

文章编号 1004-924X(2020)06-1344-09

考虑安装基座影响的光电平台等价 捷联惯性稳定控制

王中石^{1,2,3}, 田大鹏^{1,3*}, 石磊^{1,3}, 刘晶红^{1,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:采用陀螺仪直接测量光电平台内部载荷的惯性角速度构建反馈,可以在运动载体上控制视轴惯性角速度,实现稳定成像。陀螺捷联惯性稳定控制能够构建前馈,有效提高系统带宽、减小控制误差,但对陀螺安装位置有要求。本文提出了在陀螺直接反馈的机械安装条件下等价捷联稳定的控制方法,并考虑平台基座约束条件建立了动力学模型。该模型显露了光电平台基座安装刚度引入的谐振问题。针对被控对象中的一对谐振和反谐振环节,基于稳定的零极点对消设计滤波器消除谐振。综合利用陀螺直接测量的框架惯性角速度和编码器测量的机械框架相对转角构建等价捷联惯性稳定回路。在等价捷联惯性稳定回路中,采用内回路干扰抑制结合基于逆模型前馈的复合控制方法,有效拓展控制带宽,提高对指令的跟踪精度和对载体姿态晃动的隔离性能。仿真和实验结果表明:该方法有效抑制了安装基座弹性约束力矩的谐振,且与陀螺直接反馈控制相比性能更优。对幅值为 $1^\circ/\text{s}$ 、频率为 1 Hz 的典型正弦角速度指令进行跟踪,均方根误差由 $1.75^\circ/\text{s}$ 减小到 $0.23^\circ/\text{s}$,在 1 Hz 处扰动隔离度由 18% 减小到 2% 。

关键词:光电平台;动力学建模;捷联惯性稳定;基于模型滤波器;干扰观测器;复合控制

中图分类号: TP273.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202806.1344

Equivalent strapdown inertial stability control of photoelectric platform considering the effect of mounting base

WANG Zhong-shi^{1,2,3}, TIAN Da-peng^{1,3*}, SHI Lei^{1,3}, LIU Jing-hong^{1,3}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

** Corresponding author, E-mail: d.tian@ciomp.ac.cn*

Abstract: By using a gyroscope to directly measure the inertial angular velocity of the load inside a photoelectric platform to construct feedback, stable imaging can be achieved by controlling the inertial

收稿日期:2019-11-04;修订日期:2019-11-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51705496);中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2017257);吉林省省级产业创新专项资金资助项目(No. 2018C038-1);吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金资助项目(No. 2019SYHZ0016)

angular velocity of light of sight on the moving carrier. The gyroscope strapdown inertial stability control method can be used to construct the feedforward, increase the system bandwidth effectively, and minimize control error. However, there are requirements for the gyroscope installation position. We have proposed an equivalent strapdown stability control method, which satisfies the mechanical installation conditions with direct gyroscope feedback. The method establishes a dynamic model considering the constraints of the mounting base. The model reveals the resonance problem caused by the installation stiffness of the photoelectric platform base. For a pair of resonance and antiresonance, the filter to eliminate resonance based on a stable pole-zero cancellation method was designed. An equivalent strapdown inertial stability loop was constructed with the inertial angular velocity of the frame measured using the gyroscope, and the relative rotation angle of the mechanical frame measured using an encoder. In the loop above, we combined the inner loop interference suppression with the compound control method using the inverse model feedforward, which successfully expanded the system bandwidth, improved the tracking precision of the command, and enhanced the isolation performance. The simulation and experimental results show that the proposed method can effectively suppress the resonance of the elastic restraint moment of the mounting base and exhibit better performance than the gyroscope direct feedback control. For tracking a typical sinusoidal angular velocity command with an amplitude of $1 (^{\circ})/s$ and a frequency of 1 Hz, the root mean square error of the system decreased from 1.75 to 0.23 $(^{\circ})/s$, and the disturbance isolation decreased from 18% to 2%.

Key words: photoelectric platform; dynamics modeling; strapdown inertial stability; model based filter; disturbance observer; compound control

1 引言

光电平台安装在飞机和舰船等运动载体上,为平台内部搭载的光电设备在惯性空间提供稳定指向,广泛应用在光电侦察、目标捕获与跟踪瞄准等领域。光电平台包含多个正交安装的机械转动框架,从外到内分别为外框架、中框架和内框架。通常将光电设备和提供控制反馈信号的陀螺仪安装在内框架中。陀螺仪直接测量光电设备在惯性空间中的角速度。通过控制驱动各框架转动的力矩电机,补偿载体姿态变化和环境干扰力矩的影响,实现稳定成像^[1]。从控制方法的角度提升光电平台的稳定性能是提升光电装备整体性能的重要研究方向^[2-3]。

