基于主轴回转误差的模糊自整定 PID 控制器设计

李树森,陈素平*,田倩,元月　(东北林业大学机电工程学院,黑龙江哈尔滨 150040)

摘要　为解决常规 PID 调节器很难满足在线回转误差检测与控制要求的问题,以静压气体轴承回转误差控制系统为研究对象进行了探讨,提出了模糊自整定 PID 控制策略。根据模糊控制理论,运用常规 PID 控制器的设计方法,设计出了模糊自整定 PID 控制器,实现了 PID 控制器参数在线自调整。仿真试验表明,与传统的 PID 控制相比,模糊 PID 控制系统具有良好的稳定性和自适应能力。

关键词　主轴回转误差;PID 控制器;模糊自整定
中图分类号　S23　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　0517 - 6611(2014)07 - 02155 - 03

Design of Self-tuning Fuzzy PID Controller Based on Rotary Error of Spindle

LI Shu-sen, CHEN Su-ping et al　(School of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract　Since the conventional PID controller is difficult to meet the requirements of on-line error detection and control, with rotary error control system of hydrostatic gas-lubricated bearing as the study object, this paper proposed self-tuning fuzzy PID control strategy. According to the fuzzy control theory and using design method of conventional PID controller, it designed self-tuning fuzzy PID controller, and realized on-line self-tuning of PID controller parameters. The simulation test indicates that the fuzzy PID controlling system has excellent stability and self-adaptation compared with conventional PID controller.

Key words　Rotary error; PID controller; Self-tuning fuzzy control

静压气体轴承是利用气膜支承负荷的机械构件,即以一定压力的净化空气充满轴承套与轴之间,并以其为润滑介质。它具有高速、高精度、低摩擦、低消耗、寿命长等优点。随着工业应用对高速度、高精度加工技术的要求越来越高,精密数控车床的主轴系统采用回转精度更高、温升更小的静压气体轴承支承将成为今后的发展趋势[1]。因此主轴回转精度的高低直接影响着加工件的质量,为进一步提高数控车床加工精度的技术问题,减小加工误差,采用误差补偿技术以提高主轴回转精度,使轴系达到亚微米精度。基于传统 PID 控制,设计出一种参数自整定控制理论的 PID 控制器,它以误差和误差率作为输入,以 K_p、K_i 和 K_d 作为输出,根据不同时刻的误差和误差率对 PID 的参数进行在线自调整,以达到提高误差补偿控制系统响应速度、精度及稳态的目的。

1　模糊自整定 PID 控制器结构

在结构动力学问题中,自由度为 n 的自由振动系统动力学方程可表示为(即车床轴承的动力学方程)[1-2]:

$$m\ddot{X} + c\dot{X} + kX = F(t)$$

式中:m、c、k 分别是质量、阻尼系数、刚度系数;$\ddot{X}$、$\dot{X}$、X 分别是加速度、速度、位移;$F(t)$ 是外力。

对其进行拉普拉斯变换得:

$$ms^2x(s) + csx(s) + kx(s) = F(s)$$

整理可得静压气体轴承的传递函数:

$$G(s) = \frac{H}{s^2 + \delta s + \omega^2}$$

模糊参数自整定 PID 控制器的结构如图 1 所示。该结构属于间接控制系统,由直接控制器和间接控制器 2 部分组成,直接控制器部分是指 PID 控制器,间接控制器部分是指模糊推理。

先找出 PID 的 3 个参数与误差(e)、误差变化率(ec)之间的模糊关系,在运行中不断检测 e 和 ec,然后由模糊控制原理再对 PID 的 3 个参数进行在线修改,以满足不同 e 和 ec 控制器参数的不同要求,使 PID 控制器的控制效果达到最佳[3]。

