

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.05.006

改进模糊 PID 方法及其在电液伺服控制中的应用*

陈 帅¹, 汪成文^{1,2,3*}, 张震阳¹, 吉鑫浩¹, 赵赞魁¹

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

3. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要:采用传统模糊 PID 控制算法的 ΔK_p 规则库对 K_p 参数进行在线修正时,存在精准度不足的问题,对此提出了 ΔK_p 规则库优化后的模糊 PID 算法,并对其控制性能进行了研究。根据 PID 整定的专家经验分析了 ΔK_p 规则库,并明确了其中不合理的规则,对其进行了调整与改进,完成了对 ΔK_p 规则库的优化;基于优化后的 ΔK_p 规则库设计了改进模糊 PID 控制器;最后,借助多领域协同仿真技术,以阀控缸系统为被控对象,对规则改进后的模糊 PID 控制器的性能进行了仿真研究。研究表明:在对 K_p 参数进行在线修正时,相比于传统的 ΔK_p 规则库,新的 ΔK_p 规则库更加灵活与准确,能克服原有 ΔK_p 规则库存在的问题,使改进模糊 PID 控制器的伺服跟踪精度和抗干扰能力都得到显著提升;相比于 PID 和传统模糊 PID,改进模糊 PID 控制器的控制性能可分别提高 18.62% 和 32.61%。

关键词:电液伺服系统;模糊 PID 控制;规则改进;联合仿真;位置控制

中图分类号:TH137.52;TP273

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)05-0559-07

Improved fuzzy PID method and its application in electro-hydraulic servo control

CHEN Shuai¹, WANG Cheng-wen^{1,2,3}, ZHANG Zhen-yang¹, JI Xin-hao¹, ZHAO Zan-kui¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Key Laboratory of New Sensors and Intelligent Control of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. The State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic

Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Aiming at the currently widely used ΔK_p rule library of traditional fuzzy PID control algorithms, there was a problem of insufficient accuracy when the K_p parameters were corrected by the ΔK_p rule library online. A fuzzy PID algorithm after optimization of ΔK_p rule library was proposed and its control performance was studied. According to the expert experience of PID tuning, the ΔK_p rule library was analyzed and the unreasonable rules were identified, then the ΔK_p rule library was adjusted and improved to complete the optimization of the ΔK_p rule library. The fuzzy PID controller was designed based on the optimized ΔK_p rule library. Finally, with the help of multi-domain collaborative simulation technology, the valve-controlled cylinder system was taken as the controlled object to simulate the performance of fuzzy PID control with developed rules. The results indicate that the new ΔK_p rule library is more flexible and accurate in online correction of K_p parameters than the traditional ΔK_p rule library. It overcomes the problem of existing ΔK_p rule library, the servo tracking precision and anti-interference capability of the improved fuzzy PID controller are improved significantly. Comparing with PID and traditional fuzzy PID, the control performance of the improved fuzzy PID controller is respectively improved by 18.62% and 32.61%.

Key words: electro-hydraulic servo system; fuzzy PID control; rule improvement; co-simulation; position control

收稿日期:2020-10-20

基金项目:山西省重点研发计划资助项目(201903D121069);山西省回国留学人员科研教研发资助项目(HGKY2019016);流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金课题资助项目(GZKF-201720)

作者简介:陈帅(1994-),男,山西代县人,硕士研究生,主要从事电液伺服系统控制方面的研究。E-mail:18404912871@163.com

通信联系人:汪成文,男,副教授,硕士生导师。E-mail:cwwang@yeah.net

0 引 言

因具有功重比大,能够以高精度和快速响应来驱动大惯量和重负载的特点,电液伺服系统在各行各业都得到了广泛的应用,尤其是在工业现场和国防武器系统中应用最为普遍,如挖掘机上大臂小臂的驱动系统、涡轮机的变桨系统、舰船火炮的驱动系统等^[1-3]。

学术界和工业界对高性能电液伺服控制技术的需求越来越迫切。然而,在实际工作中,随工况的变化,电液伺服系统的泄漏系数、阻尼、刚度等参数都是时变的,而且系统所受的外界干扰也是不确定的,因此,由一组预先设定好的控制参数值往往不能满足工况需求,并确保系统具有良好的控制效果。对此,研究人员引入了拥有智能化特点的模糊控制与 PID 控制相结合的复合控制算法—模糊 PID 控制算法。模糊 PID 控制算法可解决 PID 控制参数固定不变的问题,又可以使控制算法在系统数学模型未能精准创建的情况下,兼具优异的伺服控制性能和鲁棒性^[4,5]。

