

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.024

液压四足机器人的自适应模糊 PID 控制

陈 斌,裴忠才,唐志勇

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院,北京 100191)

摘 要:为提高液压四足机器人的控制性能和足端轨迹跟踪效果,将自适应模糊 PID 算法用于机器人腿关节控制,并对 PID 参数进行实时增量调节.建立阀控非对称缸系统的数学模型,分析其伸出和缩回运动时由非线性、参数时变等因素导致的控制问题,利用 AMESim-Simulink 联合仿真模型对算法的控制效果进行了仿真,并在单腿试验平台上进行了实物样机测试.结果表明:自适应模糊 PID 算法的控制效果在减小调节时间、抑制干扰等方面相比常规 PID 有较大改善.该控制算法提高了机器人的动态跟踪性能,易于工程应用,有利于机器人的运动控制.

关键词:液压机器人;非对称液压缸;自适应模糊 PID;AMESim

中图分类号: TH133; TP183 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)09-0140-05

Self-tuning fuzzy-PID control for hydraulic quadruped robot

CHEN Bin, PEI Zhongcai, TANG Zhiyong

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to improve the control performance and trajectory tracking effect of hydraulic quadruped robot, the self-tuning fuzzy-PID control algorithm was applied to drive the hydraulic cylinders of leg joints, and the increment values of PID parameters were adjusted in real time. The mathematical model of valve-controlled asymmetrical hydraulic cylinder system was established, and the control problem caused by the nonlinear phenomenon and time-variance of plant parameters when the hydraulic cylinder was moving forward and reverse were analyzed. The control simulation was performed based on the co-simulation environment of AMESim and Simulink, and a physical prototype testing was done on the single leg experiment platform. Simulations and test results indicate that the self-tuning fuzzy-PID control algorithm shows the better control effects than conventional PID control in many respects, such as shortening the adjusting time, and restraining the impulse interference. This control algorithm can improve the dynamic tracking performance of robot legs, is easily applied in the projects and is helpful for hydraulic robot's control.

Keywords: hydraulic robot; asymmetrical hydraulic cylinder; self-tuning fuzzy-PID; AMESim

由于液压驱动系统在输出力矩、功率密度、控制精度等方面的优势,近年来液压足式机器人成为了研究热点.2005 年,美国波士顿动力公司研制成功的“BigDog”系列机器人^[1]展示出了极强的运动和负载能力,因此成为各国学者争相研究和效仿的目标^[2].因具备结构简单、工作空间小等优点,上述液压机器人均选择非对称液压缸作为关节运动驱动器.但非对称缸的两腔活塞面积不同,在作伸出和缩回运动时相关参数会发生变化,使动态性能出现较大差异,加大了液压驱动系统的非线性度.这种不良现象还会伴随

机器人运动状态和自身负重等因素的改变而加剧,严重影响机器人的运动灵活性和稳定性.很多学者对非对称缸系统进行过线性或非线性建模研究,并试图在此基础上寻找能解决上述问题的控制算法.其中,模糊控制以更接近人类思维的处理方式,引起了广泛的关注.文献[3]使用模糊控制器实现了对数字泵控液压缸的位置控制,达到了节能降耗的目的.文献[4]利用模糊控制对比例阀的死区进行补偿,消除了液压缸运动的不对称现象.文献[5]基于模糊理论提出了模型参考变增益自适应控制算法,实现了非对称液压缸的对称性控制.以上基于模糊算法的研究为改善非对称缸的控制提供了有益的尝试.

自适应模糊 PID 是一种基于模糊理论的控制算法,它将模糊推理系统与常规 PID 控制相结合,

收稿日期: 2015-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(50975010)

作者简介: 陈 斌(1984—),男,博士研究生;

裴忠才(1968—),男,教授,博士生导师

通信作者: 唐志勇, tzybuaa@aliyun.com

发挥两者的优势.该算法可根据实际工况对 PID 参数不断进行模糊化增量调节,使控制器具备处理非线性和参数时变系统的能力,在不需要精确数学模型的前提下,使被控对象具有更好的静、动态性能^[6].本文结合研制的“Hound”液压四足机器人,设计了适用于非对称液压缸动态控制的自适应模糊 PID 算法控制器,用于驱动机器人腿关节运动以实现良好的足端轨迹跟踪.

