

基于 DSP 的静电悬浮微陀螺模拟伺服系统的研究

应法明¹, 肖奇军^{1,2}, 崔峰¹, 陈文元¹, 张卫平¹, 刘武¹

(1. 上海交通大学微纳科学技术研究院, 上海 200030; 2. 广东肇庆学院电子信息与机电工程学院, 广东肇庆 526061)

摘要:采用 TI 公司的浮点式 TMS320VC33 DSP 开发系统, 用于静电悬浮转子微陀螺的悬浮控制试验。介绍了微陀螺控制系统的硬件结构和软件设计, 搭建了 Simulink 控制系统模型, 并利用劳斯判据在理论上推导了 PID 参数的选取范围。研究了不同频率的正弦激励信号对系统输出的影响; 计算了其主要电气参数, 并设计了微陀螺的开环、闭环和刚度性能指标。最后, 给出了静电悬浮转子微陀螺系统初步的悬浮控制结果。

关键词:静电悬浮微陀螺; DSP; 伺服系统; 硬件电路

中图分类号: TP273 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-8829(2010)10-0059-04

Research on the Analog Servo System of the Electrostatically Levitated Micro-Gyroscope Based on DSP

YING Fa-ming¹, XIAO Qi-jun^{1,2}, CUI Feng¹, CHEN Wen-yuan¹, ZHANG Wei-ping¹, LIU Wu¹

(1. Research Institute of Micro/Nanometer Science and Technology, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200030, China;

2. Faculty of Electronic Information and Mechanical & Electrical Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China)

Abstract: TI's floating-point type TMS320VC33 DSP development system is used for the suspending experiment of the electrostatically levitated micro-gyroscope. The hardware and software designing are described. A simulink model is set up, the selection of PID parameters is derived theoretically. The influence of different frequency sinusoidal excitation signal for the output of the system is discussed, and the electrostatical parameters are calculated. The performance of the micro-gyroscope about open-loop, closed-loop and stiffness are designed. Finally, the results of the initial suspension are given out.

Key words: electrostatically levitated micro-gyroscope; DSP; servo system; hardware circuit

静电悬浮微陀螺是一种利用静电力来悬浮并旋转微小扁平转子的 MEMS 器件, 根据悬浮微转子高速旋转产生的陀螺效应, 借助力矩再平衡原理测量双输入轴角速度; 同时利用悬浮微转子借助力平衡原理可测量线加速度。它集陀螺、加速度计多功能于一体, 具有高精度, 低功耗的优点, 已经越来越受到人们的关注^[1-3]。

本文采用了 TI 公司的浮点 TMS320VC33 DSP 开发系统, 用于静电悬浮转子微陀螺系统的悬浮控制试验。借助 Matlab 工具, 设计了静电悬浮转子微陀螺的

控制系统模型, 理论上推导了 PID 参数的选取范围, 给试验过程中 PID 参数的选取提供了理论依据。通过 Matlab 仿真, 得出微陀螺低频抗干扰能力比较强, 而对高频信号的抗干扰能力非常弱。试验结果表明本文设计的控制电路系统可以实现静电悬浮转子微陀螺的稳定悬浮。

1 静电悬浮微陀螺硬件电路组成

在本试验中, 采用的核心元件主要是以 TI 公司的浮点 TMS320VC33 DSP 开发系统作为数字信号处理器。它具有 150MFLOPS 的运算能力, 可扩展 1 MB × 32 位的 RAM, 适合大批量的数据处理, 自带 256 K × 32 位 Flash 存储器, 可以用来存放程序和重要的数据。

由于 VC33 浮点 DSP 处理芯片具有多达 32 位输入, 16 位输出的结构特点, 适合静电悬浮转子微陀螺 5 路检测的需求, 而且其浮点运算功能相对于定点 TMS320F2812 的 DSP 处理器来说, 其数据处理精度会

收稿日期: 2010-01-05

基金项目: 教育部博士点新教师基金(200802481026)

