

文章编号 1004-924X(2009)01-0151-07

基于 TMS320C6713B+FPGA 数字控制器实现 磁悬浮飞轮主动振动控制

刘 彬, 房建成, 刘 刚

(北京航空航天大学 新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100083)

摘要:为了抑制磁悬浮飞轮的振动,分析了磁悬浮飞轮的振动源。针对磁悬浮飞轮最主要的振动源—不平衡振动,给出了一种基于 TMS320C6713B+FPGA 数字控制器的磁悬浮飞轮主动振动控制实现方案。介绍了所采用的主动振动控制方法、数字控制器的硬件组成和功能原理,并讨论了 DSP 中主动振动控制算法的实现和 FPGA 中多任务管理及外设控制等。实验结果显示,采用本方法进行主动振动控制后,磁悬浮飞轮的不平衡振动衰减至 3.2%,表明本实现方案对飞轮转子不平衡振动取得了很好的抑制效果,对于增加磁悬浮飞轮姿态控制的稳定性,提高对地观测分辨率具有重要意义与应用价值。

关键词:磁悬浮飞轮;磁轴承;不平衡振动;主动振动控制

中图分类号:TH133.7 **文献标识码:**A

Implementation of active vibration control for magnetically suspended flywheels based on TMS320C6713B+FPGA digital controller

LIU Bin, FANG Jian-cheng, LIU Gang

*(Novel Inertial Instrument & Navigation System Technology Key Laboratory of
Fundamental Science for National Defense, Beihang University, Beijing 100083, China)*

Abstract: In order to eliminate the vibration of Magnetically Suspended Flywheel(MSFW), the disturbing sources of MSFW are analyzed. Aimed at the suppression of main disturbing sources, the unbalance vibration, a new active vibration system based on TMS320C6713B+FPGA digital controller is presented. The active vibration control method, hardware constitution and functions of digital controller are discussed. The implement of control method in DSP, the organization of multi tasks in FPGA and the control of peripheral devices are provided. The experimental results demonstrate that the unbalance vibration has been reduced to 3.2% by proposed system, which shows this system can eliminate the unbalance vibration of MSFW significantly and has great significance and value for increasing the stability of attitude control and for improving the resolution of earth observation.

Key words: magnetically suspended flywheel; magnetic bearing; unbalance vibration; active vibration control

收稿日期:2008-05-07;修订日期:2008-07-11.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 60736025)

1 引言

飞轮是卫星等航天器姿态控制的主要执行机构,其输出姿态控制力矩的精度决定了卫星的姿态稳定度,是星上负载实现高精度任务的关键^[1-3]。飞轮输出力矩的精度包括大小精度和方向精度两部分,其中输出力矩大小精度由电机控制精度决定,而输出力矩方向精度由飞轮本身的控制精度决定。传统的机械轴承飞轮通过滚珠轴承支撑,其不平衡力矩直接传递给航天器。同时由于粘滞力矩、扰动力矩、静摩擦等的存在,机械飞轮成为航天器姿态控制系统扰动的主要来源^[4-5]。磁悬浮飞轮采用磁轴承支承,具有无接触、无摩擦、无需润滑、高精度、长寿命等优点,是高精度航天器姿态控制的理想执行机构^[6]。

虽然磁悬浮轴承理论上可以达到无振动,但是磁悬浮飞轮中仍存在一些振动源,它们会影响飞轮输出力矩方向的稳定性,降低航天器的负载,如高分辨率对地观测等的精度,同时会造成功耗的饱和与功耗的增加。如何对这些振动源进行抑制,已成为磁悬浮飞轮用于航天器高精度姿态控制所要解决的主要问题。

航天器及负载对于飞轮姿态控制高精度的需求,要求磁轴承控制器具有足够的运算速度,从而能够实现各种复杂的主动振动控制算法。数字信号处理器(DSP)因其高运算性能,已被研究者应用于磁轴承控制中^[7-8],但 DSP 不方便扩展,不适合磁轴承主动振动控制算法中多任务管理与灵活控制外设的需求。现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)因其配置灵活,也有研究者将其应用于磁轴承数字控制器^[9],但 FPGA 运算性能较差,不适合磁轴承控制算法对控制器运算性能的要求。本文提出了一种将高性能 DSP 与 FPAG 相结合的磁轴承控制器实现方案,针对磁轴承开环自适应陷波的控制方法,给出了基于 TMS320C6713B 浮点 DSP 处理器+FPAG 的数字控制器具体实现。实验结果表明,本实现方案对于增加磁悬浮飞轮姿态控制的稳定性,提高对地观测的精度具有重要意义和应用价值。