1 液压驱动系统分析

Hound 四足机器人的运动学结构(见图 1)源于猎犬的骨骼系统,其腿部结构由大腿、小腿和足等部分组成,包括 3 个主动关节—侧摆关节、髋关节和膝关节.

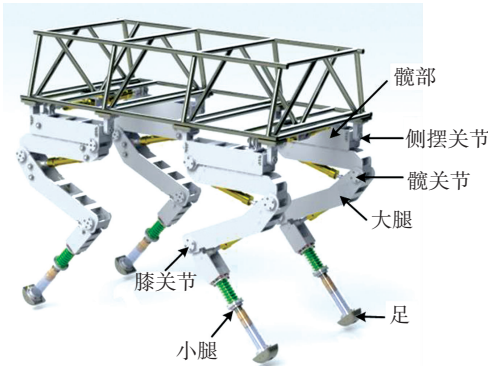


图 1 Hound 机器人机体结构

Fig.1 The body structure of Hound robot

腿部主动关节均由对称阀控非对称液压缸系统(以下简称为“阀控缸系统”)驱动,其结构原理如图 2 所示^[7-8].

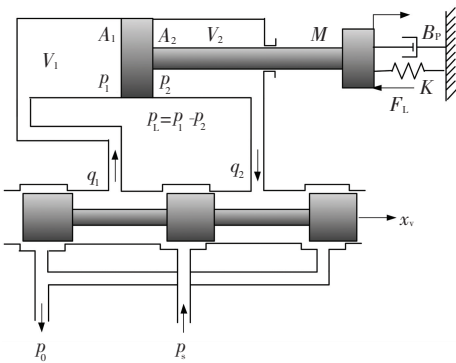


图 2 阀控缸系统原理

Fig.2 The schematic diagram of valve-controlled cylinder system

图中, M 为负载质量, x_v 为阀芯位移, y 为活塞杆位移, B_p 为负载粘性阻力系数, K 为弹性系数, F_L 为外部负载(干扰)力, p_s 为供油压力, p_0 为回油压力, p_1 为无杆腔压力, p_2 为有杆腔压力, q_1 为无杆腔流量, q_2 为有杆腔流量, A_1 、 A_2 分别为无杆腔、有杆腔活塞作用面积.

根据图 2 可以得到描述阀控缸系统动态性能的 3 个基本方程,进行拉普拉斯变换,阀的流量方程、液压缸的流量连续方程以及力平衡方程分别为

$$q_L = K_q x_v - K_c p_L, \tag{1}$$

$$q_L = q_1 = C_{ie} p_L + C_{if} p_s + \frac{V_t}{4\beta_e} s p_L + A_1 s y, \tag{2}$$

$$F = p_L A_1 = M_1 s^2 y + B_p s y + K y + F_L. \tag{3}$$

式中: q_L 为负载流量, p_L 为负载流量, V_t 为液压缸容积, β_e 为液压油弹性模量, K_q 为阀口流量增益, K_c 为流量-压力系数, C_{ie} 为等效泄漏系数, C_{if} 为额外流量系数.

将式(1)~(3)叠加在一起并忽略某些数值较小的项,可得到当伺服阀阀芯右移($x_v > 0$)时(此时液压缸活塞杆伸出),液压阀驱动电路的输入电压 U 和系统外负载力 F_L 同时作用时的非对称阀控缸系统数学模型为

$$Y(s) = \frac{\frac{K_a K_v}{A_1} U(s) - \frac{K_{ce}}{A_1^2} \left(\frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s + 1 \right) F_L(s)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi_n}{\omega_n} s + 1 \right)}. \tag{4}$$

式中: K_{ce} 为阀总流量-压力系数($K_c + C_{if}$); K_v 为阀流量增益($K_v = K_q K_{sv}$); K_{sv} 为阀芯位移增益; K_a 为驱动电路增益; ω_n 为系统固有频率, $\omega_n = \sqrt{\frac{4\beta_e A_1^2}{M V_t}}$; ξ_n

为系统阻尼比, $\xi_n = K_{ce} \sqrt{\frac{\beta_e M}{V_t}} / A_1$.

