

基于 DSP 的控制力矩陀螺外框 驱动控制系统设计

刘承 刘向东 李黎

北京理工大学

摘要:控制力矩陀螺是大型对地观测卫星以及空间站姿态控制系统的关键执行部件,介绍了以 TMS-320LF2407 为核心进行了单框架控制力矩陀螺外框驱动控制系统设计,包括了 DSP 控制核心及其外围电路、RS-422 串行通信接口设计、模拟量输出与位置测角模块硬件设计,以及整个 DSP 硬件系统控制系统软件设计,并成功地应用于单框架控制力矩陀螺外框驱动控制系统样机。

关键词:单框架控制力矩陀螺 数字信号处理器 姿态控制

Design and Application of the Control System of SGCMG Based on DSP

Liu Cheng Liu Xiangdong Li Li

Abstract:Control moment gyro is the important part of attitude control of the space station system and the observe satellites. In this paper we introduce how to design a digital controller with DSP TMS320LF2407 in a SGCMG control system, included the particular of DSP, RS-422, D/A, position measurement module and the software of the system. The controller has already been used in the prototype of control moment gyro system successfully.

Keywords: single gimbal control moment gyros(SGCMG) digital signal processor(DSP) attitude control

1 前言

大型对地观测卫星、宇宙飞船以及空间站等大型航天器的姿态控制需要大的输出力矩。常规航天器姿态控制系统的执行机构有喷管、动量轮、磁力矩器等,输出力矩比较小,无法满足大型航天器姿态控制和快速机动的要求。控制力矩陀螺输出力矩大、力矩平稳、动态响应快、控制线性度好、效率高,因而得到快速发展。根据框架的不同可以将控制力矩陀螺分为单框架和双框架控制力矩陀螺。单框架控制力矩陀螺由定常转速的动量飞轮、支撑飞轮的内框架和外框架组成,控制系统主要包括飞轮控制系统和外框架控制系统。单框架控制力矩陀螺通过框架转动迫使动量飞轮的角动量改变方向,从而实现航天器姿态的调节。陀螺力矩的大小和方向由框架转速矢量与飞轮角动量矢量的叉积决定,飞轮角动量一般比较大,框架输入小的控制力矩使框架转动引起的陀螺力矩垂直于框架转轴,该力矩通过框架轴承直接作用到航天器上,从而可获得较大的控制力矩输出。单框

架控制力矩陀螺结构简单且控制精度较高,这是单框架控制力矩陀螺的主要优点。

在航天器姿态机动过程中需要控制力矩陀螺输出大的控制力矩,在航天器稳态运行时要求控制力矩陀螺输出高精度、高平稳性的姿态控制力矩,确保姿态控制精度,为此要求外框架驱动控制系统具有高平稳性和优良的低速性能。控制力矩陀螺外框架驱动控制系统方案主要有步进电机驱动、多级驱动和直接驱动 3 种。正弦波直接驱动永磁同步电动机系统运行时平稳、力矩波动小、具有更高的动态响应性和低噪音等优点。因此,本文所研究的控制力矩陀螺外框架驱动控制系统采用正弦波驱动永磁同步力矩电机(PMSM)直接驱动方式,实现单框架控制力矩陀螺的外框架转速控制,以获得高稳定度的陀螺反作用力矩。

2 控制力矩陀螺外框架驱动控制系统结构

本控制系统主要完成电机位置检测以及对电机速度控制。系统主要完成以下功能:①初始化,

完成开机和复位时的初始化操作;②与上位机进行通讯,接收上位机的控制指令,返回相应控制参数及其相关数据;③采集位置传感器反馈的位置信号;④实现位置伺服控制策略,并将 PWM 控制信号输出给驱动模块。

为了满足系统的控制性能要求,采用了 DSP TMS320LF2407 为控制核心,DSP 内部结构为哈佛结构,大部分指令能在一个指令周期内完成,独立的数据和程序存储空间,具有高速运算能力。控制器外围电路由与上位机采用 422 串口通信标准通信模块,与测角系统相连的数据缓冲器等外围电路构成。

测角系统在控制力矩陀螺的控制中起着十分重要的作用,整个控制系统的精度几乎就是由测角系统的精度来决定的。通常的测角系统中常采用的角度传感器主要有光栅、码盘、旋转变压器、感应同步器等。光栅具有很高的精度和较强的抗干扰能力,但是对轴系和光学信号读取装置的机械安装精度要求很高,不易安装调试,而且价格高。码盘的精度一般情况下并不太高,高精度的码盘价格昂贵,旋转变压器与感应同步器抗干扰能力强,两者组合,能组成一个高精度且价格便宜的测角系统。本系统中的测角系统采用了一对极的旋转变压器和 360 对极感应同步器组合的粗精双通道测角系统。旋转变压器的精度较低,能得到电机的绝对位置。感应同步器的精度较高,为增量式测量电机位置。经过粗精组合后得到电机绝对角位置。美国 AD 公司的集成轴角转换器 AD2S80 也为这种测角系统提供了方便。

