

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2016.06.008

滚摆式导引头稳定平台控制器设计

曾龙,莫波,齐贺
(北京理工大学,北京100081)

摘要:滚摆式导引头体积小、质量小、框架角大,能够实现对前半球视场的覆盖。设计了一种基于DSP TS101与FPGA的滚摆式导引头伺服稳定控制器。分析了伺服控制器硬件电路设计与控制算法,实现对滚转和摆动框架的伺服稳定控制。最后对滚转、摆动框架进行隔离度试验,取得较好的效果。

关键词:滚摆式导引头;稳定平台;PID前馈控制

中图分类号:TJ765.3

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2016)06-0040-05

Design of Servo Controller for Roll-Pitch Seeker's Stabilized Platform

ZENG Long, MO Bo, QI He

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Roll-pitch seeker has the advantages of small size, light weight and large frame angle which make covering over the front field of hemisphere facilely. The paper designs a servo stability controller of the roll-pitch seeker based on DSP TS101 and FPGA and then analyzes the hardware circuit design of servo controller and control algorithm which makes the servo control of roll and swing frame stable. Finally, the isolation experiment of the roll-pitch seeker and swing frame is performed, achieving good results.

Key words: Roll-pitch seeker; Stabilized platform; Feedforward PID control

0 引言

导引头是现代制导武器的重要组成部分,常用的导引头采用俯仰和偏航2个框架,具有控制系统简单、两通道独立、耦合较小的优点。但由于结构限制,最大离轴角一般不超过 60° 。滚摆式导引头可以达到 360° 的滚转框架角, $\pm 90^\circ$ 的摆动框架角,可覆盖整个前半球面,实现对目标的大离轴角跟踪。但由于滚摆式导引头一般应用于跟踪高速、大机动目标及其过顶跟踪情况下存在奇异性问题,要求滚转框具有很高的响应速度,对伺服控制器提出了很高的要求。本文设计了一种基于DSP TS101和FPGA的滚摆式导引头伺服控制器,试验表明该系统具有较好的隔离性能,能满足工程应用的需要。

1 滚摆式导引头稳定平台原理及研究现状

滚摆式导引头稳定平台由直流电机、角速率陀

螺及陀螺信号处理电路、电位计角测量传感器、光学系统及图像跟踪器、伺服控制器构成。在内框摆动框架上安装光学系统及角速率陀螺,角速率陀螺敏感滚转与摆动方向相对于惯性空间的角速率,作为速度环反馈实现伺服稳定控制。滚摆式导引头伺服稳定平台结构如图1所示^[1]。

由于滚摆式导引头的大框架角、能够覆盖前半球面的大离轴角跟踪的特点,国内外进行了大量的研究,且国外已经有几个型号定型并装备。雷声公司2002年研制了AIM-9X滚摆式导引头,它在测试与军演中取得了优秀的成绩并获得了大量的订单,目前成为美式战机的主战装备之一。同年,以德国BGT公司为首的欧洲六国的公司推出了IRIS-T滚摆式导引头,它的性能指标与AIM-9X相当,成为欧洲战机的主战武器之一。AIM-9X与IRIS-T最大离轴发射角均达到了 $\pm 90^\circ$,IRIS-T最大跟踪角速度达到 $1800(^{\circ})/s$ ^[2-3]。国内对滚摆式导引头稳定平台

收稿日期:2015-06-28;修订日期:2015-08-12。

作者简介:曾龙(1991-),男,硕士,主要从事导引头伺服控制研究。

E-mail:13366409052@163.com

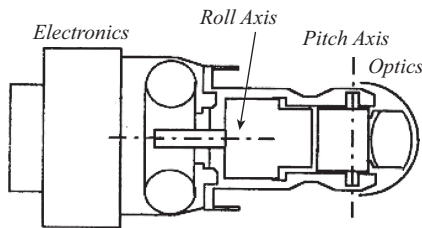


图1 滚摆式导引头结构示意图
Fig.1 Structure of roll-pitch seeker

的运动学原理、过顶跟踪的奇异性原理及控制策略都进行了很多分析和仿真^[4,6-7]。在导引头伺服控制器设计上,经典控制理论依然发挥着重要的作用,引入校正环节的PID控制器有着广泛的应用^[7]。采用位置-速度-电流的三环控制方案的导引头伺服控制器相对位置-速度双闭环的方案有更高的控制精度。在国内关于滚摆式导引头的研究多在理论研究,关于工程设计的相关论述不多。本文提出了一种采用位置-速度-电流三环控制的滚摆式导引头伺服控制器的硬件设计方案。