当伺服阀阀芯左移($x_v < 0$)时(此时液压缸活塞杆缩回),此时阀控缸系统的数学模型的形式与式(4)相同,但式中的各项增益系数会因活塞作用面积不同而有所变化, ω_n 、 ξ_n 等项数值也会随之变化(具体变化见文献[9-10]),同时还会导致两腔压力 p_1 、 p_2 在换向时发生突跳.另外,在机器人运行时不同的负载重量、动作幅度、关节角位移以及不可预测的外来干扰,会实时改变驱动液压缸受力的大小和方向.以上因素均会导致阀控缸系统在不同方向的动作时产生非线性现象和参数变化,影响驱动关节的运动平稳度,加大控制难度,因此常规的 PID 控制(固定参数)已经无法应对.为了提高系统的控制性能,满足机器人平稳运行的要求,设计了自适应模糊 PID 算法.

2 自适应模糊 PID 控制算法

自适应模糊 PID 通过建立误差 e 、误差变化率 e_c 同 PID 增量参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 相对应的模糊规则来实现调节作用.该算法最大的优势是不破坏原有常规 PID 的控制效果,仅依据系统的跟踪误差对 PID 参数

进行增量调节(增量可正可负)^[11-12],使 PID 参数实时改变以应对系统的变化,因此有别于常规 PID 一成不变的控制参数模式,可以实现对参数时变或非线性系统的良好控制,其算法原理如图 3 所示。

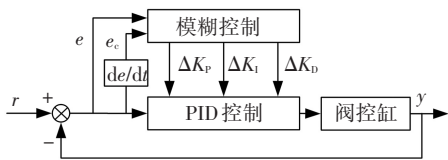


图 3 自适应模糊 PID 算法原理

Fig.3 The schematic diagram of self-tuning fuzzy-PID control algorithm

将 e 、 e_c 的论域均设为 $\{6, 5, 4, 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, -4, -5, -6\}$, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的论域均设为 $\{3, 2, 1, 0, -1, -2, -3\}$, 并分别被模糊化为 7 个级别, 即 $\{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$. 以对 ΔK_p 的模糊调节为例, 按照表 1 在 MATLAB 的模糊工具箱里建立模糊规则表, 即可得到针对 ΔK_p 的模糊系统输入/输出特性曲面^[13], 如图 4 所示。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则表

Tab.1 The fuzzy control rule table of ΔK_p

e	e_c						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NM	NM	NM	ZO	ZO
PM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
PS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
NS	NS	NS	ZO	PS	PM	PM	PM
NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
NB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

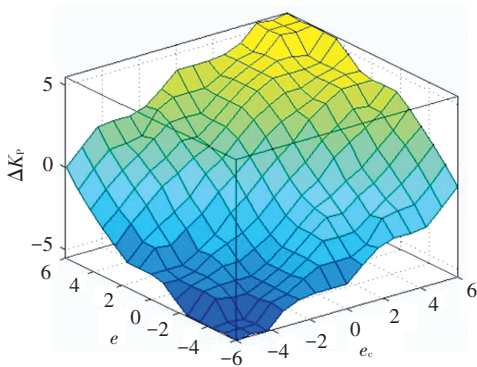


图 4 ΔK_p 的模糊推理特性曲面

Fig.4 The output surface of fuzzy inference system (FIS) of ΔK_p

以模糊规则表为依据进行相应的模糊运算,将结果去模糊化后代入式(5),计算出调节后的 PID 控制器参数值为

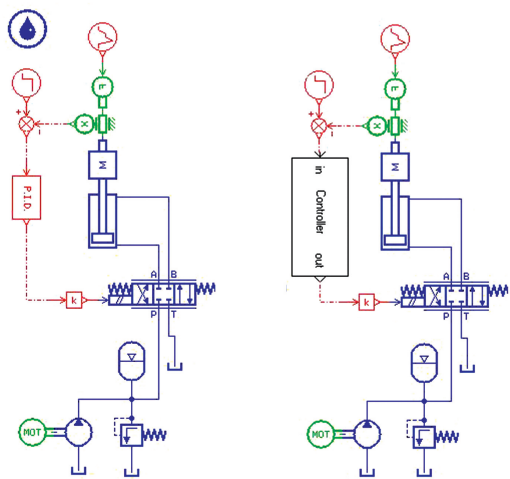
$$\begin{cases} K_p = K'_p + \{e_i, e_{ci}\}_P = K'_p + \Delta K_p \\ K_i = K'_i + \{e_i, e_{ci}\}_I = K'_i + \Delta K_i \\ K_d = K'_d + \{e_i, e_{ci}\}_D = K'_d + \Delta K_d \end{cases}, \quad (5)$$