控制系统采用永磁三相无刷直流同步电机作为执行元件,电机控制采用当前广泛应用的空间电压矢量控制。在众多 PWM 中,SPWM 和 SVPWM 最具有代表性。SPWM 是利用三角载波与正弦调制波进行比较得到的。适合于模拟电路实现,其最大不足是对直流电压利用率低。20 世纪 80 年代中期,发展产生了空间电压矢量 PWM。其物理概念清晰,算法简单,适合于数字实现。SVPWM 比 SPWM 对直流电压利用率高 15.47%。系统通过 DSP 输出 6 路 PWM 信号经过光耦隔离后输入到电机驱动电路,驱动电路由 6 个 MOSFET 组成,每个 MOSFET 都可以看作一个电子开关,有打开与接通两种状态,通过 PWM 信号决定 MOSFET 导通与关断,产生电机驱动信号。控制力矩陀螺外框架控制系统结构见图 1。

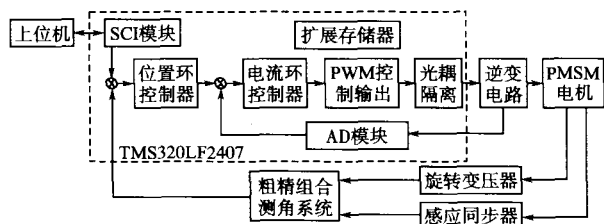


图 1 控制力矩陀螺外框架控制系统结构框图

3 DSP 控制系统硬件设计

系统硬件设计主要包含以下功能模块:CPU 控制核心及其外围电路,通信模块,位置采集模块,6 路 PWM 驱动信号的快速光耦隔离。

3.1 DSP 扩展 RAM 设计

TMS320LF2407 为 16 位定点 DSP,哈佛结构,数据存储空间与程序存储空间分开,寻址空间各为 64K,DSP 内部有 32K 的程序存储器 Flash 以及 2K 的数据存储空间,为了调试系统方便以及扩大数据存储空间,本系统扩展了一片 16 位×64K 的 RAM 存储器做为数据存储器与程序存储器,所以片选信号 \overline{CE} 由 DSP 的 \overline{PS} 和 \overline{DS} 相与来选取,扩展 RAM 的 \overline{OE} 与 DSP 的 RD 信号相连, \overline{WE} 与 DSP 的 WE 信号相连。由于外部测角系统需要与 DSP 的 16 位数据总线进行数据交换,加上一片 SN54AHCT-16245 双向数据缓冲器,SN54AHCT16245 的输出使能信号由 IS 选定,方向控制信号由 DSP RW 信号确定,只有在访问外部信号采集模块时才选通。使内部总线与外部总线有效隔离,解决了总线冲突问题及实现电平转换。

3.2 串口通信模块设计

RS-422 是以差动方式发送和接受,不需要数字地线。差动工作是同速率条件下传输距离远的根本原因,通过两对双绞线可以全双工工作收发互不影响,同时采用双端线传送信号,具有很强的抗干扰能力。该标准允许驱动器的输出为 $\pm(2\sim6)V$,接收器可以检测到的输入信号电平可低到 200 mV。最大传输率可达 10 Mb/s,传输距离可以很远。

与 RS-232 相比,RS-422 抗干扰能力强,传输速率快,传输距离远,本文串行通信接口标准采用 RS-422 通信标准。使用 TMS320F2407 内部的 SCI 模块与 MAX3070EASD 组成,通过统一上下位机通讯协议,主要用于系统向上位机反馈运行状态,以及接受上位机发送的控制指令等。DSP 控制扩展 RAM 与串口模块原理框图见图 2。

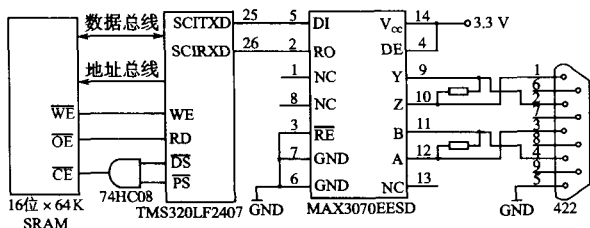


图 2 DSP 控制扩展 RAM 与串口模块原理框图

3.3 测角反馈输入模块与电流反馈模块设计

测角系统由感应同步器与旋转变压器通过 AD2S80A 转换后得到的,AD2S80A 芯片是 AD 公司的 RDC 芯片 AD2S80 系列的一种,具有精度可调、可靠性高;状态和控制信号数字化,易与微控制器相连;输入输出芯片既可用于角度跟踪控制,又可用于角度跟踪测量;自身无励磁电路,需要外部的正弦波发生器作为旋转变压器的激磁信号源;而且内部具有三态数据缓冲器。本系统中,我们选用 AD2S99 做激磁信号源,AD2S80A 芯片转换分辨率选用 16 位的数字量,最大跟踪速度为 $5000^\circ/\text{s}$ 。通过 DSP 的两路 GPIO 口 IOPF0, IOPF1 来控制 AD2S80 的三态数据缓冲器,见图 3。