2 磁悬浮飞轮的振动源分析

磁悬浮飞轮转子的不平衡振动会造成飞轮系统的基频扰动,被认为是磁悬浮飞轮最主要的振动源。转子的不平衡是指转子的几何轴与惯性主轴重合,如图 1 所示。对于含有不平衡量的飞轮转子,机械轴承只能约束转子绕几何轴旋转。由于转子几何轴与惯性主轴不重合,因此惯性轴是绕几何轴涡动,必然有不平衡力和力矩传递给基座,对飞轮输出姿态力矩的精度带来很大的扰动。而磁悬浮轴承由于采用主动控制,可以通过各种控制方法来去除对转子同频运动的约束,使转子由于自身的动力学特征,绕其惯性主轴旋转,从而达到对不平衡力和力矩进行抑制的目的,提高飞轮输出力矩方向的精度^[10]。

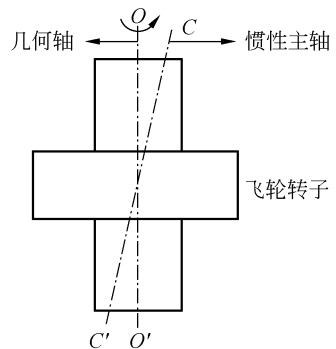


图 1 转子几何轴与惯性主轴的关系

Fig. 1 Relationship between geometric axis and inertia principal axis

同时,系统中存在的各种误差也影响飞轮的控制精度,其中传感器电气性能的误差将造成传感器信号中的噪声,转子机械部分的加工误差可视为传感器测量面的不规则,会导致传感器信号中周期性的谐波误差,而传感器的安装误差会造成不同控制通道之间测量值的耦合。为了保证磁悬浮飞轮输出姿态控制力矩方向的精度,必须对飞轮转子的不平衡振动进行控制。

3 主动振动控制方法

磁轴承系统的工作原理如图 2 所示,由位移传感器检测得到转子的位置信号送至数字控制

的采样频率,同时为了与 20 kHz 的 PWM 的调制频率相匹配,本设计中对每路位移信号进行 16 次平均后再将采样结果以 20 kHz 的频率送至 DSP,降低了电磁噪声对位移采样的影响。

处理器之间的通信对于多处理器系统的性能影响至关重要。6713DSP 内部有一个 HPI(Host Port Interface)接口,通过 HPI 接口,主机(Host)可以无缝地访问 DSP 任意地址空间,而不会影响 DSP 中 EMIF 接口的读写操作,同时 HPI 接口还具有带宽高,速度快等优点,因此本设计通过在 FPGA 内部由 VHDL 语言设计的 HPI 接口控制逻辑实现 DSP 与 FPGA 模块的通信,达到了 50 M/Byte 的通信速率。

本实现中所完成的 TMS320C6713B+FPGA 数字控制器如图 5 所示。

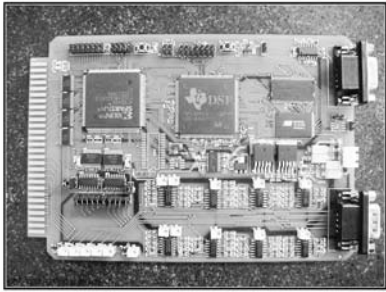


图 5 6713B+FPGA 数字控制器

Fig. 5 6713B+FPGA digital controller

5 系统功能实现

5.1 多任务管理

主动振动控制系统为多任务系统,需要对多任务进行统一管理 with 资源分配。本系统的任务管理是由协处理器 FPGA 实现的,包括管理任务的工作时序和控制相关外设。由于任务数量较少,关系简单,优先级明确,因此可由 FPGA 按串行关系的任务按时间顺序串行处理、无串行关系的任务并行处理的原则进行统一管理。

主动振动控制系统实现的主要任务有:

(1) 位移信号采集、传送与 DSP 运算,

① FPGA 控制模拟开关与模数转换芯片,对五路位移信号进行采样;

② FPGA 通过 HPI 接口将对 16 次平均后的位移采样结果送至 DSP 地址空间;

③ FPGA 发送 DSP 中断信号,DSP 运行控制算法。

(2) FPGA 通过 HPI 接口读取 DSP 控制算法的运算结果,进行 PWM 调制输出至功放。

(3) 飞轮转速测量:

① FPGA 对光电码盘或霍尔传感器的信号进行计数;

② FPGA 通过 HPI 接口将计数信号送至 DSP 地址空间;

③ FPGA 发送 DSP 中断信号,DSP 计算飞轮当前转速。

(4) FPGA 由 VHDL 设计的串行通信控制模块通过串口与上位机通信,由 HPI 接口控制按上位机的指令在 DSP 的地址空间内读取或写入数据,从而实现上位机在运行时对控制参数的实时查询与设置。

由于 FPGA 具有并行结构的特点,以上 4 个主要任务在 FPGA 中的实现是并行进行,但其中 HPI 接口控制在很多任务中用到,需要有优先级的区分。在调用 HPI 接口控制的各任务中,位移采样结果传送和运算结果的读取优先级最高,上位机查询与修改控制参数优先级最低,因为主动振动控制必须首先保证系统的稳定性,而上位机的查询与修改控制参数可以在其它任务都执行完的空闲时间进行。

5.2 控制算法实现

图 3 所示的主动振动控制算法主要在 DSP 中实现。由图 3 可见,控制算法主要有 PID 控制、自适应陷波器、正/余弦信号发生器、转速测量等。由于 PID 控制在工业控制已广泛应用,在此只讨论其余的部分。

5.2.1 自适应陷波器

自适应陷波器用于将位移信号中的同频量去

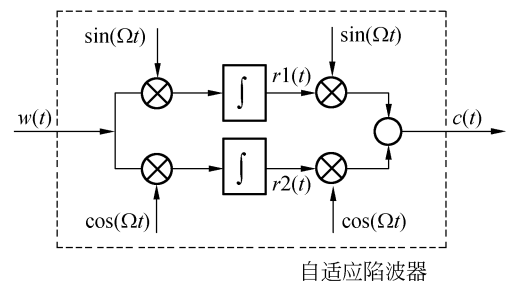


图 6 自适应陷波器的原理图

Fig. 6 Block diagram of adaptive notch filter

除,从而使磁轴承对转子的同频运动不约束,转子动力学特性使得转子绕惯性主轴旋转。自适应陷波器的原理如图6所示,其输入输出方程为:

$$c(t) = \begin{bmatrix} \sin(\Omega t)I & \cos(\Omega t)I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int \sin(\Omega t)\omega(t)dt \\ \int \cos(\Omega t)\omega(t)dt \end{bmatrix}. \quad (1)$$

离散化的自适应陷波器函数方程为:

$$\begin{cases} r_1(k) = \sin[\theta_i(k)] \cdot \omega(k) + r_1(k-1) \\ r_2(k) = \cos[\theta_i(k)] \cdot \omega(k) + r_2(k-1) \\ c(k) = \sin[\theta_i(k)] \cdot r_1(k) + \cos[\theta_i(k)] \cdot r_2(k) \end{cases}. \quad (2)$$

5.2.2 正/余弦信号发生器

由图6可知,自适应陷波器需要正/余弦信号与转子位移信号作乘积,本实现中正/余弦信号是由正余弦信号发生器产生的。正/余弦信号发生器的离散化函数方程为:

$$\begin{cases} \sin[\theta_i(k)] = \sin[\theta_i(k-1) + \Delta\theta_i] \\ \cos[\theta_i(k)] = \cos[\theta_i(k-1) + \Delta\theta_i] \end{cases}. \quad (3)$$

考虑到飞轮临界转速时的稳定性,飞轮转速在临界转速以上时,对位移信号采用闭环自适应陷波,而当飞轮转速在临界转速以下时,对位移信号采用开环自适应陷波。按采用陷波方式的不同,正/余弦信号发生器中 $\Delta\theta$ 的参数更新方法为:

$$\Delta\theta = \begin{cases} \frac{\Omega \cdot 360}{f}, & k_i = 1 \\ \frac{360}{n}, & k_i = 0 \end{cases}, \quad i=1, \dots, 5, \quad (4)$$