现有研究大多是在陀螺直接反馈的基础上,从被控对象建模、扰动因素建模、内回路补偿与主动抗扰以及外回路控制算法等方面开展研究^[4-6]。但是,在陀螺直接反馈的前提下,控制量来源于控制偏差。尽管能够实现稳态无偏差,但是在动态条件下,实际响应与给定指令之间的偏差从理论

上即无法保持为零。因此,实际系统的控制精度、工作带宽都严重受到限制。

除将陀螺仪安装在内框架直接测量光电设备惯性角速度外,还可以将陀螺仪捷联安装在光电平台基座上,测量基座的姿态运动。文献^[7]讨论了这种结构下的稳定控制,光电平台各轴的补偿指令等于测量的基座姿态运动量经坐标变换后的相反数,可实现间接惯性稳定,称为捷联惯性稳定。捷联惯性稳定方案直接敏感基座的运动,可以有效利用基座运动信息构造前馈环节,实现各轴对运动指令的完全跟踪,理论上控制误差为零^[8-9]。文献^[10]基于陀螺捷联安装的方式提出了一种自适应前馈控制方法,提高了惯性光电平台对控制指令的跟踪性能。与单纯的反馈控制系统相比,显著提高了系统的暂态性能。文献^[11]针对捷联稳定的光电平台从动力学建模、摩擦补偿、微分测速、匹配滤波、控制系统设计等方面展开了详细的研究,全面提升捷联光电平台的稳定精度。以上文献研究的基础均建立在陀螺仪捷联安装结构之上。

此外,现有的研究针对光电平台进行建模分

析时未考虑平台基座的动力学特性。实际上力矩电机驱动框架和载荷转动的同时,反作用力矩也会驱动基座转动^[12-13]。若基座的转动惯量与电机转子和负载端的转动惯量相差不大,并且基座并未稳固安装于载体上时,捷联稳定方案会敏感基座的运动进而对整个控制回路构成影响^[14]。为了在陀螺仪非捷联安装条件下实现等价的、动态误差为零的理想惯性稳定控制,解决轻质基座非稳固安装所带来的影响成为一个不可避免的问题。

本文建立了包含基座在内的光电平台控制系统模型,分析了载体对安装基座的弹性约束力矩对控制系统的影响。结合陀螺仪捷联稳定构建前馈的思想,设计了等价捷联惯性稳定控制方法。该方法基于考虑基座影响的完整模型设计了防止振荡的滤波器,在位置反馈层面构建干扰观测器进行内回路干扰补偿,利用光电平台框架相对位置转角以及安装在内框架的陀螺仪测量值在不改变光电平台结构的条件下,实现了带有前馈的等价捷联惯性稳定控制,理论上在低频工作范围内的动态误差为零。

2 建模与分析

2.1 光电平台基座和负载动力学建模

光电平台结构如图 1 所示,包括基座和负载两部分。

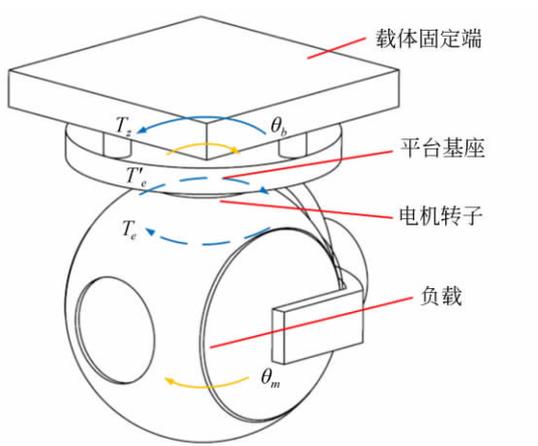


图 1 光电平台结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photoelectric platform

通常,光电平台为两轴或三轴结构,每个轴的特性相似。为简化研究,以方位轴为例展开分析。图中, T_e, θ_m 分别为力矩电机电磁转矩和电机负载端在惯性空间转角。 T'_e, θ_b 分别为力矩电机反作用力矩和基座的惯性转角。 T_z 为基座受到的约束力矩。根据牛顿第三定律,有 $T'_e = -T_e$ 。

规定电机负载端转速方向为正方向,分别对电机负载和基座进行动力学建模,则有:

$$T_e - T_f = J_m \cdot \ddot{\theta}_m + B_m \cdot \dot{\theta}_m, \quad (1)$$

$$-T_e + T_f + T_z = J_b \cdot \ddot{\theta}_b + B_b \cdot \dot{\theta}_b, \quad (2)$$

