

基于简化干扰观测器的光电平台稳定与评估*

王福超 田大鹏 王昱棠

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点实验室 长春 130033)

摘要: 单纯采用经典的比例-积分(proportion integration, PI)校正难以进一步提高航空光电平台惯性稳定性能。本文分析了影响稳定精度的主要因素,设计了基于简化干扰观测器(disturbance observer, DOB)的航空光电平台稳定控制算法。该方法由 DOB 和 PI 控制器构成,其中 DOB 采用陀螺反馈,利用等效变换实现,无需求取被控系统的逆模型。此外,本文提出一种基于隔离度测试的航空光电平台稳定性能评价方法。在实际系统中进行了惯性稳定实验,采用所提出的稳定控制方法获得了 $10 \mu\text{rad}$ (RMS)的稳定精度,并且采用新方法的隔离度测试结果在 30 Hz 频带内的姿态扰动下较传统 PI 控制均有显著的提高。

关键词: 光电稳定平台;稳定精度;干扰观测器;隔离度

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Inertial stability and evaluation of photoelectric platform based on a simplified DOB

Wang Fuchao Tian Dapeng Wang Yutang

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The inertial stabilization performance of aerial photoelectric platform is difficult to further improve only with classical Proportion Integration (PI) correction. The paper analyzed the main factors that affect the stabilization precision of the system, and designed an aerial photoelectric platform stabilization control algorithm based on a simplified disturbance observer (DOB). The algorithm is composed of DOB and PI controller, the DOB adopts gyroscope as feedback, utilizes the equivalent transform to achieve and without calculates the inverse model of the controlled system. Furthermore, an aerial photoelectric platform stabilization performance evaluation method based on isolation degree test is proposed. Finally, the inertial stabilization experiment is conducted in actual system, and the proposed stabilization control algorithm reached $10 \mu\text{rad}$ (RMS) stabilization precision, and also the isolation degree test results with new algorithm under 30 Hz band attitude disturbance has an obviously improvement than the conventional PI control.

Keywords: photoelectric stabilized platform; stabilization precision; disturbance observer(DOB); isolation degree

1 引言

在航空成像设备中,如果不对成像设备采取稳定减震措施,将导致设备在飞行震动环境下产生成像质量下降、图像模糊及清晰度下降^[1]。光电稳定平台作为一种安放在运动载体上的设备,可以有效的隔离运动载体震动及姿态变化所产生的扰动。光电稳定平台的控制精度主要受到以摩擦力矩为主的扰动力矩影响^[2]。所以,需要通过对外摩擦等干扰力矩进行补偿使得光电平台具有更好的稳定

精度。

为了提高系统的抗干扰能力,补偿干扰力矩的影响,许多文献采用了干扰观测器^[3-6]以及自抗扰技术^[7-9],然而前者需要通过获得被控对象的精确数学模型来设计干扰观测器,这在多数情况下难以实现;后者控制算法较为复杂,较难实现^[10-11]。

将摩擦力矩、电机反电动势以及电机力矩波动视为外界扰动力矩,在经典 PI 控制的基础上设计了基于简化干扰观测器的航空光电平台稳定控制算法,相比过去的基于

收稿日期:2015-04

* 基金项目:国家自然科学基金(61304032)资助课题

干扰观测器的算法,采用的简化方法在算法实现上更为容易,在满足系统实时性要求的同时提高了系统的稳定精度及抗干扰能力。

稳定隔离度是光电稳定平台的一个重要技术指标,高性能的稳定平台对外界干扰具有很强的隔离能力^[12]。提出一种航空光电稳定平台隔离度测试方法,对稳定平台隔离度性能进行评估,通过实验测得闭环控制系统的隔离度,对系统稳定进行评估。

2 稳定平台系统构成及原理

稳定平台在结构上主要有俯仰框架和方位框架组成如图1所示,通过对俯仰框架和方位框架的精确控制达到稳定光学系统视轴指向的目的,并通过控制对地面目标进行跟踪。稳定平台控制系统硬件部分主要由半实物仿真控制器、角速度陀螺仪、角位置编码器、电机驱动器、直流力矩电机组成。

