

A Detect and Control System for Micro Gyroscope with Levitated Rotor Based on DSP*

LIU Kai, ZHANG Wei-ping*, CHEN Wen-yuan*, ZHOU Hai-jun, XIAO Qi-jun, MA Gao-yin, LI Kai

(Key Laboratory of Thin Film and Micro Fabrication Technology, Key Laboratory of State Defence
(Micro-Nano Fabrication, Research Institute of Micro-Nano Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China))

Abstract: This thesis develops a visual control system for micro gyroscope with levitated rotor based on DSP. The system with Incremental PID control algorithm controller based on the development platform of VC33 DSP programs application codes about the peripheral chips of VC33 DSP. This system mainly includes the following parts: A visual interface is programmed using VC++. Communication in PC and DSP is attained by programming application codes to develop PCI chip. Using the specific assembly language for VC33, input and output of data are achieved. Provided by the testing, Incremental assembly function can run effectively. It lays the foundation to complete the detection of levitation and rotation for the micromachined electrostatically suspended gyroscope.

Key words: micro gyroscope; detect and control system; digital signal processor(DSP); electrostatic levitation; rotor

EEACC: 7630; 2575

基于 DSP 的静电悬浮转子微陀螺测控系统*

刘凯, 张卫平*, 陈文元*, 周海军, 肖奇军, 马高印, 李凯

(上海交通大学微纳科学技术研究院 薄膜与微细加工教育部重点实验室微米/纳米加工国防实验室, 上海 200030)

摘要: 开发了一种基于数字信号处理器(DSP)的静电悬浮转子微陀螺的可视化闭环测控系统。该系统是在 VC33DSP 平台下, 采用增量式 PID 算法控制器, 对 VC33DSP 开发系统的外设 A/D、D/A 和 PCI 芯片进行编程应用。具体为使用 VC++ 编写可视化界面, 对 PCI 芯片编程实现 DSP 与 PC 之间通信, 使用 VC33DSP 汇编语言编程实现数据的输入输出。经编程测试, 增量式汇编函数能够有效运行, 为静电悬浮转子微陀螺的悬浮、旋转等检测控制实现奠定了一定的基础。

关键词: 微陀螺; 测控系统; 数字信号处理器; 静电悬浮; 转子

中图分类号: V241.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2009)02-0190-05

悬浮转子微陀螺是一种不同于振动微陀螺的能够实现高精度多轴惯性测量的新型 MEMS 陀螺。在惯性导航与制导、微机器人控制、汽车安全、虚拟现实等军民领域应用前景广阔。悬浮转子式微陀螺可分为磁悬浮转子微陀螺和静电悬浮转子微陀螺。其中, 磁悬浮转子微陀螺由于电磁发热, 空气的粘滞转矩, 薄铝转子侧向支承刚度低等问题影响转子转速的提高^[1-2]。而静电悬浮转子微陀螺由于其具有低功耗、高精度、低温漂等特点, 已经成为各研究单位的研究热点^[3]。

由于静电悬浮微陀螺是差分电容结构^[4], 检测陀螺角速度和线加速度被转化为检测相应的差动电容。同时, 使用高频载波信号将陀螺信号输出, 经过前置放大、带通滤波、同步解调和低通滤波来实现对陀螺信号的解调输出。但是, 使用模拟电路的方法进行滤波处理需要提供同频的参考信号用于解调, 以及在滤波和反馈控制中都需要使用运算放大器等模拟器件, 从而容易造成频率误差和相位误差^[5], 影响了静电悬浮转子微陀螺检测精度和控制精度的提高。随着数字信号处理技术的发展和 DSP 芯片性

能的提高,可以使用 DSP 芯片来实现滤波和反馈控制^[6]。本文将使用 TMS320VC33PS DPS(以下简称 VC33)开发系统来开发基于 DSP 的静电悬浮转子微陀螺的滤波检测和 PID 反馈控制系统,以充分利用数字处理技术来提高静电悬浮转子微陀螺的检测精度和控制精度。

1 数字检测控制系统的原理及组成

根据 DSP 处理能力以及静电悬浮转子微陀螺的特点采用数字无限脉冲滤波算法(IIR)和增量式 PID 数字控制算法。

1.1 系统原理组成

图 1 是静电悬浮转子微陀螺闭环测控系统工作原理图。数字检测控制系统主要包括:经陀螺信号调制的载波信号、A/D 采集、DSP 中进行滤波和 PID 控制的数字信号处理、使用 PCI 芯片 CY7C09449PV 将 DSP 与 PC 机进行通信、将经 DSP 处理过的数据通过 D/A 通道实时输出。

