

低速高精度二维转台控制系统设计

张立文, 郭同健, 曹 策, 付云博

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为满足二维转台对典型低速目标的高精度指向要求,设计一种高精度二维转台伺服控制系统。首先介绍转台控制系统的硬件组成及工作原理,然后详细论述了全数字化三闭环控制策略和基于连续系统对数频率特性法的控算法设计,相比传统 PID,算法更适用于精准控制的场合,并引入动基座平台扰动抑制算法。仿真和实验结果表明,系统具有响应速度快、跟踪精度高的优点,满足动基座转台对典型低速目标的高精度指向要求。

关键词:二维转台;伺服控制系统;对数频率特性法;高精度指向

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:2096-9759(2022)05-0025-03

Design of Low Speed and High Precision Two-Dimensional Turntable Control System

ZHANG Liwen, GUO Tongjian, CAO Ce, FU Yunbo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to meet the high-precision pointing requirements of two-dimensional turntable for typical low-speed targets, a high-precision servo control system with strong applicability for two-dimensional turntable is designed. Firstly, the structure and working principle of turntable control system are introduced. Then, the control strategy of the turntable and the control algorithm design based on the log frequency characteristic method of continuous system are discussed in detail. Compared with traditional PID, the algorithm is more suitable for precise control. The disturbance suppression algorithm of moving base platform is introduced. The experimental results show that the turntable control system has the advantages of fast response speed and high tracking accuracy, and can effectively meet the high-precision pointing requirements of turntable with both fixed and moving base platform.

Key words: two-dimensional turntable; servo control system; logarithmic frequency characteristic method; high precision pointing

0 引言

低速、高精度要求的二维转台在空间载荷动态成像、地面低速目标跟踪测量等场合有着越来越广泛的应用。随着我国空间技术的高速发展,对空间载荷成像技术提出了更高的要求,利用空间转台搭载成像探测器实现对空间目标的动态跟踪测量技术应用越来越广泛,光轴指向精度直接影响空间动态成像效果,所以如何实现高精度指向是转台设计的关键。

本文以实际工程项目中的某型号空间二维转台为应用实例,设计了一套二维转台伺服控制系统,搭建了完整的硬件系统,设计了全数字化三闭环控制算法,并采用空间矢量技术对无刷电机驱动的空间二维转台的位置、速度和力矩进行精确控制^[1],且为抑制基座平台扰动对控制系统的影响,系统引入了复合控制算法。在系统模型精确辨识的基础上,采用连续系统对数频率特性法进行控制算法设计,相比传统的 PID 算法,更适用于精准控制的场合。由于二维转台方位轴和俯仰轴的控制算法相似,所以本文以方位轴为例对控制算法和实验结果进行详细说明。

1 系统硬件设计

二维转台控制系统通过对方位轴和俯仰轴两个无刷力矩电机的位置、速度和力矩控制从而实现对目标的精确指向^[2],二维转台控制系统组成框图如图 1 所示。

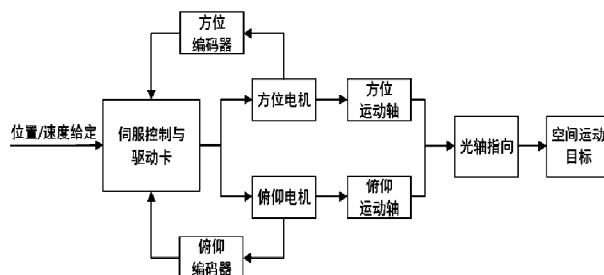


图 1 转台控制系统硬件组成框图

二维转台主要由伺服控制与驱动卡、无刷力矩电机、光电编码器、方位和俯仰运动轴等组成。电机采用无刷直流电机,电机与运动轴系之间进行直连,以提高结构刚度。光电编码器用于精确测量电机的运动角度,为构成闭环控制提供位置数据,采用 24 位分辨率的光电编码器以实现高精度控制。

伺服控制与驱动卡是转台控制系统的硬件核心,控制卡主要功能是数据采集与存储、控制算法实现、产生电机驱动信号等,伺服控制与驱动卡的硬件框图如图 2 所示。

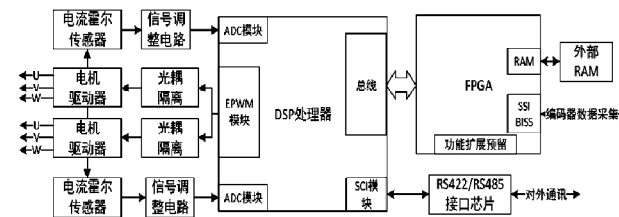


图 2 伺服控制与驱动卡结构框图

收稿日期:2022-03-03

作者简介:张立文,男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士,中国科学院长春光机所助理研究员,主要从事伺服控制系统研究与设计。

