作时,液压系统中电机转速和液压泵的输出流量的大小共同影响主推杆输出位移的响应速度,从而影响



1.滑台 2.辅助推杆 3.摄像头 4.主推杆;
5.夹持推杆 6.执行机构 7.天线 8.固定机构 9.箱体
图1 带电作业机器人结构布局

目标物体的脱离效果,故主推杆输出位移的控制精度是影响带电作业机器人完成任务质量好坏的关键因素之一。

1.2 带电作业机器人液压系统原理

带电作业机器人液压系统原理如图2所示。该系统主要由变转速电机、定量泵、换向阀、单出杆液压缸、模糊PID控制器、位移传感器LVDT、遥控装置等组成。整体的工作流程:工作人员通过遥控装置将机器人所期望的位移数据发出,控制器接收到遥控装置的电信号指令后生成驱动电机的转速控制信号,进而控制液压系统中的定量泵输出相应的液压油流量,推动活塞杆移动。另外,活塞杆上装有位移传感器,它将活塞杆运动的位移数据反馈给模糊PID控制器,模糊PID控制器再将位移传感器反馈的位移数据与遥控装置期望的位移作比较,根据误差大小来实时的调整电机转速,改变定量泵的输出流量,从而校正活塞杆的输出位移,形成带电作业机器人液压系统的闭环控制。

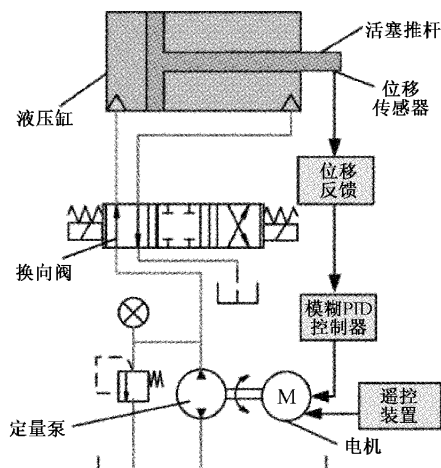


图2 液压系统原理图

1.3 液压系统的数学模型

为了建立带电作业机器人液压系统的数学模型,需要对电机、定量泵、液压缸各部分元件分别进行建模。其中,电机转速主要跟输入电压有关,可以看作是简单的比例环节^[16],即:

$$G(s) = \frac{N_p(s)}{U(s)} = K_u \quad (1)$$

式中: $N_p(s)$ 为电机的转速, $U(s)$ 为电机的输入电压; K_u 为电机的速度增益。

定量泵通过电机的转速改变流量, 排量维持不变。因此, 泵的输出流量可以表示为:

$$Q_p(s) = D_p n_p(s) \quad (2)$$

式中: $Q_p(s)$ 为泵的流量; D_p 为泵的排量, 单位为 m^3/r ; $n_p(s)$ 为泵的转速。

液压缸流量连续性方程:

$$Q_p(s) = A_p s Y(s) + C_p P_L(s) + \frac{V_1}{\beta_e} s P_L(s) \quad (3)$$

式中: A_p 为活塞的有效面积; $Y(s)$ 为活塞杆运动的位移; C_p 为液压缸的泄露系数; V_1 为进油腔的平均体积; β_e 为油液的体积弹性模数。

活塞杆的力平衡方程:

$$A_p P_L(s) = m s^2 Y(s) + B_p s Y(s) + K Y(s) + F_L(s) \quad (4)$$

式中: m 为活塞及负载的质量, 单位为 kg ; B_p 为粘性阻尼系数; K 为负载弹簧刚度; $F_L(s)$ 为外负载力。

根据式(1)~(4), 在输入电压和外负载力的作用下, 活塞推杆的输出位移为:

$$Y(s) = \frac{A_p D_p K_u U(s) - (C_p + \frac{V_1}{\beta_e} s) F_L(s)}{\frac{V_1 m}{b_e} s^3 + (m C_p + \frac{V_1 B_p}{b_e}) s^2 + (B_p C_p + A_p^2 + \frac{V_1 K}{b_e}) s + K C_p} \quad (5)$$