其中: J_m, J_b 分别为电机负载端和基座端的等效转动惯量, B_m, B_b 分别为电机负载端和基座端的等效阻尼。当基座转动惯量远大于电机负载转动惯量 $J_b \gg J_m$ 时,基座惯性角速度 $\dot{\theta}_b$ 趋向于 0,此时 θ_b 可以忽略。然而,当基座处于非稳固约束并且基座惯量并非远大于电机负载转动惯量时, θ_b 则不可忽略。对 θ_m 和 θ_b 求和等效于电机转子和定子的相对转角,则有:

$$-\theta_b + \theta_m = \theta_e. \quad (3)$$

在实际系统中,基座受到的约束力矩 T_z 十分复杂,可能包含弹性和非线性间隙等影响,难以对约束力矩进行完整建模。考虑到约束力矩主要由载机减振装置的弹性连接结构提供,将约束力矩 T_z 简化为弹簧模型:

$$T_z = K_b(\theta_z - \theta_b), \quad (4)$$

其中: K_b 为等效的弹性模量。对式(1)~式(4)进行拉普拉斯变换并整理得到由输入电磁转矩到基座转角的传递函数和由输入电磁转矩到框架相对转角的传递函数分别为:

$$\frac{\theta_b}{T_e} = -\frac{1}{J_b s^2 + B_b s + K_b}, \quad (5)$$

$$\frac{\theta_e}{T_e} = \frac{1}{J_m s^2 + B_m s} \cdot \frac{(J_m + J_b)s^2 + (B_m + B_b)s + K_b}{J_b s^2 + B_b s + K_b}. \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)绘制包含基座和负载特性的光电平台被控对象模型框图,如图 2 所示。

式(6)中, $\frac{1}{J_m s^2 + B_m s}$ 是不考虑基座影响的光电平台单轴被控对象名义模型的传递函数,决定了被控对象幅频特性在低频段的特性; $\frac{(J_m + J_b)s^2 + (B_m + B_b)s + K_b}{J_b s^2 + B_b s + K_b}$ 为二阶惯性环节,

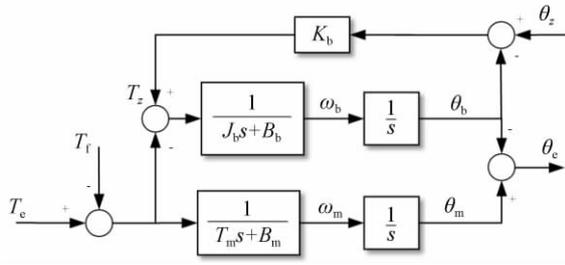


图 2 光电平台被控对象原理框图

Fig. 2 Principle diagram for control of photoelectric platform

表达式中基座参数 J_b, B_b, K_b 的变化导致极点和零点的变化,呈现谐振和反谐振特性,反映了电机负载和基座相互作用的动态影响。

传统方法从 ω_m 处直接通过安装陀螺仪获得反馈信号,因此,上述问题几乎不会影响到陀螺反馈控制系统。然而,当采用捷联稳定方法并且基座转动惯量与电机转子端转动惯量相当时,基座安装的影响就会显现。

2.2 谐振影响及分析

为直观了解基座动力学特性对于光电平台控制性能的影响,采用数值仿真法对光电平台速度闭环控制系统进行分析。速度环采用 PI 控制器,取 $K_p = 1, K_i = 5$,被控对象负载参数设为 $J_m = 0.001, B_m = 0.01$ 。基座与电机负载转动惯量比为 $k = J_b/J_m = 1$,基座约束力矩中的弹性模量 $K_b = 10$ 。仿真中采用“库伦+黏滞”摩擦模型:

$$T_f = T_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_c) + b \dot{\theta}_c, \quad (7)$$

式中:静摩擦系数 $T_c = 0.5$,黏滞摩擦系数 $b = 0.3$ 。输入幅值为 0.159° 、频率为 1 Hz 的正弦角度信号模拟载机运动,得到基座惯性角速度和编码器角速度曲线如图 3 所示。

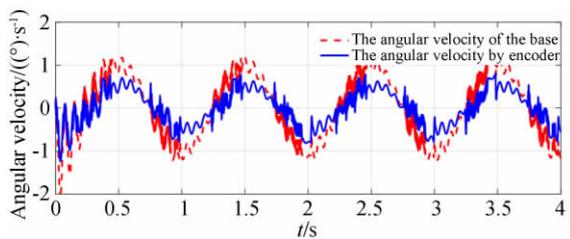


图 3 载机正弦运动条件下系统角速度应曲线

Fig. 3 Angular velocity response curves for aircraft under sinusoidal motion

为了定量分析基座约束条件对控制系统频率特性的影响,对基座角速度信号的振动幅值做标量化处理并采用快速傅里叶变换分析,在选择不同 K_b 值时得到系统角速度响应的振动频率特性曲线,如图 4 所示。可见,输出角速度除了在 1 Hz 的工作频率有较高的幅值响应外,在更高的频率上出现了一定的谐振。随着弹性系数 K_b 逐渐变大,系统谐振频率越来越高,幅值越来越大。