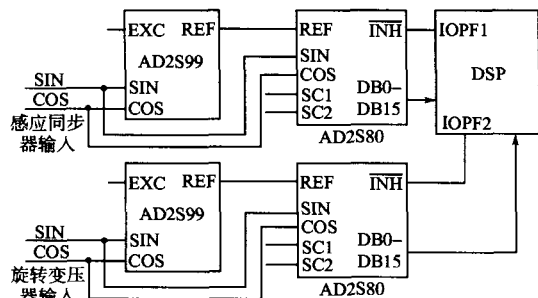


图 3 测角系统原理框图

由于感应同步器与旋转变压器同时通过 AD2S80A 转换出两路 16 位的数据反馈量, DSP 总线只有 16 位,所以需要分时读取,使用两个单向总线缓冲器 SN54AHC16541,将外部数据总线与测角系统数据总线相连,为了总线不冲突,采用地址译码电路进行地址译码和地址分配,本系统外围电路并不复杂,为了下位机的控制电路尽可能做到精小,不采用地址译码,而选用 DSP 的 GPIO 口 (IOPF3 和 IOPF2) 来为各外围电路的选通信号。

DSP 定时中断采样,读取信息采集模块反馈的数据。读取数据时,向 IOPF2 写 0,感应同步器 16 位数据端的总线缓冲器打开, DSP 读取数据。读周期完成后向 IOPF2 写 1 使缓冲器的输出端为高阻态。同样,向 IOPF3 写 0,旋转变压器 16 位数据端的总线缓冲器打开,读取数据,完

后向 IOPF3 写 1。信号采集模块数据读取完成。得到 2 个 16 位数字后可以由程序进行粗精组合并采取一定的控制算法进行控制。电流反馈输入模块部分由霍尔传感器与 DSP 内部 AD 模块构成,霍尔传感器可以将电流转换为电压,再通过 DSP 内部的 AD 转换模块,转换为数字量,通过电流环控制器进行控制。测角反馈输入模块与电流反馈输入模块原理框图如图 4 所示。

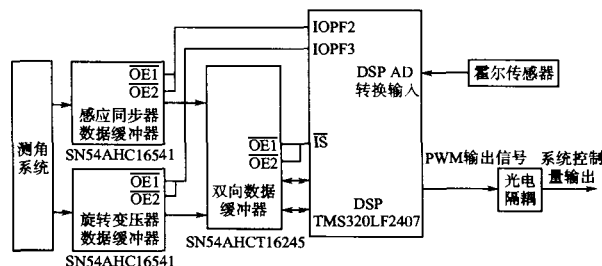


图 4 测角反馈输入模块与电流反馈输入模块原理框图

4 控制系统的软件设计

系统上电复位后,先对其进行初始化,完成关闭看门狗,设置 PLL 时钟,初始化 DSP 事件管理器与 SCI 模块,配置 GPIO 口输入输出模式等操作,再等待控制周期中断以及上位机控制指令到来。系统有两级中断,控制周期中断和串口中断。控制周期中断由 DSP 内部定时器产生,考虑到 DSP 的处理速度及串口传输速度的影响,将控制系统的控制采样周期定为 1 ms,优先级高于串口中断,即控制周期到来,不管串口的接受,发送是否处理完,都应及时地响应控制周期中断,处理完控制周期后再返回串口中断中继续接受或者发送数据。每个控制周期中,系统完成对其采样及经过 PID 控制算法计算 PWM 占空比,并输出。串口中断分为发送与接受中断,发送系统信息给上位机与接受上位机的控制指令。系统软件流程图见图 5。

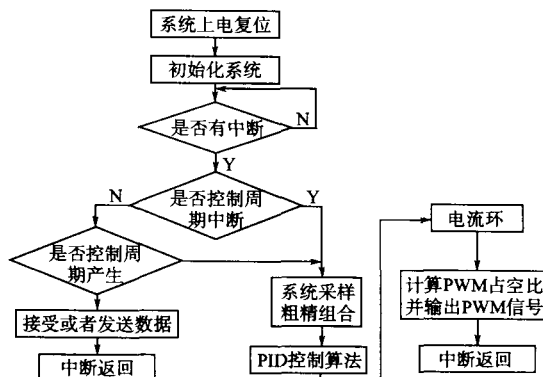


图 5 软件流程图

(下转第 43 页)