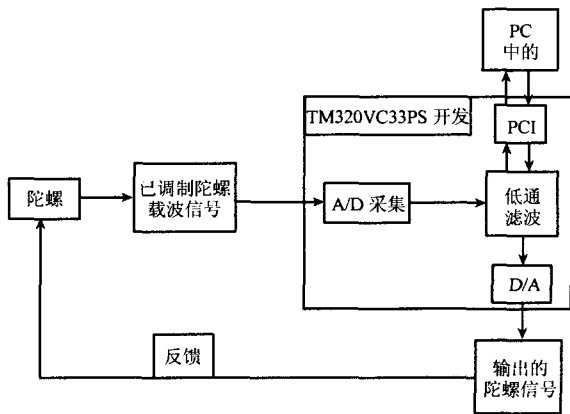


图 1 静电悬浮转子微陀螺闭环测控系统原理框图

1.2 IIR 数字低通滤波器原理

一个 N 阶 IIR 系统的传递函数可表示为:

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad (1)$$

其差分方程为:

$$y(n) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) - \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) \quad (2)$$

设计一个 IIR 数字低通滤波器就是设置一组 a_k, b_k 参数使得低频信号能够被提取出来。在这里选择切比雪夫 I 型(Chebyshev-I)滤波器来设计低通滤波器。

图 2 是用 Matlab 仿真的方法获取一组 a_k, b_k 。假设模拟信号的采样频率为 100 kHz,输入信号频率为 10 kHz 和 50 Hz;3 阶切比雪夫 I 型低通滤波

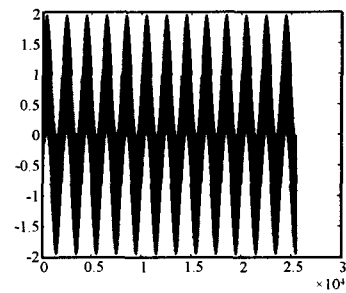
器的截止频率为 $\omega_n = 100$ Hz,通带纹波为 $R_p = 0.1$ dB,通过所设计的滤波器将原始信号中的 10 kHz 的正弦信号滤掉,留下频率为 50 Hz 的信号,达到滤波效果。使用的切比雪夫函数:

$$[b_1, a_1] = \text{CHEBY1}(3, 0.1, \omega_{nl})$$

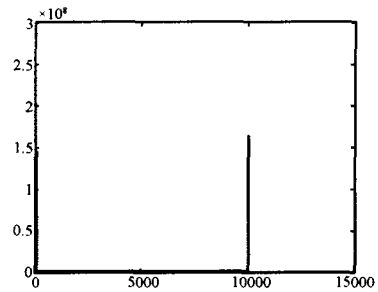
所得滤波参数为:

$$b = [5.04815e-008 \ 1.51444e-007 \ 1.51444e-007 \ 5.04815e-008]$$

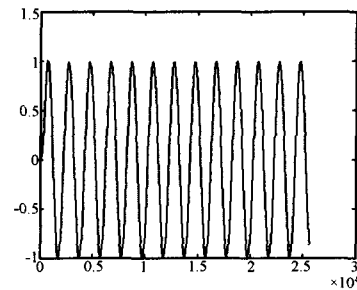
$$a = [1.00000e+000 \ -2.98779e+000 \ 2.975687e+000 \ -9.878921e-001]$$



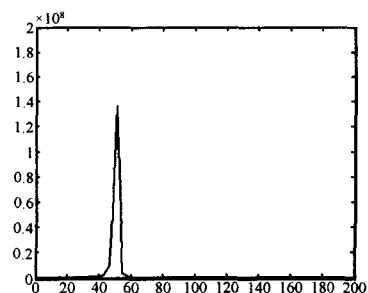
(a) 时域滤波前



(b) 频域滤波前



(c) 时域滤波后



(d) 频域滤波后

图 2 切比雪夫 I 型滤波前后分别在时域与频域比较

1.3 数字增量式 PID 控制原理

图 3 为 PID 控制的原理图。

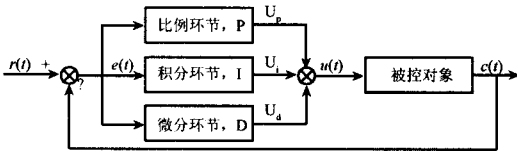


图 3 PID 控制器的原理框图

对于静电悬浮转子式微陀螺, $r(t)$ 为转子处于转动平衡位置时相对应的电压, $c(t)$ 为陀螺的实际检测到的电压值, $e(t)$ 是输入控制器的偏差信号, $u(t)$ 是控制器输出的控制量, 则 PID 控制算式如式 (3):

$$u = K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e dt + K_p T_d \frac{de}{dt} \quad (3)$$