式中 K'_p 、 K'_i 、 K'_d 均为 PID 控制参数的初始值, PID 的参数可以根据系统的变化通过模糊推理进行实时调节,体现出控制算法的自适应性。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

为了评估算法的控制效果,在 AMESim 软件环境下建立了 Hound 机器人阀控缸系统模型,如图 5 所示,模型中用到的主要参数如下:液压缸内径为 25×10^{-3} m,活塞杆直径为 14×10^{-3} m,液压缸行程为 0.1 m,供油压力为 16 MPa,油液密度为 880 kg/m^3 ,弹性模量为 7×10^8 Pa,阀额定流量为 10 L/min,阀额定电流为 20 mA,阀频率为 60 Hz,泵源流量为 15 L/min,蓄能器容积为 1 L,负载重量为 20 kg。



(a) 常规 PID (b) 自适应模糊 PID

图 5 AMESim 阀控缸系统仿真模型

Fig.5 The AMESim simulation model of valve-controlled cylinder system

利用联合仿真实现控制器设计,在 Simulink 中建立自适应模糊 PID 算法控制器,通过 S-Function 模块将控制结果实时送入 AMESim 模型中。

3.2 仿真结果

使用图 5 所示模型,通过试凑法得到一组较为满意的 PID 参数 ($P = 15, I = 0.05, D = 0.03$). 为便于观察自适应模糊 PID 算法的调整能力,比较上述两种控制算法对于不同输入信号的跟踪效果,将式(5)中的 PID 初始值 (K'_p 、 K'_i 、 K'_d) 设定为与常规 PID 相同的参数值。

1) 方波信号跟踪.以机器人运行时液压缸常用行程(0.01~0.08 m)作为测试范围,设定输入信号为频率 1 Hz 的方波信号,并在 1~2 s 和 2~3 s 这两个时间段分别加入 2、4 kN 的外部负载(干扰)力(沿液压缸缩回方向).两种算法下阀控缸系统对方波信号的跟

踪效果如图 6 所示,调节时间的变化见表 2.

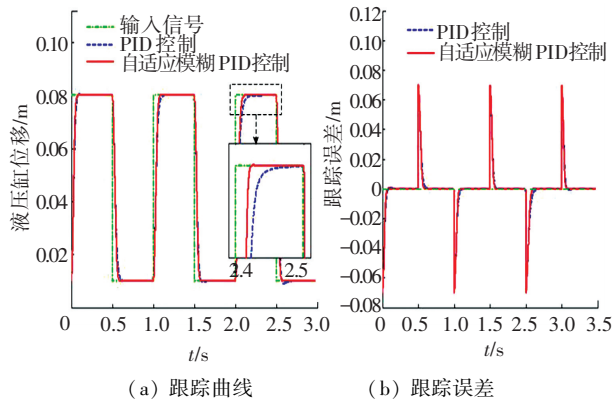


图 6 方波信号跟踪效果

Fig.6 The tracking effect for the square wave signal

表 2 方波信号调节时间

控制算法	调节时间/s					
	0~0.5 s	0.5~1 s	1~1.5 s	1.5~2 s	2~2.5 s	2.5~3 s
PID	0.055	0.070	0.067	0.057	0.091	0.050
自适应模糊 PID	0.047	0.055	0.054	0.049	0.065	0.044

2) 正弦信号跟踪.设定频率为 1 Hz 的正弦波输入信号,跟踪效果和跟踪误差如图 7 所示.

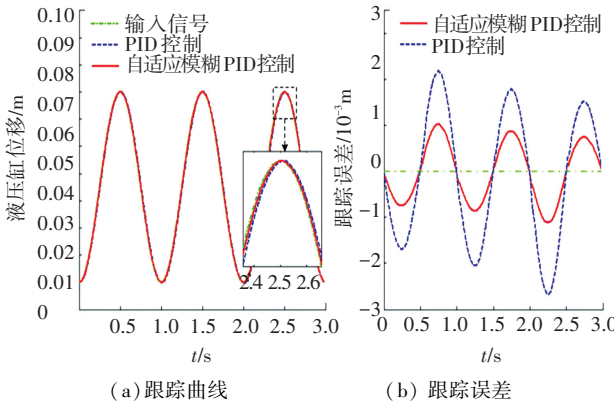


图 7 正弦信号跟踪效果

Fig.7 The tracking effect for the sinusoidal signal

通过图 6、7 和表 2 可以看出,自适应模糊 PID 控制算法相比常规 PID 控制能有效减小系统的调节时间,提高跟踪速度和精度,并削弱外部干扰力对系统的影响,增强抑制干扰的能力,表现出更为优越的控制品质.