国内外部分高校和研究单位对模糊 PID 进行了相关研究与应用:李文静等人^[6]³⁴⁵将模糊 PID 控制器应用于列车制动电液控制系统中,对高频电磁阀的开关动作进行了调控,实现了制动系统压力的比例控制。葛雷等人^[7]¹¹将模糊 PID 控制器运用在工业蝶阀电液伺服控制系统中,验证了模糊 PID 的控制效果明显优于 PID 控制。LIU F C 等人^[8]³⁵⁶利用模糊 PID 控制器对空间操纵器进行了控制,并与 PID 控制进行了对比,发现模糊 PID 的控制性能对机械臂的轨迹控制更为有效。钟定清等人^[9]⁶⁶³在模糊 PID 控制器的基础上引入了支持向量回归预测算法,提出了一种支持向量机模糊 PID 控制策略,实现了交流电力测功机控制系统的“超前”控制。LUO Q Z 等人^[10]³³⁶²提出了一种前馈模糊逻辑 PID 算法,在抗干扰性能和跟踪精度方面都得到了有效的提升。BOUKHALFA G 等人^[11]¹⁸⁸⁷将粒子群优化算法与模糊 PID 算法相结合,利用粒子群算法对模糊 PID 的比例因子进行了优化,并将该控制策略应用于双星感应电机直接扭矩控制中,结果表明该控制策略有效减少了高转矩脉动,以及缩短了上升时间。其中,文献[9-11]所提的与其他先进算法结合的复合模糊 PID 控制策略,虽然在一定程度上进一步提高了系统的性能,但其算法结构复杂、计算成本大。此外,文献[6-8]以及文献[12-17]均是对传统模糊 PID 控制算法的研究与应用。

对上述文献中模糊 PID 控制算法的模糊规则库进行分析,可以得出其对 PID 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 进行在

线调整的修正机制是 PID 整定的专家经验^[18,19]。

目前,大多数关于模糊 PID 的研究都是基于传统的模糊规则库开展的,传统模糊规则库存在的问题是:传统模糊 PID 控制算法依据 ΔK_p 规则库对 PID 的 K_p 参数进行在线修正时, ΔK_p 规则库中的部分规则与 PID 整定的专家经验存在矛盾,致使对 K_p 参数进行在线修正时精度不足。例如,当误差 $|e|$ 较大时,为使系统能尽快达到稳态,且能以较高的精度跟踪指令信号,依据 PID 整定经验,无论误差的变化趋势如何,此时的 K_p 值应取大值,但传统模糊 PID 的 ΔK_p 规则库中的部分规则反而会使 K_p 值减小。如当 E 、 EC 均为正大 PB 时,此时依据 PID 整定经验, K_p 值应取大值,然而,传统模糊 PID 规则库中 ΔK_p 对应的是负大 NB,反而使 K_p 值变小,产生矛盾。

针对上述问题,笔者提出一种改进模糊 PID 算法。

1 控制对象系统描述

笔者以典型的电液位置伺服阀控缸系统为控制对象,其结构如图 1 所示。

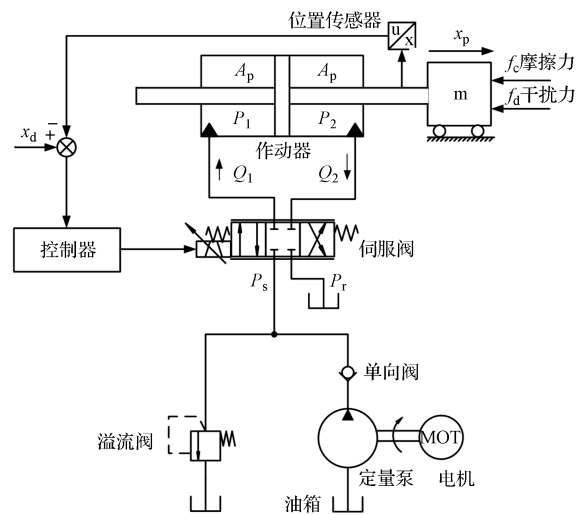


图 1 电液位置伺服阀控缸系统示意图

x_d —给定信号; x_p —作动器活塞杆的位移,控制器做差值控制调节伺服阀的开口大小,实现位置闭环控制

2 模糊 PID 控制器设计

2.1 模糊 PID 控制器结构

模糊 PID 控制器采用双输入三输出的形式,以液压缸活塞杆输出位移的误差 $e(t)$ 和误差变化率 $ec(t)$ 为输入,输出为 PID 3 个参数的增量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。

PID 控制参数在线修正公式如下:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + K_{\Delta p} \cdot \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + K_{\Delta i} \cdot \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + K_{\Delta d} \cdot \Delta K_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} —PID 控制器的初值; K_e, K_{ec} —量化因子; $K_{\Delta p}, K_{\Delta i}, K_{\Delta d}$ —比例因子。