K_p 是比例系数, 起比例调整作用。 T_i 是积分时间常数, 它决定了积分作用的强弱。 T_d 是微分时间常数, 它决定了微分作用的强弱。

PID 控制的离散形式^[7]:

$$u(k) = K_p e(k) + \frac{K_p T_s}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + K_p T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (4)$$

其中 T_s 为采样周期。对于增量式 PID 控制算式, DSP 只输出控制量 $u(k)$ 的增量 $\Delta u(k)$ 。

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + \frac{K_p T_s}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + K_p T_d \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T_s} \quad (5)$$

所以增量式 PID 控制算式为:

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + \\ &\frac{K_p T_s}{T_i} e(k) + K_p T_d \frac{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)}{T_s} = \\ &(K_p + K_i + K_d) e(k) + (-K_p - 2K_d) e(k-1) + \\ &K_d e(k-2) \end{aligned} \quad (6)$$

令式中的系数为:

$$\begin{aligned} A &= (K_p + K_i + K_d) \\ -B &= -(K_p + 2K_d) \\ C &= K_d \end{aligned} \quad (7)$$

则可表示为:

$$\begin{cases} \Delta u(k) = A \cdot e(k) - B \cdot e(k-1) + C \cdot e(k-2) \\ u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \end{cases} \quad (8)$$

增量式 PID 控制只输出增量, 减少了 DSP 误操作时对控制系统的影响, 而且不会产生积分失控。

2 测控试验系统

2.1 软硬件系统

CC^[8] (Code Composer) 开发软件是 TI 推出的

用于开发其 DSP 芯片的集成开发环境, 它集编辑、编译、链接、软件仿真、硬件仿真等功能于一体, 极大地方便了 DSP 程序的设计和开发。

DSP 开发系统是 TI 推出的 TMS320VC33 处理器。它具有 150MFLOPS 的运算能力, 可扩展 1M · 32bit 的 RAM, 适合大批量的数据处理, 自带 256k · 32bit FLASH 存储器, 可以存放程序与重要的数据。另外, VC33 浮点 DSP 处理芯片的多达 32bit 输入, 16bit 输出, 适合静电悬浮转子微陀螺的检测的需求, 而且其浮点运算功能相对于定点 TMS320F2812, 数据处理的精度会有很大的提高。

在该实验系统中使用到的外设主要有 A/D 芯片、PCI 芯片和 D/A 芯片。A/D 芯片主要用于将外部的模拟信号转换为数字信号, 用于 VC33 处理器对数据进行数字信号处理。PCI 芯片主要用于 DSP 和 PC 机之间的通信, 是该实验系统的核心所在, 通过 PCI 芯片能够实现上位机 PC 对下位机 VC33 的控制。D/A 芯片是将处理好的数字信号转换为模拟信号用于后续的输出使用。我们分别采用 4 片 MAX125 A/D 芯片、DAC7724 D/A 芯片、CY7C09449PV^[9] 3 个 PCI 芯片来实现系统的信号转换和通信。

2.2 系统试验图

整个基于 DSP 的静电悬浮转子微陀螺的试验系统如图 4 所示, 包括前置级 PCB 板、仿真器、PCI 卡 (DSP 板), 其连接关系为前置级 PCB 板连接到 VC33DSP, VC33DSP 经仿真器与 PC 相连, 并且将 VC33DSP 板卡插入 PCI 插槽, 实现与 PC 通信。

