

基于国产FPGA的天线指向机构伺服控制器的设计

胡雪刚¹,王涛²,张军²,张得礼¹,王宏涛¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016; 2. 上海宇航系统工程研究所,上海 201108)

摘要:以天线指向机构为研究对象,采用两相混合式步进电机作为其驱动机构,设计基于国产FPGA的伺服控制器。以细分SPWM技术为基础,设计基于插值的PID控制算法进行位置闭环控制来提高步进电机的指向精度和保证步进电机的平滑指向,在Simulink中对此算法进行仿真分析。进行热循环试验和EMC试验来验证国产FPGA在空间环境中的可靠性。试验表明,该伺服控制器的指向精度达到 0.1° ,满足空间环境可靠性的要求。

关键词:天线指向机构;步进电机;国产FPGA;插值PID算法;EMC试验

中图分类号:TM383.4 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)05-0164-04

Design of Servo Controller of Antenna Pointing Mechanism Based on Domestic FPGA

HU Xuegang¹, WANG Tao², ZHANG Jun², ZHANG Deli¹, WANG Hongtao¹

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Shanghai Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201108, China)

Abstract: With antenna pointing mechanism as the research object and a two-phase hybrid stepping motor adopted as its driving mechanism, a servo controller based on domestic FPGA is designed. Based on the subdivision SPWM technology, a PID control algorithm on account of interpolation is designed to perform position closed-loop control so as to improve the pointing accuracy of the stepper motor and ensure the smooth pointing of the stepper motor. The improved algorithm is simulated and analyzed in Simulink. The thermal cycling and EMC tests are performed on the servo controller to verify the reliability of domestic FPGA in the space environment. Tests show that the pointing accuracy of the servo controller reaches 0.1° , which meets the reliability requirements of the space environment.

Keywords: antenna pointing mechanism; stepper motor; domestic FPGA; interpolation PID; EMC test

0 引言

天线指向机构的指向精度是评判天线能否进行高精度扫描与指向的重要性能指标^[1],而天线指向机构的精度又取决于其伺服系统的控制精度,因此提高伺服控制器的精度对于天线高精度扫描和指向非常重要。

目前伺服控制器多采用DSP、MCU作为主控芯片,但是由于天线指向机构的伺服控制器在工作过程中会面临空间环境未知粒子辐射和高低温环境等考验,而DSP和MCU对单粒子辐射比较敏感,难以满足空间应用可靠性需求^[2]。因此空间天线指向机构伺服控制器采用FPGA作为主控芯片已成趋势。中国空间技术研究院的刘鹏、董超等人设计了一种基于FPGA和单片机的星载定位指向控制器,以ACTEL的反熔丝FPGA作为主控芯片来驱动控制步进电机,单片机作为辅助芯片来实现控制器与UART的串口通信^[3]。上海宇航系统工程研究所的侯超、郑悦等人采用单片的ACTEL公司的反熔丝FPGA作为中继天线驱动控制主控芯片^[4]。但是这些都是以国外的FPGA作为主控芯片,近年来国际形势的变化加大了核心

器件国产化的需求,只有掌握核心科技才能不受制于人。所以,设计并验证以国产FPGA为主控芯片的天线指向伺服控制器可以加快核心器件国产化的步伐。

本文设计了以国产FPGA为主控芯片的天线指向机构伺服控制器,采用步进电机作为驱动电机,以双通道旋转变压器作为位置传感器采集位置信息。本文提出了一种“细分控制+插值PID”的步进电机控制算法来提高天线指向机构的指向精度,以保证天线指向机构指向时的平滑。对设计的伺服控制器进行指向试验,验证伺服控制器的指向精度,然后进行热循环试验和EMC(电磁兼容性)试验,验证该伺服控制器在空间环境中的可靠性。

1 系统总体架构

天线指向机构伺服控制系统解析上位机发送的工作命令和参数等,按照命令中的工作模式和位置给定要求,通过控制驱动步进电机来控制天线指向机构,并获取指向机构的位置、电流信息及其工作状态,反馈至上位机。

