

航空遥感用三轴惯性稳定平台不平衡力矩前馈补偿方法

房建成, 戚自辉, 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: 航空遥感用三轴惯性稳定平台用于稳定成像载荷, 获取高分辨的遥感数据。但是由于稳定平台承载大且存在质量偏心, 在载机加速度的作用下平台产生幅值较大的不平衡力矩, 导致平台的稳定精度下降和相机成像质量退化。为了有效抑制不平衡力矩产生的影响, 提高平台的稳定精度, 提出了一种基于不平衡力矩观测器的惯性稳定平台不平衡力矩前馈补偿方法。首先设计一种不平衡力矩观测器, 实时估计出平台的不平衡力矩; 然后通过前馈补偿的方法抑制不平衡力矩的作用, 从而达到提高平台的稳定精度的目的。仿真结果显示, 平台的稳定精度得到大幅度提高, 基于不平衡力矩观测器的惯性稳定平台不平衡力矩前馈补偿方法有显著补偿效果。

关键词: 航空遥感; 三轴惯性稳定平台; 质量不平衡; 前馈补偿; 观测器

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

Feedforward compensation method for three axes inertially stabilized platform imbalance torque

FANG Jian-cheng, QI Zi-hui, ZHONG Mai-ying

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Three axes inertially stabilized platform is used to stabilize the imaging sensor in airborne high-resolution remote sensing system. But due to the existence of mass imbalance in three axes inertially stabilized platform, the imbalance torque is inevitable under the effect of acceleration, which could lead to the decline of platform accuracy and the degeneration of image quality. In order to attenuate the influence of the imbalance torque, an observer-based imbalance torque feed-forward compensation method is proposed. Firstly, an imbalance torque observer is designed to estimate the real-time imbalance torque. Then, through feed-forward compensation, the influence of imbalance torque is restrained. The simulation results show that the platform stable accuracy is dramatically improved, and the effectiveness of the observer-based imbalance torque feed-forward compensation method is obvious.

Key words: air remote sensing, three axes inertially stabilized platforms; mass imbalance; observer; feed-forward

高分辨率对地观测是航空遥感系统发展的重要方向, 但是由于大气紊流和载机自身因素的影响, 载机机体无法保持平稳, 造成安装在载机上的成像载荷视轴摇晃, 成像质量下降。由姿态位置测量系统 (POS) 和惯性稳定平台组成的高分辨率航空遥感平台是解决这个问题的有效措施^[1]。其中, POS 测量出成像载荷的姿态和位置, 提供精确指向基准; 惯性稳定平台隔离载机的角运动, 消除干扰力矩对成像载荷的影响, 使成像载荷稳定成像^[2-3]。

三轴惯性稳定平台可以承载多种载荷, 不同载荷的质心位置不同, 且质心在工作过程中会发生移动, 难以通过配重的方式克服质量偏心。由于平台承载比大, 在重力加速度和飞机干扰加速度的作用下, 产生较大的不平衡力矩, 导致平台的稳定精度下降。本文提出一种基于观测器的惯性稳定平台不平衡力矩前馈补偿方法, 通过实时观测出不平衡力矩, 然后在控制系统中进行前馈补偿, 以达到抑制不平衡力矩的目的。

收稿日期: 2009-09-14; **修回日期:** 2009-12-16

基金项目: 国家 863 计划 (2008AA121302) 及国家 973 课题 (2009CB72400201)

作者简介: 房建成 (1965—) 男, 教授, 博导, 主要研究方向为导航、制导与控制。 E-mail: fangjiancheng@buaa.edu.cn

1 平台工作原理及不平衡力矩的影响分析

1.1 三轴惯性稳定平台工作原理

三轴惯性稳定平台的结构如图1所示，由外至内分别是横滚框、俯仰框和方位框。横滚框、俯仰框用于跟踪当地地理水平，方位框用于跟踪载机航向。其中， G_x 、 G_y 、 G_z 为安装在各框架上的速率陀螺， M_x 、 M_y 、 M_z 为三合力矩电机， K_x 、 K_y 、 K_z 为各框架的伺服控制器。伺服控制器根据速率陀螺敏感到的框架角速率信息和POS测量出的姿态和位置信息产生控制信号给力矩电机，力矩电机输出驱动力矩以抵消干扰力矩并驱动框架转动，达到稳定和跟踪的目的。