2 伺服控制器硬件设计方案

2.1 系统结构

伺服控制器的主要功能:1)接收图像处理器的失调角信息、陀螺传感器的导引头角速度信息;2)采集电位机的位置反馈,通过霍尔电流传感器采集电机电流反馈;3)根据反馈参数通过控制算法生成控制信号,然后通过电机驱动电路控制滚转电机和摆动电机转动,实现对导引头位置角度与角速度的控制;4)在跟踪状态下保证导引头光轴时刻对准目标,向弹载计算机发送视线角速度信息。

伺服控制器主要由处理器 DSP TS101、FPGA EP3C16F256I7、通信接口电路、电流采集电路、AD转换电路、电机驱动电路组成,系统结构如图2所示。

2.2 DSP与FPGA主控电路

采用ADI公司的高速DSP处理芯片TS101作为伺服系统的主控芯片,TS101是ADI公司推出的32位高性能定浮点DSP。它采用超级哈佛结构,工作主频300MHz,拥有丰富的片内资源,包括6Mbytes片内SRAM、主机接口、DMA控制器、链路口以及可以无缝组成多处理器的共享总线。64位数据总线和32位的地址总线为TS101提供4G的统一寻址空间,4

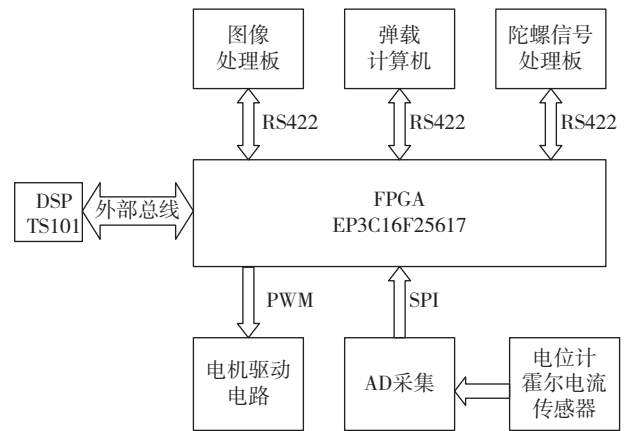


图2 伺服控制系统框图
Fig.2 Schematic diagram of servo controller

通道全双工链路接口最大的通信速度可以达到250Mbytes/s。同时支持8/16/32/64bit定点和32/64bit浮点数据格式,大大提高浮点运算能力,为编写复杂的控制算法提供较强的硬件支持。

由于TS101数据处理能力强,但与外部的连接以并行总线与链路口的方式,而伺服控制器与图像处理板、陀螺信号处理板、弹载计算机都通过RS422通信,与AD采集芯片通过SPI通信,同时需要生成4路高精度的PWM信号,而这些外部接口很难在DSP中完成。因此本文采用了1片FPGA处理所有与外设的通信,FPGA与DSP间采用总线方式连接,大大提高了数据交互的速度,同时让DSP更加专注于控制算法的实现。本文采用的FPGA EP3C16F256I7是Altera公司推出的Cyclone III系列FPGA。Cyclone III FPGA所具有的体系结构和特性为低功耗、低成本应用提供了理想的解决方案。它具有200K逻辑单元(LE)、8Mbits存储器且静态功耗不到1/4W^[8]。

