基于PID的航空遥感三轴惯性稳定平台控制系统设计

李树胜,钟麦英

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要:介绍了一种基于PID(Proportion integration differentiation)的航空遥感三轴惯性稳定平台控制系统的设计,并进行了相关试验研究。首先采用了一种基于DSP的三环复合控制方案,然后通过考虑控制系统的超调量、调节时间、阻尼性等各项指标,逐次对三环控制器进行设计,得到了合适的PID参数。通过车载试验,对平台的稳态精度、动态响应能力进行了验证。

关键词:自动控制技术;航空遥感;三轴惯性稳定平台;三环复合;PID控制

中图分类号:TP23 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2011)Sup.1-0275-05

Design of control system based on PID of three-axis inertially stabilized platform for airborne remote sensing

LI Shu-sheng, ZHONG Mai-ying

(*School of Instrument Science and opto-eletronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100191, *China*)

Abstract: The designs of control system based on PID (Proportion integration differentiation) of three-axis inertially stabilized platform for airborne remote sensing were introduced, and exprerimental researches were perfomed. First of all, a kind of three-loop control scheme using DSP was applied. Secondly, considering the performances of overshoot, response time, damping and so on, the PID parameters proved to be appropriate by designing three-loop controllers gradually. Finally, Vehicle carrying results show the platform's steady precision and dynamic response ability.

Key words: automatic control technology; airborne remote sensing; three-axis inertially stabilized platform; three-loop; PID (Proportion integration differentiation) control

航空对地观测系统广泛应用于军事侦察、基础测绘、灾害监测等重大领域。若要实现理想的对地观测则要求飞行平台做匀速直线运动,但在实际飞行过程中,由于受到阵风、湍流等外部扰动以及发动机振动等内部扰动的影响,难以保持对地观测载荷相位中心的平稳理想运动,不可避免地导致成像质量下降。

惯性稳定平台安装于飞行平台与对地观测载荷之间,用于有效隔离飞行平台的扰动及非理想姿态运动,使观测载荷视轴指向和航向在惯性空

收稿日期:2011-04-30.

基金项目:"863"国家高技术研究发展计划项目(2008AA121302);"973"国家重点基础研究发展计划项目(2009CB72400201).

作者简介:李树胜(1986-),男,硕士研究生.研究方向:三轴惯性稳定平台控制系统设计及实现.
E-mail:lss123048@163.com

间内始终保持相对稳定[1-2]。惯性稳定平台要求承载比大、响应速度快、稳定精度高,框架结构的优化设计、高性能伺服控制以及高精度姿态测量是惯性稳定平台的关键技术。目前世界上代表性产品为瑞士 Leica 公司的 PAV30 和 PAV80[3]。

由于国外对惯性技术的封锁,国内惯性稳定平台研究刚刚起步,尚无成熟产品。本文重点介绍一类自主研制的航空遥感三轴惯性稳定平台控制系统,采用一种基于 DSP 的三环复合 PID 控制方案对控制器参数进行了优化设计,并进行了车载试验验证。

1 平台结构和工作原理

航空遥感三轴惯性稳定平台的结构如图 1 所示[4-5],从外至内分别是横滚框、俯仰框和方位框,由 3 台力矩电机 M_x,M_y,M_z 驱动。其中,对地观测载荷安装在方位框上,与方位框姿态变化相同;POS 安装在对地观测载荷上,用于测量载荷相对于惯性空间的姿态角,为平台提供高精度的姿态基准[6-7];G_x、G_y、G_z 分别为横滚、俯仰、方位速率陀螺,用于测量各框架相对于惯性空间的角速率;A_x、A_y 分别为横滚、俯仰加速度计,用于

