文章编号 1004-924X(2017)09-2428-09

高精度音圈快速反射镜的自适应鲁棒控制

李贤涛¹*,张晓沛²,毛大鹏¹,孙敬辉¹ (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.美国加利福尼亚大学洛杉矶分校,亨利・萨缪理工程和应用科学学院, 美国 洛杉矶市,希尔加德大道 405)

摘要:为了进一步提高复合轴航空光电稳定平台的性能,文中首先在硬件电路中采用电流环将复杂的电机模型简化为一 阶模型,同时保证电机的输出力矩稳定;然后在 PD 控制器的基础上,引入了自适应鲁棒控制器,对快速反射镜进行位置 控制和扰动抑制;最后分别通过带宽测试实验、扰动抑制实验、视轴稳定实验和鲁棒性实验对其性能进行测试,并采用 DOB 型音圈式-快速反射镜和压电陶瓷式-快速反射镜做对比。实验结果表明:相比于传统的 DOB 型音圈式-快速反射 镜系统,本文控制方法的参数鲁棒性更强;相比于传统的压电式-快速反射镜,本文控制方法不仅视轴稳定精度与其不相 上下,还具有更大的行程。除此之外,在 80 Hz 以内任意频率扰动的影响下,基于 ARC 型音圈式-快速反射镜的复合轴 航空光电稳定平台的视轴稳定精度均可以控制在 5 μ rad(RMS)以内;同时在一40 $C \sim 50$ C 的温度条件下依然可以保持 该性能,远远优于 DOB 型音圈式-快速反射镜的效果。本文控制方法完全满足高精度航空光电稳定平台的性能要求,对 提高航空光电稳定平台控制系统的抗扰动性能具有较高的实用价值。

关 键 词:航空光电稳定平台;音圈式-快速反射镜;压电式-快速反射镜;视轴稳定精度;参数鲁棒性 中图分类号: 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172509.2428

Adaptive robust control over high-performance VCM-FSM

LI Xian-tao^{1*}, ZHANG Xiao-pei², MAO Da-peng¹, SUN Jing-hui¹

(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. Henry Samueli School of Engineering and Applied Science, University of California, 405 Hilgard Avenue, Los Angeles, CA 90095, USA)
 * Corresponding author, E-mail:lixiantao_86@126.com

Abstract: In order to improve the performance of the aviation photoelectrical stabilized platform, an adaptive robust control (ARC)-based VCM-FSM (voice coil mode-fast steering mirror) was proposed. Firstly, the current loop was adopted into electric circuit to simplify the complex model of motor into a first-order model and guarantee the stability of output torque of the motor. Secondly, on the basis of conventional PD controller, ARC algorithm was introduced to control the position of VCM-FSM and

基金项目:国家"863"高技术研究发展计划重点项目(No. 2013AA122102);中国科学院长春光学精密机械与物理研 究所重大创新工程项目(No. Y3CX1SS14C)

收稿日期:2016-07-15;修订日期:2016-09-14.

restrain disturbance. Finally performance tests were conducted in bandwidth test experiment, disturbance restrain experiment, stabilization experiment of visual axis and robust experiment. As comparison, experimental results of DOB-based VCM-FSM and PCT-FSM were offered at the same time. As compared with the DOB-based VCM-FSM, parameter robust characteristic of proposed control method is stronger. Meanwhile, as compared with traditional PZT-FSM, it also exhibits longer travel range, much simpler driving circuit, and lower power consumption while the precision of LOS stability remains almost the same. Moreover, visual axis stabilization precision of ARC-based VSM-FSM within 5 μ rad (RMS) can all be achieved under disturbance influence of any frequency within 80 Hz. This outstanding performance can be maintained at the temperature of -40 °C to 50 °C, which is superior to the DOB-based VCM-FSM and can fulfill the requirements of a high precision aviation photoelectrical stabilized platform. Thus it has high practical value on improving anti-disturbance performance of control system for optoelectronic stabilizing platform of aviation.