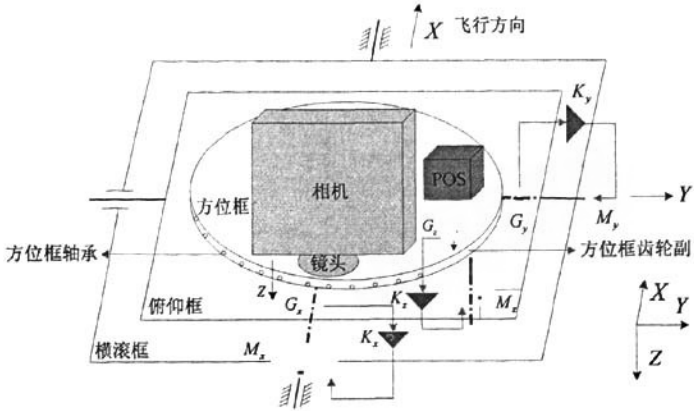


图1 三轴惯性稳定平台结构示意图

Fig.1 Layout of three-axis inertially stabilized platform

三轴惯性稳定平台三个框架间的角运动范围较小，可忽略框架间的耦合作用，则控制系统的结构图如图2所示，它采用由电流环、稳定回路和跟踪回路组成的三环控制。电流环用于加快速度电机转矩响应速度，同时抑制电机反电动势扰动；稳定回路用于提供速率阻尼，提高系统的稳定性和对干扰的响应速度；跟踪回路用于调整成像载荷视轴的精确指向，跟踪当地地理水平和载机航向。其中， θ_m 为框架姿态角给定， θ_{out} 为框架姿态角输出， ω_m 为框架角速率给定， ω_{out} 为框架角速率输出， I_m 为力矩电机电流给定， I_{out} 为力矩电机电流输出， K_T 为力矩电机力矩系数， J 为包括载荷在内的框架转动惯性， M_d 为干扰力矩（主要包括不平衡力矩和摩擦力矩）， $K_e\omega$ 为电机反电动势。

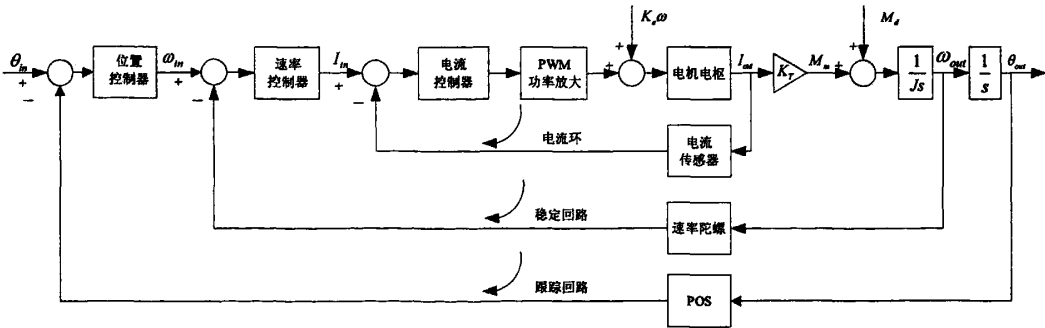


图2 控制系统结构图

Fig.2 Configuration of the control system

1.2 不平衡力矩对稳定精度的影响分析

稳定精度是惯性稳定平台的主要技术指标之一，反映了稳定平台对干扰力矩的抑制能力，然而幅值较大的不平衡力矩的存在将严重影响稳定平台的稳定精度。稳定平台的稳定精度则主要由稳定回路的性能决定^[4-5]，稳定回路的传递函数框图如图3所示，其中， $K_c \frac{\tau_c s + 1}{s}$ 为电流控制器， $\frac{U}{T_{pwm} s + 1}$ 为PWM功率驱动单元的传递函数， $\frac{K_m}{T_e s + 1}$ 为电机电枢绕组传递函数， $K_\omega \frac{\tau_\omega s + 1}{s}$ 为速率控制器， $\frac{1}{T_G s + 1}$ 为速率陀螺的传递函数。