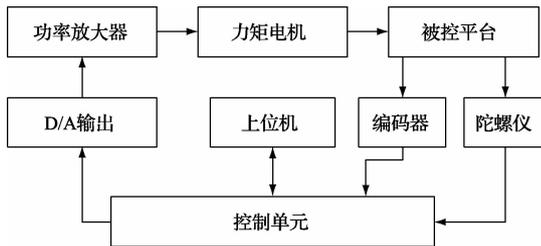


图1 稳定平台结构组成示意

两轴稳定平台包括两条伺服回路,当某一干扰信号作用于平台框架轴时,相应的陀螺会敏感地采集到扰动角速度,陀螺输出的信号经过控制器输出给电机驱动器,驱动电机转动以抵消作用于平台框架轴上的干扰力矩,使平台稳定于惯性空间。

3 控制对象的辨识

在控制器设计的过程中针对控制对象传递函数设计控制器的方法是最有效的方法,而对控制对象的准确辨识是设计控制器的基础。在系统建模的过程中,控制对象的传递函数可以通过各个环节的物理模型参数计算得到,但在实际系统中存在非线性和参数不确定等因素,所以在实际系统建模的过程中通常采用频率响应的方式得到系统的非参数模型,通过拟合得到被控对象的传递函数。

在系统开环的情况下利用伪随机噪声作为模型辨识的输入信号,通过MATLAB模型辨识工具箱对被控对象传递函数进行辨识,输入信号与输出信号如图2所示。图3为辨识得到的系统频率响应曲线。

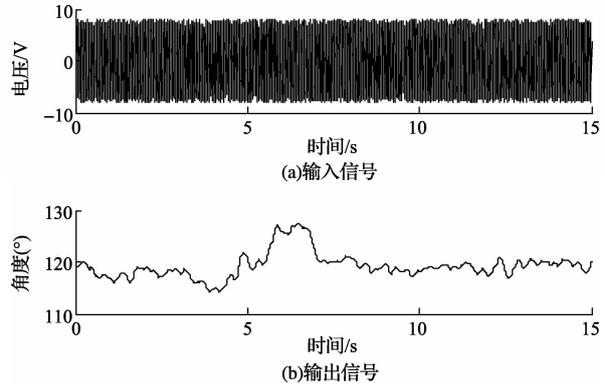


图2 系统辨识输入信号与输出信号

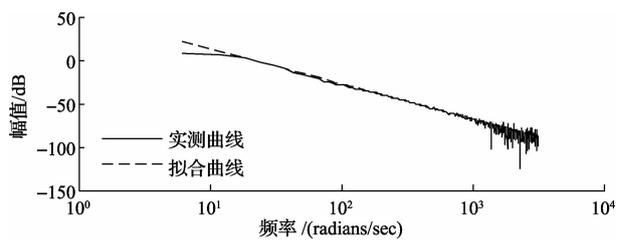


图3 稳定平台模型辨识结果

通过对实验数据进行分析可以得到稳定平台伺服控制系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{1}{0.00235s^2} \quad (1)$$

从图3的辨识结果可以看出,平台在低频段由于受到摩擦力矩、电机力矩波动等扰动因素的影响,使得实验拟合结果误差较大,在中频段拟合误差较小。

4 基于简化干扰观测器的伺服系统设计方法

4.1 基本原理

干扰观测器的基本原理是测量外部力矩干扰及模型参数变化造成的实际对象与名义模型输出的差异,并将此估计值作用于系统达到消除干扰的目的。如图4所示为DOB的基本原理。

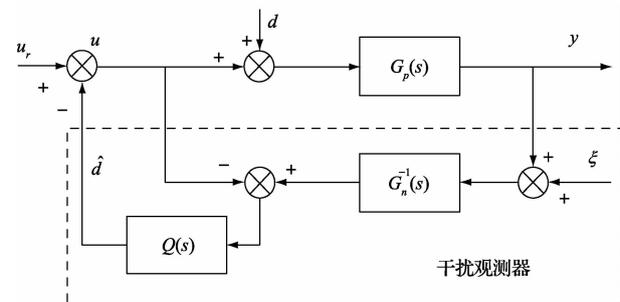


图4 干扰观测器原理

图中的 $G_p(s)$ 为对象的传递函数, $G_p^{-1}(s)$ 为稳定平台的名义逆模型, $Q(s)$ 为低通滤波器, d 为等效干扰, \hat{d} 为观测干扰, u 为控制输入, ξ 为检测噪声。系统的输出 y 为:

$$y = \frac{G_n G_p}{G_n + (G_p - G_n)Q} u_r - \frac{G_p Q}{G_n + (G_p - G_n)Q} \xi + \frac{G_n G_p (1 - Q)}{G_n + (G_p - G_n)Q} d \quad (2)$$

当系统被控对象和系统的标称模型相同时系统的输出 y 为:

$$y = G_n u_r - Q \xi + G_n (1 - Q) d \quad (3)$$

式中: $Q(s)$ 具有低通滤波特性, 在低频段 $Q(s) = 1$, 在高频段可以认为 $Q(s) = 0$ 。有式(3)可以看出在低频段即使系统存在干扰, 系统也可保证较好的鲁棒性。

经过分析可知, 带有干扰观测器的系统灵敏度函数和补灵敏度函数为:

$$S(s) = \frac{G_n G_p(s) [1 - Q(s)]}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)] Q(s)} \quad (4)$$

$$T(s) = 1 - \frac{G_n G_p(s) [1 - Q(s)]}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)] Q(s)} \quad (5)$$

系统鲁棒稳定的充分必要条件是:

$$\| \Delta_M(j\omega) T(j\omega) \|_{\infty} \leq 1 \quad (6)$$

式中: $\Delta_M = G_p(s) - G_n(s)$ 。

由上式可以看出滤波器的设计结果直接影响干扰观测器的稳定性。

4.2 滤波器设计

通常滤波器的设计结构如下:

$$Q_{NM}(s) = \frac{\sum_{k=0}^M \frac{N!(\tau s)^k}{(N-k)!k!}}{(\tau s + 1)^N}, M = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

式中: N 为分母阶数, M 为分子阶数。

在进行滤波器 $Q(s)$ 设计过程中对分子分母的阶数给予如下考虑:

1) 对于谐振频率较高的系统, 可与选择较大的分子阶数来保证系统的抗干扰能力以及减小系统干扰估计的相位滞后。

2) 若系统的谐振频率较低, 可以选择 $Q(s)$ 的分子阶数为 0, 再调整截止频率和分母阶数, 在抗干扰能力和稳定性之间折中。

3) 设计 $Q(s)$ 的分母时, 应使 $Q(s) Q(s)$ 的相对阶不小于被控对象名义模型 $G_n(s)$ 的相对阶, 以保证 $Q(s)G_n^{-1}(s)$ 正则, 物理可实现。

4.3 干扰观测器的实现方法

设计了基于简化干扰观测器的控制算法。利用 DOB+PI 控制器减小干扰力矩影响, 提高系统稳定精度。

通常情况下, 被控系统的名义模型可以用式(8)表示。

$$G_{np}(s) = \frac{1}{s(M_n s + B_n)} \quad (8)$$

式中: M_n 是等效名义质量, B_n 是等效名义阻尼。

通过式(1)可知, 被控对象的阻尼项 B_n 非常的小, 在系统中可以忽略不计, 则由辨识结果可知被控对象速度环模型为 $G_n(s) = (M_n s)^{-1}$, 速度环的名义逆模型为 $G_n^{-1}(s) = M_n s$ 。低通滤波器选为一阶形式。

$$Q(s) = \frac{1}{\tau s + 1} = \frac{g_{dis}}{s + g_{dis}} \quad (9)$$

式中: g_{dis} 为滤波器 $Q(s)$ 的截止频率。将被控对象的名义逆模型变形可得:

$$G_n^{-1}(s) = M_n s = M_n g_{dis} \frac{s + g_{dis}}{g_{dis}} - M_n g_{dis} \quad (10)$$