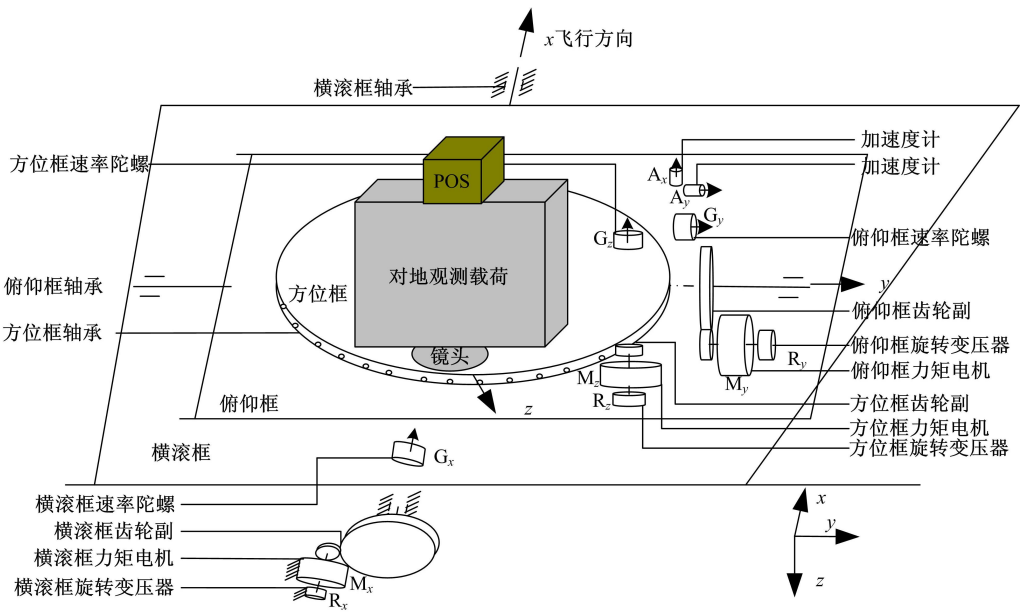


图 1 航空遥感三轴惯性稳定平台结构示意图

Fig.1 Layout of three-axis inertially stabilized platform for airborne remote sensing

测量平台相对于当地地理系的水平姿态角,为平台独立工作提供水平姿态基准;R_x、R_y、R_z 分别为横滚、俯仰、方位旋转变压器,用于测量各框架间的相对转角,为成像载荷提供补偿角度信息。

三轴惯性稳定平台在理想情况下(各框架轴承间无摩擦),对地观测载荷始终保持惯性空间稳定,但实际上轴承间的相互摩擦不可避免,致使载荷无法保持惯性稳定。以横滚框为例,当飞机发生顺时针角(图 1 中沿 x 轴顺时针方向)运动时,与飞机固联的平台底座通过横滚框轴承将这种角运动作用到横滚框架上,POS 测量到对地观测载荷的横滚姿态变化,控制器根据姿态参考输入和 POS 测量到的实际框架姿态产生控制信号驱动横滚电机,产生反作用力矩,保持对地观测载荷的惯性空间稳定,有效隔离飞机产生的横滚角运动。三轴惯性稳定平台控制系统功能框图如图 2 所示。

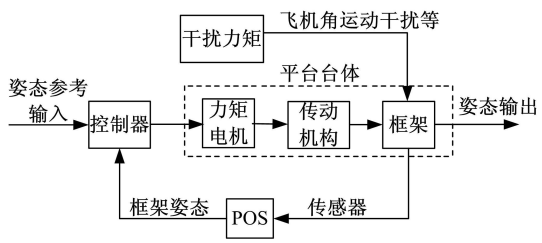


图 2 航空遥感三轴惯性稳定平台控制系统功能框图

Fig.2 Scheme of control system of three-axis inertially stabilized platform for airborne remote sensing

2 平台控制系统设计

航空遥感三轴惯性稳定平台横滚框和俯仰框运动范围较小,方位框的运动不影响系统的对地指向,将三轴惯性稳定平台控制系统简化为 3 个单框架子系统进行设计。本文采用基于 DSP 的三环复合 PID 控制方案[8-9],即电流回路、稳定回

路和跟踪回路,如图 3 所示。其中,电流回路由电流传感器构成电枢电流负反馈,以减小电源电压波动影响,提高控制转矩的线性度,实现对电流的平稳控制,使之不发生突变。稳定回路以速率陀螺作为速率传感器,主要用于隔离扰动,保证系统响应的快速性,保持载荷惯性空间稳定。跟踪回路为控制系统主回路,它以 POS 作为位置传感器,用于使成像载荷始终跟踪导航坐标系或者某一设定的姿态。下面介绍电流补偿器、速率补偿器和位置补偿器的设计。