天线指向机构伺服控制系统主要包括FPGA与上位机通信模块、PROM与FPGA的配置模块、数模转换模块、

基金项目:国家科技重大专项(2018ZX04014001)

第一作者简介:胡雪刚(1995—),男,江西宜春人,硕士研究生,研究方向为机电控制。

电平转换模块、电机驱动模块以及步距角为 0.9° 的两相混合式步进电机等。由于旋转变压器承受高、低温,抗冲击和振动的能力要远远大于光电编码器^[5],为了提高测量的精度,采用极对数为1:16的双通道,粗、精速比为1:16的多极旋转变压器,采集电机的位置信息^[6]。其系统框图如图1所示。

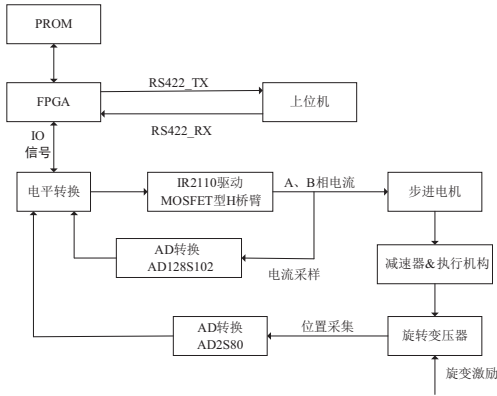


图1 系统架构示意图

其工作过程如下:

1) 上位机通过RS422向FPGA发送工作模式、位置给定等命令参数,FPGA通过RS422向上位机发送需要遥测的数据,例如位置、电流信息及工作状态等;

2) FPGA根据AD128S102的时序控制AD128S102的信号,获取AD转换后的电流值;

3) FPGA根据AD2580的时序控制AD2580的信号,获取双通道旋转变压器AD转换后的值,并根据其耦合修正算法对采集到的数据进行正确组合^[7];

4) FPGA根据采集到的位置信息,通过基于插值的PID算法实现位置闭环控制,并且依据步进电机控制原理进行控制,生成相应的控制信号,通过电平转换输出至MOSFET驱动芯片(IR2110)。

2 伺服控制算法

步进电机驱动器每接收到一个脉冲信号,步进电机就会转一个固定的步距角。由于步进电机自身特性的影响,步进电机的性能达不到实际的控制要求,故本文采取步进电机细分控制以提高步进电机的分辨率^[8]。但是由于步进电机存在丢步的现象,导致指向机构的指向精度达不到要求。因此本文提出了一种基于插值PID的闭环控制算法来避免电机因丢步而造成的指向误差^[9]。算法流程图如图2所示。

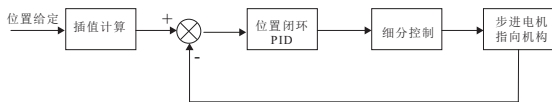


图2 伺服控制算法结构图

其控制策略为:首先对接收到上位机发送的给定位置进行插值计算,然后以插值计算得到的结果作为位置闭环PID每个控制周期的位置给定,进行PID位置闭环控制,

得到位置闭环PID的结果;以位置闭环PID的计算结果为速度给定,进行步进电机的细分控制,并采用SPWM技术控制输出给驱动芯片的PWM信号。

2.1 插值PID位置控制算法

天线指向机构接收上位机每2s发送的位置给定指令,PID位置闭环无法保证电机刚好在规定的时刻达到目标位置,会导致在指向过程中会出现走走停停的现象。如何保证指向机构的指向精度和平滑指向是位置闭环控制的关键和重点。因此本文提出了一种基于插值的PID的控制算法。

首先对上位机每隔一定时间发送的给定位置进行插值处理,计算得到每个控制周期的给定位置,从而保证电机在指向时能够平稳光滑地运动。插值算式如下:

$$r_{ef}(t) = ref(t-1) + \frac{r(k+1) - r(k)}{N} \quad (1)$$

式中: $r_{ef}(t)$ 表示插值后计算得到的第 t 个控制周期的给定位置; $r(k)$ 表示上位机第 k 次给定的位置值; N 是一个常数,表示每2s插值的次数。

