

# 精密球体研磨机压力控制系统设计\*

赵文宏, 楼一兵, 赵 蓉, 杨碧波

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**为解决传统自适应压力控制和 PID 压力控制下精密磨球机在磨球时出现的诸如响应时间长, 控制精度不够高、机械振动过大等问题, 将模糊控制技术应用到磨球机的压力控制中。开展了系统输入变量  $E$ 、 $EC$  和输出变量  $SV$  模糊化分析, 建立了 3 个模糊变量之间的关系, 提出了基于 DSP 芯片的压力模糊控制方法, 在 Matlab 软件的 Simulink 平台上对模糊控制系统性能进行了评价, 并进行了在该模糊系统控制下的偏心 and 双自转式球体研磨加工试验。试验结果表明, 该系统实现了快速响应, 并且减少了系统振动, 提高了压力控制的精度和球体研磨的效率。

**关键词:**系统设计; 模糊控制; Simulink

中图分类号: TH161; TH39; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)01-0111-04

## Design of pressure control system for grinding machine of precision ball

ZHAO Wen-hong, LOU Yi-bing, ZHAO Rong, YANG Bi-bo

(Ministry of Education & Zhejiang Province Key Laboratory of E&M,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that based on the traditional adaptive pressure control system and PID theory in eccentric and dual-rotation lapping machine for precision ball, such as long response time, low control accuracy, large system vibration, etc., the fuzzy control strategy was investigated. After the analysis of blurring input variables ( $E$ ,  $EC$ ) and output variable ( $SV$ ), the relationship of three variables was established. A method of fuzzy pressure control system was presented based on DSP chip. The fuzzy control system was evaluated on the Simulink platform of Matlab, the lapping machine for precision ball with fuzzy control system was tested. The experimental results show that the design can shorten response time, reduce system vibration and improve control accuracy and machine efficiency.

**Key words:** system design; fuzzy control; Simulink

## 0 引 言

精密球在现代工业领域和精密工程领域占有十分重要的地位, 精密轴承、滚珠丝杠、滚珠导轨等精密机械部件的精度、综合力学性能及寿命等指标很大程度上取决于球的精度<sup>[1-2]</sup>。浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室以袁巨龙为首的研究团队对精密球的加工进行了深入的研究, 原创性地提出了偏心成球方式和双自转成球方式。

这两种成球方式要依赖于球加工时磨盘压力的精确、高效控制, 对应的磨球机特别是用于粗磨的偏心式磨球机, 它的压力具有较大的时变性、非线性, 加上用于压力加载的机械传动机构有一定的滞后性<sup>[3]</sup>, 使得这类磨球机械在早期使用简单的压力自适应控制系统时, 出现系统响应慢、加工效率低、磨球球度差、机械振动很大等问题, 之后陈硕、赵文宏等研究人员采用了 PID 控制策略, 减少了设备的振动, 并在一定程度上改善了球度, 提高了材料去除, 但是其总的加工效果还不是十分理想, 未能满足精密加工的要求, 而模糊控制对

收稿日期: 2010-08-04

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y108685); 浙江省科技计划资助项目(2009C31019)

作者简介: 赵文宏(1969-), 男, 浙江浦江人, 教授级高级工程师, 主要从事单片机、控制系统算法和嵌入式系统方面的研究. E-mail: zwh2010@vip.sina.com

于这类非线性、时变及滞后系统有很好的控制效果<sup>[4-5]</sup>,基于此,本研究以偏心式磨球机和双自转磨球机为平台,设计了一种基于 DSP 芯片的模糊控制策略,实现磨球机压力的控制。

## 1 系统框架设计

本研究的系统框架如图 1 所示,由传感器、信号放大调理模块、控制芯片、显示报警设备、步进电机和上位机等部分构成,传感器、电荷放大、信号调理部分完成压力信号的采集,并送入 DSP 内部,DSP 芯片根据模糊控制规则做出判断,调整步进电机转速,同时进行显示,从而实现压力信号的检测和控制<sup>[6-10]</sup>。

