

文章编号:1002-2082(2012)01-0019-07

基于 xPC 的光电平台系统半实物实时仿真

黄显林, 鲍文亮, 卢鸿谦, 李明明

(哈尔滨工业大学 控制理论与制导技术研究中心, 哈尔滨 黑龙江 150001)

摘 要:为了便捷高效地设计和调试光电平台系统的稳定、跟踪控制算法, 基于 Matlab 的 xPC Target 环境设计开发了半实物实时仿真系统。阐述了系统的总体设计方案, 给出了系统软、硬件实现方法。通过半实物仿真, 完成了平台的模型结构参数辨识, 设计并测试了比例积分控制器、校正控制器和 μ 综合控制器。对半实物仿真系统进行摇摆实验以评估所设计的控制系统的视轴稳定精度。实验结果显示, 校正控制器因其在低频段具有更高的增益从而使系统获得了最高的稳定精度, 通过实验结果可有效地选择出扰动抑制特性最优的控制器设计。

关键词:光电平台; 惯性稳定; xPC 目标; 半实物仿真; μ 综合

中图分类号: TN209; TP275

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201233.0101005

xPC based hardware-in-the-loop simulation of electro-optical platform systems

HUANG Xian-lin, BAO Wen-liang, LU Hong-qian, LI Ming-ming

(Center for Control Theory and Guidance Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to design and debug the stabilizing and tracking control arithmetic of an electro-optical platform system conveniently and efficiently, a hardware-in-the-loop simulation system was designed and implemented based on Matlab xPC target environment. The overall design of the system was presented, and the implementation of software and hardware was described. Through hardware-in-the-loop simulation, the model structure and parameter of the plant were identified, furthermore, proportional integral controller, correction controller, and μ synthesis controller were designed and tested. Vibration experiments were carried out for every control system designed to evaluate the line-of-sight stabilization accuracy. Experimental results show that the correction controller, which has the maxium gain value in the low frequency band, makes the system achieve the highest stabilization accuracy. According to experimental results, the controller which has optimal disturbance attenuation is selected.

Key words: electro-optical platform; inertial stabilization; xPC Target; hardware-in-the-loop simulation; μ synthesis

引言

光电稳定跟踪平台是近年来发展迅速的一种新型实时图像侦察设备, 其主要功能是隔离载体

的运动使平台承载的光学传感器能够获得目标或目标区域稳定清晰的图像^[1-2]。光电平台多采用环架结构实现光学传感器视轴的 1 至 3 个转动自由

收稿日期: 2011-07-25; 修回日期: 2011-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874084)

作者简介: 黄显林(1956—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 主要从事飞行器导航与控制及复杂系统控制的研究工作。

度,对每一自由度通道,其控制系统通常为稳定、跟踪的双闭环结构。跟踪回路通常由光学传感器采集的光信号闭合。但是图像处理的速度以及传输延时限制了跟踪回路的带宽,无法有效抑制各种干扰。以陀螺仪等惯性元件为传感器,可以在跟踪回路内设置一个具有较高带宽的惯性稳定回路,通过执行机构产生的稳定力矩来抑制各种扰动,从而减小视轴抖动,保证成像质量。

控制系统的设计和调试是保证光电平台性能和精度的重要环节。对于光电平台系统,由于传统的模拟控制方案在调试时存在不易数据采集以及控制器结构和参数一旦确定不易调整等缺点,已逐渐被数字控制方案所取代。近年来光电平台多采用嵌入式微处理器(或微控制器)实现数字控制,但在控制系统的设计和调试环节上仍存在诸多不便。首先,尽管仿真器拥有强大的数据交互能力,可以方便地进行系统编程和调试,但是其电磁兼容性通常较差,在复杂的现场环境下基本无法使用。其次,如果使用数字控制器记录系统运行时的相关数据并通过通信接口进行在线或离线传输从而进行设计和调试,则一方面需要为调试增加冗余的硬件资源,另一方面需要为控制系统调试编写相关的程序,增加了软件设计的工作量。第三,在控制系统的调试过程中频繁地编写程序也将降低设计开发效率。