作者简介: 应法明(1985—), 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 主要研究方向为微惯性器件和系统; 陈文元(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微惯性器件和 MEMS 信息安全技术等方面的研究; 张卫平(1971—), 男, 教授, 硕士生导师, 从事微机电系统、精密仪器及其相关技术的研究。

有很大的提高,这也是采用 VC33 的主要缘由^[4]。

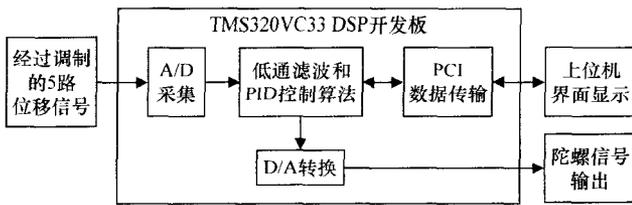


图1 静电悬浮转子微陀螺的控制系统框图

1.1 TMS320VC33 芯片的组成

在 TMS320VC33 DSP 开发系统中,采用的 CPU 是 TMS320VC33 芯片,它是 TI 公司推出的 TMS320 系列的第 3 代处理器的升级产品,是 32 位浮点运算 DSP (0.18 μm 技术,144 引脚 LQFP 封装),是目前国内外使用最为广泛的浮点 DSP 芯片之一^[5]。

1.2 CY7C09449 芯片的组成

VC33PS 系统中采用 CY7C09449 作为连接器件,是一种 32 位的 PCI 接口电路,与微机的标准 PCI 连接,可作为主设备,用于实现 DSP 与 PC 机之间的通信。

CY7C09449PV 芯片是由许多能在局部总线和 PCI 总线之间进行有效数据传输的共享资源构成的。在该芯片中主要应用的资源是能被 PCI 总线和局部总线共用的 128 Kb 的双口 RAM,通过 CY7C09949PV 芯片进行 DMA 操作,最大可以同时传送 16 KB 的数据。

1.3 A/D 电路——MAX125 芯片

VC33DSP 系统的模拟输入部分采用的是 4 片 14 位分辨率的 MAX125 芯片。它具有 A、B 两组,4 通路可以同时采样的模拟输入结构,该系统最多可以安装 4 组 MAX125 芯片,总共有 2 组 16 路同时采样的模拟输入通道;输入电压为 -5 ~ +5 V。每组 MAX125 的 4 输入通道的选择可以通过软件选择来实现。

1.4 D/A 电路——DAC7724 芯片的原理

D/A 电路主要采用的是 DAC7724 芯片:它具有 12 位、4 通道、同时输出的结构特点。DAC7724 芯片输出电压的建立时间约为 10 μs。4 路 16 通道 D/A 数据由各通道的锁存器分别锁存,再由统一的 D/A 输出命令同时输出。DAC7724 自带输出复位功能,上电对 D/A 复位口进行读操作,使 4 路 D/A 输出全部置为 0 V。复位操作只影响 D/A 输出寄存器,不影响 D/A 锁存器。

2 静电悬浮微陀螺的软件设计

对于 DSP 控制器,需要对模拟控制器进行离散化,这样才能在实际电路中进行实时控制。在本试验中,选择双线性变换法作为模拟控制器的离散方法。双线性变换法的公式为

$$S = \frac{2(z-1)}{T(z+1)}$$

式中, T 为采样时间。

因为控制器传递函数为

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \quad (1)$$

对式(1)中的 $G_c(s)$ 进行双线性变换得到下式

$$U_p(k) = K_p E(k) \quad (2)$$

$$U_i(k) = U_i(k-1) + \frac{K_i T}{2} (E(k) + E(k-1))$$

$$U_d(k) = -U_d(k-1) + \frac{2K_d}{T} (E(k) - E(k-1))$$

整个控制器的输出为

$$U(k) = U_p(k) + U_i(k) + U_d(k) \quad (3)$$

采样周期 T 的选择也很重要,而对于静电陀螺微系统来说,要根据实际情况来确定,既要满足香农采样定理,也要保证控制系统的稳定性,在此设采样周期 $T = 0.1 \text{ ms}$,即采样频率为 10 kHz。