2.3 电流、电位计信号调理电路

系统中需要采集红外导引头的4路模拟量,包括2路电位计信号和2路霍尔信号,该4路模拟信号采用共地接法。为满足采样需要AD分辨率不低于12位,对于4路模拟量的采集精度为 $\pm 10\text{mV}$;单路转换时间不大于 $5\mu\text{s}$ 。AD采集芯片采用AD公司集成芯片ADS723,这是一个单通道AD转换芯片,采用SPI通信,采样精度高、AD转换时间短。为了采集4路模拟信号,选用了—个8路通道选择器ADG608BR,前4通道接2路电位计信号、2路霍尔电流信号。采用多通道选择器进行选通模拟通道可以减少AD转换电路、光耦隔离电路以及运算放大电路,减小布线面积。为了给AD转换芯片提供

稳定的参考源,本文采用精密电源芯片 REF3325 为 AD 提供 2.5V 基准电压,通过放大电路放大 2 倍后为 AD 转换芯片提供 5V 基准电压。为了匹配输入阻抗和模拟量信号范围,所有模拟信号经过放大电路进行信号调理。模拟信号调理与 AD 采集的系统框图如图 3 所示。

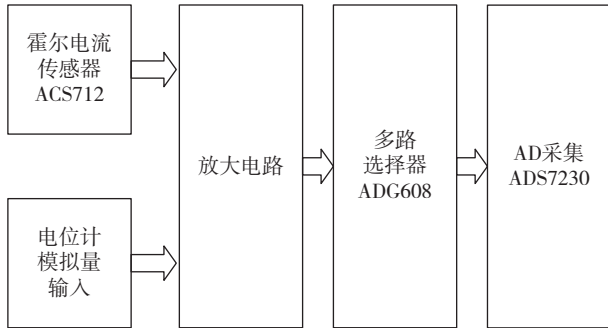


图 3 模拟信号调理与 AD 采集的系统框图

Fig. 3 Block diagram of analog signal adjusting circuit and AD acquisition

2.4 电机驱动电路

电机驱动电路用于驱动 2 个直流有刷电机,由于滚转框负载较大而响应要求很快,对驱动电路提出很高的要求。由于驱动电路对控制电路干扰较大,本文采用光耦隔离电路将 FPGA 输入的控制信号与驱动部分隔离,驱动电路采用隔离电源单独供电。光耦输出端的 PWM 信号边沿可能抖动,采用反向器对信号进行整理然后给 MOSFET 驱动芯片。

MOSFET 驱动芯片作用是驱动 MOSFET 的通断,为了让芯片稳定工作,本文采用独立隔离电源为芯片提供高端悬浮隔离电源。本文采用 IRF1404 MOSFET,瞬时最大驱动电流达到 100A,满足在滚转框过载情况下对电机驱动能力的要求。图 4 所示为电机驱动的结构框图^[9]。

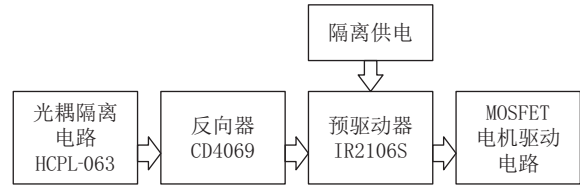


图 4 电机驱动结构框图

Fig. 4 Block diagram of motor driving

3 伺服控制算法

导引头伺服系统可分解成滚转和摆动 2 个框架上的位置伺服系统。图像跟踪器处理由红外成像传感器传送过来的图像,识别目标并计算出目标的失调角信息,将失调角通过 RS422 发送给伺服控制系统。为满足制导精度,位置伺服系统必须快速响应,保证导引头光轴时刻对准目标,因此必须加入速度环和电流环。位置控制器根据偏差信息形成角速度指令信号传递至速度控制器,速度控制器使用挠性陀螺作为速度反馈,通过 PID 算法生成控制信号给电流控制器。电流控制器可以提高伺服系统的低频性能,克服伺服结构摩擦力。图 5 所示为控制系统的控制框图^[10-11]。