RTW 是 MathWorks 公司提供的 Matlab 工具箱之一,是一个基于 Simulink 的代码自动生成环境。它能直接从 Simulink 的模型中产生优化的、可移植的和个性的代码,并根据目标配置自动生成多种环境下的程序。xPC Target 是一个基于 RTW 体系框架的附加产品,可将 PC 兼容机转变为一个实时系统,而且支持许多类型的 IO 设备板,在半实物实时仿真中得到了广泛应用^[3]。为了便捷高效地设计和调试光电平台的稳定、跟踪控制算法,本文基于 Matlab 的 xPC Target 环境设计并实现了光电平台半实物实时仿真系统,使所设计的控制算法能够对硬件在回路进行仿真,完

成快速原型化系统;并通过方便强大的数据交互手段进行检测及调试,从而有效提高控制系统的设计开发效率。

1 光电平台半实物仿真系统设计

1.1 系统总体设计

本文所设计的光电平台半实物仿真系统的控制结构如图 1 所示。平台采用双轴二环架的结构形式,有方位和俯仰 2 个回转轴,每轴以直流力矩电机驱动,并通过光电码盘敏感各环架相对基座的位置。平台上安装电视摄像系统获取可见光图像信息;同时安装 2 个单自由度陀螺仪分别直接敏感光学传感器视轴的俯仰和方位轴向上的惯性角速率。视频输出信号由图像跟踪器进行处理,一方面将原始视频信号与跟踪球位置、十字丝、目标选择框等图像辅助信息融合,生成混合视频信号输出至监视器显示;另一方面解算视轴中心与目标位置的脱靶量输出至主控计算机。

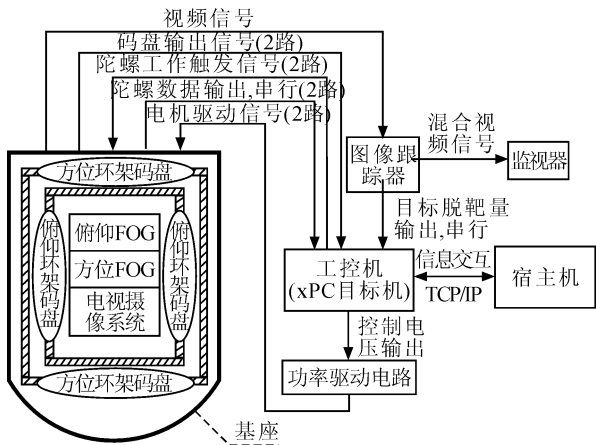


图 1 半实物实时仿真系统结构图

Fig. 1 Architecture of hardware-in-the-loop simulation system

1.2 系统硬件实现

本系统采用国产单自由度光纤陀螺仪作为惯性测量元件。该陀螺需要一路 TTL 电平的选通信号,通过下降沿触发陀螺仪的输出性能。陀螺测量的惯性角速率以串行通信方式输出,输出数据格式以二进制补码表示,采用 RS-422 通信协

议,传输速率为 614.4 kb/s。本系统采用增量式光电编码器作为敏感环架相对角位移的传感器。另外,系统使用了国产图像跟踪器进行图像处理工作,其解算得到的脱靶量信息以串行方式传输,采用 RS-232 通信协议,传输速率选为 115.2 kb/s;xPC 目标机通过主板自带的串口资源与图像跟踪器通讯。

本系统选用成都电机厂生产的 J80LYX01 和 J130LYX02 型直流力矩电机分别作为俯仰、方位两通道的执行元件。该两型号电机的连续堵转电压分别为 18 V 和 24 V,连续堵转电流 1.33 A 和 1.6 A,连续堵转转矩 1 Nm 和 2.5 Nm。针对所选择的力矩电机参数,基于 TI 公司的 L293 芯片设计实现了电机的功率驱动电路。L293 是 4 路半 H 桥驱动电路芯片,支持 4.5 V 至 36 V 的宽范围电压输入,每通道的输出电流 1 A,峰值输出电流可达 2 A,将两通道并联使用,可以获得双倍的输出电流;该芯片还具有热关断保护电路,保证了系统的可靠性。功率驱动电路采用模拟电压信号输入,输入范围为 ± 10 V,可以由 DA 电路直接驱动。