电流环的带宽远大于稳定回路的带宽，可将电流环看作比例系数为1的比例环节，则干扰力矩 M_d 的闭环传递函数为

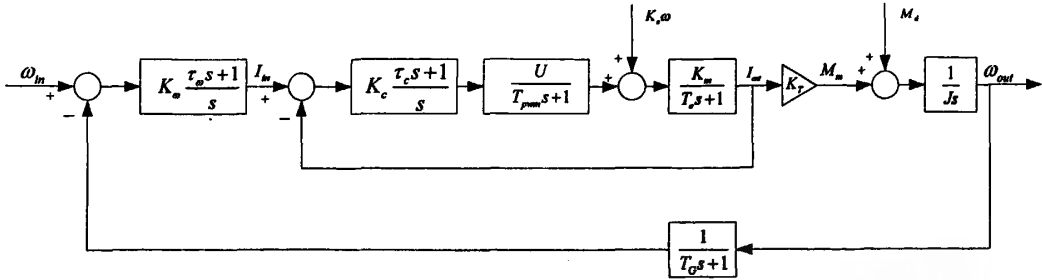


图3 稳定回路传递函数框图

Fig.3 Scheme of the stabilizing-loop

$$\Phi_{M_d} = \frac{\omega_{out}(s)}{M_d(s)} = \frac{1/Js}{1 + \frac{1}{Js} \cdot \frac{1}{T_G s+1} \cdot K_{\omega} \cdot \frac{\tau s+1}{s}} \quad (1)$$

一般使用力矩刚度来表征稳定平台抵抗干扰力矩的能力,力矩刚度越大,稳定平台的稳定精度越高^[6]。力矩刚度 $S(s)$ 定义为干扰力矩 $M_d(s)$ 与该干扰力矩引起的稳定平台偏差角 $\theta(s)$ 之比:

$$S(s) = \frac{M_d(s)}{\theta(s)} = s \cdot \frac{M_d(s)}{\omega(s)} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),得到稳定回路的力矩刚度表达式:

$$S(s) = \frac{s}{\Phi_{M_d}} = Js^2 + \frac{K_{\omega} \cdot K_r \cdot (\tau s+1)}{T_G(s)+1} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,可以通过增加框架的转动惯量 J 和速率PI控制器的比例系数 K_{ω} 来提高稳定回路的力矩刚度。但是 J 一般是不可变的,而过大的 K_{ω} 会导致系统不稳定,所以稳定回路的力矩刚度难以做到很大,对干扰力矩的抑制作用是有限的。

三轴惯性稳定平台的方位框的支撑轴与重力加速度的方向平行,重力加速度不会作用在方位框上,方位框仅在载机运动干扰加速度的作用下产生较小的不平衡力矩,对平台的稳定精度影响不大;但是横滚框和俯仰框的支撑轴平行于地理水平,在重力加速度和飞机运动干扰加速度的共同作用下会产生较大的不平衡力矩。例如,设框架质量为120 kg,质量偏心距为1 cm,则在重力加速度的作用下即可产生幅值为11.76 N·m的不平衡力矩,远大于摩擦力矩(一般小于1 N·m),从而造成平台稳定精度的大幅下降。前馈补偿是解决这种问题的有效方法^[7-8],通过前馈补偿,可以在不平衡力矩产生作用之前将其抵消,提高稳定平台的稳定精度。