不考虑粘性阻尼和负载的弹性, 使 $B_p = 0$ 和 $K = 0$, 将表达式进一步化简为:

$$Y(s) = \frac{\frac{D_p K_u}{A_p} U(s) - \frac{C_p}{A_p} (1 + \frac{V_1}{C_p \beta_e} s) F_L(s)}{s (\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2 \frac{\xi_h}{\omega_h} s + 1)} \quad (6)$$

式中: 液压的固有频率和阻尼比为:

$$\omega_h = \sqrt{\frac{\beta_e A_p^2}{V_1 m}}$$

$$\xi_h = \frac{C_p}{A_1} \sqrt{\frac{\beta_e m}{V_1}}$$

位移传感器的传递函数为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{Y(s)} = K_c \quad (7)$$

式中: K_c 为传感器的位移增益; $U(s)$ 为电机的输入电压; $Y(s)$ 为活塞杆运动的位移。

在不考虑 F_L 力的作用下, 则系统的开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K \omega_h^2}{s (s^2 + 2 \xi_h \omega_h s + \omega_h^2)} \quad (8)$$

式中: $K = \frac{D_p K_u}{A_p}$, D_p 为泵的排量, 单位为 m^3/r ; K_u 为电机的速度增益; A_p 为活塞的有效面积。

则系统的闭环传递函数为:

$$\varphi(s) = \frac{G(s)}{1 + K_c G(s)} = \frac{K \omega_h^2}{s (s^2 + 2 \xi_h \omega_h s + \omega_h^2) + K_c K \omega_h^2} \quad (9)$$

2 模糊 PID 的控制设计

为了实现带电作业机器人位移的精确控制, 提高系统的控制精度, 在 PID 控制器上加入模糊控制理论, 实时在线校正控制参数, 进一步优化了带电作业机器人控制系统。基于模糊 PID 的控制系统设计如图 3 所示。

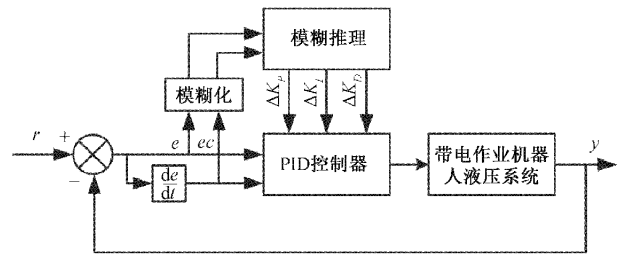


图 3 模糊 PID 控制系统

将机器人推杆的位移期望值 r 与输出值 y 进行实时比较, 确定误差 e 与误差变化 ec , 然后将两者模糊化, 再通过模糊推理运算, 最后将得出校正后的控制参数来控制本系统, 实现控制系统的自适应控制, 提高控制精度。

2.1 模糊变量及隶属度函数

考虑实际带电作业任务情况, 机器人的活塞推杆工作范围为 $0.15 \sim 0.35 \text{ m}$, 本文将期望位移值设定为 0.2 m 。根据前面建立的带电作业机器人液压系统, 从而确定误差 e 、误差变化 ec 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 5 个变量的取值, 具体参数如表 1 所示。

表 1 输入与输出变量取值

输入输出变量	基本论域	模糊论域	量化因子
e	$[-0.3 \ 0.3]$	$[-6 \ 6]$	0.05
ec	$[-0.6 \ 0.6]$	$[-6 \ 6]$	0.1
ΔK_p	$[-6 \ 6]$	$[-3 \ 3]$	2
ΔK_i	$[-9 \ 9]$	$[-3 \ 3]$	3
ΔK_d	$[-0.3 \ 0.3]$	$[-3 \ 3]$	0.1