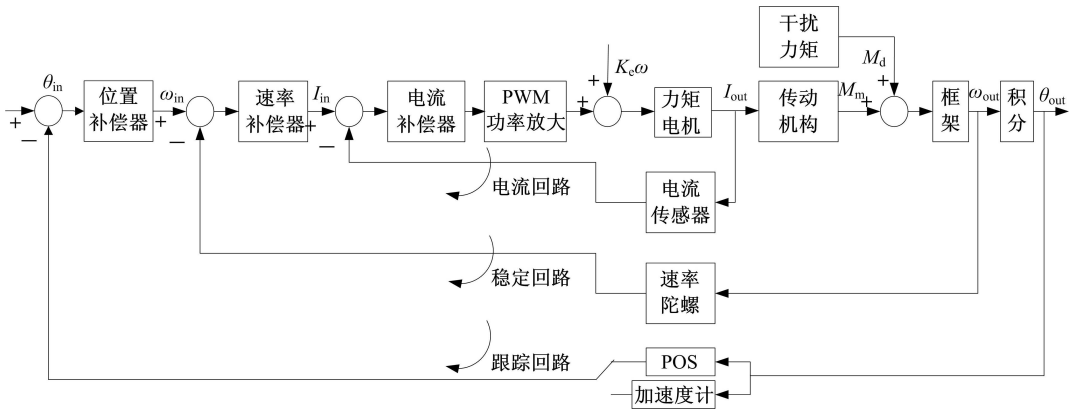


图 3　三轴惯性稳定平台单框架三环复合 PID 控制结构图

Fig .3　A single-axis gimbal block diagram on three-loop complex PID control of three-axis inertially stabilized platform

2 .1　电流补偿器设计

本文采用 PWM 开关方式实现对力矩电机的控制,电流补偿器采用比例调节方式,图 4 为电流回路控制系统传递函数框图。图中,PWM 功率放大传递函数 $\omega_{PWM}(s)$是固有的,其放大倍数 k_{PWM}和开关周期 T_{PWM}是已确定的;电机模型参数电枢绕组跨导 k_m 和电磁时间常数 T_e 也是确定的;电流补偿器的比例参数 k_{ip}是需要设计解决的。

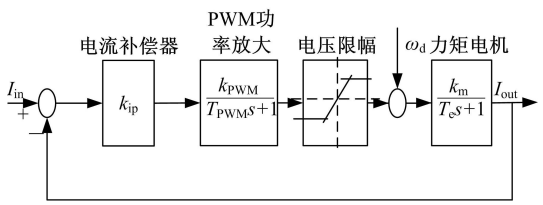


图 4　电流回路控制系统传递函数框图

Fig .4　Scheme of current loop control system

由图 4 可以得到从电流输入 I_{in}到电流输出 I_{out}的闭环传递函数为

$$\phi_i(s)=\frac{k_{ip}\,k_{PWM}\,k_m}{T_{PWM}\,T_e\left(s^2+\dfrac{T_{PWM}+T_e}{T_{PWM}\,T_e}s+\dfrac{1+k_{ip}\,k_{PWM}\,k_m}{T_{PWM}\,T_e}\right)} \tag{1}$$

式(1)为典型二阶系统[10],为了实现最优阻尼,取二阶系统阻尼比 ε为 0 .707,代入式(1)就可以得到电流补偿器比例参数 k_{ip}。

2 .2　速率补偿器设计

稳定回路采用 PI 串联校正。由于电流回路闭环带宽远远高于稳定回路,可以将电流回路等效为比例环节 1,如图 5 所示稳定回路控制系统传递函数框图。

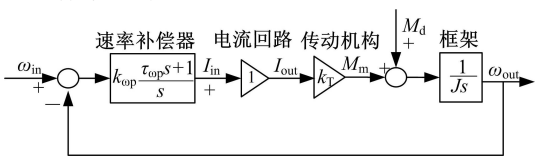


图 5　稳定回路控制系统传递函数框图

Fig .5　Scheme of stabilized loop control system

图 5 中,传动机构传动比 k_T 和框架转动惯量 J 均为已知参数,需要设计的是速率补偿器的比例参数 $k_{\omega p}$和积分时间常数 $\tau_{\omega p}$。首先确定控制带宽问题,主要涉及稳定回路开环截止频率 $\omega_{c\omega}$,跟踪回路开环截止频率 $\omega_{c\theta}$以及平台机械谐振频率 ω_R。对于典型的位置伺服系统,一般可以得到如下关系式:

$$\left\{\begin{array}{l}\omega_{c\omega}=\left(\dfrac{1}{4}\sim\dfrac{1}{6}\right)\omega_R\\ \omega_{c\theta}=\left(\dfrac{1}{2}\sim\dfrac{1}{4}\right)\omega_{c\omega}\end{array}\right\} \tag{2}$$

