

文章编号 1004-924X(2012)08-1782-07

## 动基座光电稳定平台伺服系统中加速度反馈的实现

孔德杰<sup>1,2</sup>, 戴明<sup>1\*</sup>, 程志峰<sup>1</sup>, 沈宏海<sup>1</sup>, 盖竹秋<sup>1</sup>, 王国华<sup>1</sup>, 毛大鹏<sup>1,2</sup>

(1. 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, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**在动基座光电稳定平台伺服系统中引入了加速度反馈闭环以提高其动态性能。考虑准确建立动基座光电稳定平台控制对象模型难度很大,该加速度反馈闭环没有基于控制对象模型,而是通过直接测量角加速度信号来实现。仿真、分析结果表明,加速度反馈闭环的引入有效提高了伺服系统动态力矩刚度,并改善了伺服系统起动、制动性能。引入加速度反馈闭环后,动基座光电稳定平台伺服系统对摩擦力矩抑制能力明显提高;对周期性扰动抑制能力提高了9.3 dB;对速度阶跃响应超调量降低了4.9%,同时过渡过程也有极大的改善。该伺服系统不仅结构简单,鲁棒性强,且有较好的通用性。

**关键词:**动基座光电稳定平台;伺服系统;加速度反馈;扰动力矩

**中图分类号:**TP273;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1782

## Realization of acceleration feedback for servo system of moving base optoelectronic platform

KONG De-jie<sup>1,2</sup>, DAI Ming<sup>1\*</sup>, CHENG Zhi-feng<sup>1</sup>,  
SHEN Hong-hai<sup>1</sup>, GAI Zhu-qi<sup>1</sup>, WANG Guo-hua<sup>1</sup>, MAO Da-peng<sup>1,2</sup>

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: daim@vip.sina.com

**Abstract:** An acceleration Feedback (AFB) is introduced to the servo system to improve the dynamic performance of a moving base optoelectronic stability platform. As it is difficult to establish a model for the moving base optoelectronic platform according to a moving object, the proposed acceleration feedback is realized by measuring angle acceleration signals directly. Simulation and analysis indicate that the dynamic stiffness of servo system can be enhanced and the starting and braking performance is improved with the AFB. Experiments show that the capability of resisting friction moment is increased significantly. The capability of resisting periodic disturbance is increased by 9.3db and the overshoot of speed step response is decreased by 4.9%, while the transition process has been greatly improved. The servo system has simpler structure, higher robustness, and shows better universality.

收稿日期:2012-01-03;修订日期:2012-03-05.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA121803)

**Key words:** moving base optoelectronic platform; servo system; acceleration feedback; disturbance moment

## 1 引言

动基座光电稳定平台在火力控制、导航、侦察系统中有着广泛应用,它需要在恶劣的工作环境中保持较高的稳定精度,以保证任务的顺利完成。动基座光电稳定平台正常工作时,受轴系摩擦、缠绕、质量配不平、风阻以及基座运动的影响较大,且在频繁起动、制动状态中不允许出现大的超调,对伺服系统动态性能要求很高,需要具有较强的动态抗扰性能。

通过提高动基座光电稳定平台伺服系统中速度环的反馈增益,可以增强伺服系统的动态抗扰性能,但速度环带宽的增加受到传感器精度和机械谐振频率的限制<sup>[1]</sup>。因此,提高动基座光电稳定平台伺服系统速度环带宽对提高其伺服系统动态性能作用有限。George 和 Peter B. Schmidt 等利用观测器获得加速度信号,进而引入加速度反馈闭环来提高伺服系统刚度,取得了良好效果<sup>[2,3]</sup>。上述方法中采用的观测器都是应用于特定控制对象的伺服系统中,其控制对象机械结构相对动基座光电稳定平台来说较为简单,工作环境较好,控制对象准确模型易于建立,对于不同的控制对象通用性相对较差。动基座光电稳定平台结构较为复杂、工作环境恶劣,控制对象模型难以准确建立<sup>[4,5]</sup>,基于观测器的加速度反馈闭环难以实现。

本文在动基座光电稳定平台伺服系统中成功引入了一种通过直接测量角加速度信号来构造加速度反馈闭环,可以在不基于控制对象模型的情况下提高伺服系统的动态性能。

## 2 加速度反馈原理

动基座光电稳定平台带有加速度反馈闭环的直流调速系统原理框图,如图 1 所示。

图 1 中, $G_V$  为速度环校正传递函数, $G_A$  为电流环等效传递函数, $T_D$  为电机产生的力矩, $T_L$  为作用在电机轴上的扰动力矩, $J$  为折合到电机轴上的转动惯量, $K_T$  为电机力矩系数, $\omega_i$  为角速率