为了实现数据采集与通信,本系统在 xPC 目标机上分别使用了研华公司的 PCI-1716、PCI-1602B 和 PCI-1784 三块板卡完成不同的工作。PCI-1716 是 PCI 总线多功能数据采集卡,PCI-1602B 是 2 端口 RS422/485 的 PCI 总线通信卡,并带有隔离及过电压保护电路。PCI-1784 是 4 轴正交编码器和计数器 PCI 总线卡。本系统使用 PCI-1716 的两路数字输出 DO 信号作为两陀螺输出使能的触发信号,同时,陀螺串行输出的角速率信息通过 PCI-1602B 接收采集。2 个增量式光电编码器输出的正交编码脉冲信号接至 PCI-1784 的输入端,xPC 目标机通过 PCI-1784 的计数器值获得编码器提供的相对角位移信息。另外,PCI-1716 的两路 DA 输出俯仰、方位两通道的电机控制量至功率驱动电路。电控系统的信号连接结构如图 2 所示。

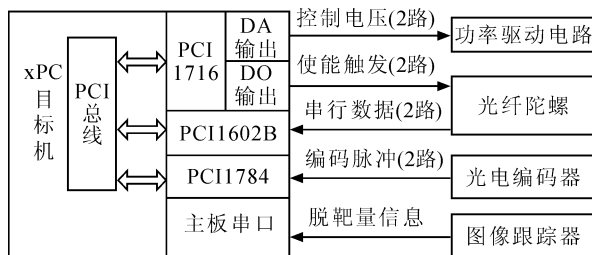


图 2 电控系统信号连接图

Fig. 2 Signals connection of electronic control system

1.3 系统软件实现

Matlab 的 xPC Target 开发环境直接使用 Simulink 模型生成可执行程序。对于在目标机中实现的仿真算法,与非实时离线仿真相同,用户只需在 Simulink 环境下使用相应的模块并连接得到所需的模型结构即可。与离线仿真不同的是,仿真模型要用到目标机的某些外设资源输入的数据信息,并将计算得到的结果输出至某些外设。因此,仿真模型中需要包括所用到的外设资源的驱动程序。xPC Target 将外设的驱动封装成系统模块,用户需使用标准 C 语言编写模块的 S 函数,并利用 Matlab 提供丰富的函数方法,生成需要的外设驱动模块。将驱动模块加入到算法模型中,就得到实时仿真模型的系统原型了,然后建造成可执行程序下载到目标机运行。

在本系统中,需编写 PCI-1716、PCI-1602B 和 PCI-1784 三块板卡在 xPC Target 环境下针对不同功能的设备 IO 驱动程序。其中在 Matlab 提供的 mdlStart() 函数中进行各项设备初始化工作;在 mdlOutputs() 函数中编写每一采样时刻设备的输入输出程序;在 mdlTerminate() 函数中进行仿真结束时的各项设置。由于厂家在 PCI-1602B 的说明书中没有给出板卡的寄存器设置说明,因此实现两路光纤陀螺数据的采集是本系统顺利运行的关键。