经过模态分析后,平台机械谐振频率 ω_R 是已知的,这里取稳定回路开环截止频率为机械谐振频率的 1/5,即 $\omega_{c\omega}=\dfrac{\omega_R}{5}$。由图 5 可以得到稳定回路开环传递函数为

$$G_\omega(s)=k_{\omega p}\,k_T\,\frac{\tau_{\omega p}\,s+1}{Js^2} \tag{3}$$

为了保证系统有较强的稳定性、较短的调节时间以及较小的超调量,将稳定回路的开环相位

裕度设计为 70°。将开环相位裕度和开环截止频率代入式(3)中,就可以得到稳定回路速率补偿器比例参数 $k_{\omega p}$ 和积分时间常数 $\tau_{\omega p}$。

2.3 位置补偿器设计

位置补偿器采用比例调节方式,比例参数 $k_{\theta p}$ 需要设计来解决。由于稳定回路闭环带宽高于跟踪回路闭环带宽 4 倍以上,将稳定回路等效为一阶惯性环节,时间常数 $T_\omega=1/\omega_{c\omega}$ 为已知参数,得到简化的稳定回路闭环传递函数为

$$\phi_\omega(s)=\frac{1}{T_\omega s+1} \tag{4}$$

如图 6 为跟踪回路控制系统传递函数框图。

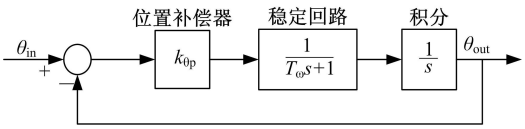


图 6 跟踪回路控制系统传递函数框图

Fig.6 Scheme of tracking loop control system

由图 6 可以得到跟踪回路开环传递函数为

$$G_\theta(s)=\frac{k_{\theta p}}{(T_\omega s+1)s} \tag{5}$$

跟踪回路开环截止频率设计指标为 $\omega_{c\theta}$,将其取作稳定回路开环截止频率的 1/4,代入式(5)中就可以得到位置补偿器滞后校正比例参数 $k_{\theta p}$。

3 试 验

本文以北航自主研制的航空遥感三轴惯性稳定平台(见图 7)为对象进行试验研究。车载试验条件为:速率陀螺选用光纤速率陀螺 VG941-3AM,随机常值漂移 15 (°)/h;加速度计选用石英挠性加速度计 JN-06M-II,随机常值偏置 100 μg;姿态测量系统 POS 选用挠性 POS。姿态精度为:水平 0.001 (°)/h(1σ),航向 0.01 (°)/h(1σ)。其中 POS 初始失准角 Ψ_N,Ψ_E,Ψ_D 设为 1°,初始状态设为 0。车载试验在北京市五环路进行。

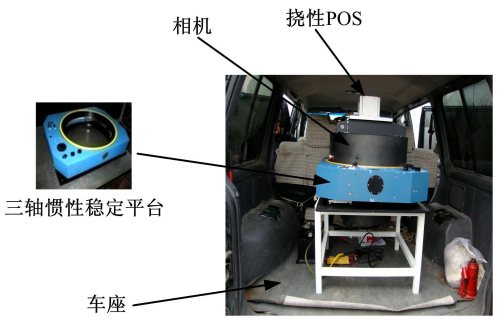


图 7 北航三轴惯性稳定平台与相机、POS 车载试验图

Fig.7 Vehicle experiment graph of three-axis inertially stabilized platform with camera and POS

平台控制器参数为:横滚框电流回路比例参数 $k_{ip}=2.27$;稳定回路比例参数 $k_{\omega p}=0.974$,稳定回路积分时间常数 $\tau_{\omega p}=0.0046$;跟踪回路比例参数 $k_{\theta p}=0.81$。俯仰框电流回路比例参数 $k_{ip}=2.05$;稳定回路比例参数 $k_{\omega p}=0.474$,稳定回路积分时间常数 $\tau_{\omega p}=0.0031$;跟踪回路比例参数 $k_{\theta p}=1.47$。图 8 为车载试验数据曲线图,其中,红色曲线表示指标要求的平台稳定精度上限值,绿色曲线表示指标要求的平台稳定精度下限值,蓝色曲线表示平台车载试验实际稳定精度。

