高精度交流伺服系统的模糊 PID双模控制

卢泽生 张 强

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 交流位置伺服系统因其存在参数时变、负载扰动以及电机的非线性等缺点, 很难为其建立准确的模型. 模糊(fuzzy)控制具有无需建立被控对象的数学模型、鲁棒性好等优点, 但稳态精度差. 将模糊控制和 PID 控制相结合, 设计了 Fuzzy-PID 双模控制器. 在论域内用不同的控制方式分段实现控制, 这样就综合了模糊控制和 PID 控制的优点, 克服了各自的缺点. 该控制器结构简单、易于实现. 在半闭环交流位置伺服系统上所做的实验表明, 采用 Fuzzy-PID双模控制器与采用经典 PID控制器相比, 阶跃响应的调整时间减少了 33.7%, 并且无超调, 轨迹跟踪误差减小了 47.2%.

关 键 词: 模糊控制; PID 控制; 双模控制; 交流伺服系统

中图分类号: TP 273+.4

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2007) 03-0315-04

Fuzzy-PID double mode control of ultra-precision AC servo system

Lu Zesheng Zhang Qiang

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract It is difficult to establish mathematical mode for AC servo system, because it has several disadvantages, such as parameters varying as time, load disturbing, motor being non-linear, and so on. Fuzzy control need not establish the mathematical mode of controlled plant, but steady state precision is bad. A fuzzy-PID double mode controller was presented, which combined fuzzy controller and PID controller. Different controller was adopted in different domain, so the double mode controller combined the advantages of fuzzy controller and PID controller, and get rid of the disadvantages of them. The double mode controller is easy to realize. Experiment results show that the fuzzy-PID double mode controller reduces settling time by 33.7% without overshooting and decreases tracking error by 47.2% in comparison to standard PID controller.

Key words fuzzy control; PID control; double mode control; AC servo system

目前超精密机床大多采用交流伺服系统, 控制器普遍应用经典的 PID 控制方法, 其优点是算法简便、易于实现. 但交流伺服系统存在参数时变、电机及被控对象的严重非线性等缺点, 很难确定准确的模型, 所以 PID 控制存在参数整定比较难、抗干扰能力弱等缺点. 为适应超精密机床高精度、高速度的发展要求, 必须提高位置控制器的稳态精度、动态响应特性、鲁棒性的性能, 因此采用智能控制算法是一种必然趋势. 模糊(fuzzy)控制与经典 PID 控制相比具有无需建立被控对象的数学模型、对被控对象的非线性和时变性具有一定的适应能力等优点[1-3]. 由于模糊控制相当于一种非线性 PD控制器, 缺少积分作用, 因此会引起系统的稳态误差. 模糊控制需要做量化取整运算, 则量化可能会导致系统输出产生稳态颤振现象, 也需加以改善. PID 控制器的积分调节作用理论上可使系统的稳态误差控制为 0, 有着很好的消除稳态误差的作用. 一些文献也提到过将积分引入到模糊控制器的方法, 但只是进行了仿真分析[4-6], 很少有人进行实验研究. 本文提出了 Fuzzy-PID双模控制方法, 即当误差在某一个阈值以外时, 采用模糊控制, 以获得良好的瞬态性能;

收稿日期: 2006-04-04

作者简介: 卢泽生(1940-), 男, 河北滦县人, 教授, lzesn@hit.edu.cn.

当误差落到阈值以内的范围时,则采用 PID控制,以获得良好的稳态性能. 在半闭环交流伺服系统上进行了实验研究,取得了良好的控制效果.

1 交流位置伺服系统

超精密机床由交流伺服电机和精密滚珠丝杠构成驱动进给系统,图 1为半闭环位置伺服控制系统结构图. 该系统通过安装电机轴端的光电码盘来获取位置和速度信息. 电机为松下交流伺服电机,额定功率为 400W,额定转矩为 1.3N·m,额定转速为 3000 r/min. 电机控制卡最高输出频率可达 2.4MHz,带有编码器反馈端口.

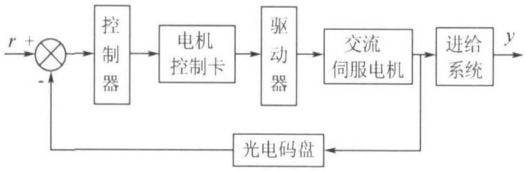

图 1 半闭环位置伺服系统结构图

2 Fuzzy-PID双模控制器的设计

经典的模糊控制算法实际上就是一个查表输出的过程. 其模糊控制器的稳态性能远不如普通的 PID或 PI控制器,原因是除了所制定的模糊表不佳之外,还有一个重要原因,就是误差及误差变化率被模糊量化取整而引起的控制器调节死区,以及控制量的分档而引起的调节过粗. 要提高经典的模糊控制器的精度和跟踪性能,就必须对语言变量取更多的语言值,即分档越细,性能越好,但同时带来的缺点是规则数和系统的计算量也大大增加,以致模糊控制规则表也更难把握,调试更加困难,或者不能满足实时控制的要求.