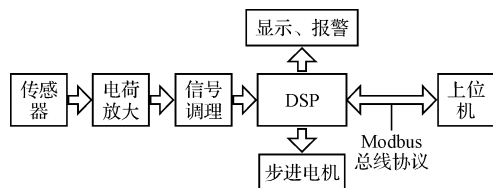


图 1 压力控制系统框图

压力大小的控制通过步进电机带动蜗轮蜗杆实现,另外 DSP 以 RS485 为接口使用 Modbus 协议与上位机实现通信,便于实现多台磨球机的信息共享和联网控制。

## 2 传感器和检测点的选择

本系统对传感器的特性参数(量程、灵敏度、温度等)和性能(密封性、防腐蚀等)要求较高,除此之外传感器是否适合安装也需要考虑。另外选择检测点时,应选择能真实、完整、敏感地反映所有球上压力信息的部位,并注意避开信号在传递通道上的空腔,减少信号在传递过程中的损失,此外选择的部位也应符合安全操作要求,适合安装。

根据以上这些原则,本系统的检测点选择在上磨盘压力加载块处,传感器选用轮辐式称重测力传感器,它与传统的拉压式传感器相比,具有精度高、滞后小、重复性好、线性好的特点,而且结构紧凑、密封可靠,性能稳定、抗偏心载荷和侧向力的能力强,可以较好地满足本设计要求,如图 2 所示。

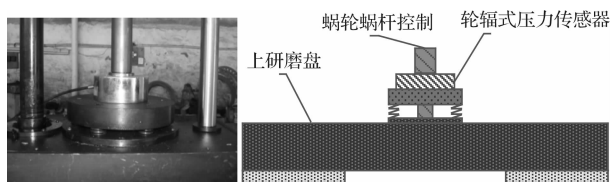


图 2 轮辐式称重测力传感器的安装

## 3 系统硬件设计

电路的硬件设计如图 3 所示,电源模块核心中,3.3 V 的 DSP 芯片电压由 TPS73HD318 电源芯片供给,传感器输入的信号经过放大和处理传送到 DSP 自带的 ADC,C28x 芯片自带的 ADC 为 12 位,共 16 路模拟输入通道,单个转换时间达 200 ns,有多种触发方式,可以较好地满足本设计要求。

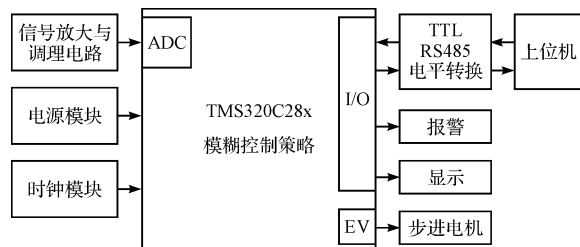


图 3 电路设计框图

信号的放大与调理电路核心主要采用了具有高共模抑制比、高输入阻抗、低噪声、低线性误差等优点的仪表放大器电路。电路的信号显示部分主要输出两个值:一个是实时采集的压力值;一个是设定的压力值。在真正大批量流水线磨球过程中,这两个值的查看是在上位机屏幕上进行的,电路中设计的显示部分,是为了便于系统的调试与检修。

控制系统对步进电机的控制,通过事件管理器模块 EV 完成,EV 是 C28X 系列 DSP 中用于外部事件处理和控制的模块,普遍应用于测控工业系统中的运动控制和电动机控制,其内部有 PWM 波产生电路,可方便精确地控制步进电机动作。

## 4 模糊控制器设计

DSP 内部模糊控制原理如图 4 所示,采用双输入单输出的控制系统。模糊控制的输入量为  $E$  (实时压力值与设定压力值之差) 和  $EC$  (压力差值变化率),输出量为步进电机的速度控制量  $SV$ ,下面根据磨球加工的要求,对磨球机模糊控制器进行设计。

