文章编号:1007-144X(2009)06-0933-04

文献标志码:A

基于 DSP 的磁悬浮球模糊 PID 数字控制器

邱 洪,黄苏丹,曹广忠

(深圳大学 机电与控制工程学院,广东 深圳 518060)

摘 要:给出了磁悬浮球系统的工作原理及其数学模型,阐述了模糊 PID 控制器的设计方法,设计了以 DSP 为核心的磁悬浮球模糊 PID 数字控制器并进行实验,实现了钢球的稳定悬浮。结果表明,该系统具有良好的 控制效果。

关键词:磁悬浮球系统;模糊控制;DSP;TMS320F2812 中图分类号:TP273

磁悬浮技术已被广泛应用于工业、交通等领域,磁悬浮球系统是研究磁悬浮控制的最好模型 之一。目前,磁悬浮球的控制方法主要有 PID 控 制、模糊控制和滑模控制等。相关文献表明^[1-3], 模糊 PID 控制器在磁悬浮球控制上的应用研究大 多仍处在仿真研究阶段。笔者研究了基于 DSP 的磁悬浮球模糊 PID 控制器并实现了稳定悬浮, 为基于 DSP 的模糊 PID 数字控制器在磁悬浮系 统中的工程化应用奠定了良好基础。

1 磁悬浮球控制系统

1.1 磁悬浮球工作原理

磁悬浮球系统由光源、硅光电池位置传感器、 电流驱动器、电磁铁和钢球组成,如图1所示。



图1 磁悬浮球系统示意图

光源正对照射在硅光电池位置传感器上,当 把钢球放入有效区域后,硅光电池位置传感器随 小球所处垂直方向的位置不同而输出相应位置的 DOI:10.3963/j.issn.1007-144X.2009.06.020

电压信号,该位置信号将由控制器进行采集。经 过控制算法,控制器输出电流驱动器的控制指令, 通过驱动器控制电磁铁的线圈电流大小,使之对 钢球产生相应的电磁力。通过控制器不断地检测 钢球位置以及输出控制指令,从而使钢球处在一 个稳定的悬浮状态。

1.2 数学模型描述

磁悬浮系统输入输出传递函数可描述为:

$$G(s) = \frac{U_{\rm OUT}}{U_{\rm IN}} = -\frac{k_{\rm s}/k_{\rm a}}{Ms^2 - N}$$
(1)

式中, U_{IN} 为功率放大器的输入电压; U_{OUT} 为经传感器后处理电路输出电压; k_s 为系统光电传感器线性化后的系数; k_a 为系统功率放大器系数。 $M = i_0/(2g)$; $N = i_0/x_0$;g为重力加速度; x_0 为平衡点处(钢球的电磁力和重力合力为零)钢球质心与电磁铁磁极之间的气隙; i_0 为平衡点处电磁铁绕阻中瞬时电流。

实际参数代入式(1)后,得出系统的 U_{IN}到 U_{OUT}之间的传递函数为:

$$G(s) = \frac{77.8421}{0.0311s^2 - 30.5250}$$
(2)

2 模糊 PID 控制算法设计

2.1 模糊 PID 控制器基本结构及其算法流程

磁悬浮球系统是典型的非线性迟滞系统,难 以获得精确的数学模型,传统的 PID 控制器并不

收稿日期:2009-09~27.

作者简介:邱 洪(1984-),男,广东韶关人,深圳大学机电与控制工程学院硕士研究生。

基金项目:广东省产学研合作科研基金资助项目(2007B090400056);深圳市科技计划基金资助项目(08exy-31);深圳大学科研基金资 助项目(200734).