在俯仰和方位两路陀螺数据采集模块的 S 函数中,mdlOutputs()函数数据采集程序流程图如图 3 所示。

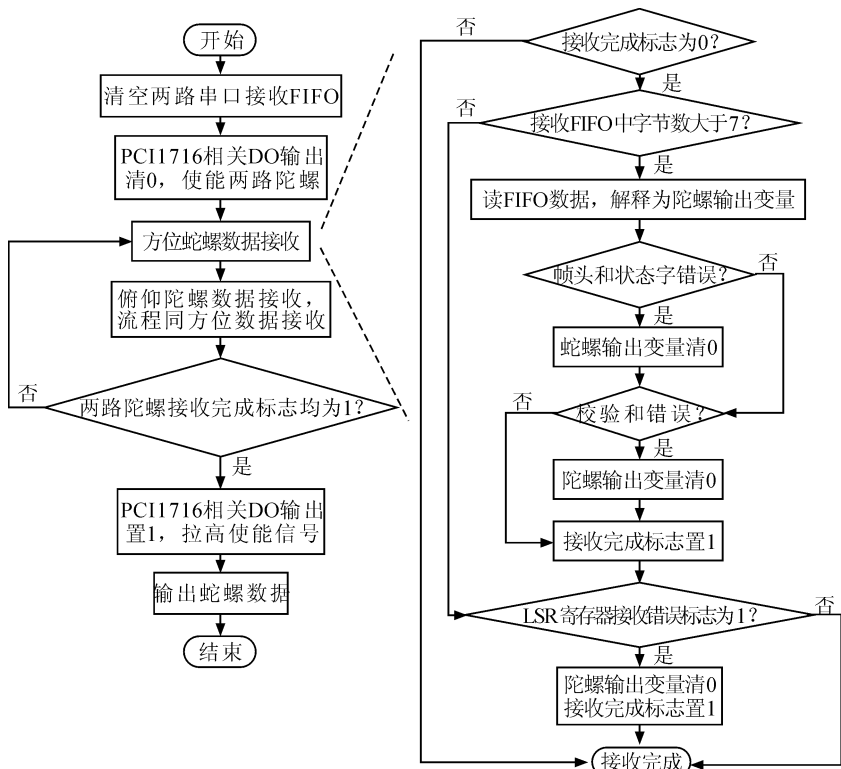


图 3 陀螺数据采集程序流程图

Fig. 3 Program flow chat of gyro data acquisition

2 控制算法的设计与调试

本文设计并通过半实物仿真测试了不同的稳定回路控制算法。下面以方位通道为例进行阐述。

2.1 平台对象模型结构参数辨识

使用 xPC Target Scope 模块可以记录或实时显示系统运行时的各项数据。本文根据实测扫描数据绘制平台对象的 Bode 图如图 4 所示。可以看出,系统在低频段呈 -20 dB/dec 的衰减特性,机

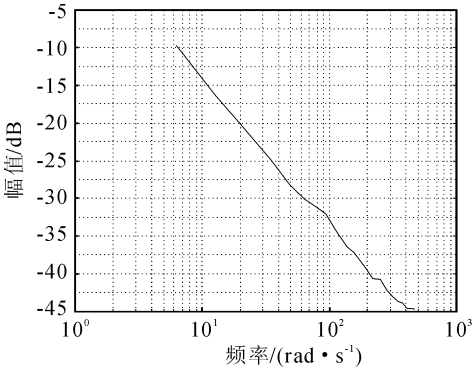


图 4 平台对象 Bode 图

Fig. 4 Bode diagram of plant

电时间常数对应的转折频率低于 1 Hz(6.28 rad/s)。如果忽略反电动势的影响,即不考虑系统在超低频的特性,在低频段可将系统近似看作一积分环节。则可以得到平台对象的数学模型:

$$P(s)=\frac{2.01}{s} \text{ (rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}) \tag{1}$$

2.2 稳定回路比例积分控制器设计

稳定回路抑制作用在转动轴上的扰动力矩,用于隔离载体的运动。为使系统在常值扰动作用下没有输出误差,要求系统在零频时具有无穷大的控制器增益,即具有积分控制作用,这样需要将系统设计为 II 型。先将系统设计为基本 II 型,具有如下的期望开环特性^[4]:

$$G_{q1}(s)=\frac{k(s/\omega_1+1)}{s^2} \tag{2}$$

k 为开环增益,选择转折频率 ω₁ 使系统具有一定的相位裕度以保证相对稳定性。考虑鲁棒稳定性的要求,应当对系统的带宽有所限制。本文通过设计系统的开环带宽(剪切频率)从而保证对系统带宽进行限制。