伺服控制与驱动卡基于高性能 DSP 处理器和 FPGA 架构进行设计。DSP 工作频率可达 150MHz, 可以处理复杂控制算法, 内部集成了 SCI 模块、ADC 模块、PWM 模块等丰富的增强型外设资源, 故适合用于电机精准控制系统的核心处理器^[3]。采用电流霍尔传感器采集电机电枢电流, 利用 DSP 内部 ADC 模块对采样电流进行高频 A/D 变换, 需要加信号调整电路进行电压调整, 每个电机只需采样两相电流, 另一路可通过计算得到。电机驱动器选用三相桥式 MOSFET 集成驱动器, 根据 DSP 的 ePWM 模块输出 PWM 信号控制各个功率开关的导通与关闭, 直接驱动三相无刷电机, 在 PWM 信号和电机驱动器之间需要进行高速光耦隔离^[4]。FPGA 的主要功能是完成 DSP 不具备的接口功能, 如编码器的 SSI/BISS 接口协议、数据存储等, 可根据需求进行功能扩展升级。

2 软件控制算法设计

2.1 伺服控制策略

转台控制算法采取全数字化三闭环控制策略, 电流环处于最内环, 速度环处于中间环, 位置环处于最外环^[5], 伺服控制策略框图如图 3 所示。

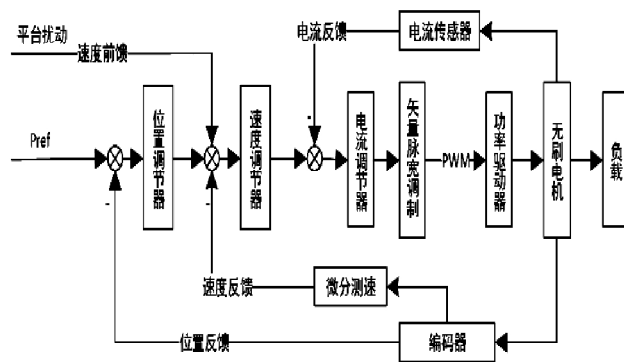


图 3 伺服控制策略框图

位置给定值与编码器位置反馈值相减得到位置偏差, 经位置调节器校正构成位置回路; 位置回路输出与速度反馈值相减得到速度偏差, 经速度调节器校正构成速度回路, 其中速度反馈值由编码器位置值微分得到; 速度回路输出与电流反馈值相减得到电流偏差, 经电流调节器校正就实现了电流闭环, 电流环输出经空间脉宽调制算法, 输出 PWM 信号至功率驱动器, 从而驱动三相无刷电机转动, 实现对目标的精确跟踪。在算法设计方法上, 采用连续系统对数频率特性法设计调节器, 经离散化处理后实现数字处理器控制^[6]。

基座平台通常存在不同程度的平台扰动, 对转台控制精度会造成一定影响, 所以需要采取措施对基座平台扰动进行抑制。采取的控制策略是在基座平台上安装角速度敏感元件(陀螺仪、惯导等), 敏感出平台的角速度扰动数据, 经坐标变换将扰动数据分解到方位轴和俯仰轴, 再经过数据插值和滤波等算法处理, 处理后的角速度数据以速度前馈方式加到速度环中, 构成复合控制^[7], 可有效抑制基座平台扰动。

2.2 电流环控制参数设计

电流环的主要作用是加快系统的动态响应, 减小转矩波动, 限制电机启动、停止和堵转电流以保证系统安全。电流环

主要由电流调节器、电流反馈和数字滤波部分组成, 电流环的采样频率为 10kHz。电流环设计过程中需要用到 Park 变换和 Clark 变换进行电流坐标系变换, 将三相电流从三相静止 abc 坐标系变换到两相旋转 dq 坐标系中^[8]。