实际上,经典的模糊控制器从理论上就存在稳态误差. 当误差 e和误差变化率 ec均为零级时,系统控制量输出 u也为 0但此时系统误差 e并非真正为 0,只是小于最小的量化等级. 对于误差输入信号,要把它转化成误差论域上的点,即

$$n_k = \mathrm{int}(k_e e_k + 0.5) \tag{1}$$

式中, e_k为某时刻 k的输入误差; k_e是误差信号; n_k为转化到误差论域上的点. 式(1)可见,当 $n_k = 0$时,仍有

$$|k_e e_k| < 0.5$$

即

$$|e_k| < \frac{0.5}{k_e} \tag{2}$$

式中 k_e是误差的物理范围 $[-e, e]$到误差论域 $\{-n, -(n-1), \cdots, 0, \cdots, n-1, n\}$量程转换的比例因子. 因为 $k_e = n/e$,所以式(2)变为

$$|e_k| < \frac{0.5}{n}e \tag{3}$$

一般规范化的离散论域形式中常取 $n=6$,因此

$$|e_k| < 0.08e \tag{4}$$

也就是说 $|e_k| < 0.08e$时,模糊控制器已经把它当作 0来处理了,因此模糊控制器无法消除 $|e_k| < 0.08e$的稳态误差,这是控制上的盲区和死区.

PID控制整定比较难,抗干扰能力差,但在小范围内调节效果是理想的,其积分作用可消除稳态误差.

为解决这一矛盾,本文在论域内用不同的控制方式分段实现控制,这样就克服了模糊控制和 PID控制的缺点. 当偏差大于某个阈值时,采用模糊控制,加快响应过程. 当偏差减小到阈值以下时,切换到 PID控制,提高稳态精度. 图 2为设计的 Fuzzy-PID双模控制系统.

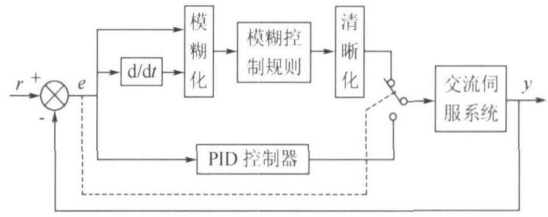

图 2 Fuzzy-PID双模控制系统框图

从理论上讲,模糊控制器的维数越高,控制就越精细. 但维数过高,模糊控制规则就会变得很复杂,控制算法的实现相当困难. 本文采用二维模糊控制器进行设计,采用偏差 e和偏差的变化 ec作为输入变量,该结构能够较严格地反映受控过程中输出变量的动态特性,结构也较简单.

为了把控制规则中偏差 e所对应的语言变量 E变成模糊集,本文将语言变量分为 8个档级,形成 8个模糊子集,来反映偏差的大小. 它们分别是: NL=负大, PL=正大; NM=负中, PM=正中; NS=负小, PS=正小; NO=负零, PO=正零. 将误差的基本论域 $[-e, e]$量化为 13档,则误差所取的模糊集合的论域为 $X = \{-6, -5, \cdots, -1, 0-, 0+, 1, \cdots, 6\}$.

有关偏差变化率 $ec = \mathrm{d}e/\mathrm{d}t$的语言变量 ΔE,本文分为 7个档级,形成 7个模糊子集,来反映偏差变化率的大小,分别是: NL=负大, PL=正大; NM=负中, PM=正中; NS=负小, PS=正小; O=零. 将偏差变化率的基本论域 $[-\dot{e}, \dot{e}]$量化为 12档,则误差所取的模糊集合的论域为 $Y = \{-6, -5, \cdots, -1, 0, 1, \cdots, 6\}$.

对于系统控制量 u的语言变量 U,本文分为

7个档级, 形成 7个模糊子集, 分别是: *NL* = 负大, *PL* = 正大; *NM* = 负中, *PM* = 正中; *NS* = 负小, *PS* = 正小; *O* = 零. 将控制量的基本论域 $[-u, u]$ 量化为 12档, 则误差所取的模糊集合的论域为 $Z = \{-6, -5, \cdots, -1, 0, 1, \cdots, 6\}$.

定义各模糊变量的模糊子集, 根据确定的控制策略及建立的模糊控制规则, 采用最大隶属度法建立模糊控制表, 如表 1所示.