得到每个控制周期的位置给定后进行位置闭环控制。在该系统中,步进电机的位置闭环为典型的绝对式的PID闭环控制算法,其离散算式如式(2)所示。

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \sum_{i=0}^t e(i) + K_d \times [e(t) - e(t-1)] \quad (2)$$

其中

$$e(t) = r_{ef}(t) - f_b(t) \quad (3)$$

式中: $f_b(t)$ 表示第 t 个控制周期旋转变压器反馈的位置值; $e(t)$ 表示第 t 个控制周期给定位置与反馈位置的误差值; $u(t)$ 表示位置闭环PID第 t 个控制周期的输出值,也就是速度给定; K_p 、 K_i 、 K_d 分别表示比例系数、积分系数和微分系数。在得到位置闭环PID输出结果值后,进行步进电机的细分驱动控制。

2.2 步进电机细分控制算法

由于所使用步进电机的特性,步进电机驱动器每接收到一个脉冲信号,步进电机就转动一个固定的步距角 0.9° ,即此步进电机的分辨率为 0.9° 。但是控制精度要求为 0.1° ,这使得指向机构的控制精度达不到要求。可通过步进电机细分驱动控制提高电机的分辨率,细分驱动控制步进电机各相电流以阶梯状变化,通过减小各相电流的突变来减小电磁力矩的突变,减小合成磁势的角度,从而达到细分的目的^[10-12]。为了使步进电机细分后的每一步转动的角度保持一致,必须保证电流合成矢量的大小和旋转角度保持不变,使用电流矢量恒幅均匀旋转法,给A、B两相通入相位差为 $\pi/2$ 的正弦电流。步进电机细分控制算法框图如图3所示。

正弦表中按照地址存放着正弦值,根据位置闭环PID输出的结果 $u(t)$ 进行正弦表地址计算,读出该地址存放的数据,输出至比较器的输入端,三角波计数器生成的三角波数据输出至比较器的另一端。将这两端的数据经过比较器比较,得到SPWM脉冲信号。正弦表地址计算算

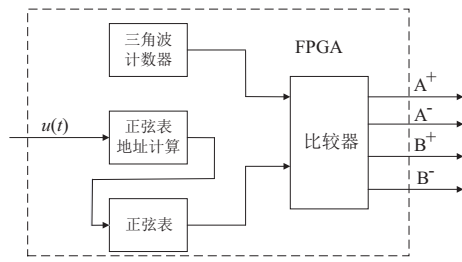


图3 细分控制算法结构图

式如下所示:

$$m = \frac{4 \times s_{\text{tep}} \times 360^\circ}{\alpha} \quad (4)$$

$$p = \frac{u(t) \times m}{60 \times f} \quad (5)$$

$$a_{\text{addr}} = \sum p \quad (6)$$

式中: m 表示电机每转动一圈所需要的脉冲数; s_{tep} 表示细分分数; α 表示步进电机的步距角; p 表示每个控制周期所需要的脉冲数; f 表示控制频率; a_{addr} 表示计算得到的正弦表地址。首先计算出电机每转动一周所需要的脉冲数,然后通过单位转换计算得到每个控制周期所需要的脉冲数,并将每个控制周期所需要的脉冲数累加就得到当前控制周期的正弦表地址。得到正弦表地址后读取正弦表数值,将正弦表数值与三角波计数器进行比较,产生对应的PWM信号。