4 试 验

自适应模糊 PID 算法在 AMESim 仿真中取得了较好的控制效果,但由于仿真模型与实际系统之间仍有一定的差别,为了验证实际的控制效果,搭建了 Hound 液压机器人的单腿试验平台(见图 8).该平台由机器人腿部结构、试验台架、外置液压油源、控制机柜(含工控机、数据采集板卡)等部分构成,并

采用 LABWindows+RTX 的组合方式作为上位机的实时控制软件,可实现机器人腿部的周期运动和负载能力测试.下面以膝关节为控制对象进行性能测试,油源压力设定为 10 MPa.

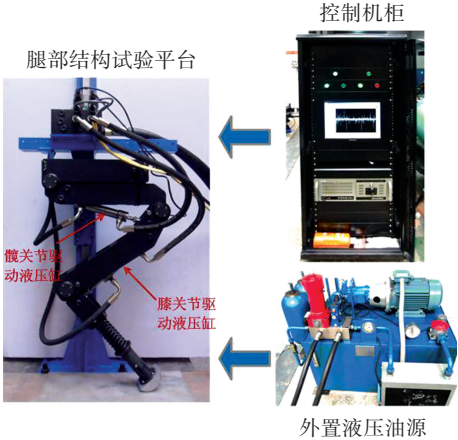


图 8 机器人单腿试验平台

Fig.8 The test platform of robot's single leg

测试时采用与软件仿真时相同频率的输入信号.由于腿部关节的传感器采集的是角度数据,当膝关节的驱动液压缸位移为 0.01~0.08 m 时,对应的关节转动角度为 58°~130°,以此作为测试的输入跟踪信号.为了验证控制效果,仍采用与常规 PID 控制进行对比的方式,测试曲线如图 9、10 所示.

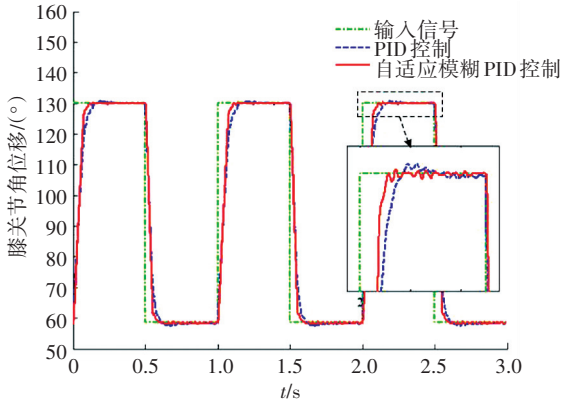


图 9 膝关节对方波信号跟踪效果

Fig.9 The tracking effect of knee joint for the square wave signal

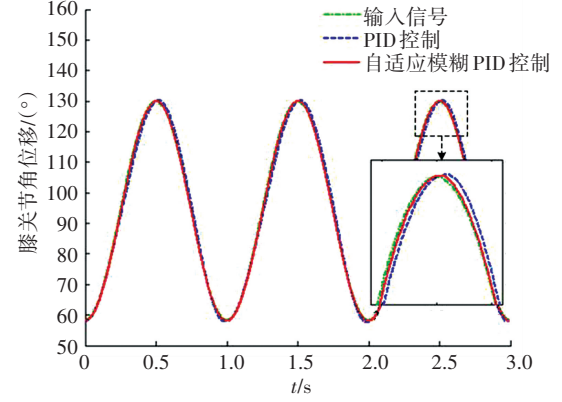


图 10 膝关节对正弦信号跟踪效果

Fig.10 The tracking effect of knee joint for the sinusoidal signal

由于机械配合、运动摩擦、噪声等因素的影响,通过测试曲线可以看出,在单腿试验平台上使用自适应模糊 PID 算法对膝关节进行控制测试时,其对跟踪曲线的改善效果不如软件仿真时那样明显,但也能减少调节时间,减小超调量,其幅值衰减和相位滞后情况相比较于常规 PID 控制有一定的改善,能更好地跟踪设定的期望轨迹,因此该算法适用于四足机器人的关节运动控制。