3 静电悬浮微陀螺的动力学方程

由于静电微陀螺的转子没有进行真空封装,因此转子运动过程中会受到空气阻尼的影响。当加力电极上加预载电压 V_p 以后,由于静电力的作用将在系统中引入一个负刚度 K 。以转子 Z 向运动为例,转子动力学方程为

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c_z \frac{dz}{dt} - K_z z = F_z \quad (4)$$

式中, m 为转子质量; z 为转子在 Z 方向上发生的位移; c_z 为 Z 方向平动时空气的阻尼系数; K_z 为 Z 方向的静电刚度; F_z 为作用在质量环上外力的 Z 分量。

式(4)经过拉普拉斯变换,得到加预载电压时转子的传递函数

$$G_p(s) = \frac{Z(s)}{F_z(s)} = \frac{1}{ms^2 + c_z s - K_z} \quad (5)$$

3.1 稳定性

设位移检测环节的传递函数为 $G_s(s)$,加力电路放大环节的传递函数为 $G_a(s)$,作用在转子上的扰动力为 $F_a(s)$,静电悬浮系统控制器的传递函数为 $G_c(s)$,电压刚度系数为 K_v 。

由图 2 可以得出悬浮系统的开环传递函数为

$$G_o(s) = \frac{Z(s)}{Z_r(s)} = \frac{G_s(s)G_c(s)G_a(s) \cdot K_{vz}}{ms^2 + c_z s - K_z} \quad (6)$$

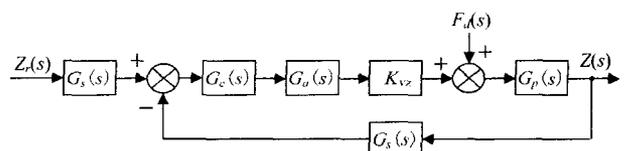


图2 静电悬浮控制系统原理图

系统的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{Z(s)}{Z_r(s)} = \frac{G_s(s)G_c(s)G_a(s) \cdot K_{vz}}{ms^2 + c_z s - K_z + G_s(s)G_c(s)G_a(s) \cdot K_{vz}} \quad (7)$$

进行控制器设计时,可以把位移检测环节和加力电路放大环节分别简化成比例项 K_s, K_a , 这样系统的闭环传递函数简化为

$$G(s) = \frac{Z(s)}{Z_r(s)} = \frac{G_c(s)K_sK_a \bullet K_{iz}}{ms^2 + c_s s - K_z + G_c(s)K_sK_a \bullet K_{iz}} \quad (8)$$

式中, PID 校正器的传递函数为

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

因为系统的特征方程

$$ms^3 + (c + K_sK_aK_iK_{iz})s^2 + (K_sK_aK_{iz}K_p - K_z)s + K_sK_aK_{iz}K_d = 0$$

根据劳斯判据,分析系统的稳定性,系统稳定的条件为

$$\begin{cases} c + K_sK_aK_{iz}K_i > 0 \\ K_sK_aK_{iz}K_pK_i - K_iK_z + cK_p - mK_d > \frac{K_z}{K_sK_aK_{iz}}c \\ K_d > 0 \end{cases} \quad (9)$$

所以
$$\begin{cases} K_i > -\frac{c}{K_sK_aK_{iz}} = -0.0074 \\ K_d > 0 \end{cases} \quad (10)$$

令 $K_i = 10, K_d = 0.1$, 得到

$$K_p > 1.868 \quad (11)$$

从式(10)可以看出,当阻尼 c 越大,参数 K_i 可以取更小的数值;参数 K_d 必须选择大于 0 的常数,否则就会引起闭环系统不稳定;而从式(9)可以看出,参数 K_p, K_i, K_d 的取值必须满足此方程,才能保证系统是稳定的,这给试验过程中 PID 参数的选取提供了理论依据。