模糊 PID 控制器结构如图 2 所示。

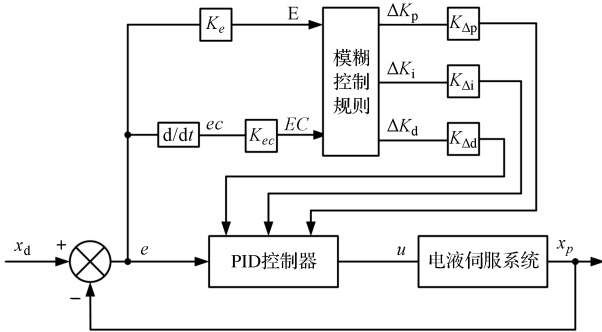


图 2 模糊 PID 控制器结构示意图

2.2 规则改进模糊 PID (FPID) 控制策略

隶属函数的选取直接影响着系统的控制性能。一般在误差比较大的场合,选取分辨率低的隶属函数 smf 或 zmf,在误差接近于 0 的情况下,笔者选取分辨率高的隶属函数 trimf,故选取传统模糊 PID 算法和规则改进模糊 PID 算法的输入/输出变量中 7 个语言变量:NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)所对应的隶属函数均分别为 zmf、trimf、trimf、trimf、trimf、trimf、smf,其分布如图 3 所示。

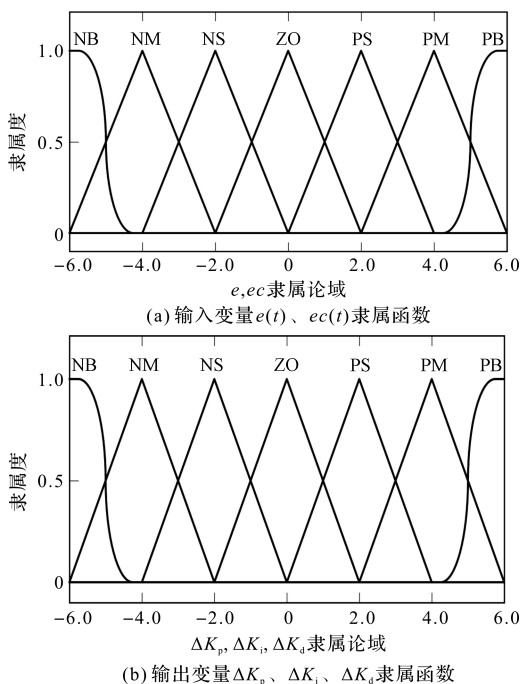


图 3 输入/输出变量隶属函数分布图

根据 PID 整定的专家经验,并参考论文对传统模糊 PID 控制器中模糊控制规则库的编制规律,针对传统模糊 PID 中模糊规则库存在的问题,笔者对传统模糊 PID 的 ΔK_p 规则库进行分析,明确哪些规则与 PID 整定的经验不符,对其进行修正与改进,并通过仿真实验做进一步的调整,即可形成新的 ΔK_p 规则库。

传统的模糊 PID 的规则库如表 1 所示。

表 1 传统的 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 模糊规则库

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	ZO/ZO
	/PS	/NS	/NB	/NB	/NB	/NM	/PS
NM	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PS/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/ZO
	/PS	/NS	/NB	/NM	/NM	/NS	/ZO
NS	PM/NB	PM/NM	PM/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NS/PS
	/ZO	/NS	/NM	/NM	/NS	/NS	/ZO
ZO	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NM/PM	NM/PM
	/ZO	/NS	/NS	/NS	/NS	/NS	/ZO
PS	PS/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NS/PS	NM/PM	NM/PB
	/ZO	/ZO	/ZO	/ZO	/ZO	/ZO	/ZO
PM	PS/ZO	ZO/ZO	NS/PS	NM/PS	NM/PM	NM/PB	NB/PB
	/PB	/PS	/PS	/PS	/PS	/PS	/PB
PB	ZO/ZO	ZO/ZO	NM/PS	NM/PM	NM/PM	NB/PB	NB/PB
	/PB	/PM	/PM	/PM	/PS	/PS	/PB

注:表中 2~8 列中的 3 个值分别为 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$

新的规则改进后的模糊 PID 的模糊规则库如表 2 所示。

表 2 规则改进后的 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 模糊规则库

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB	PB/NB	PB/NM	PM/NM	PB/NS	PB/ZO	PB/ZO
	/PS	/NS	/NB	/NB	/NB	/NM	/PS
NM	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PM/NS	PM/NS	PM/ZO	PS/ZO
	/PS	/NS	/NB	/NM	/NM	/NS	/ZO
NS	PM/NB	PM/NM	PM/NS	PS/NS	PS/ZO	PS/PS	PS/PS
	/ZO	/NS	/NM	/NM	/NS	/NS	/ZO
ZO	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	PS/PS	PM/PM	PM/PM
	/ZO	/NS	/NS	/NS	/NS	/NS	/ZO
PS	PS/NM	PS/NS	ZO/ZO	PS/PS	PS/PS	PM/PM	PM/PB
	/ZO	/ZO	/ZO	/ZO	/ZO	/ZO	/ZO
PM	PM/ZO	PM/ZO	PS/PS	PS/PS	PM/PM	PM/PB	PB/PB
	/PB	/PS	/PS	/PS	/PS	/PS	/PB
PB	PB/ZO	PB/ZO	PB/PS	PM/PM	PM/PM	PB/PB	PB/PB
	/PB	/PM	/PM	/PM	/PS	/PS	/PB