2 不平衡力矩的前馈补偿方法

具有不平衡力矩前馈补偿的稳定回路如图4所示,图中 M_d 为不平衡力矩, M_f 为摩擦力矩。由于摩擦力矩相对较

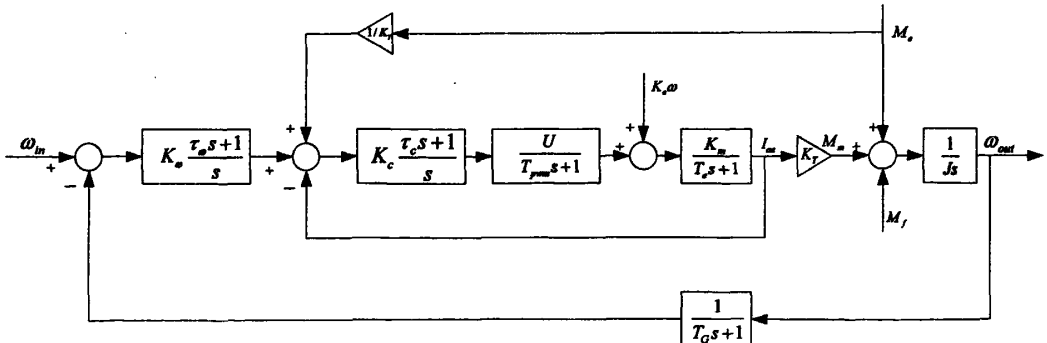


图4 具有不平衡力矩前馈补偿的稳定回路传递函数框图

Fig.4 Scheme of the stabilizing-loop with imbalance torque feed-forward compensation

小, 依靠系统本身的反馈控制即可有效地抑制摩擦力矩的作用。

如果 M_e 是已知的, 则通过在电流环中增加相应大小的电流, 力矩电机即可迅速输出与 M_e 大小相等、方向相反的抵抗力矩。但是不平衡力矩是时刻变化的, 无法直接测量得到。本文设计了一种有效的不平衡力矩观测器, 通过测量力矩电机电流 I_{out} 和飞机干扰加速度 a , 实时估计出稳定平台的不平衡力矩, 解决了不平衡力矩不可测的问题。

2.1 不平衡力矩观测器设计

在稳态情况下, 控制系统通过闭环反馈的作用, 控制力矩电机输出与干扰力矩相等、方向相反的抵抗转矩。力矩电机输出的转矩与电枢电流成正比关系 $M_m = K_T \cdot I$, 可以得到:

$$K_T \cdot I = M_{eg} + M_{ea} + M_f \quad (4)$$

式中, M_{eg} 为在重力加速度作用下框架的不平衡力矩分量, M_{ea} 为在飞机运动干扰加速度作用下框架的不平衡力矩分量。

由于大气紊流是一个随机过程, 且其均值为零^[9-10], 所以飞机运动干扰加速度作用下框架的不平衡力矩分量、摩擦力矩以及电机反电动势干扰均可视为白噪声, 通过对电机电枢电流进行 Butterworth 低通滤波, 得到框架仅在重力加速度 g 作用下产生的不平衡力矩分量:

$$K_T \cdot \tilde{I} = M_{eg} = m \cdot g \cdot l_e \quad (5)$$

式中, \tilde{I} 为滤波后的电机电枢电流, m 为框架质量, l_e 为框架的质量偏心距。

重力加速度 g 和飞机运动干扰加速度 a 可由加速度计测量得到, 则在重力加速度和飞机运动干扰加速度的共同作用下框架的不平衡力矩的计算公式为:

$$M_e = m(g+a)l_e \quad (6)$$

由式(5)(6)得框架不平衡力矩的估计方程为:

$$M_{est} = M_{eg} \cdot \frac{g+a}{g} = K_T \cdot \tilde{I} \cdot \frac{g+a}{g} \quad (7)$$