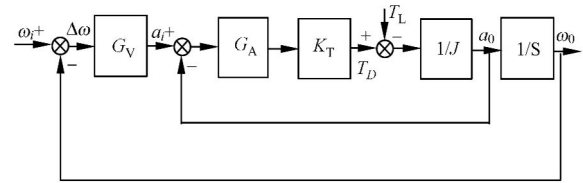


图 1 引入加速度反馈闭环的直流调速系统

Fig. 1 DC speed regulating system with acceleration loop

输入, $\omega_o$  为角速率输出, $a_i$  为角加速度输入, $a_o$  为角加速度输出。

电机驱动系统的基本运动方程为:

$$T_D - T_L = J a_o. \quad (1)$$

加速度闭环采用纯比例控制,即  $G_A = K_A$ , 则:

$$T_D = K_A (a_i - a_o). \quad (2)$$

将转动惯量  $J$  分解为定常转动惯量  $\bar{J}$  和时变不确定转动惯量  $\Delta J$  两部分,可以得到:

$$a_o = \frac{K_A a_i}{J + K_A} - \frac{T_L}{J + K_A} = \frac{a_i}{\frac{J}{K_A} + 1} - \frac{T_L}{J + K_A}. \quad (3)$$

从式(3)中可以看出,只要  $K_A$  选的足够大,且在  $J \gg \Delta J$  的情况下,则式(3)可等效为:

$$a_o = \frac{K_A a_i}{J}. \quad (4)$$

式(4)表明,通过大增益的加速度闭环,可以将电机系统从一个物理上的力矩源等效成一个控制上的加速度源,即可以直接产生加速度,而不是通过产生力矩间接地形成加速度。这样不确定的惯量及力矩扰动就不再对控制性能产生影响<sup>[6]</sup>。

由上述分析可知,式(1)可以改写为以下形式:

$$T_D - T_L = J a_o + \Delta J a_o. \quad (5)$$

动基座光电稳定平台结构较为复杂,且在其大工作范围内质量精确配平困难,这往往会造成时变不确定转动惯量  $\Delta J$  占到转动惯量  $J$  的 20% 以上,在这种情况下,平台控制对象模型难以准确建立,不能满足  $J \gg \Delta J$  的条件,基于控制对象模型的加速度反馈就难以实现<sup>[7]</sup>。

而基于直接测量角加速度信号的加速度反馈中,测量得到的  $a_o$  与转动惯量  $J$  成反比。当  $J$  变

化时,测量得到的加速度信号  $a_0$  也随之作相应变化,这样  $T_D - T_L$  就不受时变不确定转动惯量  $\Delta J$  的影响。因此基于直接测量角加速度信号的加速度反馈可以在动基座光电稳定平台伺服系统中实现。

### 3 伺服系统动态性能的分析

在动基座光电稳定平台的伺服调速系统中引入加速度反馈闭环后,其动态性能比传统双闭环调速系统有了较大提高。

#### 3.1 传统双闭环调速系统扰动力矩抑制

在电流环简化为理想的比例环节的情况下,传统双闭环调速系统原理框图如图 2 所示。

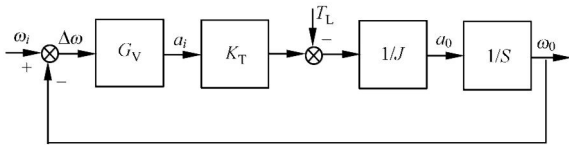


图 2 传统双闭环调速系统简化原理框图  
Fig. 2 Classical DC speed regulating system

由图 2 得到传统双闭环调速系统的动态力矩刚度传递函数如下:

$$\frac{T_L}{\Delta\omega} = \frac{1 + G_v K_T}{\frac{1}{JS}} = JS + G_v K_T, \quad (6)$$

式中:力矩系数  $K_T$  固定不变,转动惯量  $J$  也不能通过控制系统加以控制,只有改变  $G_v$  才能对系统动态力矩刚度产生有效影响。系统动态力矩刚度随着速度环校正传递函数  $G_v$  的校正增益的提高而增大,但是校正增益的提高不可避免地带来系统带宽的增加,这就使得系统容易受到传感器噪声和平台机械谐振频率的影响,可能会引起伺服系统不稳定。