数值分析说明基座与光电平台之间的连接刚度会影响光电平台的运动响应特性。非稳固、非刚性的连接会引入谐振特性。

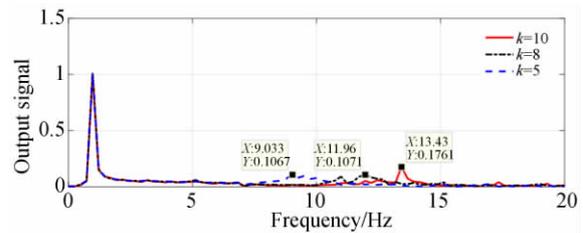


图 4 弹性模量与谐振频率变化曲线

Fig. 4 Curves of elasticity modulus and resonance frequency

3 等价捷联惯性稳定复合控制

在考虑基座非刚性连接,陀螺安装在内框架上进行直接反馈测量的条件下,提出一种等价捷联惯性稳定复合控制方法,既保证系统稳定工作无谐振,又能等价实现陀螺捷联。该方法包括基于模型的滤波器、干扰观测器、等价捷联惯性稳定控制回路 3 部分。首先,针对基座弹性约束力矩影响导致被控对象中出现的一对谐振和反谐振环节,基于稳定的零极点对消设计消除谐振的滤波器,将被控对象的响应特性校正成受到等价干扰作用的名义模型。接着,基于 DOB 在内回路补偿等价干扰。最后,综合利用陀螺和编码器的反馈信号,设计逆模型前馈和双闭环反馈控制器实现等价捷联惯性稳定。控制原理框图如图 5 所示。

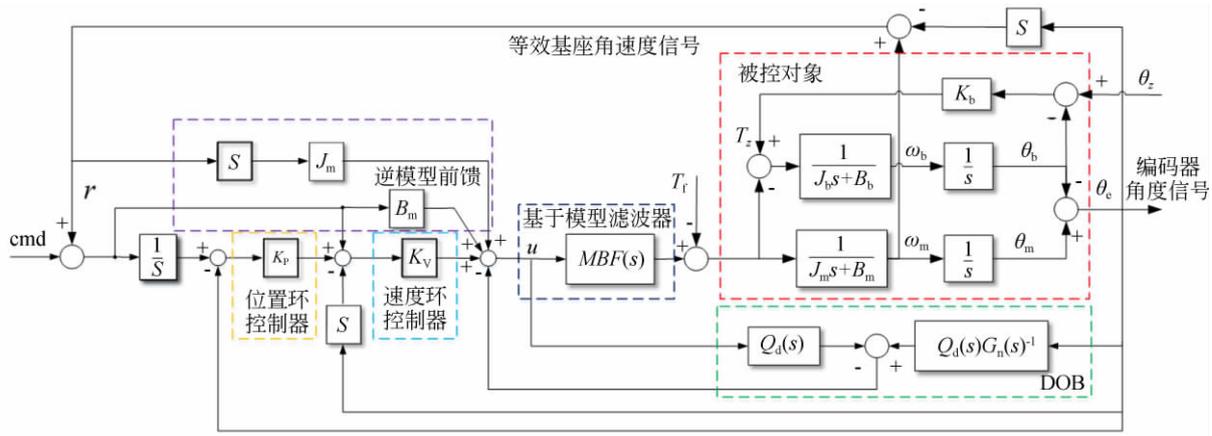


图 5 等价捷联惯性稳定复合控制原理

Fig. 5 Schematic diagram of equivalent strapdown inertial stabilization compound control

3.1 基于模型分析的滤波器设计

根据式(6)可知,光电平台由于受到安装基座的影响,被控对象模型中会出现一对谐振和反谐振环节。本文提出基于模型分析设计滤波器的方法(Model-Based Filter, MBF),从影响产生的机理设计滤波器,消除谐振频率处的控制力矩成分,提高反谐振处的系统增益,进而将基座非稳固安装条件下的光电平台动力学特性改造为接近名义模型的状态。基于模型分析设计的滤波器形式如下:

$$MBF(s) = \frac{J_b s^2 + B_b s + K_b}{(J_m + J_b) s^2 + (B_m + B_b) s + K_b} \tag{8}$$

式(8)为具有稳定零极点的二阶环节。传统消除谐振的陷波器设计是通过辨识、拟合谐振的频率特性,采用一般性的双 T 网络设计,其参数的物理意义为振动频率和阻尼比^[15]。而本文基于模型设计的滤波器,从问题产生的机理出发,滤波器的参数为等价惯量、等价阻尼、弹性模量等,具有明确的物理意义,可通过对光电平台结构进行有限元分析得到参数值。

3.2 基于 DOB 的内回路补偿

为了使被控对象更加逼近名义模型,采用干扰观测器(Disturbance Observer, DOB)将干扰力矩和模型不确定性等效为控制输入端的干扰,借助名义模型的逆模型和实际作用在被控对象的控制量估计出等价干扰并在控制量中引入等量的补偿,实现对等价干扰的抑制,其原理框图可见图 5 的 DOB 部分。