最终设计得到的不平衡力矩观测器如图 5 所示, 它具有结构简单、计算量小、易于实现的优点。

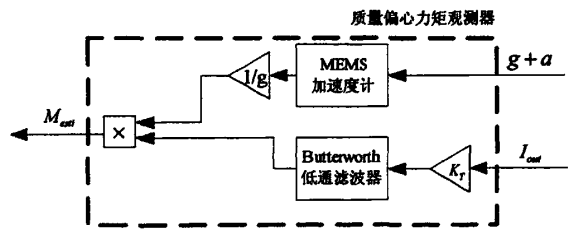


图 5 不平衡力矩观测器结构图

Fig.5 Configuration of imbalance torque observer

2.2 基于观测器的不平衡力矩前馈补偿的实现

将设计的不平衡力矩观测器应用到稳定回路中, 如图 6 所示。电流传感器测量出力矩电机的电枢电流 I_{out} , 由于其

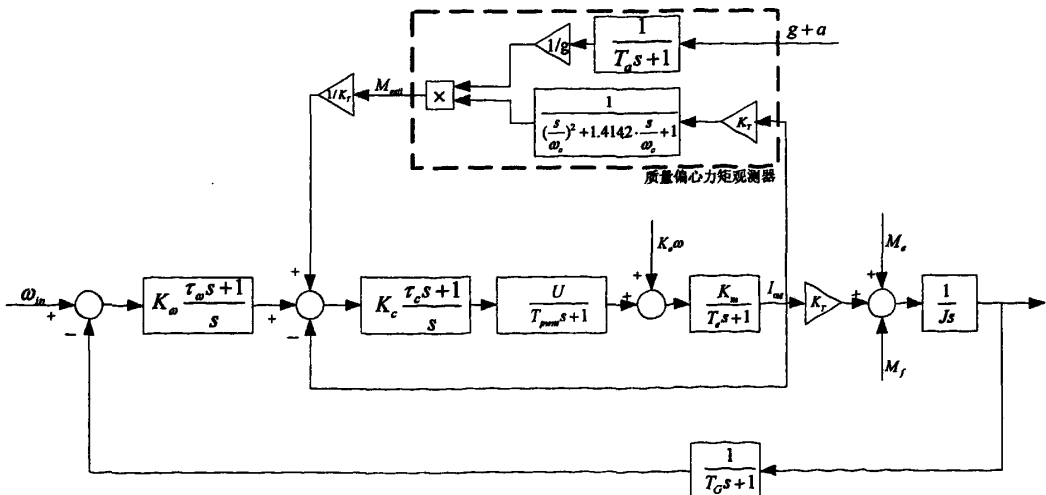


图 6 具有不平衡力矩观测器的稳定回路传递函数框图

Fig.6 Scheme of the stabilizing-loop with imbalance torque observer

带宽足够高,可近似看作比例环节;加速度计测量出加速度 $g+a$, 传递函数为一阶惯性环节 $\frac{1}{T_a s+1}$; 低通滤波器采用

两阶 Butterworth 滤波器, 传递函数为 $\frac{1}{(\frac{s}{\omega_c})^2 + 1.4142 \cdot \frac{s}{\omega_c} + 1}$, 其中 ω_c 为 3 dB 截止频率。为了检验补偿效果, 对不具有

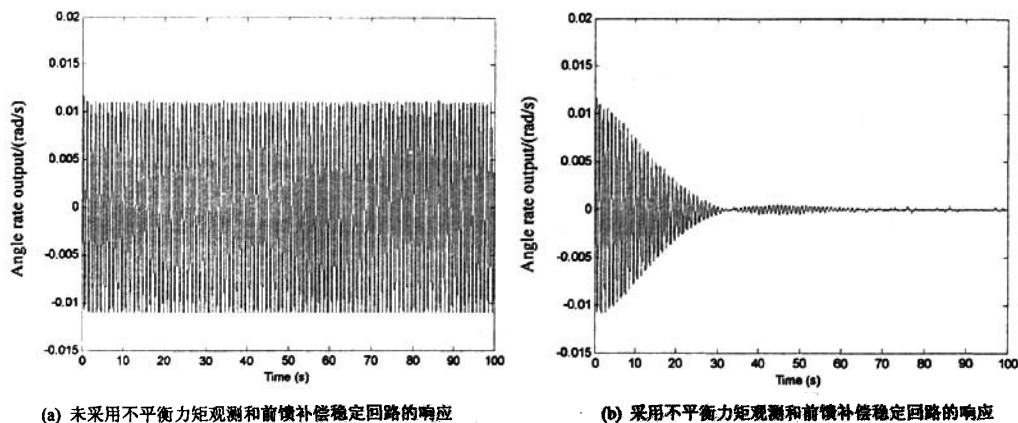
不平衡力矩观测补偿的稳定回路和具有不平衡力矩观测补偿的稳定回路分别进行了 Matlab 仿真。

3 仿真结果及分析

仿真参数设为: 摩擦力矩的幅值为 $0.3 \text{ N}\cdot\text{m}$, 反电动势干扰的幅值为 1 V , 飞机运动干扰加速度 a 的幅值为 $1g$ 、频率为 1 Hz , Butterworth 低通滤波器的截止频率 ω_c 为 0.1 Hz 。根据平台的质量偏心距是否变化, 分为以下两种情况进行仿真:

1) 常值质量偏心距。设平台的质量偏心距在工作过程中不变, 大小为 1 cm , 则在重力加速度和交变的飞机运动干扰加速度作用下, 不平衡力矩的表达式为 $(11.76+11.76 \cdot \sin(1t)) \text{ N}\cdot\text{m}$, 仿真时间为 100 s 。

2) 质量偏心距正弦变化。由于胶片式相机的胶片在工作过程中移动等原因, 设平台质量偏心距以正弦规律缓慢变化, 其幅值为 1 cm , 变化频率为 $1 \times 10^{-3} \text{ Hz}$, 则不平衡力矩的表达式为 $(11.76+11.76 \cdot \sin(1t)) \cdot \sin(0.00628t) \text{ N}\cdot\text{m}$, 仿真时间为 1000 s 。

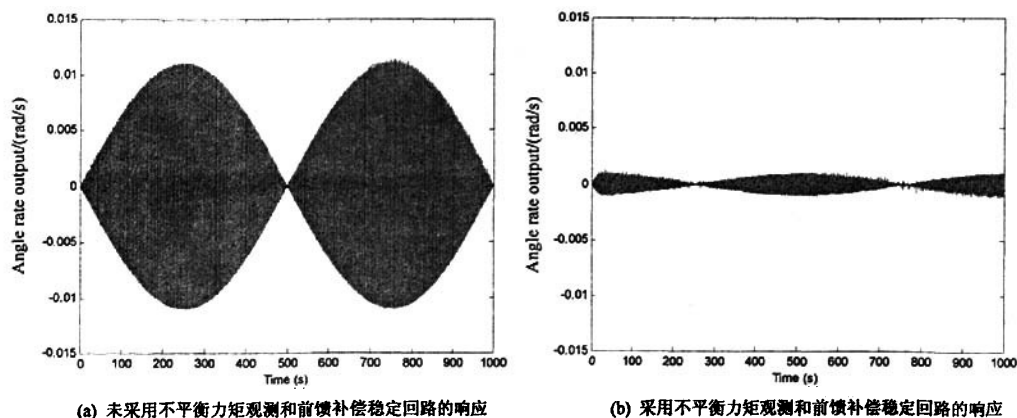


(a) 未采用不平衡力矩观测和前馈补偿稳定回路的响应

(b) 采用不平衡力矩观测和前馈补偿稳定回路的响应

图 7 常值质量偏心距作用下稳定回路的响应

Fig.7 Response of stabilizing-loop under the action of constant imbalance torque



(a) 未采用不平衡力矩观测和前馈补偿稳定回路的响应

(b) 采用不平衡力矩观测和前馈补偿稳定回路的响应

图 8 质量偏心距正弦变化时稳定回路的响应

Fig.8 Response of stabilizing-loop under the action of sinusoidal imbalance torque

仿真结果如图 7、图 8 所示。由图 7 的仿真结果可以看出, 质量偏心距阶跃变化时, 带有不平衡力矩前馈补偿的稳定回路将会在 30 s 内达到稳定状态, 并将框架的干扰角速率的幅值由 0.011 rad/s 降为 $0.001 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$, 大幅度地提高了

稳定平台的稳定精度。如果稳定平台的稳定精度已满足要求, 则可以通过适当的降低控制系统的增益, 以达到提高系统稳定裕度的目的。

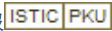
由图 8 可以看出, 质量偏心距正弦变化时, 所设计的观测器依然可以很好地估计不平衡力矩, 并通过前馈补偿进行抑制, 提高稳定平台的稳定精度。但是当质量偏心距为零或者质量偏心距较小时, 将无法准确估计出不平衡力矩, 且对干扰力矩有放大作用, 一定程度上降低了稳定平台的稳定精度, 应断开前馈补偿。

4 结论

航空遥感三轴惯性稳定平台承载多种载荷, 而且其质心位置在工作过程中发生变化, 导致稳定平台难以通过配重的方式克服质量偏心, 在重力加速度和飞机运动干扰加速度的作用下将产生幅值较大的不平衡力矩, 降低了稳定平台的稳定精度。本文通过实时的观测出不平衡力矩, 然后进行前馈控补偿。仿真结果显示, 这种方法很好地抑制了稳定平台不平衡力矩干扰, 降低了对稳定平台力矩刚度的要求, 提高了稳定平台的稳定精度。