#### 3.2 带有加速度反馈闭环的调速系统扰动力矩抑制

由图 1 可知,带有加速度反馈闭环的调速系统的动态力矩刚度传递函数如下:

$$\frac{T_L}{\Delta\omega} = \frac{1 + G_v G_A K_T (1 + \frac{1}{G_v} S) \frac{1}{JS}}{\frac{1}{JS}}, \quad (7)$$

在这里加速度闭环采用纯比例控制,即  $G_A = K_A$ ,则式(7)可整理为:

$$\frac{T_L}{\Delta\omega} = (J + K_A K_T) S + G_v K_A K_T, \quad (8)$$

由式(6)和(8)比较可知,引入加速度反馈后,转动惯量增加了  $K_A K_T$ ,系统动态力矩刚度随加速度反馈环节校正增益的增大而增大。

通过 Matlab 仿真,将系统动态力矩刚度用 Bode 图的形式反映出来,仿真结果如图 3 所示。

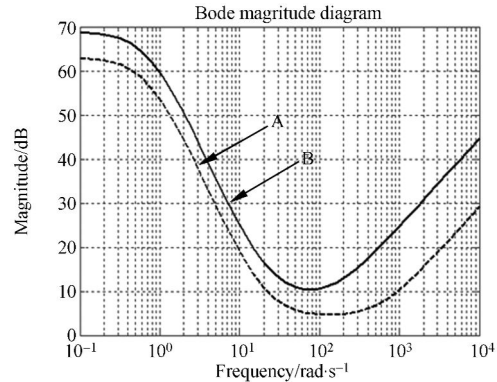


图 3 系统动态力矩刚度频率响应  
Fig. 3 Frequency response of dynamic stiffness

图 3 中,A 为传统双闭环调速系统的动态力矩刚度频率响应;B 为带有加速度反馈闭环的调速系统的动态力矩刚度频率响应。可知,在保证系统带宽不变的情况下,带有加速度反馈闭环调速系统的动态力矩刚度得到了明显提高。

#### 3.3 起动性能

从电动机原理和传递函数来分析电动机起动的瞬态过程,可以清楚地看出引入加速度反馈闭环的作用。

实际伺服系统中,加速度环校正函数为纯比例校正,有加速度环伺服系统的速度环校正参数与无加速度环的参数一致。因此,将速度环认为是纯比例校正,即认为  $G_v = K_v$ 、 $G_A = K_A$ ,不影响原理正确性。为了分析方便,图 1 可等效简化为图 4。

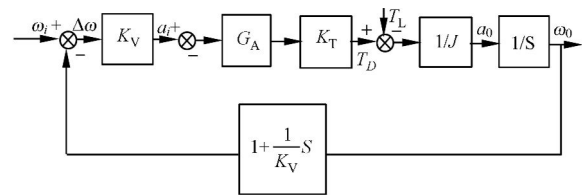


图 4 有加速度闭环调速系统等效原理框图  
Fig. 4 Equivalent principle schematic diagram of DC speed regulating system with acceleration loop

由图 4 可得:

$$\omega_o(s) = \frac{1}{J}(T_D - T_L) \frac{1}{s}, \quad (9)$$

从式(1)可得

$$\frac{d\omega_o}{dt} = \frac{1}{J}(T_D - T_L), \quad (10)$$

整理式(10),则得

$$\omega_o(t) = \frac{1}{J}(T_D - T_L)t. \quad (11)$$

在时域内,式(11)可以描述电机转速上升时的瞬态过程。电机转速起动过程如图 5 所示。

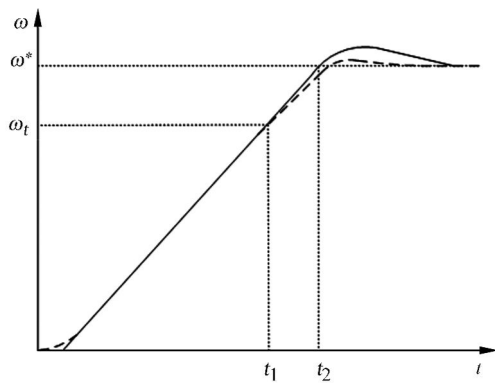


图 5 加速度反馈闭环对电机起动的影响  
Fig. 5 Effect of acceleration loop motor start

图 5 中,实线为传统双闭环速度阶跃响应,虚线为带有加速度反馈闭环的速度阶跃响应。

当  $t=t_1$  时刻,带有加速度反馈闭环的速度校正环开始退饱和,其输入信号之和为 0,由图 4 可知:

$$\omega_i(t) = \omega_o(t) + \frac{1}{K_V} \frac{d\omega}{dt} \Big|_{t=t_1}. \quad (12)$$