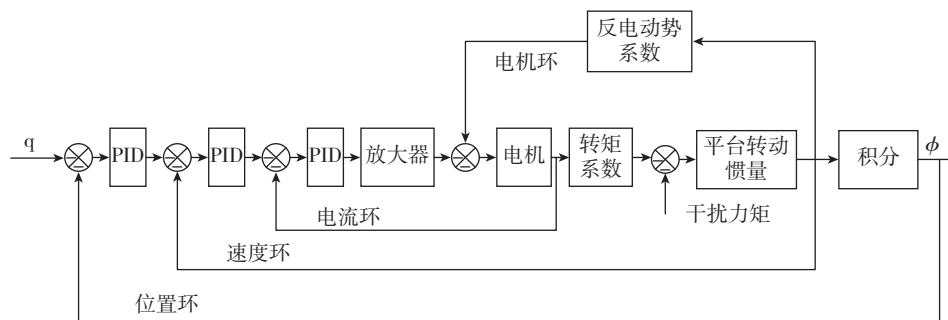


图 5 控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of control system

前馈 PID 控制器

PID 控制器由比例、积分、微分三个环节构成,它的结构简单、参数易于调整,适用于控制对象模型不明确、难以建立精确的数学模型的场合。PID

控制器在连续系统控制上应用最为成熟,在定参数的线性系统中,PID 参数经过整定,系统的静态、动态性能都能达到满意的效果。PID 控制器系统原理框图如图 6 所示^[12-13]。

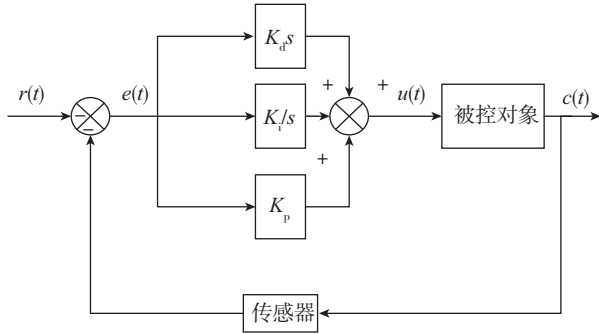


图 6 PID 控制器原理图

Fig. 6 Schematic diagram of PID controller

传统 PID 控制器存在一定的滞后,在高速高精度的运动控制系统中,很难在满足相位不滞后的同时保证系统稳定且超调量小。对于滚摆式导引头伺服稳定控制系统,由于目标在过顶区对滚转框的伺服响应速度要求非常高,传统的 PID 控制器很难满足其高速响应要求。前馈环节对控制系统具有一定预见性,因此本文在跟随回路的速度环在传统 PID 上引入前馈环节,提高运动控制系统的响应性能以及隔离度等指标。加入前馈环节的 PID 控制系统如图 7 所示^[14-15]。

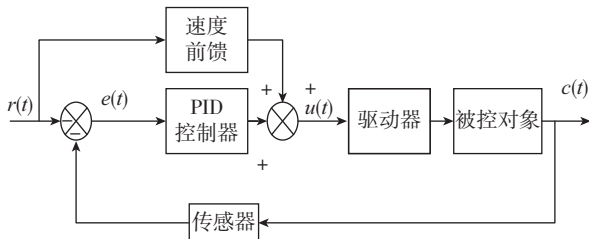


图 7 前馈 PID 控制器原理图

Fig. 7 Schematic diagram of feedforward PID controller

加入前馈环节的离散 PID 表达式为

$$u_k = K_p \left[e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + \frac{T_d}{T} (e_k - e_{k-1}) \right] + K_f [r_{k+1} - r_k] + u_0$$

式中, K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; K_f 为前馈系数。

4 实验结果分析

本文设计了基于上述结构的滚摆式导引头原理样机,为了测试伺服控制器的性能,采用隔离度测试实验测试滚转框和摆动框电机的动态性能。指令由伺服控制器自动生成,通过 RS422 将指令与反馈信息传回计算机。本文采用虚拟仪器软件 lab-windows 设计上位机软件与伺服系统通信,绘制伺服系统数据曲线,并保存测试数据。