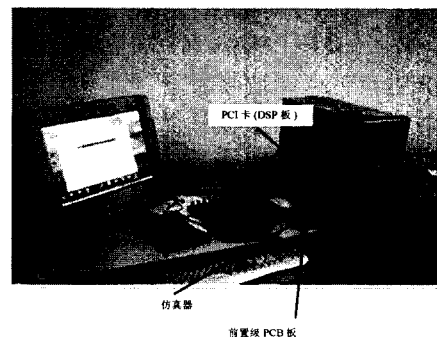


图 4 测控系统连接图

3 编程测试

图 5 显示了整个测控系统软件编程的流程图^[10]。整个程序的运行是由上位机 PC 控制的, 主要为在上位机的 VC++ 程序中向 DSP 发送开启 A/D 采集指令、PID 启动和参数数据、A/D 采集中止、测试 PCI 运行指令、测试 SRAM 运行指令、DSP

复位指令等来控制程序的运行,并能在上位机中根据需要实时的显示下位机的运行情况。在硬件上上位 PC 机与 DSP 通过 CY7C09449PCI 芯片来进行桥接。

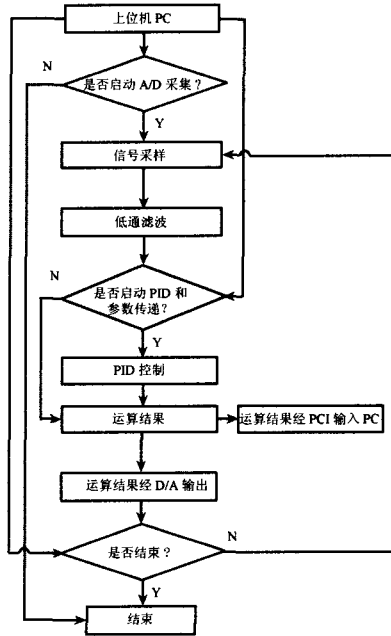


图 5 系统软件流程图

图 6 给出了测试 PCI 运行正常时的结果显示,图 7 是上位机工作的可视化界面。

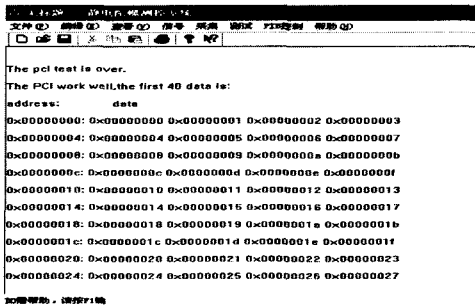


图 6 PCI 测试结果

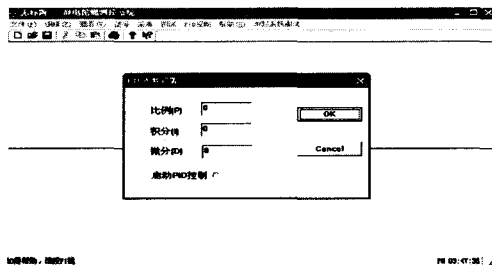


图 7 上位机 PC 可视化工作界面

4 实验结果

信号通过 A/D 采集,经 PCI 芯片进入 PC 机中显示为图 8,信号源频率为 500 Hz。然后进行 PID 处理,PID 的参数分别为比例系数为 1,积分系数为

0.1,微分系数为 0.01。由于从上位机 PC 向下位机传递浮点数未能实现,故先将参数放大 1000 倍,然后在 DSP 程序中再除以 1000,实现浮点参数传递。在电脑可视化界面中输入 PID 的各参数,图 9 为 PID 处理后的结果显示。

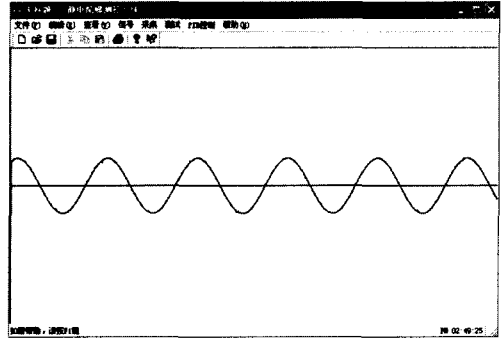
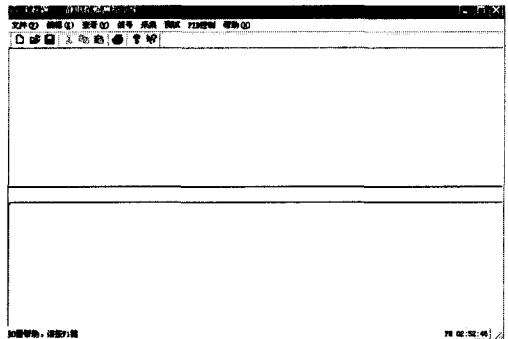
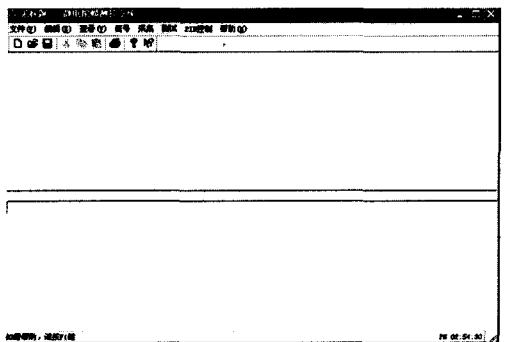