在从模糊控制向 PID 控制切换时的阈值选在误差语言变量的语言值为零级时, 由程序通过判断进行控制. 即当 $E = NO$ 或 $E = PO$ 时, 采用下面的 PID算法:

$$u_n = u_{n-1} + k_p(e_n - e_{n-1}) + k_i e_n + k_d(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (5)$$

表 1　模糊控制表

e \ *ec*	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	6	5	6	5	6	6	3	3	1	0	0	0	0
-5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	1	0	0	0
-4	6	5	6	5	6	6	6	3	3	1	0	0	0
-3	5	5	5	5	5	5	5	2	1	0	-1	-1	-1
-2	3	3	3	4	3	3	3	0	0	0	-1	-1	-1
-1	3	3	3	4	3	3	1	0	0	0	-2	-2	-2
0-	3	3	3	4	1	1	0	0	-1	-1	-3	-3	-3
0+	3	3	3	4	1	0	0	-1	-1	-1	-3	-3	-3
1	2	2	2	2	0	0	-1	-3	-3	-2	-3	-3	-3
2	1	1	1	-1	0	-2	-3	-3	-3	-2	-3	-3	-3
3	0	0	0	-1	-2	-2	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
4	0	0	0	-1	-3	-3	-6	-6	-6	-5	-6	-5	-5
5	0	0	0	-1	-3	-3	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
6	0	0	0	-1	-3	-3	-6	-6	-6	-5	-6	-5	-6

3　实验研究

为验证 Fuzzy-PID 双模控制器的效果, 分别做了定位控制实验和跟踪控制实验. 采用 PID 控制时, PID参数的整定既要考虑系统的超调量, 也要考虑系统的调整时间, 故取 $k_p = 4.1$, $k_i = 0.07$, $k_d = 0.1$ 采用 Fuzzy-PID 双模控制时, 当偏差大于切换阈值时, 采用模糊控制, 响应过程较快; PID 控制只是在小范围的切换阈值内起作用, 以提高系统稳态精度, 所以双模控制器中 PID 参数的整定主要考虑减小系统超调量, 提高系统稳态精度, 调整时间可以相对较长, 故取 $k_p = 2.8$, $k_i = 0.08$, $k_d = 0.1$

1) 定位控制实验. 将 1000个脉冲 (pulse)作为阶跃信号的输入量, 将经典 PID 控制和 Fuzzy-PID双模控制进行对比, 采样周期为 50ms 图 3为采用 PID控制时系统阶跃响应曲线, 图 4为采用 Fuzzy-PID双模控制时的系统阶跃响应曲线. 采用 PID 控制时, 超调量为 11.2%, 过渡时间为 0.89 s, 采用 Fuzzy-PID 双模控制时, 无超调, 过渡时间为 0.59 s, 调整时间减少了 33.7%.

2) 跟踪控制实验. 为验证 Fuzzy-PID 双模控制器的跟踪性能, 分别采用经典 PID控制和 Fuzzy-PID双模控制跟踪幅值为 1000个脉冲, 频率为 0.1Hz的正弦信号进行对比, 采样周期为 50ms 图 5为采用经典 PID 控制时的正弦跟踪曲线; 图 6为采用 Fuzzy-PID 双模控制时的正弦跟踪曲线. 采用 Fuzzy-PID 双模控制比采用经典 PID 控制跟踪误差减小了 47.2%.