能获得高性能的控制效果,针对这一缺点,各种改 进型的 PID 控制器开始成为应用研究的热点,基 于模糊逻辑的 PID 控制器的设计与仿真是研究热 点之一^[4-5]。

模糊控制适合于对难以建立被控对象的数学 模型的复杂系统进行控制。模糊 PID 在常规 PID 的基础上加设模糊参数自整定控制器,使其根据 系统偏差的大小、方向以及变化趋势等特征,通过 模糊推理机做出相应决策,在线调整 PID 的 3 个 参数。模糊控制器、模糊 PID 控制器的基本结构 和系统模糊 PID 控制算法流程分别如图 2、图 3 和图 4 所示。



图 2 模糊控制器基本结构



图 3 模糊 PID 控制器基本结构



图 4 系统模糊 PID 控制算法流程图

2.2 系统输入输出变量

选取反映小球位置的光电传感器输出电压与 目标参考位置电压之间的偏差 e 和偏差变化率 ec 作为模糊控制器的输入变量,输出量为 PID 参数的修正量 ΔK_{p} 、 ΔK_{i} 和 ΔK_{d} 。它们之间的语言变量、基本论域、模糊子集、模糊论域和量化因子关系如表 1 所示。

表1 模糊 PID 参数表

变量	е	ec	ΔK_p	ΔK_{i}	$\Delta K_{\rm d}$					
语言变量	Ε	EC	$\Delta K_{\rm p}$	ΔK_{i}	ΔK_{d}					
基本论域 [-1010] [-1010] [-0.10.1] [-0.0010.001] [-33]										
模糊子集	[NB NM NS ZO PS PM PB]									
模糊论域	[-33]	[-33]	[-0.10.1]	- 0. 001 0. 001][-33]					
量化因子	0.3	0.3	1.0	1.0	1.0					

2.3 模糊 PID 各变量的隶属函数

模糊 PID 各变量 $e_{x}ec_{x}\Delta K_{p},\Delta K_{i},\Delta K_{d}$ 的隶属 函数均采用三角隶属函数,根据表 1 可得到其对 应的隶属函数,限于篇幅只给出 *E* 的隶属函数, 如图 5 所示。



2.4 PID 参数的模糊控制规则

分析在不同时刻的 e 和 ec 对 PID 参数进行 相应调整,通过总结工程技术人员的实际操作经 验,可以得到 K_p 、 K_i 和 K_d 的模糊规则表,限于篇 幅只给出 K_p 的模糊控制规则表^[6],如表 2 所示。

表 2 ΔK_p 模糊控制规则表

E	NB	NM	NS	ZO	PS	РМ	РВ	
NB	PB	PB	РМ	РМ	PS	ZO	ZO	
NM	PB	PB	РМ	PS	PS	ZO	NS	
NS	РМ	РМ	РМ	PS	ZO	NS	NS	
ZO	РМ	РМ	PS	ZO	NS	NM	NM	
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	
РМ	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB	

2.5 模糊推理和解模糊化

根据得出的模糊规则表,对 $e \ \pi ec$ 经过取小运算的模糊推理以及加权平均法的解模糊化运算后,可以得出系统相应的模糊输出 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 和 ΔK_d 。最后得出系统 PID 参数的输出值为:

$$K_{\rm p} = K_{\rm p0} + a\Delta K_{\rm p} \tag{3}$$

$$K_{\rm i} = K_{\rm i0} + b\Delta K_{\rm i} \tag{4}$$

$$K_{\rm d} = K_{\rm d0} + c\Delta K_{\rm d} \tag{5}$$

式中,a、b、c分别为 ΔK_{p} 、 ΔK_{i} 、 ΔK_{d} 的比例因子; K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 分别为 K_{p} 、 K_{i} 、 K_{d} 的初始值; ΔK_{p} 、 ΔK_{i} 和 ΔK_{d} 为模糊控制器输出值。

3 硬件设计

TMS320F2812 是 TI 公司生产的目前控制领 域性能较高的 DSP,其最高时钟频率可达到 150 MHz,能满足控制算法计算的实时性要求。片上 集成一个 12 位带流水线的 16 通道 ADC 模块,其 最高采样时钟可配置为 25 MHz^[7-8],可以对磁悬 浮球位置传感器的输出信号进行实时采集。

由于磁悬浮球系统中电流驱动器是以电压信 号作为其输入指令,而TMS320F2812芯片内部并 不自带 D/A 模块,因而需要对其外扩 D/A芯片。 本设计中所采用的 D/A芯片是 BB 公司生产的 DAC7724,该芯片为4 通道 12位双缓冲 D/A芯 片,输出的模拟信号范围为0~10V。DAC7724 片选及 DAC 转换的控制由一片 CPLD芯片进行 控制。系统硬件结构框图如图6所示。