注:表中 2~8 列中的 3 个值分别为 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$

ΔK_p 规则库改进思路:

若 $e(t) \cdot ec(t) > 0$ 时,表明系统的输出随时间的推移趋于发散状态,即误差 $|e(t)|$ 会越来越大,此时为了快速降低误差使系统能再次达到稳态,就必须适当增大 K_p 。由公式 $K_p = K_{p0} + K_{\Delta p} \cdot \Delta K_p (K_{\Delta p} > 0)$ 可知,

此时,模糊控制应输出一个正的 ΔK_p 值;因此,当误差 $|e|$ 较大时,为使系统具有快速的响应能力, ΔK_p 应取大值,故当 E 、 EC 均为 PB 时, ΔK_p 应为 PB,而传统模糊 PID 的 ΔK_p 规则库中对应的为 NB(模糊控制输出的 ΔK_p 值为负),产生矛盾,因此需对此条规则进行调整;当误差 $|e|$ 减小为中等大小时,为保证系统即具有足够的响应能力,又能避免产生较大的超调, ΔK_p 应取适中值,故当 E 、 EC 均为 PM 时, ΔK_p 应为 PM,而传统模糊 PID 的 ΔK_p 规则库中对应的为 NM(模糊控制输出的 ΔK_p 值为负),产生矛盾,因此需对此条规则进行调整;当误差 $|e|$ 较小时,为避免系统在达到稳态时出现振荡, ΔK_p 应取小值,故当 E 、 EC 均为 PS 时, ΔK_p 应为 PS,而传统模糊 PID 的 ΔK_p 规则库中对应的为 NS(模糊控制输出的 ΔK_p 值为负),产生矛盾,因此需对此条规则进行调整;根据该思路便可完成对 ΔK_p 规则库中 E 与 EC 同号规则的优化与改进。

同理,若 $e(t) \cdot ec(t) < 0$ 时,表明系统的输出随时间的推移趋于收敛状态,即误差 $|e(t)|$ 会越来越小,此时为了使系统的输出稳定在稳态值附近,只需根据偏差 $|e|$ 的大小和偏差变化率 $|ec|$ 的快慢对 ΔK_p 适当取值即可;根据该思路便可完成对 ΔK_p 规则库中 E 与 EC 异号规则的优化与改进。

新的规则改进后的模糊 PID 控制器的 ΔK_p 规则库,与传统的模糊 PID 控制器的 ΔK_p 规则库的差异,可通过 ΔK_p 规则库的曲面图直观地反映出来,如图 4 所示。

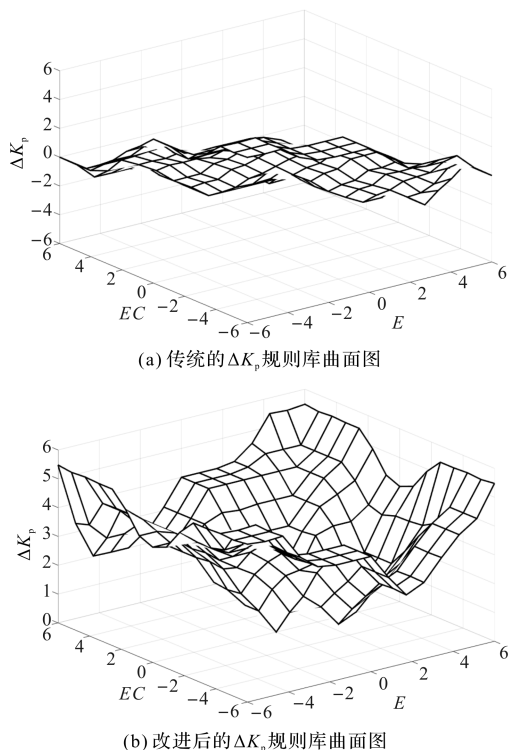


图 4 不同规则库下的 ΔK_p 规则库曲面图对比

3 仿真实验验证

笔者以阀控对称缸系统为被控对象,对规则改进后的模糊 PID 控制性能进行仿真研究与分析。在 AMESim 中搭建阀控对称缸的液压系统模型,利用 MATLAB 的 Simulink 模块库,实现笔者所提控制器的设计,通过 MATLAB 自带的 Fuzzy 工具箱,完成对所设计的模糊规则库的编写与创建,借助 2 个软件的接口技术,实现一个完整的电液位置伺服系统的建模。