选择 $k=5\,000$, $\omega_1=51(\text{rad/s})$, 系统的开环带宽为 $108\text{ rad/s}(17.2\text{ Hz})$, 相位裕度 64.8° 。此时, 稳定回路采用比例积分(PI)控制器:

$$K_{\text{PI}} = 48.8 + \frac{2\,487.6}{s} (\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}) \quad (3)$$

通过半实物仿真, 首先测得系统的单位阶跃响应超调 28% , 过渡过程时间 0.088 s ; 其次, 对系统闭环频率特性进行测试, 测得 -3 dB 带宽为 230 rad/s , 谐振峰值 2.99 dB , 谐振频率 94.3 rad/s 。测试结果与设计基本一致, 满足要求。

2.3 稳定回路校正控制器设计

对于稳定回路, 希望系统具有尽可能高的控制器增益以提高伺服刚度, 从而获得更好的扰动抑制性能。而所需的高增益与系统带宽受限构成矛盾, 如果能够在扰动力矩作用的频段内提高系统的开环增益, 并且在有限的带宽范围内使系统具有一定的稳定裕度, 则需要引入滞后校正。因此, 本文进一步将系统设计为改进 II 型, 其期望开环传递函数为

$$G_{q2}(s) = \frac{k(s/\omega_2 + 1)^2}{s^2(s/\omega_1 + 1)} \quad (4)$$

式中转折频率 ω_1 应大于扰动力矩作用的频段; 平方超前使系统能够以 -20 dB/dec 穿越 0 dB 线, ω_2 的选择应当使系统具有一定的中频带宽。通常要求光电平台在载体做频率为小于 2 Hz 的正弦运动时能保证良好的视轴稳定性能, 因此, 提高开环增益至 $k=6\,500$, 选择 $\omega_1=13(\text{rad/s})$, $\omega_2=28(\text{rad/s})$, 系统的开环带宽为 $114\text{ rad/s}(18.1\text{ Hz})$, 相位裕度 68.8° 。此时, 稳定回路采用积分-滞后-平方超前的校正控制器:

$$K_{\text{ad}} = \frac{3\,233.8(s/28 + 1)^2}{s(s/13 + 1)} (\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}) \quad (5)$$

通过半实物仿真, 测得系统的单位阶跃响应超调 26.4% , 过渡过程时间 0.099 s ; 对系统闭环频率特性的测试测得 -3 dB 带宽 232 rad/s , 谐振峰值 2.46 dB , 谐振频率 88.0 rad/s 。

2.4 基于 μ 综合的稳定回路控制器设计

本文关心的问题是, 在受限的带宽范围内, 所

设计的控制器能否使系统的扰动抑制性能达到或接近最优。伺服系统设计的主要要求是对对象输入端干扰的抑制^[5], μ 综合能够系统地使伺服系统的干扰抑制设计达到性能极限^[6]。为此, 本文设计了 μ 综合控制器, 以对所设计的控制系统性能进行评估。

考虑图 5 所示的广义反馈控制系统。平台对象包含了(1)式表达的名义系统 P 和乘性不确定性描述的高频摄动, 权函数 W_2 为乘性不确定性的界, $\Delta_f \in \mathbb{C}$ 为归一化不确定性, 则有:

$$\|\Delta_f\|_\infty < 1 \quad (6)$$

在稳定回路的设计中, 扰动抑制性能指从输入 w_1 到输出角速度 y 的传递函数的最大奇异值 $\bar{\sigma}[T_{yw_1}(j\omega)]$, 这里

$$T_{yw_1}(j\omega) = [I + (I + \Delta_f W_2)PK]^{-1}(I + \Delta_f W_2)P(j\omega) \quad (7)$$

系统设计的目的就是沿整个频率轴尽可能压低 $\bar{\sigma}[T_{yw_1}(j\omega)]$, 即幅频特性 $|T_{yw_1}(j\omega)|$, 性能加权函数 W_1 的选择反映了对 $T_{yw_1}(j\omega)$ 的设计要求。