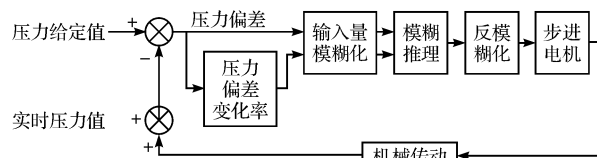


图 4 模糊控制原理图

### (1) 变量的模糊定义。

设定在传统的自适应压力控制磨球过程中,实时压力与设定压力偏差值  $E$  变化范围在  $[a, b]$  区间内,

对该区间应用转化公式:

$$y = \frac{6}{b-a} \left( x - \frac{b+a}{2} \right)$$

应用该公式对区间进行模糊分割,得到论域  $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ ,对应模糊语言为{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大},记为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},同样的过程也可以得到  $EC$  和  $SV$  的论域和模糊语言:

$EC$ :  $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ , {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}

$SV$ :  $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ , {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}

通过 Matlab 的 Fuzzy 命令和工具,设置  $E$ 、 $EC$ 、 $SV$  的隶属度函数(使用了三角型和高斯型两种),如图 5 所示。

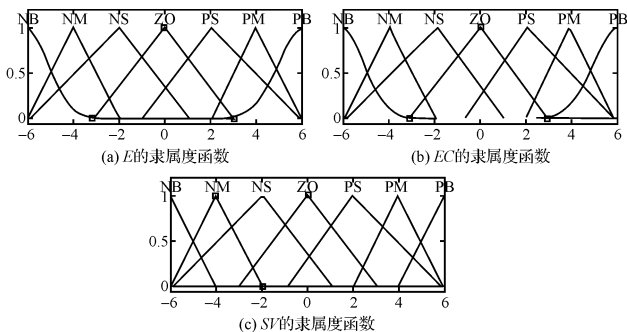


图5 输入/输出量的隶属度函数

### (2) 模糊推理规则与反模糊化。

模糊规则的建立依托于偏心式磨球和双自转磨球的工艺理论研究,共 49 条,如图 6 左方表格所示,这样,

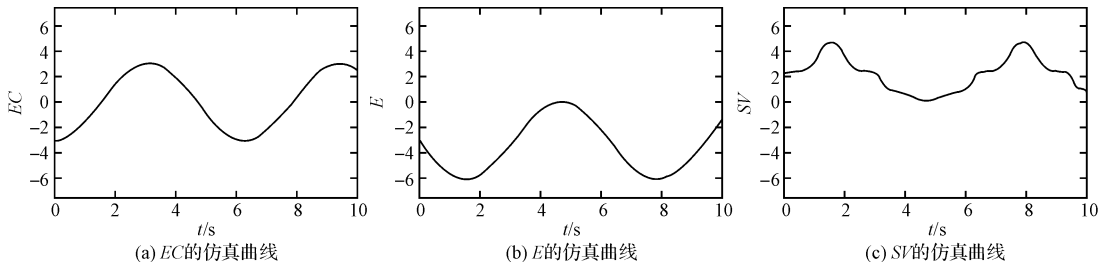


图8 模糊控制器仿真曲线( $E$ 、 $EC$ 、 $SV$ )

从曲线上可以看出,模糊控制器实现了压力控制的要求。为了进一步验证整个系统性能,本研究在 Simulink 中搭建了仿真平台,如图 9 所示,输入一个阶跃信号,作为加工压力值的设定,模糊控制器输出到传动机构模型,传动系统的输出接到系统输入端,以构成反馈。调节  $gain1$ 、 $gain2$  等参数,观察系统的响应情况,得到响应曲线,并与传统的控制方法下的系统响应作比较。

