[自控·检测]
DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.02.015

基于 PID 与模糊控制的切削加工过程双模控制

宋晓华

(衢州学院 机械工程学院, 浙江 衢州 324000)

摘 要:为了克服在切削加工过程中单一的控制策略建立的控制系统性能不理想的情况,采用了多个系统并联的切削加工过程模型。结合了 PID 控制和模糊控制两者各自的优点,设计实现了对切削加工过程的双模控制。利用 MATLAB 对该控制策略进行响应仿真并调试参数,求解出了较优的基于 PID 控制与模糊控制的切削加工过程双模控制的控制器,有效地提升了对切削加工系统的控制性能。

关 键 词:控制器;双模控制; MATLAB 软件;PID 控制;模糊控制

中图分类号:TP273.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2895(2015)02-0061-04

Dual-Mode Control of Machining Process Based on PID Control and Fuzzy Control

SONG Xiaohua

(College of Mechanical Engineering, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China)

Abstract: In order to overcome the poor performance of the control systems established by single control strategy in the cutting process, a cutting process model of multiple systems in parallel was adopted. A dual-mode controller was designed based on combining the advantages PID control and fuzzy control. MATLAB software was used to simulate the system response of the control strategy and to optimize the parameters. An optimum cutting process controller of the dual-mode control strategy is obtained and the control performance of the system is effectively enhanced.

Key words: controller; dual-mode control; MATLAB software; PID control; fuzzy control

加工过程控制的发展是与控制理论、仪表、计算机以及有关学科的发展紧密相关的[1]。PID 控制策略不仅算法不复杂,而且鲁棒性良好,是控制论发展早期重点研究的控制策略。现在 PID 算法已经发展的比较成熟,而且随着计算机的大量使用,PID 算法的参数调整更加灵活方便,使得 PID 控制被广泛应用于切削加工过程控制中。在对切削加工过程控制的要求越来越高的今天,经过国内外学者的研究探索,PID 控制又得到了进一步的发展,产生了许多以之为基础的新的控制算法,例如模糊 PID 控制、自适应 PID 控制、智能 PID 控制等等[2]。

模糊理论的加工过程控制是基于模糊集合论和模糊逻辑推理等模糊数学的理论基础的一种控制策略[3]。模糊控制作为这几年来发展迅速的一种计算机控制方法,其本质是基于执行对模糊规则的控制,它是一种对控制对象数学模型的精确建立要求并不高的智能控制方法,尤其在对不确定系统和非线性系统的加工过程控制中表现出色。

1 建立加工模型

图 1 所示是最为常见的切削加工过程的模型,伺服机构、切削过程以及测力反馈是基本的切削加工过程最重要的几个环节[4]。

图 1 切削加工过程模型框图

Figure 1 Model diagram of cutting process

其中 n 为主轴转速/(r·min^{-1})。

伺服环节可以用一个二阶系统来表示:

收稿日期:2014-09-23;**修回日期**:2014-11-24

作者简介:宋晓华(1973),男,浙江衢州人,硕士,副教授,主要研究方向为机械设计制造及自动化。E-mail:290053590@qq.com

$$v_f = \frac{K_n \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} u_i 。$$

式中：s 为连续系统复域中的复数，即拉氏变换的算子；v_f 为进给速度/(mm · s^{-1})；u_i 为伺服输入/V；K_n 为伺服增益/(mm · V^{-1}s^{-1})；ω_n 为伺服系统的自然频率/(rad · s^{-1})；ξ 为阻尼系数；f 为进给量/(mm · r^{-1})。

静态的切削力 F_c 可表示为

$$F_c = K_c a f^m$$

式中：K_c 为切削比例/(N · mm^{-2})，m 为指数(一般 $m<1$)，二者均取决于工件材料和刀具形状；a 为背吃刀量/mm。

选取切削加工过程传递函数

$$\frac{v_f(s)}{u_i(s)} = \frac{0.6}{(\frac{s}{35}+1)} 。$$

而对于切削加工过程，可用一个变增益的一阶动态系统来表示为

$$\frac{F(s)}{v_f(s)} = \frac{K_g}{\frac{s}{b}+1} 。$$

式中：b 为极点；K_g 为增益，且与切削深度、切削宽度、转速和进给速度有关。具体的各项参数如表 1 所示，选取 5 组切削加工模型作为研究对象。

表 1 切削加工过程模型参数

Table 1 Model parameters of cutting process

模型	主轴转速/(r · min^{-1})	进给速度 v_f/(mm · min^{-1})	轴向切深/mm	径向切深/mm	增益 K_g	极点 b
G1	955	380	33.8	3.20	6 360	-5.0
G2	955	250	33.8	6.40	8 586	-2.8
G3	955	250	33.8	3.20	7 473	-4.0
G4	1 448	890	25.0	1.50	7 723	-2.6
G5	1 448	1 780	25.0	0.75	4 373	-7.0