2.3 控制算法仿真

运用 Simulink 对设计的控制算法进行建模仿真,并不采取插值只采取PID的控制算法进行仿真对比。仿真结果如图4-图5所示。

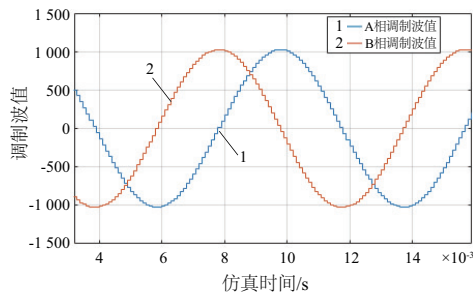


图4 两相调制波仿真结果图

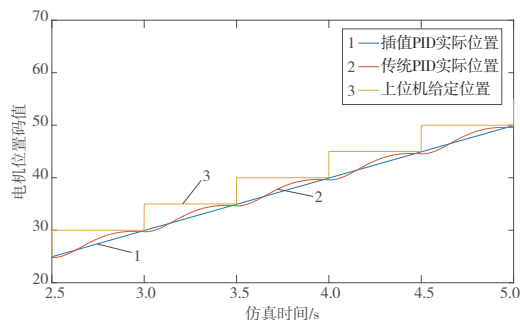


图5 系统算法仿真结果图

图4是A、B相SPWM调制的数值为相位差为 $\pi/2$ 的正弦波,满足其控制要求。图5是系统最终仿真结果,结果显示基于插值PID的控制算法相较于传统的PID控制算法的电机速度平滑,并且指向精度也相对提高。

3 试验验证

3.1 指向精度试验验证

采用专用测试台对伺服控制器进行指向测试试验。上位机在发送跟踪指令前先给控制器下发预置指令,使电机转动至指向指令的初始位置。到达初始位置后开始进行指向跟踪(测试台每隔2s发送指向位置)。本试验发送的指向位置是周期为2000s、幅值为 180° 的正弦曲线。最终测试结果如图6所示。试验结果表明该系统指向跟踪精度高,达到了 0.09° 的指向精度,并且满足电机平稳跟踪的要求。

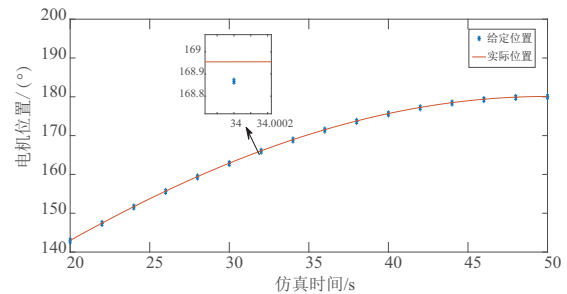


图6 电机指向试验结果图

3.2 可靠性试验验证

为了验证这个基于国产FPGA的伺服控制器在空间环境中的可靠性,进行了热循环试验和EMC试验。

热循环试验条件按照Q/RJ356-2013《卫星型谱单机试验通用要求》在高低温交变试验箱中展开,如图7所示。试验初始温度为 22.3°C ,初始相对湿度为44%RH。试验的温度范围为 $-35^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$,并且第一次和最后一次的高温端和低温端的持续时间至少为6h,中间循环的高温端和低温端的持续时间至少为2h,温变速率为 $3 \sim 5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。



图7 热循环试验箱内状态图

EMC试验条件按照Q/RJ356-2013《卫星型谱单机试验通用要求》在EMC实验室开展。试验布置如图8

所示。

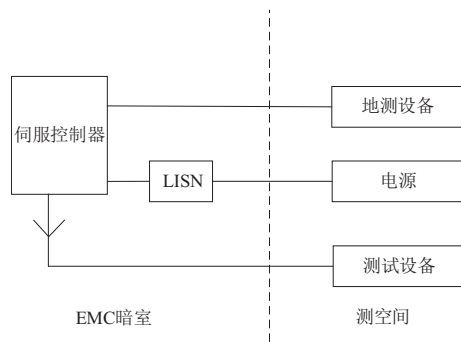


图 8 EMC 试验布置图

将待测的伺服控制器放入 EMC 实验室中,电源通过 LISN(线路阻抗稳定网络)给被测的伺服控制器供电,被测伺服控制器通过电缆与地测相连来观察试验时伺服控制器的主要功能参数。由于此伺服控制器主要采用二次电源供电,其核心电源为 5V,因此对其展开了 CE102(10kHz~10MHz 电源线传导发射)检测项目,测试结果如图 9 测试结果显示,在 260kHz~4.16MHz 频段有超标。该超标主要是由于该频段与电机驱动频率和产品内部晶振频率的倍频重合造成,属于机构驱动控制类电子产品固有特性,不影响其性能。