在 AMESim 中搭建的阀控对称缸的液压系统模型如图 5 所示。

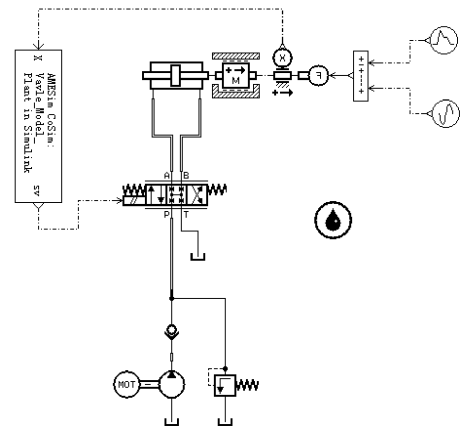


图 5 阀控对称缸的液压系统模型

阀控对称缸系统主要参数如表 3 所示。

表 3 阀控对称缸系统主要参数

参数	值
负载质量 m/kg	50
活塞有效面积 A/m^2	11.75×10^{-4}
伺服阀额定流量 $Q_n/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	38
伺服阀额定压降 $\Delta P_n/\text{MPa}$	7
伺服阀额定电流 I_n/mA	40
系统的总泄漏系数 $C_l/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$	0.57
体积弹性模量 β_e/MPa	1×10^3
系统的总压缩容积 V_l/m^3	6.01×10^{-4}
黏性摩擦系数 $B/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	500
库伦摩擦/N	125
静摩擦/N	150
溢流阀压力/MPa	10

在 Simulink 中搭建的改进模糊 PID 控制器的模型如图 6 所示。

为检验规则改进后的模糊 PID(FPID)控制器是否具有快速的响应能力,以及更好的位置跟踪精度和抗干扰能力,笔者以电液位置伺服阀控缸系统为被控对象跟踪阶跃信号,并与 PID 控制器和传统模糊 PID 控

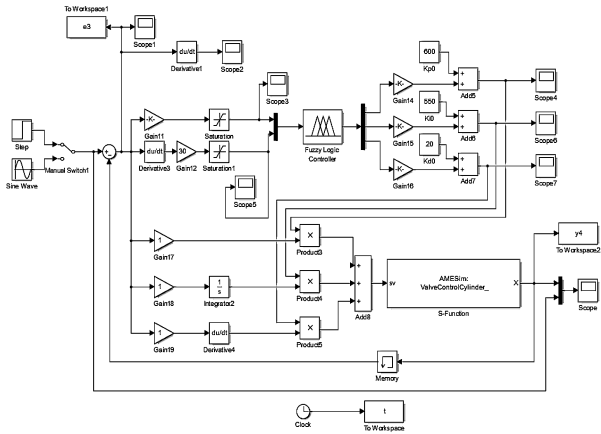


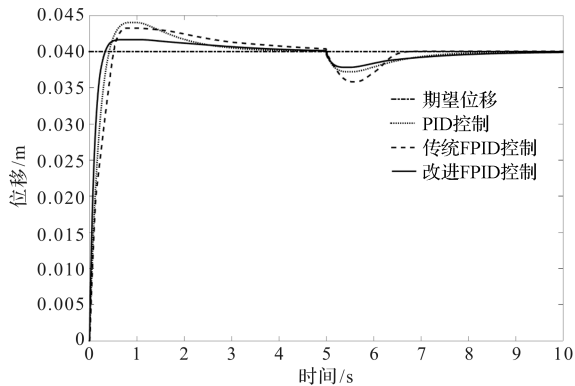
图 6 改进模糊 PID 控制器模型

制器进行对比分析;

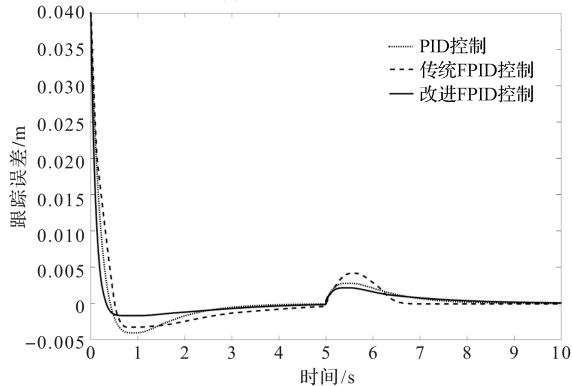
此外,为验证所设计的模糊 PID 控制器在系统的启闭过程中是否仍具有良好的控制效果,笔者以正弦信号来模拟系统的启闭过程,做了两组跟踪正弦信号的仿真研究,以进一步检验所设计控制器的优越性和可行性。

3.1 跟踪 40 mm 的阶跃信号

输入 40 mm 的阶跃信号,为模拟突变干扰的影响,假设在 5 s 时加入一个幅值为 3 000 N 的阶跃力模拟突变干扰。此时,系统位置跟踪曲线、动态跟踪误差曲线如图 7 所示。