Key words: aerial photoelectrical stabilized platform; VCM-FSM; PZT-FSM; stability precision of LOS; parameter robustness

1 引 言

光电稳定平台广泛应用于航天、航空领域的 光学侦查、跟踪系统中,其主要作用是隔离载体对 瞄准装置的角运动干扰,使瞄准装置视轴稳定、可 以快速地瞄准目标,并减小由于颤振引起的图像 模糊,提高成像质量^[1]。

然而,现代战争要求的侦查距离越来越远,目 前已逐步向超远距离迈进。如此一来,对视轴稳 定精度的要求也变得越来越严格。国外的航空光 电稳定平台采用复合轴结构并结合先进控制策 略,视轴稳定精度已达到 $5 \mu rad(RMS)$ 。所谓复 合轴结构即为在传统大惯量框架的主光路中安装 方位、俯仰均可以微动的具有高谐振频率的快速 反射镜系统(FSM)^[2]。根据驱动方式的不同,工 程中所采用的 FSM 结构可分为压电陶瓷式和音 圈电机式两类^[3]。其中基于压电陶瓷的驱动方式 以其带宽高、力矩大的优点而备受研究者的青睐, 是目前复合轴式光电稳定平台应用的主流产品。 然而,随着工程需求的不断提升,压电陶瓷行程短 (一般在±5 mrad 以内)、功耗高、驱动电路复杂 的缺点逐渐突显^[4]。相比之下,基于音圈电机驱 动方式的 FSM 系统恰恰可以有效克服上述缺 点,尤其在最大行程方面,与基于压电陶瓷驱动方 式的同体积系统相比,采用音圈电机驱动的系统 运动范围可以达到±5°,完全满足工程上的需求 (如稳定过程中的像移补偿)^[5]。对比二者的各项 性能指标,除了在扰动抑制方面,音圈电机驱动方 式较压电陶瓷驱动方式有所不及,其他方面均有 过之而无不及,这是结构的固有特性所决定的。 因此,在现有结构和传感器精度条件下,提高音圈 式-快速反射镜系统在复杂环境中的抗扰特性以 及对模型参数的鲁棒特性,是音圈式-快速反射镜 能否取代压电陶瓷-快速反射镜的关键。

在实际工作过程中,航空光电稳定平台的扰 动主要来源于快速反射镜支撑结构的摩擦力和质 量不平衡力矩,由其引起的载体姿态变化以及振 动将间接影响平台的视轴稳定精度。目前,在控 制领域中,为了突破系统机械谐振频率的限制^[6], 大多采用扰动观测器对其进行主动补偿,比较常 用的方法有 DOB(Disturbance Observer)和 ADRC^[7-9]。这在一定程度上可使系统的扰动隔 离度得到明显提升。

然而这两种扰动主动补偿方法均是基于线性 控制理论设计的,因此很难对摩擦力矩这种非线 性扰动进行实时准确的观测与抑制。针对此问 题,有研究人员提出通过结合摩擦力辨识补偿方 法以减小这种非线性的影响^[10]。然而无论是摩 擦力辨识还是扰动的主动补偿,对系统参数的准 确性要求都很高^[11],尤其对于这种精度要求极高 的系统,参数的微小变化都可能导致系统的不稳 定。因此需要更为适合的控制策略以提高音圈 式-快速反射镜的扰动抑制能力。

针对音圈式-快速反射镜同时存在参数不确 定性和非线性的特点,本文提出了一种自适应鲁 棒控制^[12]的新方法(简称 ARC),该方法有效结 合了自适应控制技术和确定性鲁棒控制的双重优 点,通过自适应控制中参数的自适应调节有效减 小了系统参数的不确定性。因此即便不采用非线 性控制方法或者提高反馈回路中的增益,依然可 以实现系统对目标的渐进稳定跟踪。

2 基于摩擦力补偿的 DOB 控制方法

本文实验中所采用的音圈式-快速反射镜如 图1所示。

此反射镜为两轴结构,它采用4个音圈电机 同时驱动,位置传感器采用目前比较主流的涡流 传感器^[13],其最大行程可以达到一1.5°~1.5°。 该行程远远大于目前所应用的压电式-快速反射 镜的最大行程。



图 1 音圈式-快速反射镜 Fig. 1 The VCM-FSM

传统音圈式-快速反射镜常采用基于摩擦力 补偿的 DOB 控制方法^[14],即先对摩擦力进行非 线性补偿,再采用扰动观测器对系统补偿后的"残 余扰动"进行实时观测并加以消除,从而进一步抑 制系统中的扰动,其原理如图 2 所示。