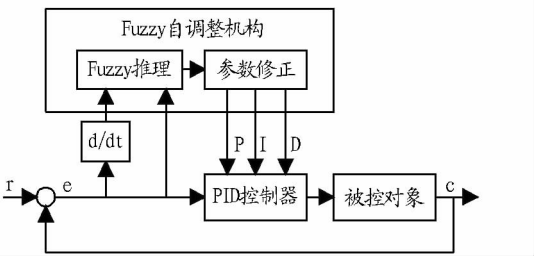

图 1　模糊自整定 PID 控制器结构

PID 控制器采用增量计算位置输出算法[3],表达式如下所示:

$$\Delta u(n) = u(n) - u(n-1) = K_p[e(n) - e(n-1)] + \frac{T}{T_i}e(n) + \frac{T_d}{T}[e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] = K_p\Delta e_i + K_I e_i + K_D\Delta^2 e_i$$

式中:$u(n)$ - 第 n 个采样时刻控制器输出量;$e(n)$ - 第 n 个采样时刻控制器输入量;K_p - 比例系数;T_i - 积分时间;T_d - 微分时间;T - 采样周期。

2　参数自整定方法分析

误差绝对值 $|e|$ 和误差变化率 $|ec|$ 的绝对值为模糊控制器的输入,根据参数 K_p、K_i 和 K_d 对系统的输出特性的影响,可以总结不同情况下 K_p、T_i 及 T_d 的自整定要求。

(1) $|e|$ 较大时,系统响应如图 2 所示的第Ⅰ部分,为了加快系统的响应速度,应取较大的 K_p 和较小的 T_d。同时,为了防止积分饱和及系统响应出现超调,必须对积分作用进行限

基金项目　哈尔滨市科技创新人才研究专项资金(2012RFXXG077);黑龙江省自然科学基金(E201215);高等学校博士学科点专项科研基金博导类资助课题(20120062110006)。
作者简介　李树森(1963 -),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,从事气体轴承、现代机械设计理论与方法、农业与林业机械研究。*通讯作者,在读硕士研究生,研究方向:气体轴承。
收稿日期　2014-02-07

制,即取较大值的 T_i。

(2)$|e|$和$|ec|$为中等大小时,系统响应如图 2 曲线中的的第Ⅱ部分,为了使系统响应减小超调,K_p、T_d 不能太大,而且 T_i 不能太小,取适中的 K_p、T_i及 T_d,以确保系统的响应速度。

(3)$|e|$较小时,如图 2 曲线的第Ⅲ部分,为使系统的稳态性能良好,应增大 K_p 值,T_i 值减小,其主要功能是快速消除静态误差。同时,考虑到系统的抗干扰能力,为了使控制系统在设定值附近尽可能少的出现振荡,要慎重选择 T_d 值。

模糊控制器的输入语言变量为位置误差的绝对值$|e|$和误差变化率$|ec|$,输出变量为 K_p、K_i 和 K_d(图 3)。输入语言变量和的论域为[-1.5,1.5],并定义语言值是“负大”(NB),“负中”(NM),“负小”(NS),“零”(ZO)“正小”(PS)“正中”(PM)“正大”(PB)七种,输出语言变量 K_p、K_i 和 K_d 的论域是[-1.5,1.5],取“负大”(NB),“负中”(NM),“负小”(NS),“零”(ZO)“正小”(PS)“正中”(PM)“正大”(PB)7 种语言值。输入、输出隶属函数如图 4 ~7 所示。