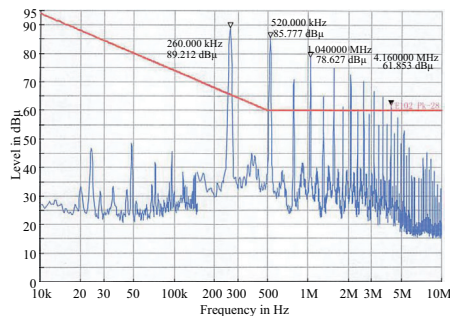


图 9 5V 正端 CE102 检测图

在进行伺服控制器热循环试验和 EMC 试验时,对该产品的主要功能进行测试。其试验的测试值如表 1 所示。

表 1 伺服控制器试验前后主要指标测试表

工况	驱动电源 遥测/V	PROM 供电/V	FPGA 供电/V	指向精 度/(°)
试验前	28.00	1.80	3.30	0.09
热循环	28.01	1.79	3.29	0.09
EMC	28.00	1.80	3.30	0.09

测试结果显示:在进行热循环试验和 EMC 试验时,伺服控制器的功能参数基本没有发生变化,伺服控制器满足空间环境的可靠性要求。

4 结语

本文针对天线指向机构,采用国产 FPGA 作为指向机构伺服控制器的主控芯片,基于插值的 PID 算法设计并实现了单片 FPGA 架构的天线指向机构伺服控制器,并对此伺服控制器进行了热循环试验验证和 EMC 试验验证。结果表明,此基于插值 PID 算法、细分的 SPWM 技术的伺服控制器能够精确地实现指向,并且在进行热循环和 EMC 试验时,伺服控制器的各项指标和功能均符合要求。因此,该伺服控制器满足天线指向机构的指向精度要求和空间环境的可靠性要求。

参考文献:

- [1] 董毅,陈伟,李臣政,等. 高分五号卫星数传天线指向机构系统技术研究[J]. 上海航天,2019,36(增刊2):73-78,98.
- [2] 雷志军,蒋炯炜,郭刚,等. DSP 处理器单粒子翻转率测试系统的研制[J]. 半导体技术,2019,44(1):73-79.
- [3] 刘鹏,董超,杨政委,等. 一种基于单片机和 FPGA 的星载定位指向控制器设计[J]. 空间电子技术,2016,13(6):14-18.
- [4] 侯超,郑悦,姚惟琳,等. 基于 FPGA 小型化数传中继天线驱动控制设计[J]. 电子技术应用,2019,45(5):81-84,88.
- [5] BAASCH A K S, LEMOS E C, STEIN F, et al. Resolver-to-digital conversion implementation—a filter approach to PMSM position measurement [C]//2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Malaga, Spain: IEEE,2011:1-6.
- [6] HANSELMAN D C. Resolver signal requirements for high accuracy resolver-to-digital conversion [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,1990,37(6):556-561.
- [7] 徐大林,高文政. 基于 FPGA 的多极旋转变压器粗、精数据组合双速处理器的设计与实现[J]. 测控技术,2006,25(5):42-45,50.
- [8] 王泮海,史敬灼,徐殿国. 二相混合式步进电动机 SPWM 细分驱动[J]. 微特电机,2002,30(6):13-14,39.
- [9] 闫贵军,吕海宝,漆新民. 提高步进电机步距精度的研究[J]. 国防科技大学学报,1994,16(2):38-42,54.
- [10] 曾高荣,高杨,胡莉,等. 细分驱动在步进电机控制中的应用[J]. 兵工自动化,2004,23(2):52-53.
- [11] 紫文才,何邦贵,紫振钦. 基于 FPGA 的步进电机优化控制[J]. 现代电子技术,2013,36(23):142-144.
- [12] 中国航天科技集团公司第八研究院. Q/RJ 557—2017 卫星型谱单机试验通用要求[S]. 2017.

收稿日期:2020-09-28