经过滤波器校正后的被控对象的名义模型为

$G_n(s) = \frac{1}{J_m s^2 + B_m s}$,采用乘性不确定性 $\Delta(s)$ 描述不确定摄动,则有:

$$G_p(s) = G_n(s)(1 + \Delta(s)), \tag{9}$$

根据灵敏度函数定义可得到灵敏度函数:

$$S(s) = \frac{G_n(s)(1 - Q_d(s))}{G_n(s) + (G_p(s) - G_n(s))Q_d(s)} \tag{10}$$

在低频段时名义模型接近实际模型 $G_p(s) = G_n(s)$,则补灵敏度函数 $T(s)$ 为:

$$T(s) = 1 - S(s) = Q_d(s), \tag{11}$$

其中 $Q_d(s)$ 是低通滤波器。由小增益定理可知,加入 DOB 后系统鲁棒稳定的充分必要条件是^[16]:

$$\|\Delta(j\omega)T(j\omega)\|_\infty = \|\Delta(j\omega)Q_d(j\omega)\|_\infty \leq 1. \tag{12}$$

DOB 的设计主要是在确定名义模型后调节 $Q_d(s)$ 的带宽以满足鲁棒稳定性要求。

3.3 等价捷联稳定的复合控制

利用编码器测量的框架相对运动角度微分得到角速度,再结合陀螺测量的惯性角速度可以计算出基座框架未安装陀螺部分的惯性角速度。即等价得到了陀螺捷联安装的测量值。利用这种折算,可以等价实现陀螺捷联稳定模式,并构建带有前馈的复合控制回路,提高惯性稳定控制的带宽。复合控制由反馈环节和前馈环节组成,有:

$$U(s) = \left(\frac{R(s)}{s} - \theta_e(s)\right)K_p K_v + (R(s) - \theta_e(s)s)K_v + R(s)(J_m s + B_m), \tag{13}$$

其中: K_p 和 K_v 分别为位置环增益和速度环增

益, $R(s)/s$ 为基座惯性角度信息, $\theta_e(s)s$ 为编码器角度经过微分后的角速度信号。

反馈控制取编码器作为反馈信号,控制的是机械框架的相对角运动,其指令为基座惯性角速度的相反数,即控制框架运动实现对基座惯性姿态运动的反向最终从而使平台实现惯性稳定。而前馈则利用式(3)等价计算得到的基座惯性角速度构成,基于编码器闭环控制对象的名义模型构建前馈。

在加入 DOB 进行内回路补偿后,对于外环控制器而言,被控对象的特性近似于名义模型 $G_n(s)$ 。前馈控制器为 $C_2(s)$,反馈控制器为 $C_1(s)$,输入角度指令为 $R(s)/s$,输出反馈角度为 $\theta_e(s)$ 。

由于前馈环节并不影响控制系统的稳定性,因此,在根据式(12)设计 DOB 滤波器的前提下,控制系统的稳定性只取决于双闭环反馈环节的增益 K_p 和 K_v 。针对名义模型引入双闭环反馈后控制系统的特征方程为:

$$J_m s^2 + (K_v + B_m)s + K_p K_v = 0, \quad (14)$$

可见只要保证 K_p 和 K_v 均 >0 ,即可保证控制系统的稳定性。在实现惯性稳定时,利用前馈控制可以提高动态性能,保证机械框架相对转动角度完全补偿掉基座的惯性角度变化,前馈的设计目标是使利用编码器测量的角度闭环反馈控制回路的闭环传递函数接近 1,实现完全跟踪^[17],则有:

$$\Phi(s) = \theta_e(s)s/R(s) = 1. \quad (15)$$

系统的闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{C_1(s)G_n(s) + C_2(s)G_n(s)}{1 + C_1(s)G_n(s)}, \quad (16)$$

则可得到前馈环节取名义模型的逆模型 $C_2(s) = G_n^{-1}(s)$ 时,系统闭环传递函数 $\Phi(s)$ 恒等于 1。

前馈控制 $C_2(s) = J_m s + B_m$ 器,其中加速度信号需要通过速度信号进行微分得到。为避免噪声的影响,采用文献^[18]提出的非线性跟踪微分器实现微分计算。

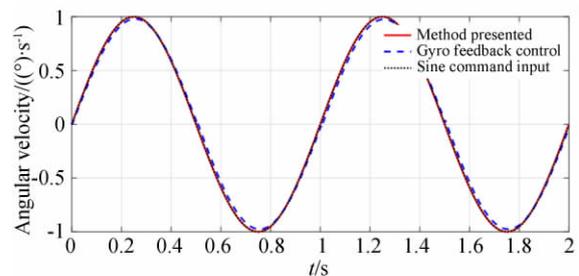
4 仿真分析

采用 MATLAB 进行仿真分析,被控对象负载端模型参数 $J_m = 0.001, B_m = 0.04$,模型包含 10%的不确定性,基座模型参数 $J_b = 0.01, B_b = 0.04$,摩擦参数 $T_c = 0.1, b = 0.5$,基座弹性力矩系数 $K_b = 10$ 。