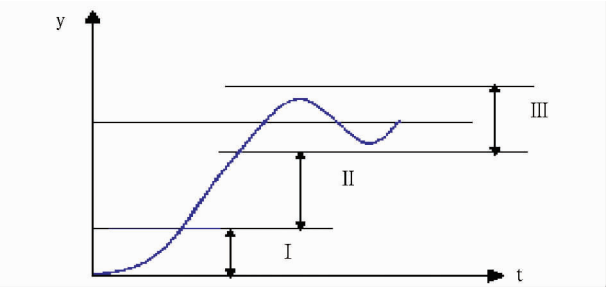

图 2 输出响应曲线

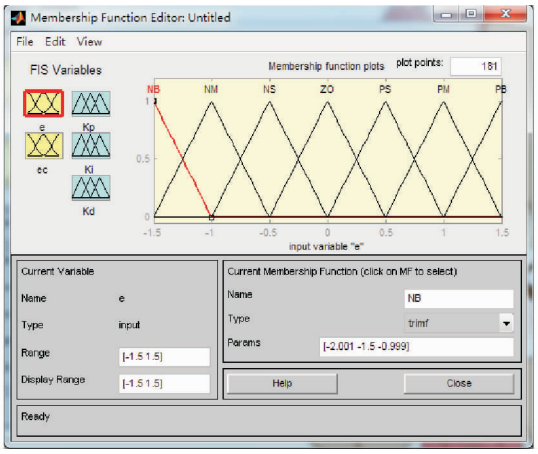

图 3 隶属函数编辑器窗口

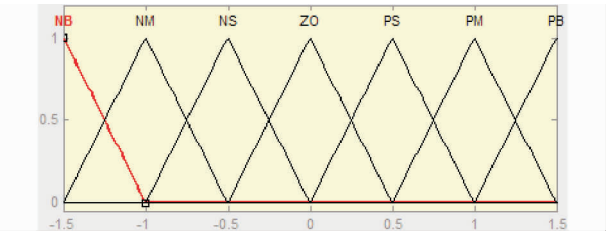

图 4 e、ec 的隶属函数

3 模糊控制规则

参数模糊自整定 PID 控制器设计的核心是控制规则的设计。考虑到 K_p、K_i 和 K_d 3 个参数对控制系统各种方面的

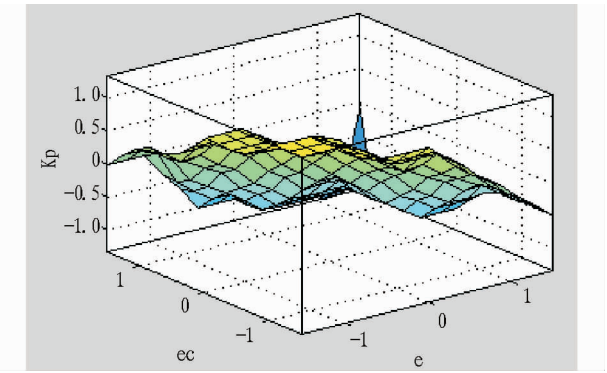

图 5 K_p 输出

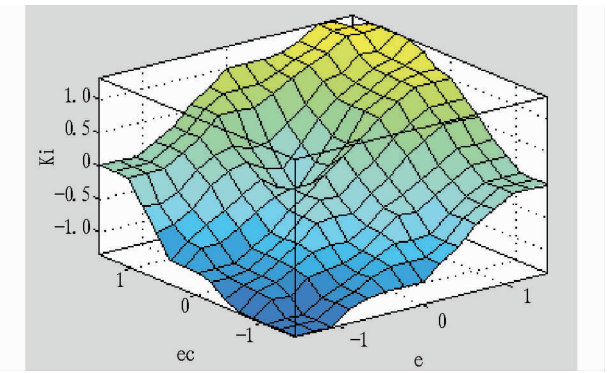

图 6 K_i 输出

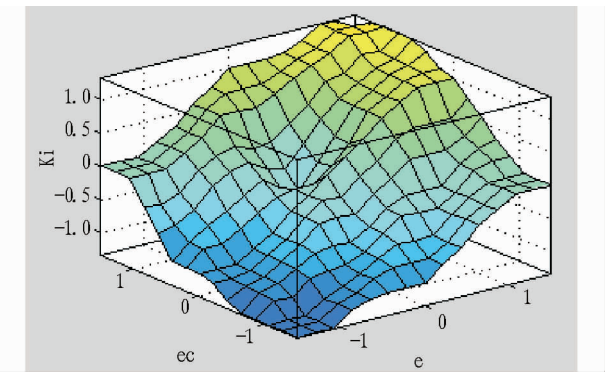

图 7 K_d 输出

影响,控制专家经过大量的仿真研究和试验得出以下 K_p、K_i 和 K_d 的整定经验[4-5]:(1)增大则降低振荡周期,超调增大,上升时间减小;K_p 减小则变化相反;(2)K_i 增大则超调增大,稳定性减弱,静差减小;K_i 减小则变化相反;(3)K_d 增大,则稳定性增强;K_d 减小,则稳定性减弱;(4)当系统输出大于设定值时,减小 K_i;(5)当系统的上升时间大于所需的上升时间时,增大 K_i;(6)在稳定状态时,如果系统输出产生波动现象,则应适当的增加 K_d;(7)如果系统输出对于干扰信号反应较敏感,应适当的减小 K_d;(8)如果系统上升时间过长,增加 K_p;(9)系统输出发生振荡现象,减小 K_p。