将式(10)、式(11)代入式(12),则得:

$$\omega_i(t) = \frac{1}{J}(T_D - T_L)t_1 + \frac{1}{K_V} \frac{1}{J}(T_D - T_L),$$

整理得退饱和时间为:

$$t_1 = \frac{\omega_i(t)}{\frac{1}{J}(T_D - T_L)} - \frac{1}{K_V}, \quad (13)$$

而传统的双闭环调速系统退饱和时间为:

$$t_2 = \frac{\omega_i(t)}{\frac{1}{J}(T_D - T_L)}. \quad (14)$$

由式(13)、(14)可见,带有加速度反馈闭环的调速系统比传统的双闭环系统调速系统更早达到平衡,开始退饱和。 $t_1$ 时刻所对应的转速  $\omega_i$  比  $t_2$ 时刻对应的转速  $\omega^*$  要小,因而带有加速度反馈闭

环的调速系统在起动、制动的过渡过程相对传统双闭环调速系统有明显改善<sup>[8]</sup>。由图 5 也可以看出,引入加速度反馈闭环会带来速度响应滞后,但是只要加速度反馈闭环带宽足够宽,其对速度等外环影响可以忽略。

### 4 稳定性分析

由图 1 可以得到带有加速度反馈闭环的速度环传递函数为:

$$\frac{\omega_o}{\omega_i} = \frac{G_V G_A K_T}{(J + G_A K_T)s + G_V G_A K_T}. \quad (15)$$

在这里加速度闭环采用纯比例控制,即  $G_A = K_A$ ,则可得系统特征方程

$$(J + K_A K_T)s + G_V K_A K_T = 0. \quad (16)$$

式(16)中,速度环校正传递函数经典 PI 控制为  $G_V(s) = K_P(1 + \frac{1}{T_i s})$ ,则由劳斯判据可知该调速系统稳定<sup>[9]</sup>。

### 5 实验

在某型动基座光电稳定平台上安装加速度计组,利用加速度计组直接测量平台角加速度<sup>[10]</sup>,进而在传统双闭环调速系统中引入加速度反馈闭环。为了验证基于加速度反馈的伺服系统的效果,将搭建的光电稳定平台安装于动基座仿真转台上进行实验,在实验中,速度环校正传递函数设计为  $G_V(s) = 1.25 \times (1 + \frac{1}{0.03s})$ ,速度环带宽为 28 Hz;引入加速度反馈后,加速度环带宽为 185 Hz,

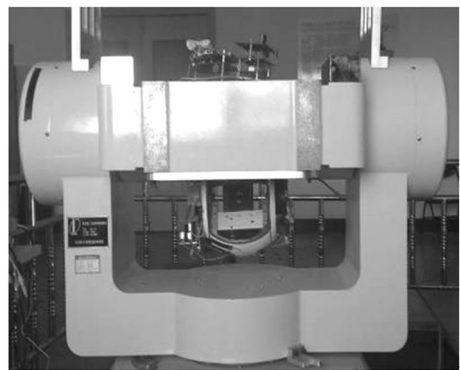


图 6 动基座光电稳定平台加速度反馈实验装置  
Fig. 6 Experimental facility of opto-electronic platform servo system with acceleration loop

对速度环带宽基本无影响;电流环采用模拟电路构造,带宽为 1 000 Hz;数字控制系统采样频率为 2 000 Hz,其实物图如图 6 所示。

### 5.1 对低速性能的改善

影响动基座光电稳定平台低速性能的主要因素是摩擦力矩。摩擦力矩可分为静摩擦力矩、库仑摩擦力矩和黏滞摩擦力矩,它们都与光电稳定平台运动反向。黏滞摩擦正比于光电稳定平台速度,传统双闭环调速系统即可克服由其产生的力矩误差。而静摩擦、库仑摩擦决定光电稳定平台最小运动距离,若不加以抑制补偿,则在低频低速运动情况下,平台运动方向发生改变时,使平台无法平滑移动<sup>[11]</sup>。

对动基座光电稳定平台伺服系统施加速度给定为  $\omega = 0.6 \sin 6\pi t$ ,即幅值为  $0.6 (^{\circ})/s$ 、频率 3 Hz 的正弦引导,实验结果如图 7 所示。