则:

$$Q(s)G_n^{-1}(s) = M_n g_{dis} - M_n g_{dis} \frac{g_{dis}}{s + g_{dis}} \quad (11)$$

因此, 稳定平台速度环干扰观测器如图 5 所示。

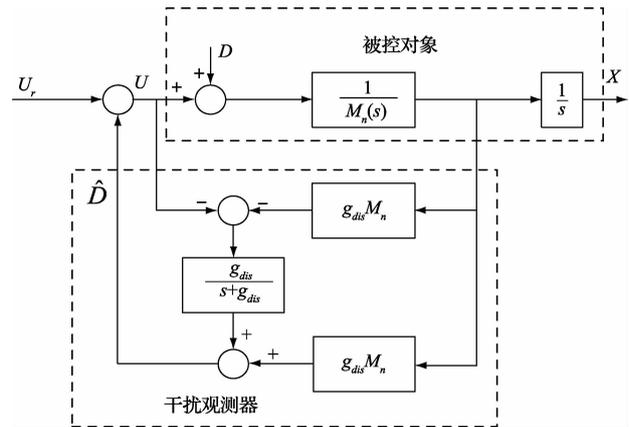


图 5 引入 DOB 的平台控制系统原理

该结构的参数调节非常简单, 仅需将计算或辨识得到的 M_n 设定好, 调节 g_{dis} 即可调节干扰观测器的抗干扰特性。这一结构各个参数都有明确的物理意义, 更方便调参, 并且具有所用的变量少、占用计算机内存少、程序更加简单的优点。

5 实验研究

为了进一步验证干扰观测器的作用效果, 以单自由度光电稳定平台为实验对象进行实例分析, 如图 6 所示。实验平台由内、外两个框架组成, 两个框架均沿着俯仰方向运动, 实验过程中控制外框架进行摇摆运动, 模拟平台载体的运动, 内框架进行稳定控制。如图 7 所示采用 MATLAB/Simulink 仿真软件设计干扰观测器及控制算法, 通过半实物仿真系统实现全数字控制系统。半实物仿真系统主要功能为传感器信号采样、控制算法的实现、控制信号的输出及逻辑处理等功能。稳定平台的角速度信号由安装在内外框架上的角速率陀螺测得, 通过内框架角速度陀螺数据的积分结果对稳定平台的性能进行评估。



图6 实验平台实物

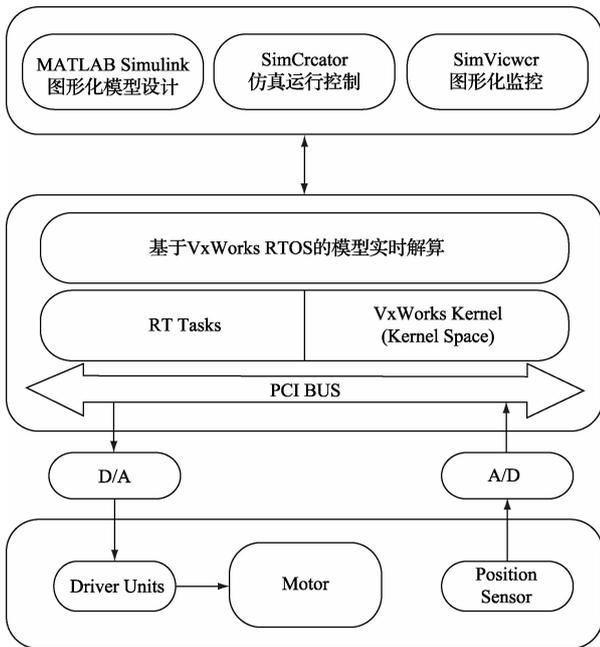


图7 实验平台原理

实验内容:首先设计干扰观测器,通过系统模型的辨识方法辨识引入干扰观测器后的系统模型;建立系统模型,设计内框架速度环PI控制系,控制平台的外框架以频率1/6 Hz,3°/s的幅值做正弦运动,比较单纯PI控制与引入DOB后系统稳定效果;控制外框架以1~50 Hz频率做正弦扰动,记录每个频率点稳定平台的输出值,拟合出系统的隔离度曲线。