在这些控制规则中,规则(6)的优先级高于规则(9),即当上升时间过大时,先调整 K_i,再调整 K_p,并考虑控制系统易于实现和算法的执行时间。同时,在系统的不同控制阶段,制定具体的控制规则是既要提高响应速度,同时要兼顾超调和稳定性的因素,根据上述的一些控制原则以及专家的经验[4-5],设定 K_p、K_i 和 K_d 的调整规则如表 1。

表 1　K_p、K_i、K_d 整定规则

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/ZO
NM	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PS/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/ZO
NS	PM/NB	PM/NM	PM/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NS/PS
ZO	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NM/PM	NM/PM
PS	PS/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/NS	NS/PS	NM/PM	NM/PB
PM	PS/ZO	ZO/ZO	NS/PS	NM/PS	NM/PM	NM/PB	NB/PB
PB	ZO/ZO	ZO/ZO	NM/PS	NM/PM	NM/PM	NB/PB	NB/PB

注:表中数据为 K_p/K_i K_d。

4　解模糊

在控制器的设计中,为了能使计算机随时控制使用,要将模糊控制规则转换为一个查询表的形式,这就要求必须进行解模糊。解模糊的方法有最大隶属度函数法、中位数法、加权平均法等等。考虑到各种方法的优缺点,采用 FIS 编辑的模糊控制规则和仿真模型。在打开的规则视图窗口中运用 max - min 方法去除模糊化。初步选取一组典型的语言变量和的赋值表以确定误差、误差变化以及控制量 K_p、K_i、K_d 的隶属度,然后在实际调试中根据控制效果进行调整。视图窗口界面如图 8 所示。查询视图窗口可以得到 K_p、K_i 和 K_d 的具体数值。

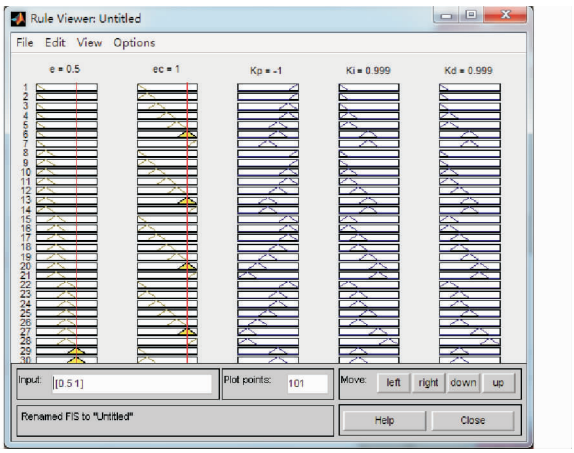

图 8　Ruleview 窗口

5　仿真结果分析

在 MATLAB 中下建立仿真模型,取控制对象的传递函数为 $G(s)=2/s^2+3s+2$。从阶跃响应图可知,和传统的 PID 控制器相比,模糊自整定控制器能够根据系统误差和误差变化率的任何时刻的变化,从而实现了对 K_p、K_i 和 K_d 3 个参数的在线调整,所以得到的系统阶跃响应曲线具有响应时间短、超调量小、稳态精度高的优点,而且系统遇到干扰时能很快的进行稳态修复,动静态性能好。