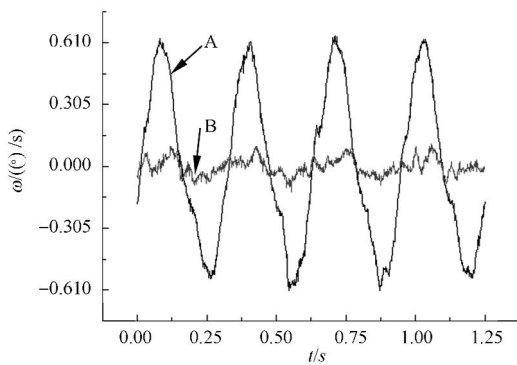


图 7 低频低速下调速系统响应

Fig. 7 Response of speed regulating system in low frequency and low velocity

图 7 中,A 为带有加速度反馈闭环的调速系统速度响应,B 为传统的双闭环调速系统速度响应。

由图 7 看出,在低频低速的情况下,传统双闭环调速系统对摩擦力的抑制能力有限,但加上加速度反馈闭环后,对摩擦力抑制有了明显提高,表明引入加速度反馈可有效改善平台低速性能。

### 5.2 对动基座周期性力矩扰动抑制性能的改善

利用动基座仿真转台,对光电稳定平台负载轴施加给定频率 2 Hz、幅值  $1^{\circ}$  正弦扰动。即作用在平台负载轴的扰动角速度为  $\omega = 4\pi \cos 4\pi t$ ,动基座光电稳定平台伺服系统速度给定为 0,如图 8 所示。

图 8 中,A 为动基座周期性扰动情况下引入

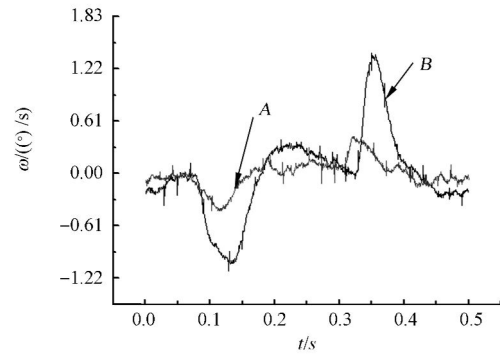


图 8 转台扰动下速率稳定

Fig. 8 Stability of speed with simulation turntable

加速度反馈闭环的调速系统速率稳定;B 为动基座周期性扰动情况下传统双闭环调速系统速率稳定。

实验数据分析表明,对动基座周期性扰动  $\omega = 4\pi \cos 4\pi t$ ,传统双闭环调速系统速度环扰动抑制能力为 19.98 dB;引入加速度反馈后,对扰动抑制能力为 29.28 dB,可见引入加速度反馈的调速系统抑制周期性扰动能力提高了 9.3 dB。

### 5.3 对起动制动性能的改善

伺服系统的起动和制动性能可利用速度阶跃响应加以验证。对动基座光电稳定平台伺服系统施加速度给定值为  $3 (^{\circ})/s$  的阶跃响应,实验结果如图 9 所示。

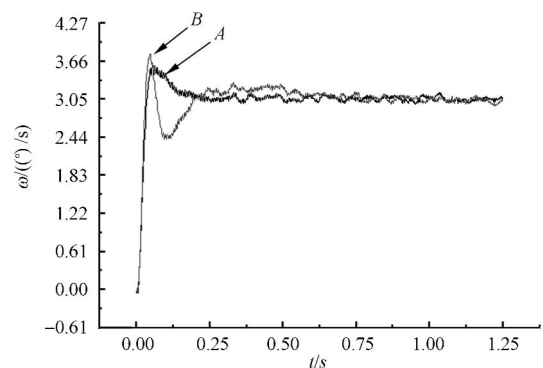


图 9 速度阶跃响应

Fig. 9 Step response of velocity loop

图 9 中,A 为带有加速度反馈闭环的调速系统速度响应,B 为传统的双闭环调速系统速度响应。

传统双闭环调速系统超调量为 23.8%,而带有加速度反馈闭环调速系统超调量为 18.9%,并且过渡过程明显改善;带有加速度反馈闭环比传

统双闭环系统速度响应滞后 1 ms 左右,折合相位裕度减小  $0.36^\circ$ ,对外环影响可以忽略。结果证明,加速度反馈闭环的引入对摩擦力矩等干扰力矩有极大的抑制作用,并对速度环超调有所改善。