经计算及参数辨识得到方位轴电流环的被控对象的传递函数分别为:

$$M_{CA}(s) = \frac{2.91}{(0.00015s + 1)(0.0006s + 1)} \quad (1)$$

其中, 0.00015 为小时间常数近似值, 0.0006 为方位轴电机的电气时间常数。

电流调节器采用带积分环节的补偿环节, 积分环节可以消除静差, 提高系统的无差度。方位轴电流调节器传递函数为:

$$G_{CA}(s) = \frac{500(0.0006s + 1)}{s} \quad (2)$$

经电流调节器校正后, 方位轴电流环闭环带宽约 326Hz, 系统开关频率设计为 10kHz 即满足要求。

2.3 速度环控制参数设计

速度环的主要作用是克服负载扰动, 抑制速度波动, 保证速度控制刚度和系统的调速范围。速度环采用双惯性校正环节, 方位轴速度调节器传递函数为:

$$G_{VA}(s) = \frac{3200(0.03s + 1)(0.0006s + 1)}{(0.8s + 1)(0.015s + 1)} \quad (3)$$

校正后, 方位轴速度回路开环频率特性如图 4 所示, 开环剪切频率 $\omega_{cv}=122\text{rad/s}$, 相位裕度 $Pm=64.3^\circ$, 速度回路满足系统稳定条件。

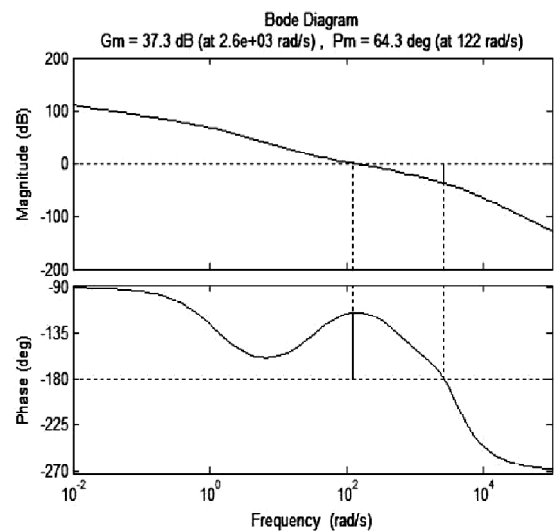


图 4 方位轴速度环开环频率特性

2.4 位置环控制参数设计

位置回路设计的目的是对一定速度、加速度运动目标进行稳定跟踪, 保证系统静态精度和动态跟踪的性能。位置回路采用滞后-超前校正, 位置调节器的传递函数为:

方位轴位置调节器传递函数:

$$G_{PA}(s) = \frac{400(0.25s + 1)}{4.6s + 1} \quad (4)$$

方位轴位置回路的开环频率特性如图 5 所示, 位置环开环剪切频率 $\omega_{cp}=24.3\text{rad/s}$, 相位裕度 $Pm=76.6^\circ$, 位置回路满足系统稳定条件。