4 实验结果

4.1 信号滤波

TMS320F2812 的 A/D 模块虽然有 12 位精 度,经实验证明,该模块自身存在增益和偏移的误 差,需对采样结果进行数字滤波,笔者采用中位值 滤波算法,其原理为连续采样 N 个数据,将其按 大小排列,仅取其中间值为本次滤波结果的有效 值。笔者对 A/D 的直接采样结果连续进行两次 滤波,系统滤波效果如图 7 所示。

从图7可以看出,在滤波前,F2812 对一稳定 输入信号的直接采样结果最大偏差程度可达到 1.3 V,经两次滤波后,系统采样结果的偏差范围 在0.06 V以下,实验结果表明,该精度满足系统 悬浮控制要求。

4.2 实时控制效果

图 8 为基于 F2812 的磁悬浮球控制器结构框





图9 实验平台

图 10(a)为系统实现悬浮后的实际效果图, 图 10(b)为钢球在其悬浮过程中某一段时间内基 于 F2812 控制的系统稳态输出的位置变化曲线, 系统输入的参考位置电压为1 V。



图 10 基于 DSP 的磁悬浮球系统实际控制效果图

实验结果表明,笔者所设计的基于 DSP 的磁 悬浮球控制系统能实现钢球的稳定悬浮,系统有 较好的控制效果。

5 结论

设计了基于 TI 公司 DSP 器件 TMS320F2812

的磁悬浮球模糊 PID 控制器,实验过程中通过进 行两次中位值滤波解决了该型号 DSP 普遍存在 的内部 A/D 转换结果误差较大的问题,探讨了模 糊控制器的设计方法,对所设计的 DSP 模糊 PID 数字控制器进行了实际磁悬浮球系统控制实验, 实现了钢球的稳定悬浮,控制效果良好,为基于 DSP 的模糊 PID 数字控制器在磁悬浮系统中的工 程化应用奠定了良好基础。

参考文献:

- [1] 苏奎峰. TMS320F2812 原理与开发[M]. 北京:电子 工业出版社,2006:32-63.
- [2] 廉小亲. 模糊控制技术[M]. 北京:中国电力出版 社,2003:21-53.
- [3] 刘德生,尹力明,佘龙华. Fuzzy PID 控制算法在磁 悬浮系统中的应用[J]. 计算机测量与控制,2002 (10):54-56.
- [4] 宋召青.磁悬浮球实验系统的模糊控制仿真[J].计 算机仿真,2002(11):63-65.
- [5] 刘样. 一种基于 D S P 的磁悬浮模糊控制系统的研究[J]. 仪器仪表标准化与计量,2003(5):22-24.
- [6] 蔡自兴.智能控制原理与应用[M].北京:清华大学 出版社,2007:5-21.
- [7] Texas Instrument. TMS320F2810, TMS320F2812 digital signal processors data manual[DE/OL]. [2009 - 09 - 27]. http://focus. ti. com/docs/prod/folders/print/ tms320f2812. html.
- [8] Texas Instrument. TMS320F28X DSP analog to digital converter(ADC) reference guide[DE/OL]. [2009 -09 - 27]. http://focus.ti.com/general/docs/litabsmultiplefilelist.tsp? literatureNumber = spru060d#.

Development of Fuzzy PID Controller for Magnetic Levitated Ball System Based on DSP

QIU Hong, HUANG Sudan, CAO Guangzhong

Abstract: The working principle and the mathematic model were presented for the magnetic levitated ball system. Design method for the fuzzy PID controller was introduced. Based on core of DSP, a digital controller for the fuzzy PID was designed for the magnetic levitated ball system. Practical experiments were carried out for the controller. Experimental results demonstrated the ball had been levitated steady and the system had a good control performance.

Key words: magnetic levitated ball system; fuzzy control; DSP; TMS320F2812

QIU Hong: Postgraduate; School of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China.