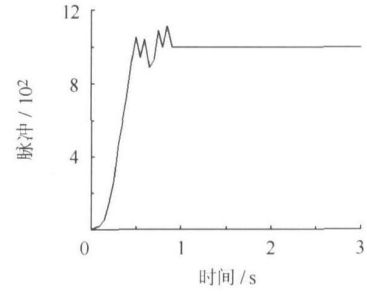

图 3　*PID* 控制阶跃响应曲线

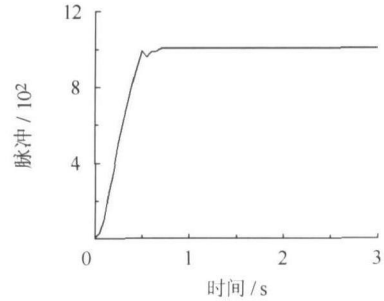

图 4　*Fuzzy-PID* 双模控制阶跃响应曲线

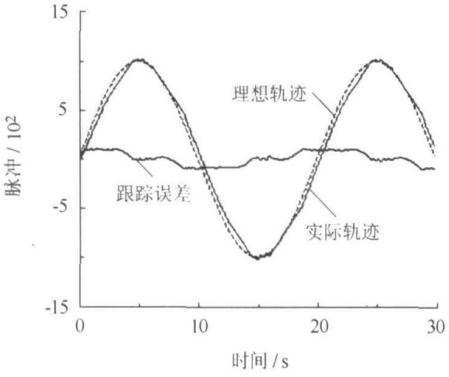

图 5 *PID* 控制正弦跟踪曲线

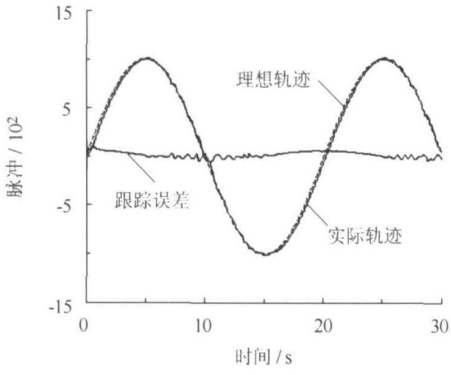

图 6 *Fuzzy-PID* 双模控制正弦跟踪曲线

4 结 论

1) Fuzzy-PID 双模控制器克服了模糊控制和经典 PID 控制两者的缺点, 具有接近于人类操作经验的控制性能. 交流位置伺服系统采用 Fuzzy-PID 双模控制方法, 既具有较强的鲁棒性又具有较高的稳态精度.

2) 实验表明, 采用 Fuzzy-PID 双模控制器能够得到良好的控制效果, 使系统阶跃响应的快速性、稳定性及动态信号的跟踪能力均明显优于经典的 PID 控制器.

参考文献 (**References**)

[1] 杨亚炜, 张明廉. 一种新的模糊控制方法及其仿真 [J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(3): 310-313
Yang Yawei, Zhang Minglian. Type of new fuzzy control method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(3): 310-313(in Chinese)

[2] Mustafa M M. Fuzzy inference using piecewise polynomial interpolation and its application to model-reference fuzzy logic controller[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 118(2): 257-270

[3] Kóczy László T, Zorat Alessandro. Fuzzy systems and approximation[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 85(2): 203-222

[4] 朱良红, 王永初. 模糊与积分混合控制器 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 285-289
Zhu Lianghong, Wang Yongchu. Fuzzy and integral mixed controller[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2003, 24(3): 285-289(in Chinese)

[5] 孔薇, 谷丽娜, 于飞. 积分在提高模糊控制器精度中的作用 [J]. 青岛化工学院学报, 2001, 22(1): 66-68
Kong Wei, Gu Lina, Yu Fei. Function of integration in improving precision of fuzzy controller[J]. Journal of Qingdao Institute of Chemical Technology, 2001, 22(1): 66-68(in Chinese)

[6] 贺云波, 简林柯, 林廷圻, 等. 模糊控制器的三种积分改进方法对比及应用 [J]. 机床与液压, 2001(1): 34-35
He Yunbo, Jian Linke, Lin Tingqi, et al. Three types of improving methods of adding an integrator to a fuzzy controller[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2001(1): 34-35(in Chinese)

(责任编辑: 文丽芳)

(上接第 **264**页)

参考文献 (**References**)

[1] Hamed A, Laskowski G. A parametric study of slot injection thrust vectoring in a 2DCD nozzle[R]. AIAA-97-3154, 1997

[2] Deere K A. Computational investigation of the aerodynamic effects on fluidic thrust vectoring[R]. AIAA-2000-3598, 2000

[3] 王强, 付尧明, 额日其太. 流体注入的轴对称矢量喷管三维流场计算[J]. 推进技术, 2002, 23(6): 441-444
Wang Qiang, Fu Yaoming, Eriqitai. Computation of three dimensional nozzle flow field with fluidic injection [J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(6): 441-444(in Chinese)

[4] 张群峰, 吕志咏, 王戈一, 等. 轴对称射流矢量喷管的试验与数值模拟[J]. 推进技术, 2004, 25(2): 139-143
Zhang Qunfeng, Lu Zhiyong, Wang Geyi, et al. Numerical simulation of an axisymmetric fluidic vectoring nozzle [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(2): 139-143(in Chinese)

[5] 邓远灏, 钟梓鹏, 宋文艳. 收敛-扩张喷管中运用次流推力矢量控制技术的计算研究 [J]. 固体火箭技术, 2004, 28(1): 29-32
Deng Yuanhao, Zhong Zipeng, Song Wenyan. Computational investigation of secondary flow thrust vector control technology used in a convergent-divergen nozzle [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 28(1): 29-32(in Chinese)

[6] 乔渭阳, 蔡元虎. 基于次流喷射控制推力矢量喷管的实验及数值研究[J]. 航空动力学报, 2001, 16(3): 273-278
Qiao Weiyang, Cai Yuanhu. A study on the two-dimensional thrust vectoring nozzle with secondary flow injection [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(3): 273-278(in Chinese)

(责任编辑: 娄 嘉)