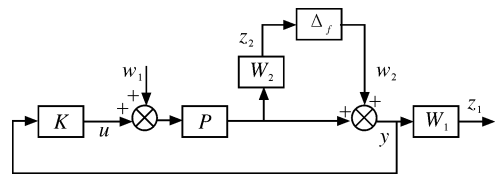


图 5 光电平台广义反馈控制系统

Fig. 5 Generalized feedback control system of E-O platform

系统的设计问题可表述为当存在不确定性 Δ_f 时, 系统具有鲁棒稳定性, 且系统的扰动抑制性能具有鲁棒性, 亦即:

$$\left. \begin{aligned} \|W_2 T\|_\infty &\leq 1 \\ \|W_1 T_{yw_1}(j\omega)\|_\infty &\leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

此处 T 为系统的补灵敏度:

$$T(j\omega) = PK(1 + PK)^{-1}(j\omega) \quad (9)$$

以 $\Delta_p \in \mathbb{C}$ 表示假想的性能摄动块, 有

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= \Delta_p z_1 \\ \|\Delta_p\|_\infty &< 1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

图 5 所示的广义反馈控制系统可以表示为图

6 的一般形式。此时,原设计问题式(8)等价于具有结构性不确定性的广义对象 G 的鲁棒稳定问题。存在结构不确定性的系统,其鲁棒稳定的充要条件是基于一阶奇异值 μ 的概念而给出的。 μ 设计方法可以有效解决此类控制问题。

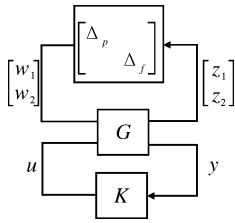


图 6 广义反馈控制系统的等效分析框图

Fig. 6 Equivalent block diagram of the generalized feedback control system

定义不确定性集合

$$\Delta \triangleq \begin{bmatrix} \Delta_p \\ \Delta_f \end{bmatrix} \tag{11}$$

则根据鲁棒性能定理^[7],满足(8)式描述的系统性能的充要条件为

$$\sup_{\omega \in K} \mu_{\Delta}[F_l(G,K)] \leq 1 \tag{12}$$

$F_l(G,K)$ 表示下线性分式变换。Matlab μ 分析及合成工具书中的 dkit 函数提供了求解 μ 综合控制器 K 的 D-K 递推程序。

权函数 W_2 反映了对系统带宽所加的一种限制,用来设计系统的带宽,本文要求设计系统的闭环带宽低于 150 rad/s(23.9 Hz),同时要求过带宽后系统的闭环特性按 -40 dB/dec 衰减,另外要求保证权函数为真有理函数,因此选择:

$$W_2 = \frac{0.1(s/15+1)(s/300+1)}{(s/1\,000+1)^2} \tag{13}$$

权函数 W_1 反映了对系统的性能设计,设需要控制器中有积分控制律,则一般在权函数 W_1 中设置积分环节^[8],选择:

$$W_1 = \frac{\rho}{s+0.001} \tag{14}$$

式中 ρ 是 μ 综合优化设计中的待选参数,设计时,通过合理选择 ρ 的值而使得 μ 接近 1 但不超出 1,以减少保守性。经反复试验,选择 $\rho=2\,270$,调用 dkit 函数迭代 3 次, μ 值的上界为 0.999,得 6 阶控制器 K 。通过绘制系统的开环 Bode 图,可知系统开环带宽为 115 rad/s(18.3 Hz),相位裕度 68.8°。

通过半实物仿真,测得系统的单位阶跃响应超调 23.8%,过渡过程时间 0.056 s;对系统闭环

频率特性的测试测得 -3dB 带宽 225 rad/s,谐振峰值 2.47 dB,谐振频率 100.5 rad/s。

3 摇摆实验测试结果

光电平台以稳定精度指标作为衡量系统性能的重要标准,通常以载体运动情况下光学传感器图像抖动范围的标准差(1 σ)作为稳定精度指标。为了对所设计的不同控制器所能达到的稳定精度进行评估,本文对半实物仿真平台进行了摇摆实验,实验现场如图 7。摇摆实验的测试条件:靶标不动,提供固定点目标,用摇摆台模拟载体运动,设置摇摆台作峰峰值 3°、频率 1 Hz 的正弦运动。通过 xPC Target 半实物实时仿真环境记录系统抵抗载体扰动时的视轴输出角偏差,对平台系统稳定回路分别采用所设计的 PI 控制器、校正控制器及 μ 控制器的情况进行摇摆实验。其中采用 μ 控制器时视轴的角位置偏差实验曲线如图 8 所示。