## 6 结 论

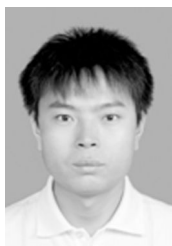
在动基座光电稳定平台伺服系统内引入不基

于控制对象模型的加速度反馈闭环,并通过实验得以验证。实验表明,该伺服系统结构简单、性能优越、鲁棒性强,具有较好的通用性。在控制对象改变时,只需改变相应的加速度反馈系数即可;引入加速度反馈闭环后,对速度环等外环性能影响极小,而动基座光电稳定平台伺服系统动态力矩刚度增大,抗扰动性能进一步增强,稳定精度得以提高。

### 参考文献:

- [1] 甘至宏. 光电吊舱内框架减振系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2036-2043.  
GAN ZH H. Design of inner frame vibration absorbing system for optoelectronic pod[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2036-2043. (in Chinese)
- [2] YOUNKIN G W. Compensating structural dynamics for Servo driven industrial machines with acceleration feedback[C]. *IEEE*, 2004, 28(3): 1881-1890.
- [3] SCHMIDT P B, LORENZ R D. Design principles and implementation of acceleration feedback to improve performance of dc drives[J]. *IEEE*, 1992, 28(3): 594-599.
- [4] 李洪文. 基于内模 PID 控制的大型望远镜伺服系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 327-332.  
LI H W. Servo system of large telescope based on internal model PID control method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 327-332. (in Chinese)
- [5] 熊皑, 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, FAN Y K, WU Q ZH. Design of a variable structure PI controller and its application in photoelectronic tracking systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1855-1861. (in Chinese)
- [6] 何玉庆, 韩建达. 一种新的角加速度估计方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(1): 6-12.  
HE Y Q, HAN J D. A new angular acceleration estimation method and its application in acceleration feedback control [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(1): 6-12. (in Chinese)
- [7] GEORGE E. 控制系统设计指南(第 3 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
GEORGE E. *Control System Design Guide (Third Edition)* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统(第 3 版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
CHEN B SH. *Automatic Control System for Electric Drive(Third Edition)* [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. (in Chinese)
- [9] 于艾, 杨耕, 徐文立. 具有扰动观测器调速系统的稳定性分析及转速环设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(4): 521-524.  
YU A, YANG G, XU W L. Stability analysis and speed loop design of speed control system with disturbance observer[J]. *TsingHua Univ(Sci&Tech)*, 2005, 45(4): 521-524. (in Chinese)
- [10] 胡浩军, 马佳光. 线加速度计辅助高精度稳定跟踪[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 769-772.  
HU H J, MA J G. Linear accelerometer-assisted high accurate stabilizing and tracking [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5): 769-772. (in Chinese)
- [11] 向红标, 裘祖荣, 李醒飞, 等. 精密试验平台的非线性摩擦建模与补偿[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1119-1127.  
XIANG H B, QIU Z R, LI X F, et al.. Nonlinear friction modeling and compensation of high-precision experimental platforms [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1119-1127. (in Chinese)

## 作者简介:



**孔德杰**(1978—),男,山东莱芜人,博士研究生,助理研究员,2002年、2005年于山东大学分别获得学士、硕士学位,主要从事动基座光电稳定平台伺服控制方面的研究。E-mail: kongdejie78@126.com



**程志峰**(1979—),男,山东临沂人,助理研究员,2005年于大连理工大学获得硕士学位,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电仪器结构设计及优化分析等方面的研究。E-mail: chengzhif2004@yahoo.com.cn



**沈宏海**(1976—),男,江苏东台人,博士,副研究员,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空光电测量领域的研究。E-mail: shenhh@ciomp.ac.cn



**盖竹秋**(1973—),男,吉林长春人,硕士,副研究员,1998年于吉林大学获得学士学位,2005年于中科院研究生院获得硕士学位,主要从事光电侦查平台伺服控制系统的研究。E-mail: gaizhuquemail@yahoo.com.cn



**王国华**(1977—),男,江苏盐城人,硕士,助理研究员,2003年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事航空光电测量领域的研究。E-mail: jlwanggh@126.com



**毛大鹏**(1979—),男,吉林长春人,硕士研究生,助理研究员,2002年于吉林大学获得学士学位,主要从事动基座光电平台信号处理及伺服控制的研究。E-mail: mdp\_ciomp@126.com

## 导师简介:



**戴明**(1964—),男,湖北潜江人,研究员,博士生导师,1993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,主要从事机载设备图像处理及动基座稳定技术方面的研究。E-mail: daim@vip.sina.com