5 结 论

1) 在分析液压机器人所采用的阀控非对称缸系统原理和控制难点基础上,将自适应模糊 PID 控制算法用于机器人腿部关节的运动控制,并使用 AMESim/Simulink 搭建的联合仿真模型及机器人单腿试验平台进行仿真和实物测试,结果表明自适应模糊 PID 控制提高了液压驱动系统应对非线性和参数时变等不良因素的能力。

2) 自适应模糊 PID 控制相比常规 PID 具有更好的动态响应性能,且易于工程应用,有利于实现机器人的运动控制。

参考文献

- [1] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot[C]// Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control. Seoul: IFAC, 2008: 10822-10825.
- [2] SEMINI C, TSAGARAKIS N G, GUGLIELMINO E, et al. Design of HyQ - a hydraulically and electrically actuated quadruped robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2011, 225(6): 831-849.
- [3] 董建园, 曹旭妍, 魏培, 等. 电液比例位置控制系统的研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(7): 40-47.
DONG Jianyuan, CAO Xuyan, WEI Pei, et al. Research on electro-

- hydraulic proportional position servo system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(7): 40-47.
- [4] 高炳微, 邵俊鹏, 韩桂华. 电液伺服系统位置和力模糊切换控制方法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 99-104.
GAO Bingwei, SHAO Junpeng, HAN Guihua. Fuzzy switching control between position and force for electro-hydraulic servo system[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 99-104.
- [5] 张晓宁, 王岩, 付永领. 非对称液压缸对称性控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(11): 1334-1339.
ZHANG Xiaoning, WANG Yan, FU Yongling. Symmetric control of asymmetric cylinder[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(11): 1334-1339.
- [6] AHN K K, TRUONG D Q. Online tuning fuzzy PID controller using robust extended Kalman filter[J]. Journal of Process Control, 2009, 19(6): 1011-1023.
- [7] 曹正, 赵新泽, 陈永清. 阀控非对称液压缸往返运动动态特性对比分析[J]. 机床与液压, 2008, 36(9): 254-256.
CAO Zheng, ZHAO Xinze, CHEN Yongqing. Comparison of dynamic characteristics of asymmetric cylinder moved back and forth controlled by symmetric valve[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(9): 254-256.
- [8] MANRING N D. Hydraulic control system[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [9] SABAN C, ALI V A. Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system[J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 61(3): 465-476.
- [10] JELALI M, KROLL A. Hydraulic servo-systems: modelling, identification, and control[M]. New Jersey: Springer, 2003.
- [11] JIN Junran, HUANG Hengshuo, SUN Junman, et al. Study on fuzzy self-adaptive PID control system of biomass boiler drum water[J]. Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 2013, 3(1): 93-98.
- [12] ESFANDYARI M, FANAEI M A, ZOHREIE H. Adaptive fuzzy tuning of PID controllers[J]. Neural Computing and Applications, 2013, 23(1): 19-28.
- [13] SIVANANDAM S N, SUMATHI S, DEEPA S N. Introduction to fuzzy logic using Matlab[M]. Berlin: Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

(编辑 魏希柱)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“液压四足机器人的自适应模糊 PID 控制”,是自行设计的液压四足机器人 Hound 的机体结构。Hound 机器人的运动结构以猎犬的骨骼系统为仿生参考对象,其腿部共具有 12 个主动自由度(运动关节)和 4 个被动自由度,以非对称液压缸驱动腿部关节运动,这些特点保证了该型机器人具有良好的机动性、灵活性和负载能力,可以在复杂的地质环境中执行灾难救援、野外运输等任务。采用外置液压泵源、工控机柜、Windows + RTX 实时控制系统、CVI 人机交互软件等搭建机器人单腿结构试验平台,完成腿部结构的步态规划、负重能力等多种运动性能测试,验证了机器人机械结构、液压系统、控制系统、控制算法等方面设计的合理性和有效性。测试中将基于模糊理论的自适应模糊 PID 算法用于机器人腿部关节的运动控制,自适应模糊 PID 控制提高了非对称液压缸应对非线性和参数时变等不良因素的能力,相比常规 PID 控制具有更好的动态响应特性,能够满足高机动性四足机器人的运动控制要求,实现算法理论分析与实际工程应用的有效结合。

(图文提供:陈斌,裴忠才,唐志勇. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院)