图 7 摇摆实验现场

Fig. 7 Vibration experimental environment

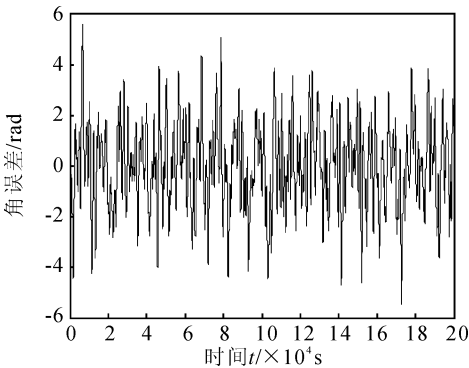


图 8 采用 μ 控制器时视轴偏差实验曲线

Fig. 8 LOS error curve of the system using μ synthesis controller

通过 xPC Target 环境获得的实验数据,经计算,采用不同稳定控制器时光电平台系统的稳定精度如表 1 所示,可以看出,采用基于改进 II 型系

统设计的校正控制器,由于存在滞后校正,在低频段有效提升了系统开环增益,从而获得了最高的稳定精度;系统采用 μ 控制器时,稳定精度较采用 PI 控制器时有所提升。实验结果表明采用所设计的积分-滞后-平方超前的校正控制器已使系统获得了较为满意的性能。

表 1 采用不同控制器时系统的稳定精度
Table 1 Stabilization accuracy of the system with different controllers

稳定控制器	稳定精度 $1\sigma/\mu\text{rad}$
PI 控制器	170.62
校正控制器	161.67
μ 控制器	167.70

4 结论

本文基于 xPC Target 环境设计开发了光电稳定跟踪平台半实物实时仿真系统。首先解决了系统软硬件设计开发过程中的若干关键技术问题;其次通过半实物仿真手段设计及调试了 3 种惯性稳定控制器;最后以摇摆实验对所设计的控制系统性能进行测试,以检验控制设计的合理性及有效性。半实物仿真有效地减小了控制系统设计的工作量,丰富了调试手段,缩短了开发周期。

参考文献:

[1] MASTEN M K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems; tracking dynamic targets with mobile sensors[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1): 47-64.
[2] HILKERT J M. Inertially stabilized platform technology: concepts and principles[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1): 26-46.

[3] 杨正贤,孔宪仁,王继河,等. 基于 xPC 的小卫星半物理仿真验证平台[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 6444-6448.
YANG Zheng-xian, KONG Xian-ren, WNAG Ji-he, et al. Hardware-in-Loop simulation platform for small satellite based on xPC real-time simulator[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(20): 6444-6448. (in Chinese with an English abstract)
[4] 王广雄,何朕. 控制系统设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
WANG Guang-xiong, HE Zhen. Control system design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
[5] SAFONOV M G, LAUB A J, HARTMANN G L. Feedback properties of multivariable systems; the role and use of the return difference matrix[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(1): 47-65.
[6] 王广雄,何雨奋. 伺服设计的性能极限[J]. 电机与控制学报, 1997, 1(4): 238-240.
WANG Guang-xiong, HE Yu-fen. Performance limit of servo design[J]. Electric Machines and Control, 1997, 1(4): 238-240. (in Chinese with an English abstract)
[7] 王广雄,何朕. 应用 H_∞ 控制[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2010.
WANG Guang-xiong, HE Zhen. Applied H_∞ control[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)
[8] SEFTON J, GLOVER K. Pole/zero cancellations in the general H_∞ problem with reference to a two block design[J]. Systems Control Letters, 1990, 14: 295-306.