得切削加工过程模型

$$\frac{F(s)}{u_i(s)} = \frac{0.6K_g}{(\frac{s}{35}+1)(\frac{s}{b}+1)} 。$$

2 双模控制

如图 2 所示是一个常规模糊控制器的设计，表现了加工过程的模糊控制原理[5]。根据模糊控制理论，图中 K_E，K_{E_C} 是量化因子，K_U 是比例因子，F_r 是切削力的设定值，F 是切削力的测量值。模糊逻辑最重要的语言变量 E，E_C 和 U 对应了误差 e、误差变化率 e_c 和控制量 u。本例中按照常规，令 E 和 E_C 作输入变量，U 作输出变量。

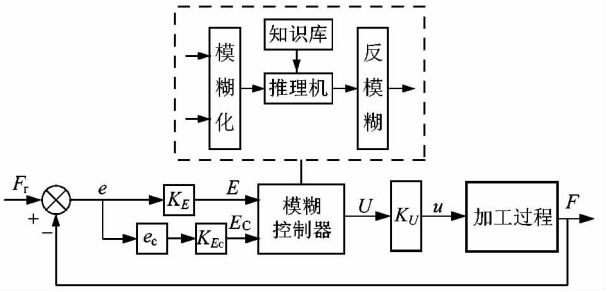

图 2 切削加工过程模糊控制原理图

Figure 2 Diagram of fuzzy control in cutting process

2.1 基于 PID 控制与模糊控制的切削加工过程双模控制原理

为了同时满足系统的动态与静态性能要求，传统的模糊控制中采用的固定的模糊规则或控制表实现起来比较困难，此时可利用模糊控制方法与其它控制方法相组合，提高系统的响应性能[6-7]。

将 PID 控制和模糊控制结合的控制方法有 2 种[8]：调整系统控制量的模糊 PID 控制器在大偏差时利用模糊推理法调整系统的控制量 u 在小偏差时转换成 PID 控制；模糊增益调整 PID 控制器，利用 Fuzzy 推理，根据系统所处的不同状态实现 PID 参数的在线自动整定，使系统在任何状态下，都能得到更好的控制效果和更强的鲁棒性[9]。

纯 PID 和纯模糊控制对于复杂的非线性系统都难以达到满意的效果。因此在切削加工过程中采用 PID 控制和模糊控制相结合的双模控制，控制系统框图见图 3。

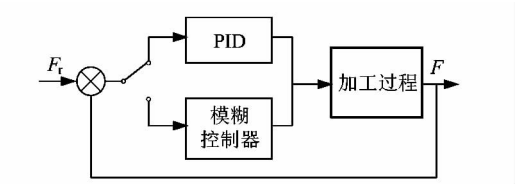

图 3 切削加工过程的控制系统框图

Figure 3 Block diagram of control system in cutting process

具体在系统的仿真过程中，设定主切削力 F_r = 800 N，当 $|e_c| \geq 80$ N(10% F_r)时，采用模糊控制；当 $|e_c| < 80$ N 时，采用 PID 控制。

对于 PID 控制部分，与纯 PID 控制时类似，通过试验调整方法来整定 PID 参数[10]，设定 $K_p = 0.01$，$K_i = 0.02$，$K_d = 0.000\ 08$。对于模糊控制部分，与纯模糊控