就得到了  $EC$  和  $E$  与  $SV$  的关系。

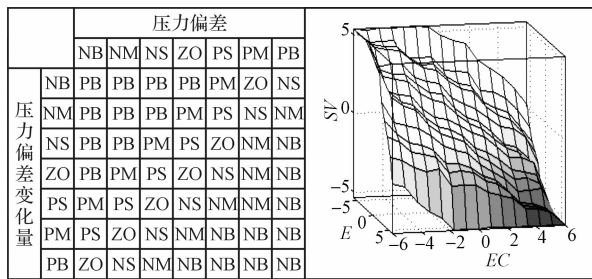


图6 模糊规则与曲面

要实现步进电机的控制,就要对  $SV$  进行反模糊化,亦即模糊决策过程,有最大隶属度法、中位数法、加权平均法、重心法等。考虑到这里压力控制的较高要求,采用重心法 centroid 为宜。如图 6 右侧所示为 Matlab 中输入/输出关系曲面。

## 5 仿真与实验

应用 Matlab 的 Simulink 工具,搭建模糊控制器功能仿真框架,如图 7 所示。正弦波波峰幅值为 3,与常数 3 叠加后作为模糊控制器的输入,调节  $gain1$ 、 $gain2$  的参数,最终得到的曲线如图 8 所示。

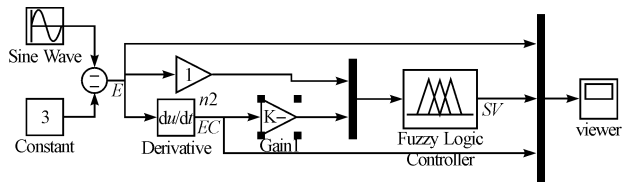


图7 模糊控制器的仿真

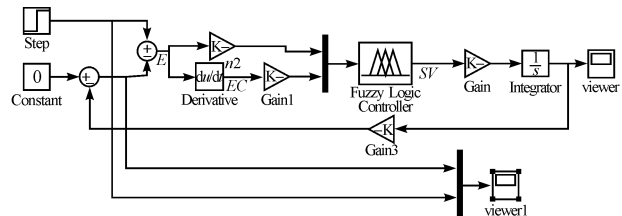


图9 控制系统的仿真

如图 10(a) 所示,即模糊控制系统的响应曲线,相

同输入条件和控制对象的 PID 控制系统响应曲线如图 10(b)所示,经比较可证明,模糊控制系统响应时间快,超调量小,比传统的 PID 磨球机压力控制的效果要好。

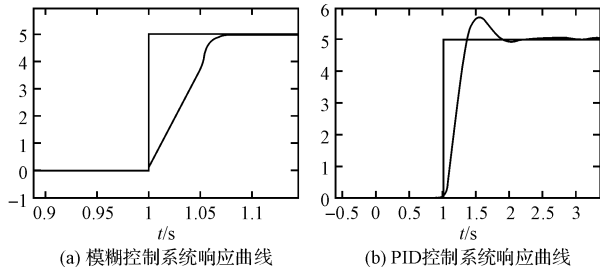


图 10 系统响应曲线

本研究进行偏心磨球和双自转磨球实验,并对两种控制系统的控制效果进行了比较,对比的双方所设定的上磨盘载荷相同,上下磨盘转速变化一致,磨削液材料浓度相同,所磨球来自同一批次。

在偏心磨球实验时,测得传统 PID 控制系统下材料去除率为 56  $\mu\text{m}/\text{h}$  左右,平均球度为 4.6  $\mu\text{m}$ ,而模糊控制系统下平均去除率为 60  $\mu\text{m}/\text{h}$  左右,平均球度为 4.3  $\mu\text{m}$ ;在双自转磨球实验中,测得传统 PID 控制系统下材料去除率为 13  $\mu\text{m}/\text{h}$  左右,平均球度为 2.0  $\mu\text{m}$ ,而模糊控制系统下平均去除率为 15  $\mu\text{m}/\text{h}$  左右,平均球度为 1.8  $\mu\text{m}$ <sup>[11-13]</sup>。

## 6 结束语

经过仿真与实验证明,模糊策略的引入提高了材料去除率,也改善了球度,由于系统响应较快,又达到了减少振动的效果,从而实现了提高加工效率和加工精度的目标,同时也延长了设备的使用寿命。

### 参考文献 (References) :

[1] YUAN Ju-long, WANG Zhi-wei, LV Bing-hai. Simulation

study on the developed eccentric V-grooves lapping mode for precise ball [J]. **Key Engineering Material**, 2006 (304-305):300-304.