参考文献(References):

- [1] 杨胜科, 汪骏发, 王建宇. 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. The combined technology of POS and stabilized platform control in airborne remote sensing[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(2): 62-65.
- [2] Hilkert J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1): 26-46.
- [3] Masten M K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1): 47-64.
- [4] 李东明. 基于 DSP 的平台稳定回路控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2003: 1-2.
LI Dong-ming. Control system design based on DSP for platform stabilization loop[D]. Harbin: School of Automation, Harbin Engineering University, 2003: 1-2.
- [5] 李景森, 奚砧华, 付中泽, 等. 模糊-线性双模控制在平台稳定回路中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(4): 390-395.
LI Jing-sen, XI Bei-hua, FU Zhong-ze, et al. Application of fuzzy-linear dual-mode control in platform stabilization loop[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(4): 390-395.
- [6] 沈宏海, 刘晶红, 张葆, 等. 航空光电成像平台角位置陀螺和角速率陀螺的稳定效果分析[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1293-1299.
SHEN Hong-hai, LIU Jing-hong, ZHANG Bao, et al. Stabilization properties of airborne imaging platform based on position gyro and rate gyro[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1293-1299.
- [7] Iwasaki M, Matsui N. Robust speed control of IM with torque feedforward control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(6): 553-560.
- [8] Babrin V, Haba C G, Cojocaru-Filipiuc C. Industrial robot control system with torque-based estimator for rejection of perturbations[J]. IEEE Power Electronics and Drive Systems, 2003, 2(17-20): 1624-1629.
- [9] 杨秋艳, 王立新. 大气紊流环境下的纵向飞行参数响应分析[J]. 飞行力学, 2009, 27(1): 20-23.
YANG Qiu-yan, WANG Li-xin. Analysis of the longitudinal flight parameter under atmosphere turbulence[J]. Flight Dynamics, 2009, 27(1): 20-23.
- [10] Werne J, Fritts D C, Ling Wang, Lund T, Wan K. High-resolution simulations and atmospheric turbulence forecasting[C]// IEEE DoD HPCMP Users Group Conference. Seattle, WA, 2008: 262-266.

作者: 房建成, 戚自辉, 钟麦英, FANG Jian-cheng, QI Zi-hui, ZHONG Mai-ying
作者单位: 北京航空航天大学, 仪器科学与光电工程学院, 北京, 100191
刊名: 中国惯性技术学报 
英文刊名: JOURNAL OF CHINESE INERTIAL TECHNOLOGY
年, 卷(期): 2010, 18(1)
被引用次数: 0次

参考文献(10条)

1. 杨胜科, 汪骏发, 王建宇 航空遥感中POS与稳定平台控制组合技术[期刊论文]-电光与控制 2008(2)
2. Hilkert J M Inertially stabilized platform technology concepts and principles 2008(1)
3. Masten M K Inertially stabilized platforms for optical imaging systems 2008(1)
4. 李东明 基于DSP的平台稳定回路控制系统设计 2003
5. 李景森, 奚磊华, 付中泽, 宋超 模糊-线性双模控制在平台稳定回路中的应用[期刊论文]-中国惯性技术学报 2008(4)
6. 沈宏海, 刘晶红, 张葆, 戴明, 贾平, 魏忠和, 熊经武 航空光电成像平台角位置陀螺和角速率陀螺的稳定效果分析[期刊论文]-光学精密工程 2007(8)
7. Iwasaki M, Matsui N Robust speed control of IM with torque feedforward control 1993(6)
8. Babrin V, Haba C G, Cojocaru-Filipiuc C Industrial robot control system with torque-based estimator for rejection of perturbations 2003(17-20)
9. 杨秋艳, 王立新 大气紊流环境下的纵向飞行参数响应分析[期刊论文]-飞行力学 2009(1)
10. Werne J, Fritts D C, Ling Wang, Lund T, Wan K High-resolution simulations and atmospheric turbulence forecasting 2008

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgqxjsxb201001007.aspx

授权使用: 上海交通大学(shjtdxip), 授权号: 67978cc5-51e0-4e03-aaaf-9e9700cf36c7

下载时间: 2011年2月27日