

文章编号 1004-924X(2013)05-1213-09

# 基于舰载光电设备参考模型扰动估计的前馈控制

张 艳<sup>1,2\*</sup>, 张淑梅<sup>1</sup>, 乔彦峰<sup>1</sup>

- (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 100039)

**摘要:**在传统前馈控制的基础上引入了基于参考模型的扰动估计来改善舰载光电设备的动态性能,提高其扰动隔离能力,从而提高跟踪精度。分析了传统前馈控制二次扰动问题,结合扰动估计观测器精确估计系统扰动的优点,提出了基于参考模型扰动估计的前馈控制器。介绍了常规扰动观测器的工作原理,分析了观测器应用于舰载光电设备中存在的问题;引入参考模型,构建了参考模型扰动估计的前馈控制器,并给出了相应的结构图和传递函数,分析了它的输出特性和鲁棒性;最后,对本文设计的控制器进行了模型仿真和实验研究并与传统前馈控制方法进行了对比。实验结果表明:基于参考模型扰动估计的前馈控制方法对摩擦力矩扰动和测量误差有良好的补偿效果,固定点指向误差均方根由 12.36" 提高到 5.919";在靶标以 10 s 周期转动的动态实验中,跟踪精度均方根误差从 20.615 7" 提高到 13.744",隔离度提高了 12 dB,动态性能显著改善。本文方法结合了前馈控制和扰动估计的优点,能更好地抑制扰动,提高系统的动态性能和跟踪精度。

**关键词:**舰载光电设备;前馈控制;参考模型扰动估计;隔离度;跟踪精度

**中图分类号:**U674.703.2;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132105.1213

## Feedforward control based on reference model disturbance observer of carrier-based optoelectronic theodolite

ZHANG Yan<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Shu-mei<sup>1</sup>, QIAO Yan-feng<sup>1\*</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
  2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*
- \* *Corresponding author, E-mail: zy07100523@sina.com*

**Abstract:** A disturbance observer based on reference model was introduced into the traditional feedforward control to improve the dynamic performance of a carrier-based optoelectronic theodolite and to improve the disturbance isolation and tracking accuracy. A kind of feedforward control based on the reference model disturbance observer was proposed. It not only abstained the secondary disturbance of traditional feedforward control, but also combined with the accurate estimation of the disturbance observer. The working principle of the disturbance observer was introduced and its problems existing in the application of carrier-based optoelectronic theodolite were pointed out. By introduction of the ref-

收稿日期:2012-12-13;修订日期:2013-03-01.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA7034320B);国防科技预研基金资助项目(No. 1040603)

reference model of carrier-based optoelectronic theodolite, a feedforward control based on reference model disturbance observer was established, the structure chart and transfer function were given, and its transfer behavior and robustness were analyzed. Finally, some controller model simulations and experiments were carried out and contrasted with the traditional feedforward control method. Experiment results show that feedforward control based on reference model disturbance observer can overcome both friction torque disturbance and measurement errors, and the point error of fixed point is improved from 12.36"(RMS) to 5.919"(RMS). In the dynamic test, when a target turns by a cycle of 10 s, the tracking accuracy is improved from 20.615 7"(RMS) to 13.744"(RMS), the degree of isolating is increased by about 12 dB, and the dynamic performance is significantly improved. It concludes that the proposed method combines the advantages of feedforward control and disturbance observer, and it can better improve the system dynamic performance and tracking accuracy.

**Key words:** carrier-based optoelectronic theodolite; feedforward control; reference model disturbance observer; degree of isolating; tracking accuracy

## 1 引言

舰载光电设备是海上执行捕获、跟踪等军事任务的主要设备<sup>[1]</sup>,对其具有实时性好、跟踪精度高、图像显示清晰和抗干扰性强等要求。但由于光电设备固连在舰艇上,随舰艇一起受到海浪影响,会产生艏摇、纵摇和横摇 3 个自由度摆动<sup>[2,3]</sup>。这种摆动包含了周期性和随机性摆动,会使经纬仪视轴产生晃动,影响到经纬仪的跟踪指向精度,从而使图像模糊甚至丢失目标。因此,舰载光电经纬仪伺服控制需具备两个功能<sup>[4-6]</sup>:一是隔离载体运动引起的扰动;二是减小动态目标跟踪的跟踪误差。