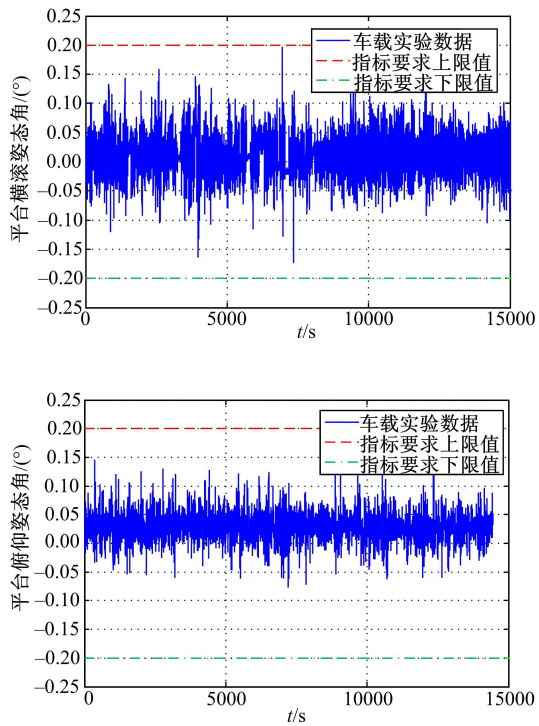


图 8 车载试验平台姿态角输出曲线

Fig.8 Graph of platform's attitudes during experiment

从试验数据可以看出,车载试验过程中平台姿态角输出始终维持在 −0.2°~+0.2°之间,满足对平台稳定精度的要求。

4 结束语

介绍了一类航空遥感三轴惯性稳定平台的结构和工作原理。采用了一种基于 DSP 的三环复合 PID 控制方案,对控制器参数进行了优化设计,并进行了车载试验验证。试验结果表明,三轴惯性稳定平台控制系统设计是可行有效的。

参考文献:

[1] Hilkert J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles[J]. IEEE Control Systems

Magazine,2008,28(1):26-46.

[2] Michael K.Masten.inertially stabilized platforms for optical imaging systems[J].IEEE Control Systems Magazine,2008,28(1):47-64.

[3] Product description leica PAV80 gyro-stabilized sensor mount[EB/OL].[2010-11-14].http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/airborne/PAV80/documentations/Leica_PAV80_Product_Description.pdf.

[4] 房建成,戚自辉,钟麦英,等.航空遥感用三轴惯性稳定平台不平衡力矩前馈补偿方法[J].中国惯性技术学报,2010,18(1):38-43.
Fang Jian-cheng,Qi Zi-hui,Zhong Mai-ying,et al.Three axes ISP imbalance torque feedforward compensation method[J].Journal of Chinese Inertial Technology,2010,18(1):38-43.

[5] 戚自辉.航空遥感三轴惯性稳定平台控制系统设计与实现[D].北京:北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院,2009.
Qi Zi-hui.Design and realization of the control system of three-axes inertially stabilized platform for airborne remote sensing[D].Beijing:School of Instrument Science and Opto-eletronics Engineering,Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2009.

[6] 杨胜科,汪骏发,王建宇,等.航空遥感中 POS 与稳定平台控制组合技术[J].电光与控制,2008,15(2):62-65.
Yang Sheng-ke,Wang Jun-fa,Wang Jian-yu,et al.The combined technology of POS and stabilized platform control in airborne remote sensing[J].Electronics Optics & Control,2008,15(2):62-65.

[7] 宫晓琳,房建成.基于信息正交性的 Kalman 滤波抗野值法在 POS 中的应用[J].航空学报,2009,30(12):32-40.
Gong Xiao-lin,Fang Jian-cheng.Application of modified Kalman filtering restraining outliers based on orthogonality of innovation to POS[J].Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica,2009,30(12):32-40.

[8] 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,1993.

[9] 姬伟.陀螺稳定光电跟踪平台伺服控制系统研究[D].南京:东南大学自动化学院,2006.
Ji Wei.Research on servo control system of gyro stabilized and opto-electronic tracking[D].Nanjing:School of Automation,Southeast University,2006.

[10] 郑大钟.线性系统理论[M].北京:清华大学出版社,1988.