变压器的副端,波形与原理波形一致。因为高频变压器漏感的缘故,开通瞬间存在振荡电压尖峰,通过 RC 吸收电路,可以有效的予以抑制。

逆变器的输出波形如图 8 所示。通过两级 LC 滤波,波形谐波畸变很小,满足指标要求。

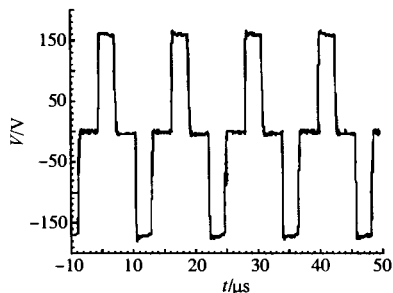


图 7 移相电路输出波形图

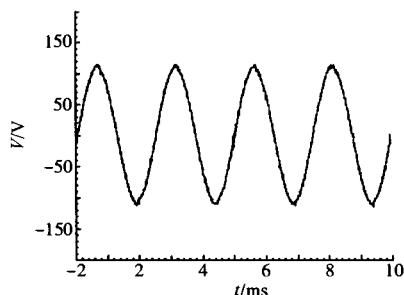


图 8 逆变器输出正弦波形图

7 结论

实验结果表明,该逆变电源输出波形质量好、运行可靠,满足性能指标要求,是较理想的变频电源。将 CPLD 用于航空逆变电源的控制电路,可以实现高集成度,高灵活性,具有较高的参考价值。

参考文献

- 1 孙向东,钟彦如,任碧莹. 一种新颖的高频环节 DC/AC 变换器的控制方法研究. 电工技术学报,2003,18(6):19~20
- 2 罗冷. DSP 控制 400 Hz 中频在线式不间断电源的研究. 电力电子技术,2004,38(2):48~50
- 3 段峻,段成刚,苏彦民. CPLD 在高频链逆变电源控制中的应用. 电气传动自动化,2003,25(2):38~40
- 4 孙向东. 组合式软开关高频链逆变器的研究. 西安:西安理工大学,2003:64~87
- 5 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计. 北京:电子工业出版社,1998
- 6 Marty Brown. 开关电源设计指南. 北京:机械工业出版社,2005

收稿日期:2005-09-07

修改稿日期:2006-04-05

(上接第 31 页)

5 实验结果

控制力矩陀螺外框系统要求永磁同步电机在低速下能够平稳的转动,从而输出高精度、高平稳性的姿态控制力矩。实验采用的永磁同步电机参数为:额定电压 DC 48 V;额定电流 DC 2 A;额定输出转矩 5 N·m;最大输出峰值转矩 10 N·m;电机相电阻 8.61 Ω;相电感 25 mH。控制周期为 1 ms,通过 PID 控制算法并选择合适的 PID 控制参数,使永磁同步电机在低速下,系统速度平稳,响应快速,达到了性能指标与控制精度。图 6 为系统运行状态曲线。输入转速指令为 0.4°/s,稳态误差为 0.0006°,平稳性达到指标。

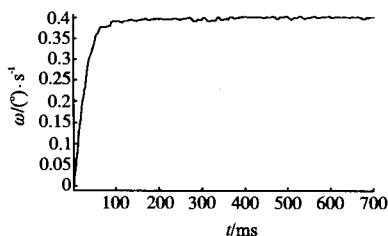


图 6 电机速度响应曲线

6 结束语

本文介绍的采用 TMS320LF2407 芯片为核心的数字控制力矩陀螺控制系统设计已在实验板上调试通过,并应用于工程样机中,TMS-320LF2407 先进的内部总线结构及指令执行的高速性,极大地提高了系统的实时性,感应同步器与旋转变压器相结合的测角系统使得系统控制精度提高,整个系统得到满意的控制效果。

参考文献

- 1 邵长胜,陈海鹏. 控制力矩陀螺速率控制中测角系统的研究. 中国惯性技术学报,2004,12(1):77~80
- 2 王念旭. DSP 基础与应用系统设计. 北京:北京航空航天大学出版社,2001
- 3 刘和平,王维俊,江渝等. TMS320LF240X DSP C 语言开发应用. 北京:北京航空航天大学出版社,2003
- 4 Ti 公司. TMS320C24X DSP Controllers Peripheral Library and Specific Devices Reference Set [M]. U. S. A;1999

收稿日期:2005-08-12

修改稿日期:2006-04-19