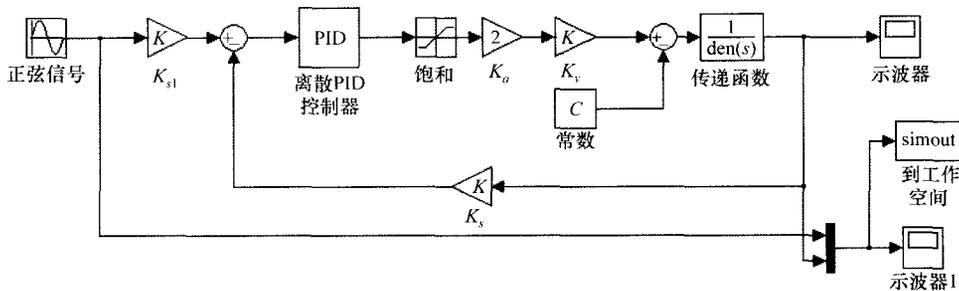


图3 静电悬浮转子微陀螺的 Simulink 模型

从图 4 中可以看出,当静电微陀螺系统的输入信号在 100 Hz 以内的时候,输出信号能够完全跟上输入信号的变化;但是当输入信号的频率高于 500 Hz 的时候,其输出波形已经完全不能跟上输入的波形了。即微陀螺低频抗干扰能力比较强,而对高频信号的抗干扰能力非常弱,所以仅仅适合于低频工作状态。

5 静电悬浮转子微陀螺试验系统

整个基于 DSP 的静电悬浮转子微陀螺的试验系统如图 5 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, VC33 DSP 经仿真器与 PC 相连,并且将

3.2 静电悬浮微陀螺的电气参数

静电悬浮微陀螺的主要电气参数如表 1 所示。

表 1 静电悬浮微陀螺的电气参数

物理量	参数值
预载电压 V_p	20 V
位移检测环节比例系数 K_s	1.34×10^6 V/m
加力放大环节比例系数 K_a	2
位移刚度系数 K_z	224.1152 N/m
电压刚度系数 K_{iz}	4.48×10^{-5} N/V

3.3 静电悬浮陀螺的仿真结果

选择 PID 参数如下: $K_p = 20, K_i = 20, K_d = 0.0001$, 并利用 Matlab 工具计算得到静电悬浮陀螺的开环、闭环、阶跃和刚度的性能指标,如表 2 所示。

表 2 静电悬浮微陀螺的性能指标

指标名称	指标值	指标名称	指标值
幅值裕度 G_m	20.6 dB	调整时间 t_s	8.61 ms
相位裕度 P_m	82.7 ($^\circ$)	超调量 M_p	10%
闭环带宽 B_w	3.14×10^3 Hz	动刚度系数 K_{zmin}	66.8 dB
闭环谐振频率	52.6 Hz	动刚度系数对应的频率	62.8 Hz

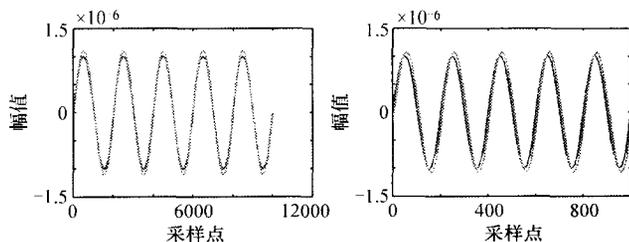
4 不同频率的外界扰动对系统输出的影响

针对静电悬浮微陀螺系统的整体电路图,考察微陀螺在平衡位置附近的抗扰性,利用线性近似的方法,建立相应的 Simulink 等效模型,如图 3 所示,研究不同频率的正弦激励信号输入对系统输出的影响。