每个区域子集的隶属度函数均采用三角型函数, e 、 ec 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的隶属度函数分别如图 4 所示。

2.2 模糊控制规则

为了使模糊控制器能有效调节带电作业机器人系统的位移输出, 需要制定合理的模糊规则表。当带电作业机器人位移误差较大时, 应选择较大的 ΔK_p , 较小的 ΔK_i 与 ΔK_d , 这样能提高系统的响应速度; 当带电作业机器人误差较小时, 应选择较小的 ΔK_p , 较大的 ΔK_i 与 ΔK_d , 这样能防止系统发生超调; 当带电作业机器人误差出现超调时, 应适当减小 ΔK_p , 增大 ΔK_i 与 ΔK_d 。本文的模糊 PID 控

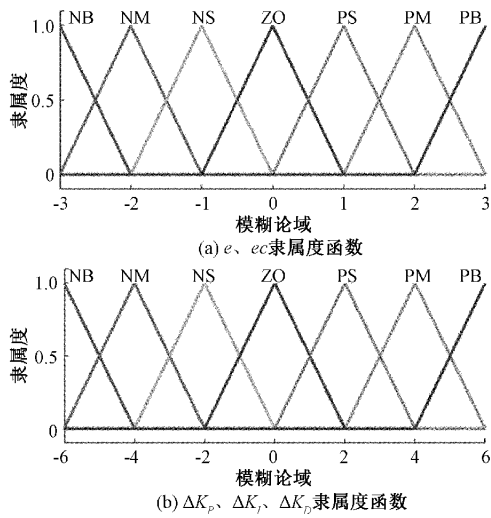


图4 输入、输出隶属度函数

制规则如表2所示。

表2 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d的模糊规则

变量	ec	e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ΔK _p	NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
	NS	NM	NM	NM	NS	ZO	ZO	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
	PM	NS	ZO	PS	PM	NM	PM	PB
	PB	ZO	PS	PM	PM	PM	PM	PB
ΔK _i	NB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	NM	NM	NM	NS	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PS	PM	PM
	PB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
ΔK _d	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

2.3 校正参数的确定

模糊PID控制器的校正参数是模糊推理得到的调整参数和PID控制器设定的初始参数两部分叠加而来,如式(10)所示。

$$\begin{cases} K_{p\text{校}} = K_p + \Delta K_p \\ K_{i\text{校}} = K_i + \Delta K_i \\ K_{d\text{校}} = K_d + \Delta K_d \end{cases} \quad (10)$$

式中: $K_{p\text{校}}$ 、 $K_{i\text{校}}$ 、 $K_{d\text{校}}$ 为校正后的控制参数, K_p 、 K_i 、 K_d 为PID控制器的初始值, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为推理运算后的调整值。

3 仿真与分析

根据带电作业机器人系统各部件的实际情况,考虑到各种参数对系统的影响,系统所需主要参数如表3所示。

表3 液压系统主要参数

序号	参数	数值
1	液压泵的排量 $D_p / (\text{m}^3/\text{r})$	1.75×10^{-5}
2	电机的速度增益 $K_u / (\text{r/s/V})$	2
3	活塞的有效面积 A_p / m^2	3.6×10^{-5}
4	液压缸的泄露系数 $C_p / (\text{m}^3/\text{s/Pa})$	7×10^{-12}
5	进油腔的平均体积 V_1 / m^3	7.2×10^{-5}
6	液压油的体积弹性模数 $\beta_e / (\text{N/m}^2)$	2.5×10^8
7	活塞及负载的质量 m / kg	8.7
8	传感器的位移增益 $K_c / (\text{V/N})$	1