隔离度测试方法是导引头安装在转台上,让转台在测试轴上做正弦摆动,同时导引头伺服系统控制导引头光轴方向不动。在正弦摆动幅值 2° 频率 3Hz 的情况下,计算导引头实际摆动幅值与弹体正弦摆动幅值的百分比。由于导引头上的陀螺传感器不能直接检测弹体摆动速度,本文采用导引头上电位计角度信息差分后与陀螺角速度合成的方法计算实际的弹体扰动。

图 8 所示为摆动框隔离度检测曲线,图 9 所示为滚转框隔离度检测曲线。由于导引头隔离弹体扰动后摆动速度非常小,为了便于观察将滚动框与摆动框的速度均乘以 10 后绘制曲线。分析隔离度测试数据,摆动框的隔离度达到 2.9%,滚转框的隔离度为 3.3%,满足工程实际的要求。

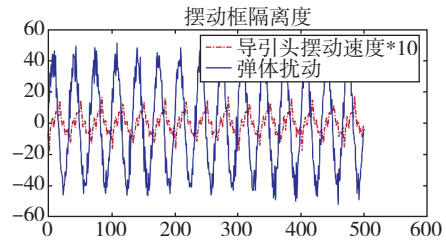


图 8 摆动框隔离度检测曲线

Fig. 8 Anti-jamming result of the pitch channel

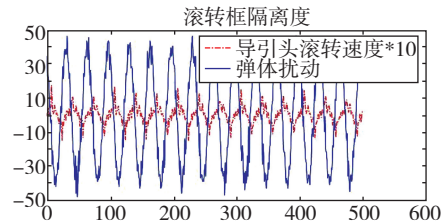


图 9 滚转框隔离度检测曲线

Fig. 9 Anti-jamming result of the roll channel

5 结论

本文设计了滚摆式导引头伺服稳定控制器。硬件上讨论了伺服控制器的硬件电路设计,分析了伺服控制器各个功能模块的设计思路;软件上研究分析了前馈 PID 控制器在伺服控制器控制上的应用。最后,通过隔离度测试实验,滚转框和摆动框均能满足在实际工程系统中的要求,达到了预期的指标。

参考文献

[1] Peter H Z. Modeling and simulation of aerospace vehicle dynamics [M]. Gainesville, Florida: American Institute of Aeronautics and

- Astronautics, 2000.
- [2] 汤永涛, 林鸿生, 陈春. 现代导弹导引头发展综述[J]. 制导与引信, 2014, 35(1):12-17.
- [3] 邵开开, 王佳民, 王卿. 精确制导武器的导引头综述[J]. 科技创新导报, 2011(34):11.
- [4] 王志伟, 祁载康, 王江. 滚-仰式导引头跟踪原理[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2):274-277.
- [5] 朱明超, 贾宏光. 基于 Padan-Kahan 子问题求解滚仰式导引头角增量[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8):1838-1844.
- [6] Jiang H H, Jia H G, Wei Q. Analysis of zenith pass problem and tracking strategy design for roll-pitch seeker [J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 23(1): 345-351.
- [7] 刘慧. 滚仰式导引头伺服机构稳定跟踪技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- [8] ADSP-TSIOI TigerSHARC Processor Hardware Reference [C]// Analog Devices Inc, 2003.
- [9] 胡浩. 基于 DSP 双轴稳定控制平台设计[D]. 南京理工大学, 2007.
- [10] 范宏伟. 红外导引头的二轴伺服稳定平台控制系统设计与实现[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [11] 卢志刚, 吴杰, 吴潮. 数字伺服控制系统与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [12] Abdo M, Vali A R, Toloei A, et al. Research on the cross-coupling of a two axes gimbal system with dynamic unbalance [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(4):301-319.
- [13] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [14] 胡寿松. 自动控制原理(第 5 版)[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [15] 胡佑德, 马东升, 张莉松. 伺服系统原理与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003: 135-186.