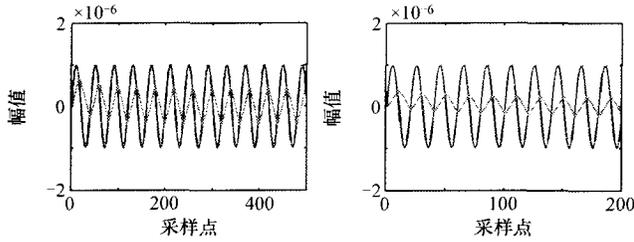
VC33 DSP 板卡插入 PCI 插槽,实现与 PC 的通信^[4]。

6 试验结果

将整个静电悬浮转子微陀螺的试验系统按照图 5



(a) 10 Hz 的正弦信号输入 (b) 100 Hz 的正弦信号输入



(c) 500 Hz 的正弦信号输入 (d) 1000 Hz 的正弦信号输入

图4 不同频率的正弦信号激励下的输出结果



图5 静电悬浮转子微陀螺的试验系统

所示进行连接,并把静电微陀螺系统抽成真空以降低空气阻尼对它的影响。在本试验中,采用的控制算法是数字式PID控制方法,通过改变相应的PID参数实现转子的稳定悬浮。

在本试验中选取 $K_p = 10$ 、 $K_i = 100$ 、 $K_d = 0$,启动DSP系统以后,试验结果如图6所示。

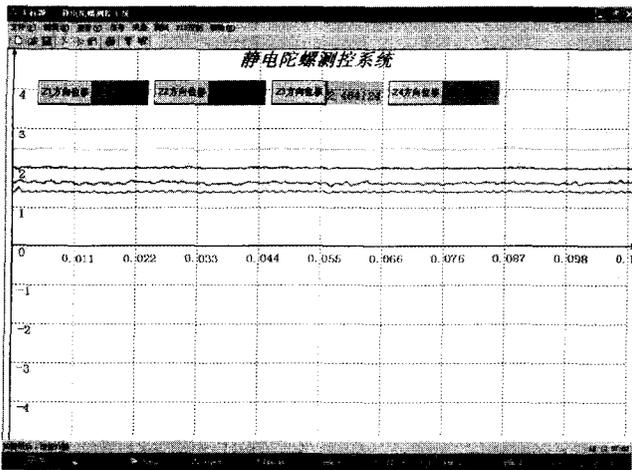


图6 转子位移的实时测控界面

7 结束语

仿真结果表明,静电悬浮转子微陀螺低频抗干扰

能力比较强,而对高频信号的抗干扰能力非常弱,故微陀螺仅仅适合于低频工作状态。

试验结果表明,利用DSP开发板设计的控制电路系统,可以实现静电悬浮转子微陀螺的稳定悬浮。但是由于微陀螺悬浮过程中各轴之间存在一定的耦合现象,这对信号的检测和控制提出了更高的要求,同时也是后续工作需要做的相应改进之处。

参考文献:

- [1] Houlihan R, Kraft M. Modelling of an accelerometer based on a levitated proof mass [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2002, 12(4): 495 - 503.
- [2] Xiao Q J, Chen W Y, Ma G Y, et al. Simulation of levitation control for a micromachined electrostatically levitated gyroscope [A]. Proceedings of the 4th IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems [C]. Shenzhen, 2009: 160 - 163.
- [3] Murakoshi T, Endo Y, Fukatsu K, et al. Electrostatically levitated ring-shaped rotational-gyro/accelerometer [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003, 42(4B): 2469 - 2470.
- [4] 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: 上海交通大学, 2008-02.
- [5] 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, 2007-01.

□

(上接第 58 页)

- [4] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [5] Murugan R, Nandakumar S, Mohiyadeen M S. DSP-based electric power assisted steering using BLDC motor [J]. Sadhana Academy Proceedings in Engineering Sciences, 2008, 33(5): 581 - 590.
- [6] Lenine D, Rami R B, Vijay K S. Estimation of speed and rotor position of BLDC motor using extended Kalman filter [A]. Proceedings of IET-UK International Conference on Information and Communication Technology in Electrical Sciences [C]. Chennai, Tamilnadu, 2007: 433 - 440.
- [7] Sathyan A, Milivojevic N, Lee Y J, et al. An FPGA-based novel digital PWM control scheme for BLDC motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8).
- [8] Kang J S, Xu G Q, Hu B, et al. Research on field-weakening based on reactive power with BLDC motor for electric vehicle application [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Integration Technology [C]. Shenzhen, 2007.
- [9] 李树靖, 林凌, 李刚. 线性光耦合器 LOC110 的原理与应用 [J]. 北京: 世界电子元器件, 2002(12).

□