由表3的参数值可计算出机器人液压系统的闭环传递函数。

$$G(s) = \frac{502.87}{s^3 + 48.6s^2 + 517.24s + 502.87}$$

为了验证模糊PID在带电作业机器人系统的控制效果,利用MATLAB中Simulink搭建模糊PID控制算法的带电作业机器人系统,将STEP模块设定为0.2作为系统的期望值输入,分别采用原系统无控制、PID控制、模糊PID控制3种方式进行对比试验,其中PID的初始参数通过试凑法确定, $K_p = 14$, $K_i = 11$, $K_d = 0.1$,如图5所示。

系统仿真时间设定为6s,仿真结果如图6所示。由图6可知,原系统的响应时间为4.8s,响应时间过长,对于惯性、时变的带电作业机器人液压系统,必须设计控制器来改善系统的控制性能。传统的PID控制,系统的响应时间缩减到1.3s,但系统超调量也达32%,导致振动明显,控制效果不理想。模糊PID控制器,进一步缩短响应时间,稳定时间只有0.9s,并且使系统无超调、无振动。

为了进一步验证本文控制器的控制精度与稳态精度,取 $y = 0.2 \sin t$ 作为输入信号,幅值为0.2m进行跟踪试验,仿真时间为13s,系统仿真跟踪曲线如图7所示。在PID控制下,输出幅值误差为5.5mm和相位的误差为 9.10° ,都相对较高;而采用模糊PID控制器,输出幅值和相位的误差都有明显的改善,幅值误差仅为3.4mm和相位误差为 6.32° ,能够更好地反映目标信号曲线。