经过实验实测得到内框架的开环传递函数为 $G(s) = \frac{1}{0.00235s}$;本实验内框架速度环采用PI控制器为 $C(s) = 0.05 + \frac{1}{5s}$,干扰观测器的滤波器表达式为 $Q(s) = \frac{400}{s+400}$,采样频率为1 kHz,进行了以下实验。

5.1 引入DOB的系统模型辨识

在未引入DOB的系统辨识结果如图3所示。从图中可以看出,在未引入DOB的系统由于摩擦力矩的存在,平台的低速性能较差,对系统模型辨识的过

程中低频段辨识结果误差较大;引入DOB后系统的辨识结果如图8所示,在引入DOB后,由于补偿了摩擦力矩,减小了摩擦力矩的影响,有效的改善了系统的低速性能。

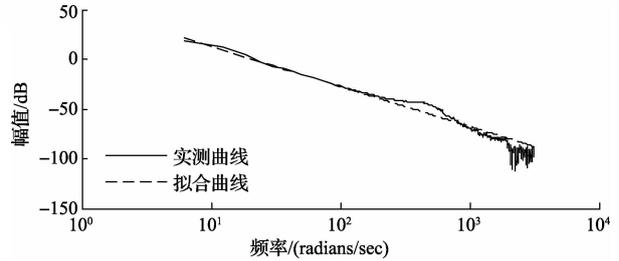


图8 引入DOB的稳定平台模型辨识结果

5.2 平台稳定精度对比实验

平台外框架作为摇摆运动,稳定平台的期望转速为0,对引入DOB前后的两个闭环系统进行对比实验。通过提取陀螺积分的角位置信号比较平台的稳定精度,实验结果如图9和10所示。可以看出两图中均出现尖峰,这是由于平台在换向的过程中受到摩擦力矩的影响造成速度残次突然增大。但通过比较试验结果可以看出,在引入DOB后平台位置的尖峰的幅值和持续时间明显减小。

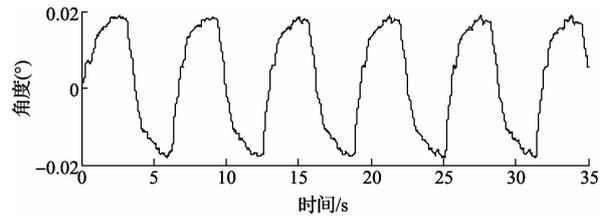


图9 无DOB条件下稳定平台位置曲线

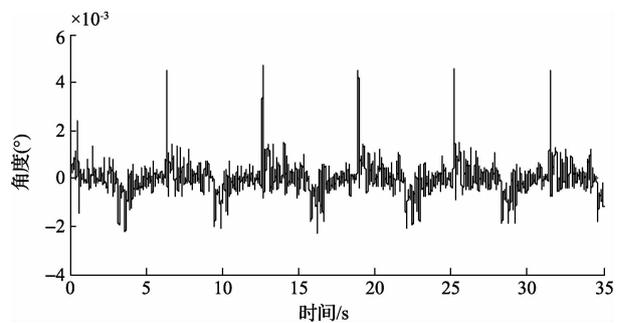


图10 引入DOB条件下稳定平台位置曲线

从图9中可以看出当外框架以频率1/6 Hz,3°/s的幅值做正弦扰动时,在没有加入DOB的情况下稳定平台在外框架摇摆运动的扰动下稳定精度的峰-峰值628.3 μrad,系统的稳定精度较差;从图10曲线结果可以看出系统的稳定精度的峰-峰值为121.7 μrad,稳定精度明显提高。计算引入DOB后系统稳定精度的RMS值为10.8 μrad。