(a) 位置系统跟踪曲线



(b) 位置跟踪误差曲线

图 7 加入阶跃干扰力的阶跃响应

其中,PID 控制的参数: $P = 600$ 、 $I = 550$ 、 $D = 20$;模

糊 PID 控制的参数: $K_e = 1\ 500$ 、 $K_{ec} = 30$ 、 $K_{\Delta p} = 100$ 、 $K_{\Delta i} = 45.8$ 、 $K_{\Delta d} = 1.67$ 、 $K_{p0} = 600$ 、 $K_{i0} = 550$ 、 $K_{d0} = 20$ 。

从图 7(a)可以看出:这 3 种控制方法均能实现对位置指令的精确跟踪,但跟踪精度与抗干扰能力有所差别。传统模糊 PID 控制和 PID 控制在 1 s 附近均出现不同程度的超调量,而改进模糊 PID 控制的超调量很小几乎没有;

此外,3 种控制策略下系统达到稳态的时间也大不相同,改进模糊 PID 控制下系统在 1.5 s 处达到稳态,而系统在其余两种控制器作用下都是在 2.8 s 后才进入稳态;在 5 s 处加入突变干扰后,3 种控制方案下系统均出现了波动,但改进模糊 PID 控制的波动情况明显小于其余控制算法,抗干扰能力更强。

从图 7(b)可以看出:PID 控制下系统的最大位置跟踪误差为给定指令的 9.5%;传统模糊 PID 控制下系统的位置跟踪误差在 5.5 s ~ 6.1 s 超过了给定指令的 7.5% (最大为 10.1%),其他时间段里的位置跟踪误差在给定指令的 7.5% 以内;而改进模糊 PID 控制下系统的最大位置跟踪误差仅占给定指令的 5.2%,相比于 PID 控制器所设计的规则改进后的模糊 PID 控制器的最大位置跟踪误差缩小了 45.26%,所设计的规则改进后的模糊 PID 控制器相比于传统模糊 PID 控制器,最大位置跟踪误差缩小了 48.52%,系统动态跟踪误差明显小于其他两种控制方法。

由此可以得出结论,即与其余两种控制器相比,改进的模糊 PID 控制器响应能力更快、伺服跟踪精度更高、抗干扰能力更强。

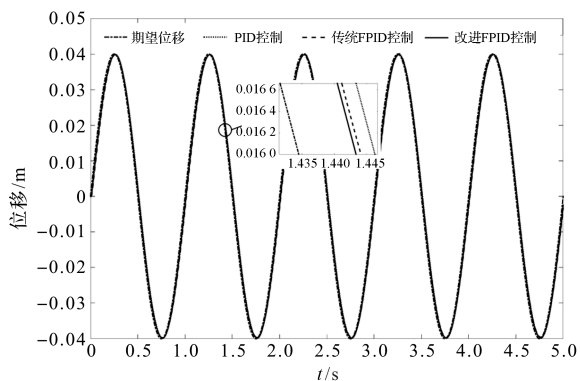
3.2 跟踪 1 Hz ~ 40 mm 的正弦信号

输入 $40\sin(2\pi t)$ mm 的正弦信号,为模拟实时变化的干扰力,0 s 时加入 $3\ 000\sin(2\pi t)$ N 的干扰力,模拟时变干扰。此时,系统位置跟踪曲线、动态跟踪误差曲线如图 8 所示。

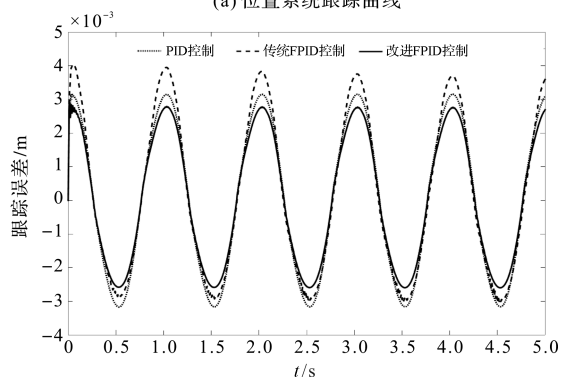
其中,PID 控制的参数: $P = 7\ 500$ 、 $I = 2\ 500$ 、 $D = 5$;模糊 PID 控制的参数: $K_e = 1\ 500$ 、 $K_{ec} = 30$ 、 $K_{\Delta p} = 450$ 、 $K_{\Delta i} = 208$ 、 $K_{\Delta d} = 0.5$ 、 $K_{p0} = 7\ 500$ 、 $K_{i0} = 2\ 500$ 、 $K_{d0} = 5$ 。

从图 8(a)以及局部放大图可以看出:这 3 种控制方法均能实现对位置指令的精确跟踪并且都具有一定的鲁棒性,但改进模糊 PID 控制下系统的伺服跟踪精度优于其余两种控制方法。

从图 8(b)可以看出:在加入时变干扰的情况下,PID 控制器的最大跟踪误差为给定指令的 7.95%;传统的模糊 PID 控制器的最大跟踪误差占给定指令的 9.6%;而规则改进后的模糊 PID 控制器的最大跟踪误差仅为给定指令的 6.47%,相比于 PID 控制器所设计