图 8 在 PC 中显示的由 A/D 采集的数据



(a) 放大 1000 倍的稳态结果



(b) 正常情况下的稳态结果

图 9 PID 处理结果

PID 处理后,很快达到稳态结果。可见,增量式汇编函数能够有效的运行,不过为了获取更好的效果,还需要对 PID 参数进行更好的调试。

5 结论

经过编程控制实验表明,PID 控制器的参数可以便捷地修改,且能实时地掌握控制器的效果,从而通过不断调试获得更好的结果。可视化的控制的优点在于能及时掌握控制效果,并根据需要及时调整控制参数。无论对于信号检测还是闭环控制,通过

对检测和控制算法的复制修改就能实现多路检测和控制,方便了静电悬浮转子微陀螺的多路检测和控制。这对静电悬浮转子微陀螺的悬浮、旋转等实现提供了一种有效的方法。

参考文献:

- [1] 张卫平, 陈文元, 赵小林等. 悬浮转子式微陀螺技术关键、创新设计和最新进展[J]. 功能材料与器件学报, 2008, (03): 721-728.
- [2] Zhang Weiping, Chen Wenyuan, Zhao Xiaolin, et al. The Study of an Electromagnetic Levitating Micromotor for Application in a Rotating Gyroscope[J]. Sensors and Actuators A 132, 2006; 651-657.
- [3] 肖奇军, 崔峰等. 静电悬浮转子微陀螺悬浮控制系统的研究[J]. 传感技术学报. 2008, 21(2): 346-349.
- [4] 崔峰, 苏宇锋, 张卫平等. 静电悬浮转子微陀螺[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(6): 62-67.
- [5] 余新平. 频率误差和相位误差在同步解调中的失真分析[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(3): 131-132.
- [6] 周海军, 黄晓刚等. 基于 DSP 的悬浮转子微陀螺数字幅度解调[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(11): 36-38.
- [7] 汪安民等. DSP 应用开发子程序[M], 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [8] 杜普选, 马庆龙. 实时 DSP 技术及浮点处理器的应用[M]. 北京-清华大学出版社; 北京交通大学出版社, 2007. 1.
- [9] Data Sheet for MAX125, DAC7724, CY7C09449PV, MAXIM, Inc.
- [10] 周海军. 静电悬浮转子微陀螺 DSP 测控技术相关问题的研究[D]. 上海交通大学硕士论文. 2008. 2.



刘凯(1984-),男,山东肥城人,上海交通大学微纳米科学技术研究院硕士研究生,主要从事 MEMS 系统集成方面的研究,liukai1984@sjtu.edu.cn



陈文元(1944-),男,上海交通大学微纳米科学技术研究院博士生导师。近年来主要从事微惯性器件、MEMS 信息安全技术、微流控系统、微仿生飞行机器人等方面的研究。在国内外发表论文 60 多篇,申请专利 10 多项,获国家技术发明二等奖 2 次,省部级一等、二等奖多次,chenwy@mail.sjtu.edu.cn



张卫平(1971-),男,上海交通大学微纳米科学技术研究院副教授,硕士生导师,博士生导师。多年来一直从事微机电系统、精密仪器及其相关技术的研究,先后主持或参与多项国家和省部级课题。在国内外学术期刊或会议上发表论文 60 余篇,申请专利 40 余项,授权专利 10 余项。2004 年获北京市科技进步二等奖,2005 年获军队科技进步二等奖,2005 年获上海市科技进步三等奖,2006 年机械工业科技进步二等奖,2006 年高等学校技术发明一等奖,2006 年高等学校专利一等奖,2007 年获上海市技术发明一等奖,2007 年第十届中国专利优秀奖,2008 年国家技术发明二等奖,zhangwp@sjtu.edu.cn