为了解决以上问题,目前舰载光电跟踪设备大多采用引入前馈控制的复合控制技术<sup>[7-8]</sup>,将测量得到的舰船运动姿态作为速度环前馈控制信号进行速度或加速度补偿,来隔离扰动,从而稳定视轴和提高跟踪精度<sup>[5]</sup>。使用这种方法时,姿态信息的精确度和实时性成为影响光电设备跟踪指向精度的重要因素。在电视跟踪的状态下,系统本身具有一定的抗扰能力。但脱靶量通常有一个滞后,前馈控制的引入又会给系统带来一个超差量,这些给系统带来了二次扰动。

扰动估计可解决这一问题。扰动估计观测器<sup>[9-10]</sup>(Disturbance Observer, DOB)可从系统可测的信息中估计出不可测的扰动,进而在控制系

统中进行补偿。传统的扰动估计是在系统中串联一个低通滤波器,但仍然无法解决扰动抑制和伺服性能提高间的本质矛盾。文献[11]讨论了基于速度回路的扰动估计观测器,解决了扰动放大的问题,但由观测器构成的反馈回路影响了系统带宽和动态性能。

本文提出了一种基于参考模型扰动估计<sup>[12-13]</sup>(Reference Model Disturbance Observer, RM-DOB)的前馈控制器。很好地估计了系统动态扰动,解决了脱靶量和前馈补偿的二次扰动问题,保证了系统的稳定性,且响应时间快,动态性能好,提高了跟踪精度,能很好地隔离扰动,达到了较好的跟踪效果。

## 2 扰动估计观测器(DOB)简介及分析

DOB<sup>[10-11,14]</sup>是通过观测系统中的可观测测量来估计出系统中的未知误差。工程中的实现方法是:以同一个输入分别通过控制对象和其标称模型,将控制对象输出与标称模型输出做差,其差值看作是作用于标称模型的等效扰动,估计出这种等效扰动并将其加入到控制端来抵消系统扰动。图 1 所示为扰动估计观测器的标准结构。

图 1 中: $u_r$  为参考控制输入, $d$  为外部干扰, $\xi$  为测量误差, $P(s)$  为实际被控对象, $P_n(s)$  为对象的标称模型, $P_n^{-1}(s)$  为标称模型的逆模型。 $Q(s)$  为一个低通滤波器, $\delta$  为等效补偿项,即干扰估计





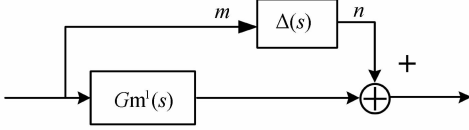


图4 对象加法扰动模型

Fig.4 Addition uncertainty model

## 4 实验研究

本文以某舰载光电设备为控制对象,使用 Matlab/Simulink 软件对所设计的基于参考模型扰动估计的前馈控制器,在模拟外部扰动为五级海况下进行了仿真,并与传统控制方法跟踪精度进行了对比分析;以两轴摇摆台模拟横滚和艏摇船摇,使用惯性导航系统测量扰动量,分别进行了固定点指向实验和动态目标跟踪实验。给出基于参考模型扰动估计的前馈控制器和传统前馈控制下的跟踪精度,并进行了比较,对基于参考模型扰动估计的前馈控制器的优越性进行了评估。

### 4.1 系统回路设计

以某舰载光电设备为控制对象,以其方位运动建立仿真模型,对基于参考模型扰动估计的前馈控制器进行仿真分析。经过测算,得到控制对象传递函数如式(13)所示:

$$Gm^1(s) = \frac{2.056}{(1.14s + 1)(0.08s + 1)}. \quad (13)$$

本文中将其视为参考模型,实际控制对象在此基础上加入饱和环节、死区环节和摩擦力矩模型。

滞后超前校正可以使系统的剪切频率前移并增加相角裕度,保证稳定精度,改善系统稳定性。本控制系统的速度和位置回路均采用滞后超前校正设计,GG(s)、G(s)为位置和速度调节器,其传递函数为:

$$G(s) = 2\,300 \cdot \frac{(0.17s + 1)(0.08s + 1)}{(8.6s + 1)(0.0025s + 1)}, \quad (14)$$

$$GG(s) = 4\,000 \cdot \frac{(0.38s + 1)(0.38s + 1)}{(5.35s + 1)(5.35s + 1)}. \quad (15)$$

根据鲁棒性设计前馈调节器  $Gp(s)$ ,将  $Gp(s)$  设计成一个比例低通滤波器<sup>[15]</sup>。前馈回路的低通滤波器能很好的滤除测量误差,又能保证系统的稳