制时类似,通过试验调整方法来整定模糊控制参数[11],设定 $K_E=0.008\ 57$,$K_{E_C}=1E\text{-}5$,$K_U=0.2$。

实现 PID 控制与模糊控制相结合的双模控制如图 4 所示。图中 $|u|$ 在转换开关处设定值为 80 N。

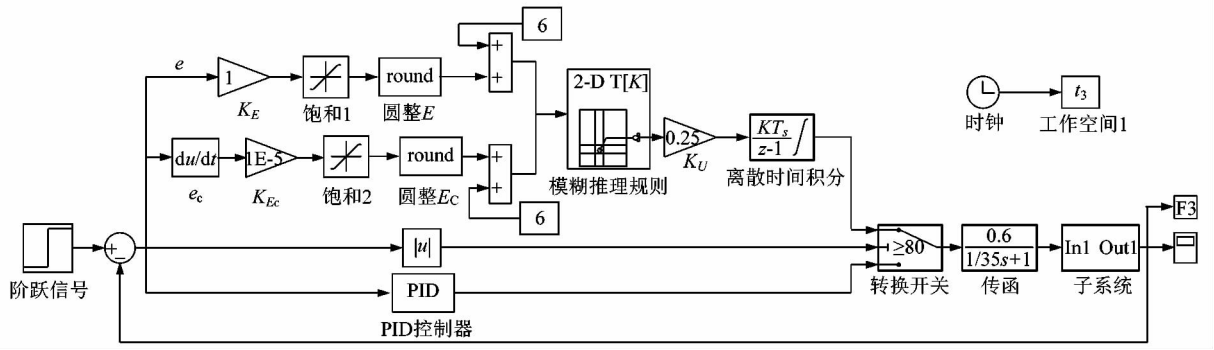

图 4　切削加工过程双模控制系统

Figure 4　Dual control system of cutting process

2.2　双模控制的调试

由于双模控制不同于前面 2 种单模控制方法,响应由于两者复合而变得更加复杂更容易产生超调和振荡,虽然 PID 和模糊控制的 6 个参数有一定的参考意义,但为了获得更好的控制效果还是要重新在原有基础进行参数调整。

为了对比双模控制的效果,将 PID、模糊和双模控制都设在同一个时间轴上,subsystem 中的 ramp 斜率都设为 0.04,仿真时间都设为 100 s。并在 3 个程序中分别加入 clock,获取时间 t_1,t_2,t_3,引出响应力 F_1,F_2,F_3 到状态空间。输入以下代码画图,得到图形如图 5 所示。

```
>>plot(t1,F1,'r-')
>> hold on
>>plot(t2,F2,'g-.')
>>plot(t3,F3,'b--')
>>grid
>>grid(gca,'minor')
```

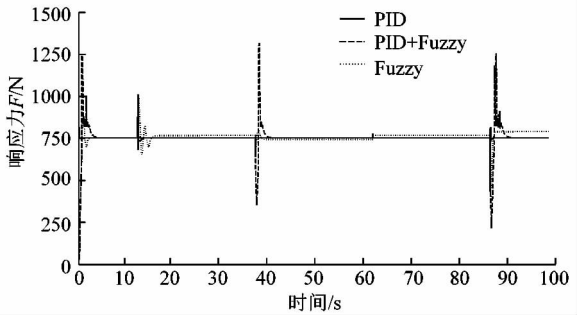

图 5　PID,FUZZY 和双模控制效果比较

Figure 5　Performance comparison of PID, fuzzy and dual contro

可以看到如果沿用原有的 6 个参数,双模控制的效果并不会比 PID 或模糊控制的效果更好。仍旧采用手动调节参数的方法,尽量加快收敛时间,减少超调,主要针对超调较为严重的情况对模糊控制的参数进行调节,手动调节参数至 $K_p=0.01$,$K_i=0.02$,$K_d=0.0000\ 8$,$K_E=1$,$K_{E_C}=1E\text{-}5$,$K_U=0.25$。再输入代码进行绘制,对比单模控制和双模控制,如图 6 所示。

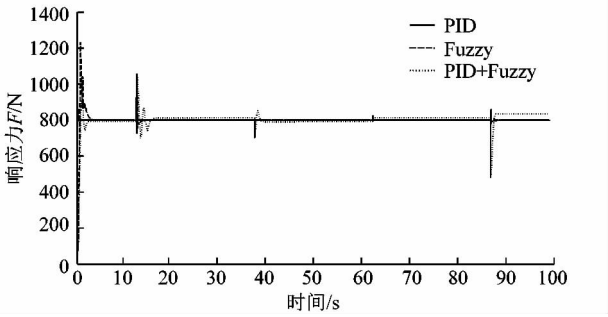

图 6　参数调整后 PID,FUZZY 和双模控制效果比较

Figure 6　Performance comparison of PID, fuzzy and dual control after parameter adjustment

可以看出双模控制性能明显变好,相比较单纯的 PID 控制和模糊控制而言,对于除了 G1 外的模型外系统的超调都更小,调整时间更短,稳态误差更小。基于双模控制的系统具有较小的超调量,较短的调节时间,良好的动、静态特性,更好的适应性和鲁棒性,系统响应性能明显要优于纯 PID 控制系统。