其中 f 为数字控制器接收采样数据进行控制算法的频率, n 为光电码盘或霍尔传感器阵列经倍频后转子每转一周所产生的脉冲个数。

当飞轮转速在临界转速以上时,控制开关 k_i 闭合($k_i=1, i=1, \dots, 5$), k_0 选择为转速测量,即采用闭环自适应陷波对位移信号中同频量进行去除时,正/余弦信号发生器采用DSP运算得到的转速产生正/余弦信号;当飞轮转速在临界转速以下时,控制开关 k_i 断开($k_i=0, i=1, \dots, 5$), k_0 选择为直接将倍频后的脉冲信号传送至正/余弦信号发生器,正/余弦信号发生器按每个脉冲所对应的角位置分辨率产生正/余弦信号。

5.2.3 飞轮转速测量与角位置检测

闭环时的转速测量和开环时的角位置检测是

正/余弦信号发生器中的核心部分,其计算公式为公式(4)。控制系统对转速测量的要求是高速时转速测量有较高精度,同时低转速时计数器不溢出。由于FPGA具有丰富的逻辑和寄存器资源,同时DSP的运算能力强大,本设计采用FPGA对相邻两光电码盘(Hall传感器阵列)信号的时间间隔以50MHz频率在32位计数器内进行计数,既保证了高速时的测量精度,也具有对低速时的分辨率。

当作用开关断开($k_i=0, i=1, \dots, 5$),采用开环自适应陷波的方法补偿时,FPGA将光电码盘或霍尔传感器信号直接作为DSP的中断信号。如果采用Hall传感器阵列进行角位置检测,可以通过FPGA对Hall信号进行倍频,以提高对转子角位置的分辨率。实验结果表明,当每周的霍尔传感器阵列脉冲数达到150个以上时,开环自适应陷波对位移信号中同频量的去除可以达到与闭环自适应陷波相同的精度。

6 主动振动控制实验结果

为了验证本实现方案对磁悬浮轴承主动振动控制的效果,采用6713B+FPGA数字控制器,以北京航空航天大学研制的五自由度磁悬浮反作用飞轮原理样机FW50D为实验对象,对径向的4个通道进行主动振动控制验证,实验用飞轮原理样机如图7所示。为了测试对转子所受同频力的抑制效果,采用安装于飞轮基座上的振动加速度传感器对振动信号进行测量。



图7 实验用磁悬浮飞轮原理样机

Fig. 7 MSFW prototype for experiment

采用传统PID控制和采用本文提出的主动振动控制的效果对比如图8、图9所示。图8可见,采用PID控制时,飞轮振动信号中的同频分

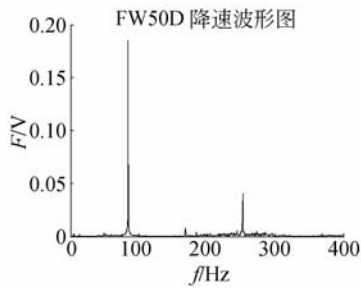


图 8 采用 PID 控制的振动信号频谱

Fig. 8 Spectrum of vibration signal with PID control

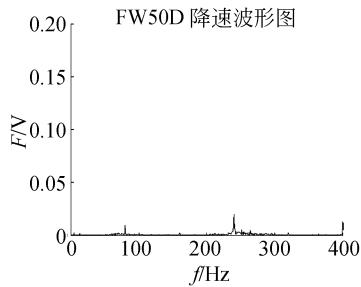


图 9 用主动振动控制的振动信号频谱

Fig. 9 Spectrum of vibration signal with active vibration control

量(80 Hz)在整个振动信号频谱中占有很大的分量,其峰值达到了 0.185 V;图 9 可见,采用本主动振动控制方法后,振动信号中的同频分量(80 Hz)得到了很好的抑制,其峰值为 0.006 V,仅为 PID 控制的 3.2%,主动振动控制得到了很好的效果,转子振动信号中的同频分量得到了很大的衰减。