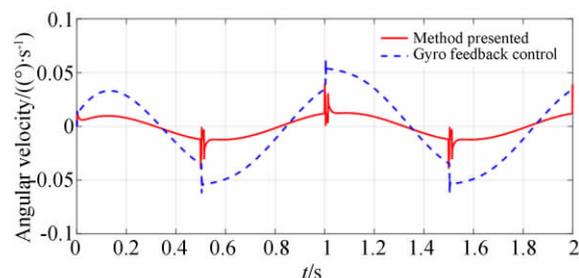
根据式(8)设计谐振抑制滤波器,根据式(12)

设计干扰观测器滤波器 $Q_d(s) = \frac{1}{0.01s+1}$ 。

为了验证本文控制方法的有效性,引入陀螺直接反馈控制作为对比。输入幅值为 $1 (^{\circ})/s$ 、频率为 1 Hz 的正弦角速度信号,绘制系统响应曲线和角速度误差曲线,如图 6 所示。仿真结果表明:本文提出的控制方法与陀螺反馈控制相比,在受到摩擦干扰时,角速度误差可以较快地收敛,并且角速度均方根误差由 $0.032 (^{\circ})/s$ 减小到 $0.009 2 (^{\circ})/s$ 。



(a) 输入输出曲线
(a) Input and output curves



(b) 角速度误差曲线
(b) Curves of angular velocity error

图 6 陀螺反馈控制和等价捷联稳定复合控制方法对比仿真曲线

Fig. 6 Simulation curves of gyro feedback control and equivalent strapdown stability compound control

5 实验测试与结果分析

5.1 实验设置

为验证本文方法对光电平台控制系统性能的改善效果,搭建了单自由度实验装置。系统硬件由带编码器的力矩电机、基座、负载盘、陀螺、控制电路板和电源组成,如图 7 所示。

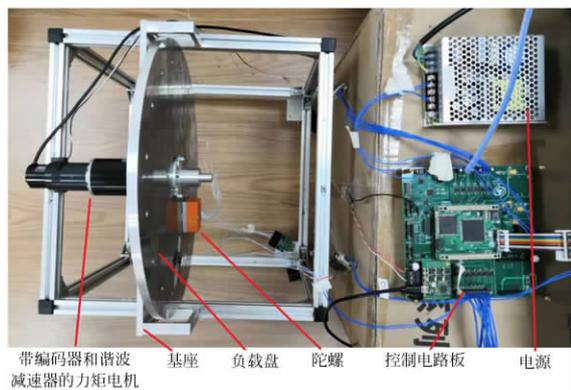


图 7 光电平台实验系统

Fig. 7 Photoelectric platform experimental system

5.2 实验结果

实验平台基座采用非稳固连接方式与固定框架连接,模拟光电平台非稳固的基座安装影响。首先,根据实验装置结构有限元分析得到基座的等效弹性模量、等效转动惯量和等效阻尼参数值,以此为依据设计消除谐振的滤波器。为了验证上述滤波器效果,采用伪随机噪声对光电平台系统再加入滤波器前后分别进行噪声扫频,对被控对象进行模型辨识,绘制系统 Bode 图,如图 8 所示。

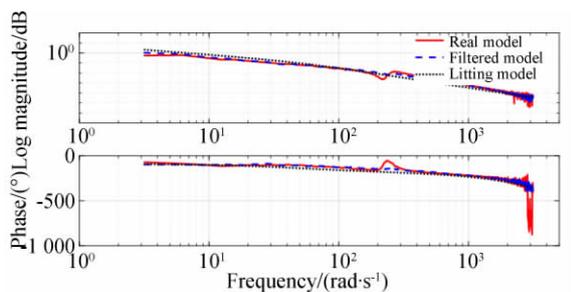


图 8 实际模型、滤波后模型和拟合模型的幅频特性曲线

Fig. 8 Amplitude-frequency curves of real model, filtered model and fitting model

基于模型滤波器的设计参数如下:

$$MBF(s) = \frac{0.0085s^2 + 0.35s + 400}{0.0055s^2 + 0.2s + 400}, \quad (17)$$

加入滤波器后的名义模型为:

$$G_n(s) = \frac{1}{0.003s^2 + 0.15s}. \quad (18)$$

由图 8 可知,设计的滤波器能够将被控对象校正成接近名义模型。基于拟合的名义模型设计 DOB,在保证 $Q_d(s)G_n^{-1}(s)$ 正则的条件下,尽量采