定。比例环节是基于误差进行调节的,能够快速调节,加快响应速度、缩短调节时间。同时省去了积分环节和微分环节,避免了系统带宽影响和滞后。前馈调节器  $Gp(s)$  传函为:

$$Gp(s) = -\frac{1}{50} \cdot \frac{1}{0.005s + 1}. \quad (16)$$

### 4.2 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 软件对控制器进行建模,并与传统控制对比,并对本文设计控制的优越性进行仿真验证。假设目标按照一定的轨迹运动,  $A = 0.5\sin(1.2t)$ ,对系统施加与五级海浪相当的等效正弦扰动,分别仿真比较系统的跟踪精度。五级海浪等效正弦如下所示,单位为(rad):

$$R = 0.35\sin(0.628t)$$

$$P = 0.12\sin(0.785t)$$

$$H = 0.3\sin(1.2t)$$

设某一时刻目标空间(大地坐标系下)的方位和俯仰描述分别为  $A$  和  $E$ ,方位、俯仰角速度分别为  $A_v$  和  $E_v$ ;目标相对于载体(载体坐标系下)的方位和俯仰描述分别为  $A_c$  和  $E_c$ ,相对于载体的方位、俯仰角速度分别为  $A_{c_v}$  和  $E_{c_v}$ 。以上模拟船摇角度是在大地坐标系下的三维摇摆数据需要先转换为载体坐标下的  $A_c$  和  $E_c$ <sup>[1]</sup>,最终转换为甲板极坐标系下的扰动速度进行视轴前馈校正。则,扰动后目标在载体坐标下的方位、俯仰表达式为:

$$A_c = \arctan\left[\frac{\cos E(\cos R \sin(A - H) + \sin R \sin P \cos(A - H)) - \sin E \sin R \cos P}{\cos E \cos P \cos(A - H) + \sin E \sin P}\right], \quad (17)$$

$$E_c = \arcsin\left[\frac{\cos E(\sin R \sin(A - H) - \cos R \sin P \cos(A - H)) + \sin E \cos R \cos P}{1}\right]. \quad (18)$$

将  $A_c$  和  $E_c$  分别微分得到方位、俯仰扰动速度  $A_{c_v}$  和  $E_{c_v}$ ,不讨论  $A_c$ 、 $E_c$ 、 $A_{c_v}$  和  $E_{c_v}$  的误差对跟踪误差的影响,船摇经解算如图5所示。

首先在不加船摇扰动的情况下对控制系统进行仿真,图6所示为分别加入传统前馈控制和基于参考模型扰动估计前馈控制的控制系统跟踪精度对比图。可见,在无船摇扰动下,引入参考模型扰动估计的前馈控制能估计被控对象内部扰动并实时补偿,从而提高跟踪精度,经计算,跟踪精度均方根误差由  $0.000\,964^\circ$  提高到  $0.000\,609^\circ$ 。由于实际控制对象模型是在参考模型基础上加入有限摩擦模型,与实际情况并不相符,故跟踪精度仅能认