(a) 位置系统跟踪曲线



(b) 位置跟踪误差曲线

图 8 加入正弦干扰力的正弦响应

的规则改进后的模糊 PID 控制器的最大位置跟踪误差缩小了 18.62%，所设计的规则改进后的模糊 PID 控制器相比于传统模糊 PID 控制器，最大位置跟踪误差缩小了 32.61%，系统动态跟踪误差明显小于其他两种控制方法。

由此可以得出结论：在系统的启闭过程中，所设计的规则改进后的模糊 PID 控制器仍具有良好的控制效果和抗干扰能力。

现实中干扰一般是复杂无规律的，因此为了使仿真更接近现实，同时为了进一步对比传统模糊规则库和改进模糊规则库对 PID 参数在线修正的灵活性和准确性，笔者用一组复合的干扰力来模拟复杂无规律的干扰，即将上述仿真中，将有规律的正弦干扰力改为复杂的复合干扰力。

此时，系统的动态跟踪误差曲线如图 9 所示。

其中，复合干扰力的函数表达式如下：

$$F = \begin{cases} 1\ 500\sin(\pi t) + 1\ 500t & 0 \leq t < 1 \\ 1\ 500\sin(\pi t) + 1\ 500 & 1 \leq t < 2 \\ 1\ 500\sin(\pi t) - 3\ 000t & 2 \leq t < 3 \\ 1\ 500\sin(\pi t) & 3 \leq t < 5 \end{cases} \quad (2)$$

复合干扰力曲线如图 10 所示。

从图 9 可以看出：将正弦干扰力换为复合干扰力后，传统模糊 PID 控制在 0.5 s、2.5 s、4.5 s 均出现了

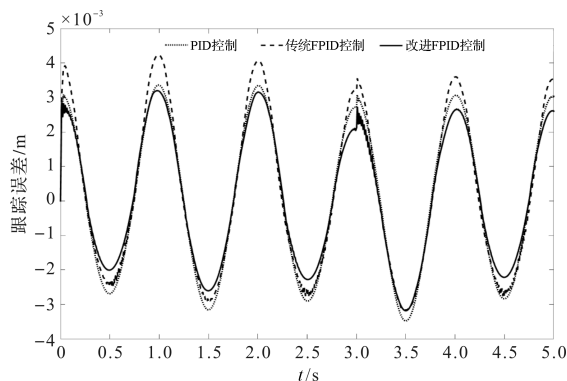


图 9 加入复合干扰力的正弦响应

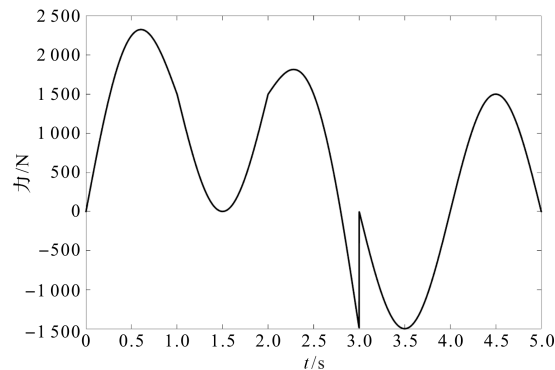


图 10 复合干扰力

不同程度的抖震现象，改进模糊 PID 控制在 3 s 处因干扰力的跳跃性变化而产生了轻微的抖震，但很快就趋于稳定，相比于传统模糊 PID 控制，其稳定性得到了显著提升；此外，改进模糊 PID 器控制下系统的动态跟踪误差明显依旧小于其他两种控制方法。

结合图 8(b) 和图 9 可以看出：在加入干扰的情况下，传统模糊规则库和改进模糊规则库均能实现对 PID 参数的在线修正，但修正能力有所差别，传统模糊规则库因存在精准确度不足的问题而导致其正向跟踪误差大于 PID 控制器的正向跟踪误差，而改进模糊规则库克服了该问题，故改进模糊 PID 控制下无论是正向误差还是负向误差均比 PID 控制下的小。

由此可以得出结论，即所设计的规则改进后的模糊 PID 控制器的模糊规则库更符合 PID 的调整规律，对 K_p 、 K_i 、 K_d 进行调整时更加灵活与准确。

综上仿真结果可以说明：相比于传统的 ΔK_p 规则库，改进后的 ΔK_p 规则库更符合 K_p 的调整规律，对 K_p 参数进行调整时更加灵活与准确；故在系统发生扰动时，规则改进后的模糊 PID 控制器的响应更加迅速、抗干扰能力更强。