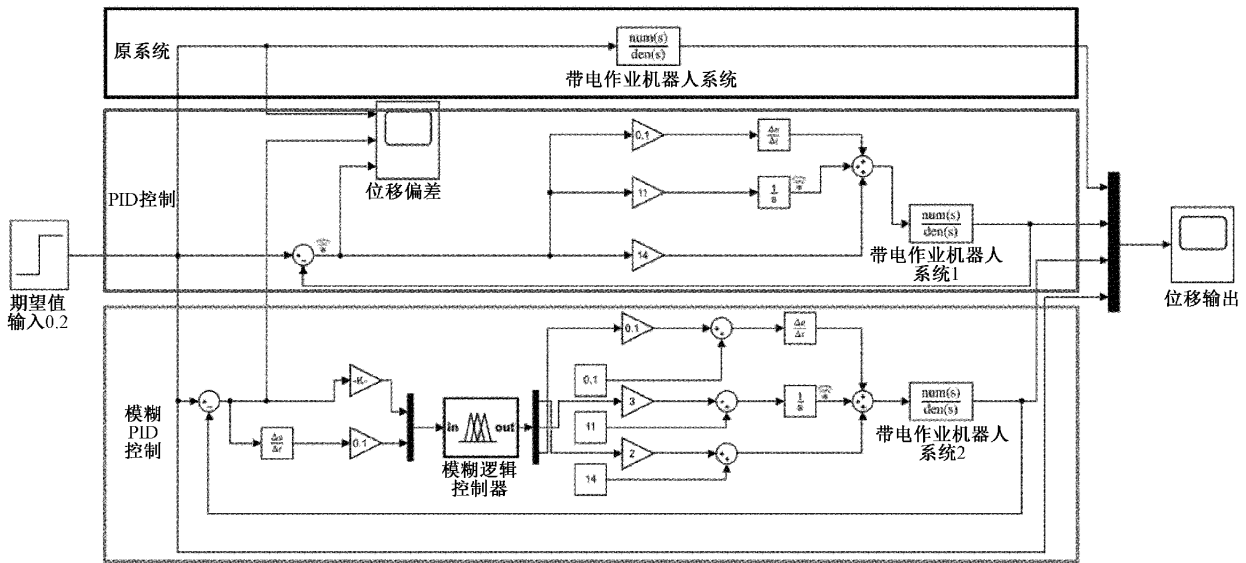


图 5 3 种控制方法的仿真模型

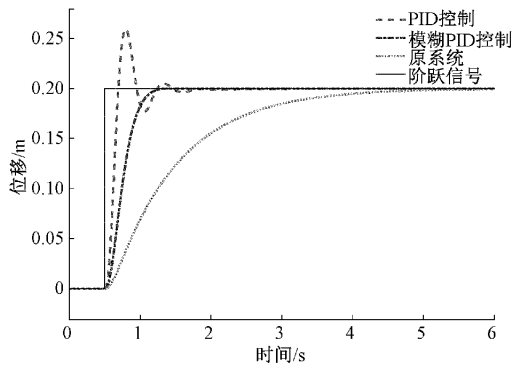


图 6 阶跃信号的仿真曲线

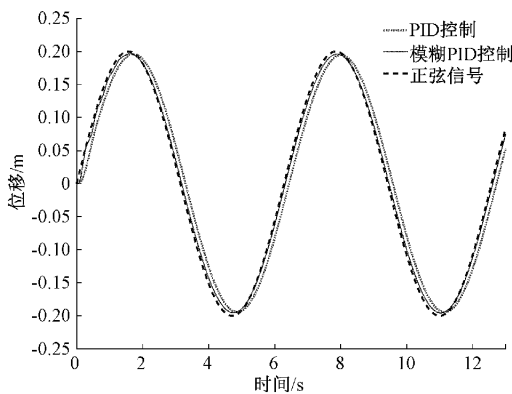


图 7 正弦信号的跟踪效果曲线

从仿真效果和性能参数来看,当阶跃信号作为输入时,机器人在模糊 PID 控制下输出位移的响应速度最快、超调量最小和稳定时间最短,系统的控制精度和稳定性更高;当正弦信号作为输入时,机器人在模糊 PID 控制器下各类跟踪误差均最小,系统的稳态精度更高。

4 样机实验验证

为了验证原系统、传统 PID 和模糊 PID 控制器的实际应用控制性能,对带电作业机器人控制系统进行测试,如图 8 所示。将制定的模糊推理规则以二进制代码的形式烧录到样机的主控制器程序中,实现模糊 PID 控制,样机的主控制器采用的 STM32F103C8T6 单片机。样机的推杆处装有位移传感器,可实时将推杆的位移数据传输给上位机,上位机起到监控样机运动状态和接收推杆的输出位移数据的作用。

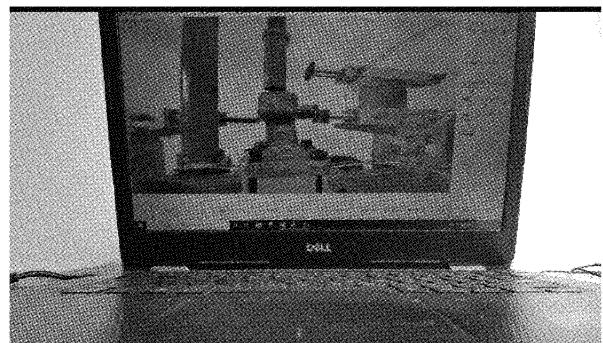


图 8 上位机测试环境

实验设定了 3 组位移阶跃信号,测试机器人推杆的输出位移效果,通过位移传感器将推杆的实时位移数据传输到上位机,观察上位机的位移数据变化,等到数据稳定时,记录此时的稳定时间,得到的具体数据如表 4 所示。

从表 4 中结果可知,相对于 PID 控制和原系统,模糊 PID 控制器在输出位移误差和稳定时间都有一定的改善,并且实验结果与仿真结果大致相同。

表4 正弦信号跟踪误差

阶跃信号 幅值/m	控制方式	输出位移 误差/cm	稳定 时间/s
0.15	原系统	1.4	2.7
	PID控制	0.3	0.9
	模糊PID控制	0.2	0.55
0.20	原系统	1.7	3.5
	PID控制	0.4	1.1
	模糊PID控制	0.2	0.7
0.25	原系统	2.3	4.3
	PID控制	0.5	1.35
	模糊PID控制	0.4	0.9