为有变好的趋势,而变化量需要通过实验进行验证。

近,能够更好的隔离扰动,保证系统跟踪精度。

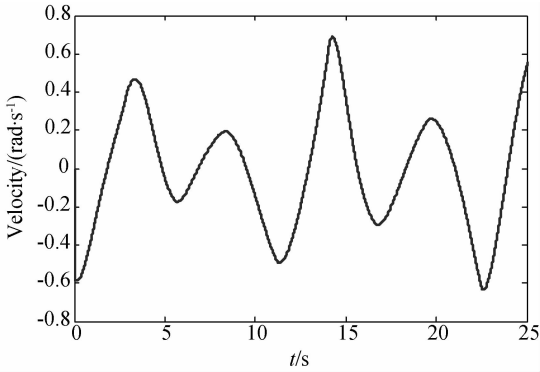


图 5 船摇速度解算曲线

Fig. 5 Velocity disturbance curve

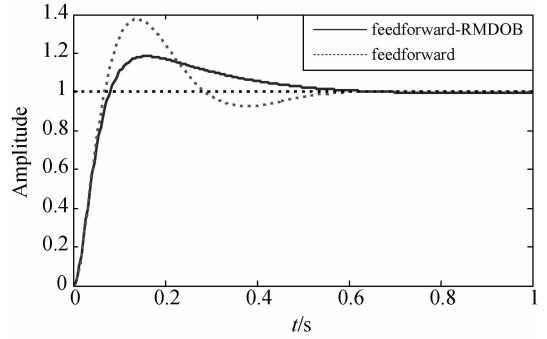


图 7 系统阶跃响应对比

Fig. 7 Comparison of step responses

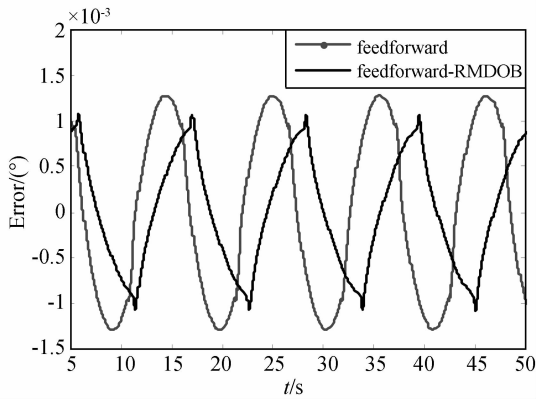


图 6 无船摇系统跟踪精度对比

Fig. 6 Comparison of tracking accuracy without carrier disturbance

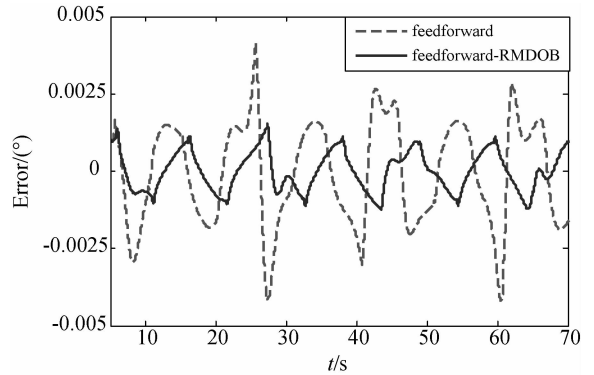


图 8 有船摇系统跟踪精度对比

Fig. 8 Comparison of tracking accuracy with carrier disturbance

图 7 所示为阶跃响应对比。由图中可以看出,引入参考模型扰动估计的前馈控制,由于能够实时准确估计并补偿内部和外部扰动,避免了过扰带来的问题,在保证了响应时间的前提下减小了系统超调量,改善了系统的动态性能。

由以上仿真结果可知,引入基于参考模型扰动估计的前馈控制可以很好的估计并补偿控制对象扰动;可有效抑制控制对象本身的力矩扰动,克服前馈数据测量噪声的影响,隔离载体扰动的干扰。能够保证在舰载情况下使光电设备具有良好的稳定指向和跟踪精度。

在系统中加入船摇模型进行动态仿真,得到图 8 所示的跟踪精度曲线对比图。由图可见,引入参考模型扰动估计的前馈控制大幅度的提高了系统的跟踪精度,跟踪精度均方根误差由 0.001 6°提高到 0.000 63°。通过计算,在传统前馈加入系统后,系统对船摇的隔离度已经到达 35 DB,而引入参考模型扰动估计的前馈控制算法,可以将船摇隔离度提高到 49 DB,跟踪精度与无船摇时跟踪精度接

### 4.3 实验研究

使用两轴摇摆台模拟两轴船摇,摇摆台的两个轴能根据各自给定的速度和摆幅单独运动。由于实验用摇摆台控制系统简单,控制精度较差,本研究使用惯性导航系统实时测量摇摆台姿态,作为所需的姿态信息,经过解算后供控制系统使用。

实验分为两个阶段进行:第一阶段为固定点指向实验,设定一个固定点作为固定目标,在载体扰动的情况下,分别使用两种控制系统进行指向跟踪,对比指向精度;第二阶段为动态目标跟踪实验,使用靶标模拟动态目标,在载体扰动情况下分别进

行跟踪实验,比对跟踪精度。本文仅取方位跟踪精度作对比,俯仰跟踪精度与方位类似。

选取方位角为 $45^\circ$ 、俯仰角为 $45^\circ$ 的固定点作为目标点,对摇摆台施加相当于艏摇、横摇的扰动,分别进行指向精度实验。惯性导航系统安装在舰载光电设备底座空腔内,坐标原点与舰载光电设备三轴交点一致,忽略其安装误差。相机状态设为大倍率,此时一个脱靶量对应的量纲是 $2.156''$ 。图9所示分别为传统前馈控制和基于参考模型扰动估计的前馈控制下的指向精度曲线(直接由脱靶量经过量纲转化所得)。