用低阶滤波器,截止频率考虑对外界干扰的抑制能力和测量噪声的敏感性折中选取。本文采用截止频率为 100 rad/s 的一阶低通滤波器满足表达式(12)的鲁棒稳定性要求。

$$Q_d(s) = \frac{100}{s + 100}. \quad (19)$$

调节控制系统速度环增益,原则上在保证系统不发散的条件下尽量增大,同理整定位置环增益。最后,根据名义模型加入逆模型前馈,实现本文的等价捷联惯性稳定控制。

实验分为两组:正弦输入的时域实验和隔离度测试的频域实验。为了方便研究载体在宽频带运动时光电平台的惯性稳定性能,引入频率隔离度的概念^[19-20]。针对本实验系统,频率隔离度是系统在惯性稳定工作时,根据电机负载端惯性角速度信号和基座施加干扰的惯性角速度信号,绘制幅频特性曲线。对比组实验采用陀螺直接反馈控制。

根据某工程项目要求,设计输入幅值为 10 ($^{\circ}$)/s、频率为 1 Hz 的正弦信号,记录输入和输出角速度信号,响应曲线如图 9 所示。与传统方法相比,新方法指令的动态跟踪性能更优。角速度

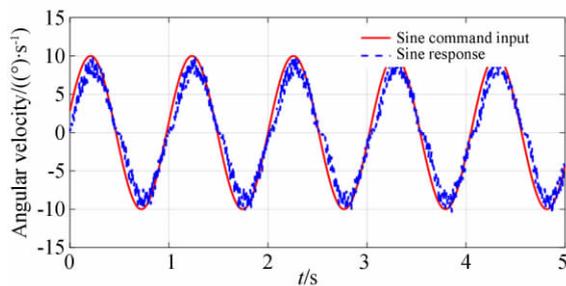
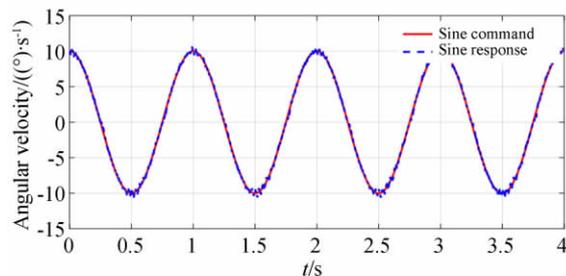
(a) 陀螺反馈控制
(a) Gyro feedback control(b) 等价降阶稳定符合控制
(b) Equivalent strapdown stability compound control

图 9 两种方法的正弦输入指令和响应曲线

Fig. 9 Sinusoidal input and response curves of two methods

跟踪误差的均方根值为 $0.23 (^{\circ})/s$, 而陀螺反馈控制的角速度跟踪误差的均方根值为 $1.75 (^{\circ})/s$ 。本文方法有效提升了控制系统的动态性能, 并且没有发生明显的谐振。

在实验平台上测试本文方法的频率隔离度指标, 验证本方法对扰动的隔离能力。令载体进行反复多次的摇摆运动, 采集载体惯性角速度和电机负载端的惯性角速度信号, 绘制从载体惯性角速度到稳定后框架惯性角速度的幅频特性曲线并比较两种控制方法, 结果如图 10 所示。

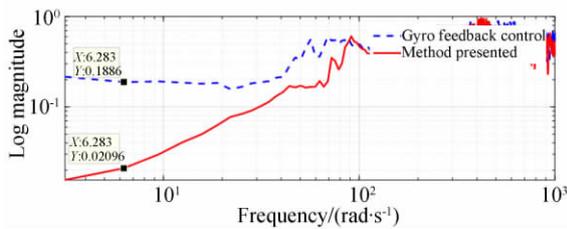


图 10 陀螺反馈控制和本文方法的隔离度曲线

Fig. 10 Isolation curves of gyro feedback control and proposed method

参考文献:

- [1] BULENT Ö, ALTUG U. Comparison of the strap-down and gimballed seekers utilized in aerial applications[J]. *SPIE*, 2012, 8353:1-6.
- [2] 张跃, 刘波, 阎胜利. 捷联式光学导引头的稳定、跟踪原理与系统仿真[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1942-1948.
ZHANG Y, LIU B, YIN SH L. Strapdown optical seeker: stabilization, tracking principle and system simulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1942-1948. (in Chinese)
- [3] 魏伟, 戴明, 李嘉全, 等. 航空光电稳定平台的自抗扰控制系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2296-2305.
WEI W, DAI M, LI J Q, et al.. ADRC control system for airborne opto-electronic platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2296-2305. (in Chinese)
- [4] DONG F, LEI X S, CHOU W S. A dynamic model and control method for a two-axis inertially stabilized platform[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(1): 432-439.
- [5] DENG K, CONG S, KONG D J, et al.. Discrete-