3　结论

本文实现了切削加工过程的 PID 控制和模糊控制相结合的双模控制。其中参数的整定是一个较为复杂而且不确定的过程,对于控制器的 6 个参数本文采用了从简单到复杂逐步接近优化参数的方法。通过对单

个模型的仿真初步确定参数,然后对 5 个模型的子系统调试进一步校正参数。通过对切削加工过程模型的单模控制来初步确定参数,然后在双模控制中进行求解从而校正参数。

通过讨论 PID 控制、模糊查表法、模糊推理法、双模控制各自的特点以及效果,采用了基于 PID 控制与模糊查表法的切削加工过程双模控制方法。双模控制结合了 PID 控制和模糊控制各自的优点,从而获得了针对特定切削加工过程模型更好的响应性能,更小超调量,更短调节时间,动静态特性和鲁棒性都得到了优化。

参考文献:

[1] 欧阳黎明. MATLAB 控制系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,2001.

[2] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用:第一讲 PID 控制原理和自整定策略[J]. 工业仪表与自动化装置,1997(4):60 - 64.

[3] MAMDANI E H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers,1974,121(12):1585 - 1588.

[4] 姚锡凡,常少莉. 加工过程的计算机控制[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[5] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[6] 赖兴余,叶邦彦,鄢春艳,等. 基于现场总线的铣削加工过程自适应模糊控制[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2005,43(5):7 - 10.

[7] 马云龙,章玮. 开关磁阻电机的模糊自适应简化控制[J]. 机电工程,2014,31(1):93 - 96.

[8] 张国良,邓方林. 模糊控制及其 MATLAB 应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.

[9] 李卓,萧德云,何世忠. 基于 Fuzzy 推理的自调整 PID 控制器[J]. 控制理论与应用,1997,17(2):238 - 243.

[10] 刘镇,姜学智,李东海. PID 控制参数整定方法[J]. 电子技术应用,1997(5):3 - 5.

[11] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995.

(上接第 60 页)

3 结语

低温测试是低温阀门生产过程中的重要环节,而先进的低温测试系统是这项工作顺利进行的重要保证。本文介绍的新型低温阀门性能自动测试系统,它综合利用计算机技术与先进测试技术,将两者有机结合,可使测试操作流程合理,测量参数多样且准确,工作场所安全,劳动强度低、以及冷媒和试验介质综合利用率大大提高。这一设计理念符合测试的自动化、高效化、绿色化要求,是未来低温阀门性能测试系统的发展方向。

参考文献:

[1] 童南青,王殿军,宗新. 阀门低温试验装置[J]. 阀门,2004(4):17 - 19.

[2] 刘先禹,霍金海. 低温阀门特点的探讨[J]. 广州化工,2009,37(5):197 - 199.

[3] 陆培文. 实用阀门设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[4] 陈国邦. 低温工程材料[M]. 杭州:浙江大学出版社,1998.

[5] 金滔,夏雨亮,洪剑平,等. 低温阀门冷态试验的动态传热过程模拟与分析[J]. 低温工程,2007(4):35 - 38.

[6] 张晓忠,陈佑军,金滔. 基于计算机数据采集的低温阀门性能测试装置[J]. 阀门,2010(10):184 - 189.

[7] 程三红,徐云奎,许敏影,等. 多路阀型式试验台的设计与开发[J]. 机电工程,2014,31(3):358 - 360.

[8] 刘雪. 基于单片机控制的步进电机控制器[J]. 数字技术与应用,2012(11):1 - 3.

[9] 陈居现,李英堂,李英勇. 基于步进电机的一种运动控制系统设计[J]. 电机与控制应用,2012,39(11):26 - 28.

[10] 秦志强. 现代传感器技术及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010.

[11] 尹志鹏. 铰链式气动夹紧机构的设计与应用[J]. 装备制造技术,2005(2):67 - 68.

[12] 朱新才,周雄,周小鹏,等. 液压传动与气压传动[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.

[13] 曹建东,龚肖新. 液压传动与气动技术[M]. 北京:北京大学出版社,2006.

[14] JIA L X, MOSLEMIAN D, CHOW W L. Cryogenic leak testing of tube fittings/valves [J]. Cryogenics,1992,32(9):833 - 839.

[15] JIN Tao, XU Bin, TANG Ke, et al. Bubble counter based on photoelectric technique for leakage detection of cryogenic valves [J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A,2008,9(1):88 - 92.