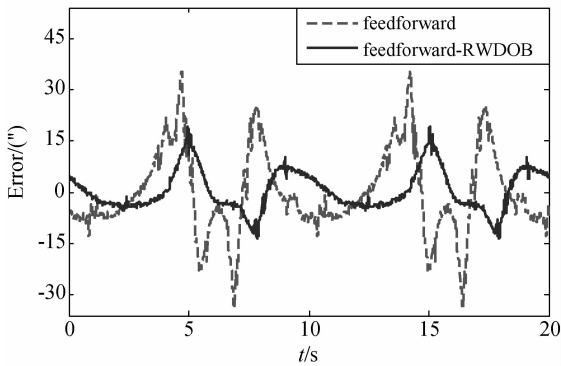


图9 固定点指向精度曲线

Fig. 9 Pointing accuracy curves of fixed point

由图可知,基于参考模型扰动估计的前馈控制的指向精度曲线整体较传统前馈控制曲线平滑、连续,可见基于参考模型扰动估计的前馈控制能更好的估计并补偿扰动,可减小测量误差影响。由实验结果可知,舰载光电设备在加速最大即速度最低时精度最差。基于参考模型扰动估计的前馈控制对速度过零较传统前馈控制处理突变较小,可以验证其对摩擦力矩扰动的补偿效果。经过测算,两者的指向误差均方根分别为 $5.919''$ 和 $12.36''$ ,基于参考模型扰动估计的前馈控制方法较传统前馈控制提高一倍以上。很好的验证了所设计控制器对扰动的估计补偿能力和稳定指向能力。

为了验证控制器的动态稳定跟踪能力,以靶标为动态目标,进行动态跟踪实验。所使用的靶标中心点为 $31.98^\circ$ ,锥角为 $16.34^\circ$ ,转动周期约为 $10\text{ s}$ 。两种控制方法的跟踪误差如图10所示。

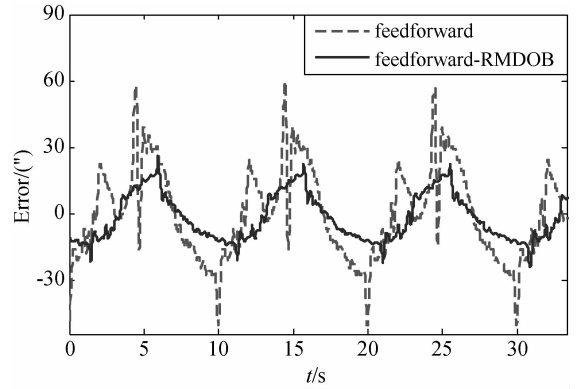


图10 跟踪精度曲线

Fig. 10 Tracking accuracy curves

由图10可见,基于参考模型扰动估计的前馈控制方法要明显优于传统前馈控制跟踪精度。能很好的抑制外部扰动和低速时的摩擦力矩扰动,保证良好的跟踪精度。设计的控制器将跟踪精度均方根误差从 $20.6157''$ 提高到 $13.744''$ ,在继承前馈控制的优点的同时,又结合了扰动估计对内外扰动的估计补偿作用,提高了舰载光电设备的动态性能。

## 5 结论

为改善舰载光电设备的动态性能,提高对载体扰动的隔离能力,提出了基于参考模型扰动估计的前馈控制器,并将其引入舰载光电设备控制系统中。解决了闭环系统鲁棒性和扰动抑制能力之间的矛盾,提高了系统的动态性能和扰动隔离能力。理论分析、模型仿真和实验研究均证明了所设计控制器的合理性和有效性。在模拟船摇的双自由度摇摆台上进行的固定目标指向实验结果表明:基于参考模型扰动估计的前馈控制方法对摩擦力矩扰动和测量误差有良好的补偿效果,并将指向误差均方根由 $12.36''$ 提高到 $5.919''$ ,扰动隔离能力显著提高。在靶标以 $10\text{ s}$ 为周期转动的动态实验中,本文所设计控制器很好地克服了过零时视轴的明显波动,将跟踪精度均方根误差从 $20.6157''$ 提高到 $13.744''$ ,动态性能显著提高。