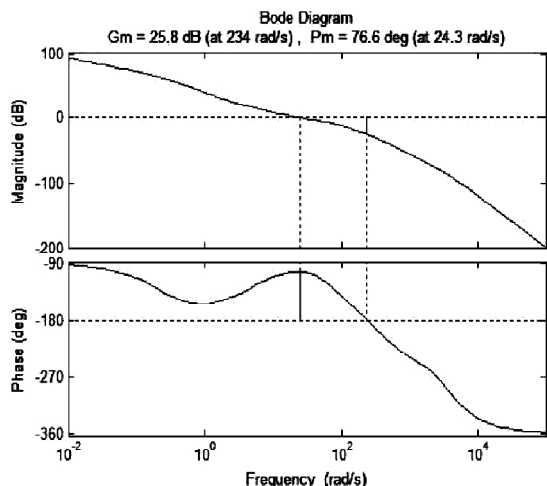


图5 方位轴位置环开环频率特性

3 实验结果及分析

为验证系统的性能,利用 Matlab 软件进行仿真测试,并进行了实验验证。

3.1 动态响应性能

方位轴位置阶跃响应如图6所示,超调量为9%,过渡过程时间0.39s,系统动态响应性能良好。

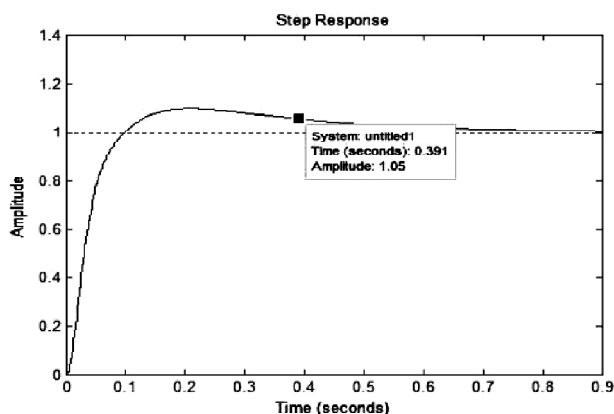


图6 方位轴位置阶跃曲线

3.2 基座平台抑制效果

基座平台的原始扰动数据曲线如图7所示。

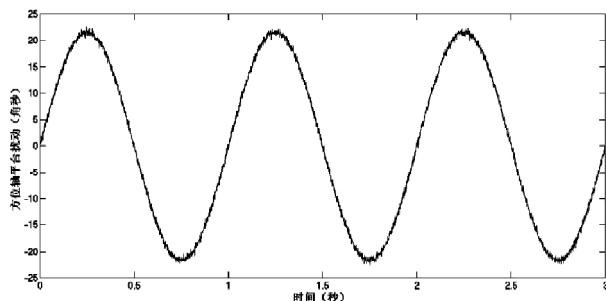


图7 方位轴基座平台扰动数据

基座平台的扰动数据,经坐标变换将扰动数据分解到方位轴,经过数据插值和数字滤波处理,以速度前馈的方式引入速度回路中,构成复合控制。方位轴对平台扰动的抑制误差曲线如图8所示,平台扰动抑制误差为 ± 0.81 角秒。

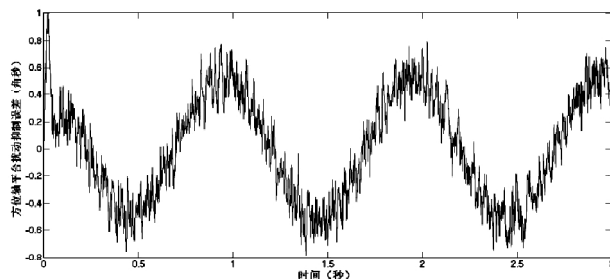


图8 方位轴平台扰动抑制误差曲线

3.3 跟踪误差测试

方位轴运动轨迹为幅值 50° 、角频率为 0.001rad/s 的正弦运动,经控制系统后,跟踪误差曲线如图9所示,跟踪误差为 ± 0.45 角秒。

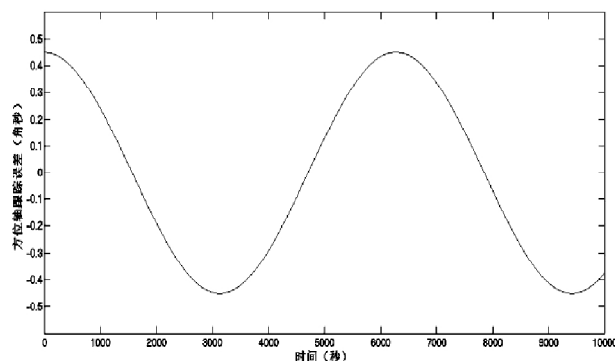


图9 方位轴跟踪误差曲线

综上所述,方位轴的目标运动轨迹跟踪误差为 ± 0.45 角秒,平台扰动抑制误差为 ± 0.81 角秒,综合误差 ± 0.92 角秒,稳态跟踪精度良好。

4 结语

以实际工程项目中的某型号空间二维转台为应用实例,设计了一种高精度二维转台伺服控制系统,从系统工作原理出发,进行系统硬件设计,在系统模型精确辨识的基础上,采用连续系统对数频率特性法设计了完善的全数字化伺服控制算法,并加入了基座平台扰动抑制算法。从仿真和实验结果可知,系统具有良好的动态和稳态性能,跟踪精度高,响应速度快,可有效抑制基座平台扰动,系统运行稳定可靠,已成功应用于多个工程项目中,具有良好的应用价值。

参考文献:

- [1] 袁登科,徐延东,李秀涛.永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M],北京:机械工业出版社,2015.
- [2] 郭丹瑞,林晓焕,单星,等.基于DSP的无刷直流电机控制系统研究[J].国外电子测量技术,2016,35(2):98-101.
- [3] 刘陵顺,高艳丽,张树团,等.TMS320F28335 DSP 原理及开发编程[M],北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [4] 张洁,何文涛,冯华星.基于直流无刷电机的PWM电路设计[J].微电子学与计算机,2021,3(38):84-88.
- [5] 秦继荣,沈安俊.现代直流伺服控制技术及其系统设计[M],北京:机械工业出版社,2007.
- [6] 胡松涛.自动控制原理[M],北京:科学出版社,2007.
- [7] 庞鸿,沈少萍.飞艇隔振云台电机控制器设计与实现[J].测控技术,2020,39(10):67-72.
- [8] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统-运动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2009.