5 结 论

针对带电作业机器人输出位移控制精度低的问题,本文设计了模糊PID控制器。以液压缸活塞推杆输出位移的误差和误差变化率作为输入变量,通过变量模糊化、模糊推理运算和去模糊化的方法实时调整活塞杆的输出位移,使系统能够实时地跟踪位移指令信号。通过仿真验证,其结论如下:

仿真实验结果表明,模糊PID控制系统相较于原系统稳定时间从4.8 s缩减到0.9 s,缩减了81.3%;相较于传统PID控制系统,稳定时间缩短了0.4 s,缩减了30.8%,并且超调量降低0.064 m,达到了无超调。

样机实验表明,相比传统PID控制器,模糊PID控制器在效果上有一定的提升,能够进一步的缩短稳定时间、减少输出误差,提高带电作业机器人液压系统的控制精度和稳定性。

参考文献

- [1] 刘一涵,纪坤华,傅晓飞,等.配网带电作业机器人技术发展现状述评[J].电力与能源,2019,40(4):446-451,470.
- [2] 孙智滨,常俊,闫坤,等.配电线路不停电作业机器人研究[J].电工技术,2021(24):72-75,79.
- [3] WRAT G, BHOLA M, RANJAN P, et al. Energy saving and fuzzy-PID position control of electro-hydraulic system by leakage compensation through proportional flow control valve[J]. ISA Transactions, 2020, 101: 269-280.
- [4] 李琦,程向丽,张猛,等.电动舵机专家PID控制系统

设计[J].电子测量技术,2020,43(14):165-170.

- [5] 秦琪品,葛文庆,鲁应涛,等.泵控伺服系统关键技术研究综述[J].机床与液压,2022,50(1):170-181.
- [6] 贾林,王耀南,何静,等.自由曲面打磨机器人非奇异终端滑模阻抗控制[J].电子测量与仪器学报,2020,34(5):89-96.
- [7] 南玉庆.直驱泵控电液伺服粉末压机控制算法研究[D].秦皇岛:燕山大学,2018.
- [8] 张亮,李芝炳,李超.一种电液伺服系统位置控制的模糊迭代控制策略[J].机床与液压,2021,49(10):156-159.
- [9] 陈志高,胡仕成,黎新齐.基于模糊PID的变幅液压控制系统[J].液压与气动,2021,45(6):156-162.
- [10] 戴明川,徐天宇,张俊佳,等.基于连续滑模控制的电液伺服系统轨迹跟踪控制[J].机床与液压,2021,49(4):54-58.
- [11] 刘志刚,孙春亚.电液伺服PID位置控制系统的仿真研究[J].中国农机化学报,2016,37(10):171-175.
- [12] 赵岩,周秦源,邵念锋,等.基于RBF神经网络模糊PID控制的电液伺服系统[J].机电工程,2022,39(2):244-249.
- [13] 董蒙,栾希亭,吴宝元,等.基于自适应遗传算法的电液伺服系统控制[J].机床与液压,2019,47(14):78-83.
- [14] 闵磊,张洪信,赵清海,等.电液位置伺服系统的反馈线性化滑模控制研究[J].青岛大学学报(工程技术版),2021,36(2):9-14.
- [15] JIN X, CHEN K, ZHAO Y, et al. Simulation of hydraulic transplanting robot control system based on fuzzy PID controller [J]. Measurement, 2020, DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108023.
- [16] 方一鸣,李官胤,李建雄,等.伺服电机驱动连铸结晶器振动系统建模与分析[J].仪器仪表学报,2014,35(11):2615-2623.

作者简介

王华建,硕士研究生,主要研究方向为带电作业机器人的智能控制技术与研制。

E-mail:1607905721@qq.com

李鹏,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为工业机器人、北斗定位、图像处理。

花国祥(通信作者),硕士,副教授,主要研究方向为新型电力系统、机电自动化。

E-mail:20201249043@nuist.edu.cn