7 结 论

针对航天器及负载对飞轮姿态控制精度的要求,本文给出了基于 TMS320C6713B+FPGA 数字控制器的磁悬浮飞轮主动振动控制实现,由高运算性能的 DSP 作为主处理器运行控制算法,配合扩展灵活的 FPGA 作为协处理器进行任务管理与外设控制,并可通过上位机实现对控制参数的实时查询与修改,系统功能强大。实验结果表明,采用本文方法进行主动振动控制后,磁悬浮飞轮的不平衡振动衰减至 3.2%,本实现方案对飞轮转子不平衡振动的抑制取得了很好的效果。

参考文献:

- [1] BICHLER U, ECKARDT T. A 3(5) degree of freedom electrodynamic bearing wheel for 3-axis spacecraft attitude control applications[C]. 1st *International Symposium on Magnetic Bearing*, June 6-8, 1998, Zurich; 13-22.
- [2] 任建伟, 万志, 李宪圣, 等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1186-1190.
REN J W, WAN ZH, LI X SH, *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1186-1190. (in Chinese)
- [3] 史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(1): 16-24.
SHI G H. High resolution optical systems used to observation from the satellites to the earth and problems in design [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(1): 16-24. (in Chinese)
- [4] XIE Y C, SAWADA H, HASHIOTO T, *et al.*. Adaptive model following control method for actively controlled magnetic bearing momentum wheel [C]. 5th *International Symposium on Magnetic Suspension Technology*, Santa Barbara, America, 1999.
- [5] 刘治华, 白越, 黎海文, 等. 单轴飞轮储能与姿态控制系统误差分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1): 127-132.
LIU Z H, BAI Y, LI H W, *et al.*. Analysis on errors of single axis energy storage/ attitude control system with double flywheels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 127-132. (in Chinese)
- [6] 高云国. 现代小卫星及其相关技术[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(5): 16-21.
GAO Y G. Modern small satellites and its related technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 16-21. (in Chinese)
- [7] KNOSPE C R, FEDIGAN S I, HOPE R W, *et al.*. A multitasking DSP implementation of adaptive magnetic bearing control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1997, 5(2): 230-238.
- [8] GERLACH B, EHINGER M, RAUE H K. Digital controller for a gimbaling magnetic bearing reaction wheel [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit Aug.* 2005, 15-18, San Francisco, California; 1-6.
- [9] FANG ZH W, CARLETTA J E, VEILLETTE R J. A methodology for FPGA-based control implemen-

tation[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005,13(6):977-987.

- [10] 虞烈,刘恒. 轴承-转子系统动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
YU L, LIU H. *Bearing-Rotor system dynamics* [M]. Xi'an: Xi'an jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)
- [11] HERZOG R, BUHLER P, GAHLER C, LARSON-NEUR R. Unbalance compensation using generalized notch filters in the multivariable feedback of magnetic bearings[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1996,4(5):580-586.
- [12] 彭晓军,高钟毓,王永樑. 磁电轴承中抑制不平衡振动的陷波滤波器设计方法[J]. *机械工程学报*,

2006,42(6):120-123.

- PENG X J, GAO Z Y, WANG Y L. Design of notch filter to eliminate unbalance vibration in magnetic and electrostatic bearing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006,42(6):120-123. (in Chinese)
- [13] LUM KY, COPPOLA VT, BERNSTEIN DS. Adaptive autocentering control for an active magnetic bearing supporting a rotor with unknown mass imbalance[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1996,4(5):587-597.
- [14] Texas Instrument. TMS320C6713B floating-point digital signal processor[R]. 2005.

作者简介:



刘 彬(1981—),男,山东日照人,博士研究生,主要研究方向为磁轴承主动振动控制,磁悬浮飞轮的研制与高精度控制等。E-mail: jobs@aspe.buaa.edu.cn



刘 刚(1970—),男,山东济南人,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电机及磁轴承建模与控制等。E-mail: lgang@buaa.edu.cn

导师简介:



房建成(1965—),男,山东临沂人,博士,教授,博士生导师,长江学者特聘教授,主要研究方向为航天飞行器姿态控制技术和自主定位导航技术以及航空航天飞行器 GNC 系统集成技术和信息集成技术。E-mail: fangjiancheng@buaa.edu.cn