## 参考文献:

- [1] KIMIAGHALAM B, HOMAIFAR A, BIKDASH M, *et al.*. Feedforward control law for a shipboard crane with Maryland Rigging system[J]. *Journal Of Vibration And Control*, 2002,8(2): 159-188.
- [2] VANZWIETEN J H, DRISCOLL F R, VANZWIETEN T S, *et al.*. Development of an adaptive disturbance rejection system for the rapidly deployable stable platform-part 1: Mathematical modeling and open loop response [J]. *Ocean Engineering*, 2010,37(8-9):833-846.
- [3] VANZWIETEN J H, DRISCOLL F R, VANZWIETEN T S, *et al.*. Development of an adaptive disturbance rejection system for the rapidly deployable stable platform-part 2 controller design and closed loop response [J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(14-15):1367-1379.
- [4] ZHANG L J, JIA H M, QI X. NNFFC-adaptive output feedback trajectory tracking control for a surface ship at high speed [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(13): 1430-1438.
- [5] VANZWIETEN J H, VANZWIETEN T S, BALAS M J, *et al.*. Mitigation of vortex-induced disturbances for the rapidly deployable stable platform [J]. *Ships And Offshore Structures*, 2010,5(1): 13-24.
- [6] 李焱,陈涛,曹立华,等.舰载光电设备跟踪掠海目标的控制[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 937-941.  
LI Y, CHEN T, CAO L H, *et al.*. Control of ship-based optoelectronic equipment for tracking near-sea targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 937-941. (in Chinese)
- [7] 丁科,黄永梅,马祖光,等.抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 1991-1998.  
DING K, HUANG Y M, MANG Z G, *et al.*. Composite control fast-steering-mirror for beam jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 1991-1998. (in Chinese)
- [8] 王辉华,刘文华,张世英,等.舰载光电跟踪的船摇扰动符合补偿控制[J]. *海军工程大学学报*, 2008, 20(2): 81-84.  
WANG H H, LIU W H, ZHANG SH Y, *et al.*. Combined compensation control of ship motion disturbance in ship-borne photoelectric tracking system [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2008, 20(2): 81-84. (in Chinese)
- [9] 方强,马杰,毕运波,等.基于扰动观测器的电动负载模拟器控制系统设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2009, 43(11): 1958-1964.  
FANG Q, MA J, BI Y B, *et al.*. Disturbance observer based controller design for electric dynamic load simulator [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(11): 1958-1964. (in Chinese)
- [10] 陈霞,邹继斌.基于干扰观测器的反作用力矩测试系统鲁棒性设计[J]. *电工技术学报*, 2010, 25(7): 56-60.  
CHEN X, ZOU J B. Robust design of reaction to torque measurement system based on disturbance observer [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(7): 56-60. (in Chinese)
- [11] 李嘉全,丁策,孔德杰,等.基于速度信号的扰动观测器及在光电稳定平台的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 998-1004.  
LI J Q, DING C, KONG D J, *et al.*. Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 998-1004. (in Chinese)
- [12] 李英,葛文奇,王绍彬,等.稳定平台的自适应逆控制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2744-2748.  
LI Y, GE W Q, WANG SH B, *et al.*. Adaptive inverse control of stable platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2744-2748. (in Chinese)
- [13] 姬伟,李奇.陀螺稳定平台视轴稳定系统自适应模糊PID控制[J]. *航空学报*, 2007, 28(1): 191-195.  
JI W, LI Q. Adaptive fuzzy PID control for LOS stabilization system on gyro stabilized platform [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(1): 191-195. (in Chinese)
- [14] 史忠科,吴方向,王蓓,等.鲁棒控制理论[M].北京:国防工业出版社,2003.  
SHI ZH K, WU F X, WANG B, *et al.*. *Robust Control Theory* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [15] 熊晓,范永坤,吴钦章.变结构PI控制器的设计及其在光电跟踪系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1855-1861.  
XIONG A, FANG Y K, WU Q ZH. Design of a



variable structure PI controller and its application in photoelectric tracking systems [J]. *Opt.*

*Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1855-1861. (in Chinese)

作者简介:



张 艳(1985—),女,山东烟台人,博士研究生,2008年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事舰载光电设备伺服控制等方面的研究。E-mail: zy07100523@sina.com



乔彦峰(1962—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1985年于南京工学院(现东南大学)获得学士学位,主要从事光电测量与控制方面的研究。E-mail: YanfengQiao@ciomp.ac.cn



张淑梅(1964—),女,吉林长春人,研究员,硕士生导师,主要从事光电测量、跟踪控制技术方面的研究。E-mail: zhangsm\_ciomp@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)