[2] 周兆忠,赵 萍,陈苗青,等.精密球体研磨技术的现状与发展方向[J].新技术新工艺,2005(5):25-28.  
 [3] UMEHARA N, KIRTANE T, GERLICK R, et al. A new apparatus for finishing large size/large batch silicon nitride (Si3N4) balls for hybrid bearing applications by magnetic float polishing(MFP) [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2006, 46(2):151-169.  
 [4] YE Bin, ZHU Cheng-zhi, GUO Chuang-xin. Fuzzy modeling strategy for control of nonlinear dynamical systems[J]. **Lecture Notes in Computer Science**, 2005, 36(13):882-885.  
 [5] SALA A, GUERRA T M, BABUŠKA R. Perspectives off uzzzy systems and control [J]. **Fuzzy Sets and Systems**, 2005(156):432-444.  
 [6] 贾玉坤,胡克佳,王华东,等.基于 ATmega128 的高效精密球体研磨机控制系统[J].机电工程,2009,26(6):24-27.  
 [7] 武星星,朱喜林,李晓梅.模糊推理系统在 DSP 上的实现和优化[J].微计算机信息,2007(8):177-179.  
 [8] 陈晓龙. DSP 在现代测控技术中的应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2007.  
 [9] 王茂飞,程 昱. TMS320C2000DSP 技术与应用开发[M].北京:清华大学出版社,2007.  
 [10] 刘建辉,冀常鹏.单片机智能控制技术[M].北京:国防工业出版社,2007.  
 [11] 曲其飞.压力容器接管焊接过程中焊接质量的控制[J].现代制造技术与装备,2009(6):44-45.  
 [12] 刘 秉,刘 俊,张凯凯.交流伺服电机为动力的包装压力试验机设计[J].轻工机械,2010(1):67-69.  
 [13] 孟宏君,姜献峰.手柄曲向压力分布测试系统设计关键技术[J].轻工机械,2009(6):66-68.

[编辑:张 翔]

(上接第 89 页)

### 参考文献 (References) :

[1] 李 刚,林 凌,何 峰. AD $\mu$ C845 单片机原理、开发方法及应用实例[M].北京:电子工业出版社,2006.  
 [2] 马明建.数据采集与处理技术[M].2 版.西安:西安交通大学出版社,2005.  
 [3] 李 霖.高集成度热电偶温度变送器的研制[J].郑州轻工业学院学报,2000,15(1):37-40.  
 [4] 张 震,黄国辉,王 剑,等.高性能的工业通用型数据采集卡的研制[J].自动化仪表,2009(12):72-75.  
 [5] 陈玉林,徐 飞,杨永梅,等.新型热电偶温度测量仪的研制[J].实验室研究与探索,2009,28(4):31-33.

[6] 王建新,任勇峰,焦新泉.仪表放大器 AD623 在数采系统中的应用[J].传感器与仪器仪表,2007,23(3):169-170.  
 [7] 郭松林,张礼勇,林海军.  $\Sigma$ - $\Delta$ /D 转换器的原理与分析[J].电测与仪表,2002,11(39):21-24.  
 [8] 陈胜勇,张凯翔.多点温度采集控制系统的分析与研究[J].宁夏机械,2007(1):19-22.  
 [9] 陈旭灿,姜周曙,黄国辉.基于 AD $\mu$ C834 的低温测量仪表设计[J].工业与自动化装置,2009(2):96-98.  
 [10] Analog Devices, Inc. . MicroConverter, Dual 16 -/24 - Bit ADCs with Embedded 62 KB FLASH MCU AD $\mu$ C834 Datasheet[M]. Analog Devices, Inc. ,2002.

[编辑:李 辉]