5.3 稳定平台隔离度分析

隔离度是指稳定平台对载体运动的去耦能力,使用平台指向误差角和载体姿态变化角之比的分贝数表征,用数学模型描述为:

$$D_{isolate} = 20\lg \left| \frac{\delta\theta_s}{\delta\theta_d} \right| \quad (12)$$

式中: $D_{isolate}$ 表示隔离度, $\delta\theta_s$ 表示平台视轴相对惯性空间转动的角度, $\delta\theta_d$ 表示载体转动的角度。 $D_{isolate}$ 的数值越小,表示稳定平台对载体运动的隔离能力越高。

实验过程中,外框架的扰动频率设置为 1~50 Hz,记录每个频率点稳定平台的输出值,拟合出系统的隔离度曲线如图 11 所示。从图中可以看出系统隔离度在 6~10 Hz 范围内明显降低,这是由于系统控制参数为非最优参数,系统在该频率段内出现超调,使得隔离度下降。

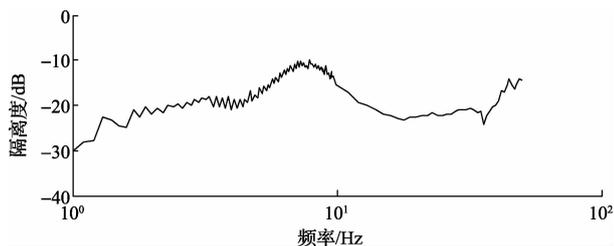


图 11 稳定平台隔离度曲线

6 结 论

经典的比例-积分校正难以进一步提高航空光电平台惯性稳定性能。为了进一步提高系统的稳定性能,提高系统的抗干扰能力,设计了基于简化干扰观测器的航空光电平台稳定控制算法。通过设计 DOB+PI 控制器,补偿系统低速转动情况下摩擦力矩的干扰。同时,通过对干扰观测器变形以及简化,在满足系统实时性的同时保证系统的可实现性,无需求取系统的逆模型,简化计算量。通过实验结果表明本文方法的有效性。其中,稳定平台控制的实验结果表明:在引入 DOB 的闭环系统有效的改善可系统的低速性能,克服了摩擦力矩等干扰力矩的影响,提高了系统的稳定精度;在 1/6 Hz, 3°/s 的载体扰动下,引入 DOB 后平台的稳定精度为 10.8 μ rad(RMS),明显高于无 DOB 时平台的稳定精度。

参 考 文 献

- [1] 张雪菲,冷雪,李文明,等. 基于干扰观测器的航空成像系统的扰动抑制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2793-2799.
- [2] 杨晓霞,孟浩然,张斌,等. 大型光电系统精跟踪带宽设计方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1382-1388.
- [3] 杨晓霞,孟浩然,李玉霞,等. 具有扰动观测及实时补偿的大型光电望远镜主轴控制技术[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 56-61.
- [4] 于爽,付庄,闫维新. 基于干扰观测器的惯性平台摩擦补偿方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(1): 1830-1833.
- [5] 丁新平,杨俊友,孙荣斌. 基于干扰观测器 PID 控制的磁悬浮[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(3): 288-290.
- [6] CHEN W H. Disturbance observer based control for nonlinear system[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2004, 9(4): 706-710.
- [7] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰”控制技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 176-186.
- [8] 于灵慧,房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺框架伺服系统扰动力矩分析与抑制[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 287-291.
- [9] 徐向波,房建成. 基于角加速度的陀螺框架伺服系统干扰观测器[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(6): 669-672.
- [10] 周涛. 光电平台伺服系统稳定环结构谐振自抗扰控制[J]. 光电工程, 2013, 40(5): 6-12.
- [11] 谢婷婷,杨忠,郑志忠. 基于加速度滞后补偿的转台控制系统应用研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2): 81-86.
- [12] 赵超. 导引头稳定系统隔离度研究[J]. 电光与控制, 2008, 15(7): 78-82.

作 者 简 介

王福超, 1988 年出生, 硕士, 研究实习员。主要研究方向为光电平台伺服控制。
E-mail: fuchaow@163.com