由图 10 可见, 本文方法的隔离度优于传统陀螺反馈控制方法。这意味着, 本文方法对外界的低频扰动的隔离效果更好, 取典型频率 1 Hz 处的隔离度进行定量比较, 陀螺反馈控制的隔离度为 18.9%, 而本文方法的隔离度为 2.1%。

6 结论

本文提出了在陀螺直接反馈的机械安装条件下实现高性能等价陀螺捷联稳定的控制方法。考虑基座的安装条件, 建立了包含基座和负载两部分的光电平台动力学新模型, 并发现安装刚度会引起谐振的问题, 由此提出了基于模型消除谐振的滤波器设计方法。该方法有效提升了光电平台的控制性能。对该方法进行了仿真和实验, 结果表明, 与传统陀螺直接反馈控制相比, 在不改变现有光电平台陀螺的安装条件下, 新方法使平台对指令的跟踪性能以及对姿态晃动的隔离性能均有明显提升, 具有重要的工程实用价值。

- time direct model reference adaptive control application in a high-precision inertially stabilized platform [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(1): 358-367.
- [6] SAFA A, YAZDANPANAHDOLMALAKI R. Robust output feedback tracking control for inertially stabilized platforms with matched and unmatched uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(1): 118-131.
- [7] 张平, 董小萌, 付奎生. 机载/弹载视觉导引稳定平台的建模与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
ZHANG P, DONG X M, FU K SH. *Modeling and control of Airborne/Missile-borne Vision-Guidance Stabilized Platform* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [8] LEE D H, LEE J, AHN J W. Mechanical vibration reduction control of two-mass permanent magnet synchronous motor using adaptive notch filter with fast Fourier transform analysis [J]. *Iet Electric Power Applications*, 2012, 6(7): 455-461.
- [9] 陈明俊, 李长红, 杨燕. 武器伺服系统工程实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
CHEN M J, LI CH H, YANG Y. *Weapons Servo*

- System Engineering Practice* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [10] 朱明超, 刘慧, 张鑫, 等. 惯性稳定平台自适应前馈控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 141-148. ZHU M CH, LIU H, ZHANG X, *et al.*. Adaptive feed-forward control for inertially stabilized platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 141-148. (in Chinese)
- [11] 孙高. 半捷联光电稳定平台控制系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013. SUN G. *Research on Control System of Semi-Strapdown Photoelectricity Stabilized Platform* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [12] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 结构滤波器在望远镜主轴控制系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 368-377. DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Application of structural filter to principal axis system of telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 368-377. (in Chinese)
- [13] 黄梁松, 曲道奎, 徐方, 等. 基于可调惯量比的伺服系统低频谐振控制[J]. *电气传动*, 2010, 40(7): 61-65. HUANG L S, QU D K, XU F, *et al.*. Servo control strategy for low-frequency resonance suppression base on adjustable inertia ratio[J]. *Electric Drive*, 2010, 40(7): 61-65. (in Chinese)
- [14] ANDERSEN T, ENMARK A. *Integrated Modeling of Telescopes* [M]. New York: Springer, 2011.
- [15] 王建敏, 吴云洁, 刘佑民, 等. 基于数字滤波器的伺服系统谐振抑制方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(3): 485-491. WANG J M, WU Y J, LIU Y M, *et al.*. Resonance suppression method based on digital filter for servo system[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(3): 485-491. (in Chinese)
- [16] 吴敏. 鲁棒控制理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010. WU M. *Robust Control Theory* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese)
- [17] SHETTY D, KOLK R A. *Mechatronics System Design* [M]. Second Edition. Poston: Cengage Learning, 2010.
- [18] TIAN D P, SHEN H H, DAI M. Improving the rapidity of nonlinear tracking differentiator via feedforward[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(7): 3736-3743.
- [19] ELLIS G. *Control System Design Guide* [M]. Fourth Edition. Netherlands: Elsevier, 2012.
- [20] 李贤涛, 张葆, 沈宏海. 基于自抗扰控制技术提高航空光电稳定平台的扰动隔离度[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2223-2231. LI X T, ZHANG B, SHEN H H. Improvement of isolation degree of aerial photoelectrical stabilized platform based on ADRC [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2223-2231. (in Chinese)

作者简介:



王中石(1988—),男,黑龙江牡丹江人,博士研究生,2014年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事航空光电平台自动控制方面的研究。E-mail: zhongshiwang@ciomp.ac.cn

通讯作者:



田大鹏(1984—),男,辽宁铁岭人,研究员,博士生导师,中国科学院青年创新促进会会员,2012年于北京航空航天大学获得博士学位,2009~2012年任日本庆应义塾大学先导研究中心共同研究员,主要从事运动控制理论与技术方面的研究。E-mail: d.tian@ciomp.ac.cn

导师简介:



刘晶红(1967—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,1990年于长春理工大学获得学士学位,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事机载光电成像测量设备方面的研究。E-mail: liu1577@126.com