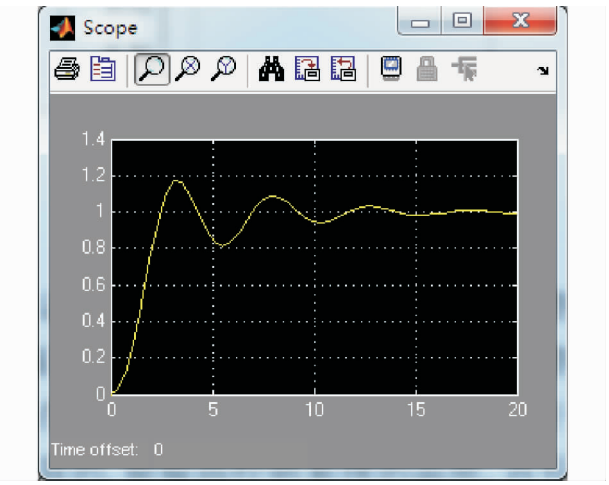

图 9　PID 控制阶跃响应图

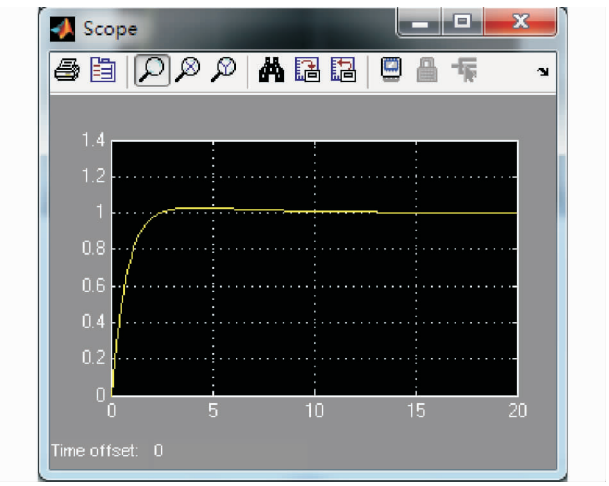

图 10　模糊自整定 PID 控制阶跃响应图

6　结论

仿真结果表明,采用模糊自整定 PID 控制器进行主轴回转误差的控制,操作简便,反应迅速,自整定能力强,能整体提高控制系统的性能,具有很强的自适应能力和较好的鲁棒性,从而确保了回转误差在线测量与控制的精准性。

参考文献

[1] 郭永红. 数控车床静压气体轴承主轴系统动力学建模及静特性研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2011.
[2] 马兰兰. 精密气磁轴承的误差补偿和控制方法的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2006.
[3] 王安,杨青青,闫文宇. 模糊自整定 PID 控制器的设计与仿真[J]. 计算机仿真,2012(12):224 - 228.
[4] 李丽娜,柳洪义,罗忠,等. 模糊 PID 复合控制算法改进及应用[J]. 东北大学学报:自然科学版,2009,30(2):274 - 278.
[5] 王延年,郭卫松,陈苗苗. 基于 DSP 的高精度智能电液伺服控制器的设计[J]. 西安工程大学学报,2013(4):198 - 202.

(上接第 2154 页)

参考文献

[1] 国家烟草专卖局关于推进现代烟草农业建设的意见. 国烟办[2009]115 号[Z]. 2009.
[2] 何泽华. 发展现代烟草农业的重大意义——何泽华 2007 年 12 月 27 日在全国烟叶生产汇报会议上的讲话[R]. 2007.
[3] 云南烟草科学研究院,中国烟草育种研究(南方)中心. 云南"名、优、捞"烟叶生产技术及发展思路[J]. 烟草科技,2008(8):38 - 39.
[4] 姜林灿. 对烟叶原料保障上水平的探讨[J]. 中国烟草科学,2011,32(6):90 - 93.
[5] 杜传印,王兆群,周建,等. 烟叶标准化生产与可持续发展[J]. 中国烟草科学,2008(3):24 - 27.
[6] 李青常,杨永霞,范黎,等. 充分发挥标准化生产的作用稳定烟叶质量[J]. 安徽农学通报,2009(20):143 - 145.
[7] 邓瑞康,杨鹏. 标准化生产对黔东南现代烟草农业的推动作用[J]. 耕作与栽培,2010(5):62 - 64.
[8] 刘丹,段宁东,董毅明,等. 普洱市烟叶种植的比较效益分析[J]. 安徽农业科学,2013,41(3):1372 - 1375.