4 结束语

针对目前传统模糊 PID 控制算法存在精准确度不足

的问题,笔者提出了一种改进模糊 PID 算法,其核心是对传统模糊 PID 中的规则库进行修正,改进后的模糊 PID 智能控制策略综合了 PID 控制和模糊控制的优势,具有优异的伺服跟踪精度和抗干扰能力;为了验证改进方法的可行性和有效性,笔者通过 Simulink 搭建了新的模糊规则库,在此基础上完成了对改进模糊 PID 控制器的设计;最后以电液位置伺服阀控缸系统为研究对象,对所提控制策略进行了联合仿真。研究结论如下:

(1)笔者提出的改进模糊 PID 控制器统一了模糊控制与 PID 控制的优势,即解决了 PID 控制参数固定不变的问题,又可以使控制算法在系统数学模型未能精准创建的情况下,兼具优异的伺服控制性能和鲁棒性;

(2)与传统的模糊规则库相比,笔者所提的改进后的模糊规则库中的 ΔK_p 规则库更符合 K_p 的调整规律,对 K_p 、 K_i 和 K_d 的参数进行在线修正时,显得更加灵活与准确,故更适用于 PID 控制参数的在线修正与自整定;

(3)联合仿真的结果表明:改进模糊 PID 控制器克服了传统模糊 PID 控制器存在的问题,其伺服跟踪精度和抗干扰能力都得到了显著的提升。

另外,在该控制策略中的优化 ΔK_p 规则库思路,可以为将来模糊 PID 控制的改进与优化提供一条新的途径。

参考文献 (References):

- [1] 王占林. 近代电气液压伺服控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [2] WANG C W, QUAN L, ZHANG S, et al. Reduced-order model based active disturbance rejection control of hydraulic servo system with singular value perturbation theory[J]. *ISA transactions*, 2017(67):455-465.
- [3] 吉鑫浩,汪成文,陈 帅,等. 阀控电液位置伺服系统滑模反步控制方法[J]. 中南大学学报:自然科学版,2020,51(6):1518-1525.
- [4] 彭 辉,王军政,沈 伟,等. 带补偿因子的双模糊控制在电液伺服阀控非对称缸系统上的应用研究[J]. 机械工程学报,2017,53(24):184-192.
- [5] ZUO D Q, QIAN L X, YANG T E, et al. Coupling leveling control based on fuzzy PID for synchronous loading system of load-bearing test bed[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2017,26(6):1206-1212.
- [6] 李文静,龚国芳,刘 建,等. 基于高频电磁阀压力控制的列车制动电液系统仿真[J]. 中南大学学报:自然科学版,2020,51(2):340-348.
- [7] 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.
- [8] LIU F C, LIANG L H, GAO J J. Fuzzy PID control of space manipulator for both ground alignment and space applications [J]. *International Journal of Automation & Computing*, 2014,11(4):353-360.
- [9] 钟定清,王艾伦,何 谦,等. 交流电力测功机的支持向量机模糊 PID 控制策略[J]. 中南大学学报:自然科学版,2020,51(3):661-667.
- [10] LUO Q Z, AN A M, ZHANG H C, et al. Non-linear performance analysis and voltage control of MFC based on feedforward fuzzy logic PID strategy[J]. *Journal of Central South University*, 2019,26(12):3359-3371.
- [11] BOUKHALFA G, BELKACEM S, CHIKHI A, et al. Genetic algorithm and particle swarm optimization tuned fuzzy PID controller on direct torque control of dual star induction motor[J]. *Journal of Central South University*, 2019,26(7):1886-1896.
- [12] 周 围,李群明,高志伟,等. 基于模糊 PID 的送杆机构同步控制建模与仿真研究[J]. 机电工程,2020,37(9):1006-1012.
- [13] 孙 凤,张 琪,徐方超,等. 激光光路控制电磁作动器的模糊 PID 控制特性分析[J]. 兵工学报,2019,40(2):430-441.
- [14] 刘存根,周玉成,刘晓平,等. CT 扫描攀爬机器人模糊 PID 力控制算法[J]. 林业科学,2018,54(11):104-110.
- [15] 曹婧华,孔繁森,冉彦中,等. 基于模糊自适应 PID 控制的空压机背压控制器设计[J]. 吉林大学学报:工学版,2018,48(3):781-786.
- [16] 陈 斌,裴忠才,唐志勇. 液压四足机器人的自适应模糊 PID 控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(9):140-144.
- [17] WEI X H, YIN Q Z, HONG N, et al. Aircraft electric anti-skid braking system based on fuzzy-PID controller with parameter self-adjustment feature [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014,31(1):111-118.
- [18] 刘轶菡,苏东海. 风机风景调整电液伺服系统模糊 PID 控制器设计[J]. 液压气动与密封,2019(4):56-58.
- [19] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2004.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

陈 帅,汪成文,张震阳,等. 改进模糊 PID 方法及其在电液伺服控制中的应用[J]. 机电工程,2021,38(5):559-565.

CHEN Shuai, WANG Cheng-wen, ZHANG Zhen-yang, et al. Improved fuzzy PID method and its application in electro-hydraulic servo control[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021,38(5):559-565.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>