图 2 摩擦力补偿性 DOB 控制策略 Fig. 2 Controller scheme of DOB with friction compensation

图中,P(s)为音圈式一快速反射镜的实际被控 对象,d(s)为与系统中"总和扰动"等效的电压,称 之为"等效扰动电压"(包括:摩擦力扰动,质量不平 衡扰动等效的扰动电压)。它可以复现系统中所有 扰动对系统的影响;f(s)为摩擦力的非线性补偿, 它是在辨识环节根据 FSM 的实际工作状态实时辨 识得到的;P'(s)为通过辨识得到的系统名义模型 的逆模型,DOB 根据该逆模型对系统摩擦力补偿 后的"残余扰动"进行估计。根据前面的分析可以 得到残余扰动的表达式,如式(1)所示:

$$d_{c}(s) = d(s) - f(s) + \left(1 - \frac{P'(s)}{P(s)}\right)u(s). \quad (1)$$

由此可见,其扰动观测值 d'(s)与实际系统中的"残余扰动" $d_{c}(s)$ 越接近,其扰动补偿效果越好, DOB 设计的越合理。在理想情况下,系统中的残 余扰动可以得到完全补偿,即 $d'(s) = d_{c}(s)$,那么在 忽略测量噪声的情况下,上述系统可以改写为: $\omega(s) = P'(s) \star u(s), \qquad (2)$

其中: $\omega(s)$ 为角速度,u(s)为传统控制器根据陀螺 偏差得到的控制量。显而易见,在理论上采用基于 摩擦力补偿的 DOB 控制方法可使复杂的被控系统 完全等效为名义模型,从而实现对系统的理想控 制。然而,在实际应用中,由于传感器以及模拟器 件噪声的影响,在对扰动观测器进行补偿前需要经 过低通滤波器^[15]Q(s),这样一来,式(2)将改写为:

$$\omega(s) = \frac{P(s)P'(s)}{P(s) - (P(s) - P'(s))Q(s)}u(s) + \frac{P(s)P'(s)(1 - Q(s))}{P(s) - (P(s) - P'(s))Q(s)} \star (d(s) - f(s)) + \frac{P(s)Q(s)}{P'(s) - (P(s) - P'(s))Q(s)}n(s).$$
(3)

由此可见,当系统的名义模型通过辨识的方法一经确定,便可以通过设计Q(s)来提高系统的 鲁棒性能和扰动抑制能力。

为了进一步分析参数不确定对系统稳定性的

影响,设建模误差为 $\hat{P}(s) = P(s) - P'(s)$,则系统的闭环传递函数为:

$$\frac{\omega(s)}{\omega_{r}(s)} = \frac{G_{v}(s)\frac{P(s)P'(s)}{P(s) - (P(s) - P'(s))Q(s)}}{1 + G_{v}(s)\frac{P(s)P'(s)}{P'(s) - (P(s) - P'(s))Q(s)}}$$
$$= \frac{G_{v}(s)P(s)P'(s)}{P'(s) - (P(s) - P'(s))Q(s) + G_{v}(s)P(s)P'(s)}$$
$$= \frac{G_{v}(s)P(s)}{(1 + G_{v}(s)P'(s)) + (Q(s) + G_{v}(s)P'(s))\frac{\hat{P}(s)}{P'(s)}}$$

根据鲁棒稳定性的相关知识有,若使系统在 整个频域内实现鲁棒稳定,其模型不确定性需 满足:

$$\frac{\hat{P}(s)}{P'(s)} < \frac{1 + G_{v}(s)P'(s)}{Q(s) + G_{v}(s)P'(s)}.$$
(4)

由于在系统实际工作频域段,滤波器 $Q(s) \approx$ 1,因此:

$$\frac{\hat{P}(s)}{P'(s)} < 1. \tag{5}$$

由此可见,当采用 DOB 扰动抑制方法时,须 保证系统模型的不确定性不能够太大,否则会导 致系统不稳定。

然而,航空光电稳定平台的实际工作环境十 分复杂多变,温度、电磁、振动、风阻等均会导致系 统参数发生剧烈的变化¹¹⁶。因此,需要寻求一种 在保证系统扰动抑制能力的同时,还能适应模型 参数剧烈变化的新型控制方法。

3 基于自适应的鲁棒控制方法

ARC-自适应鲁棒控制方法具有自适应和鲁 棒控制的双重优点,满足航空光电稳定平台应用 环境对音圈式-快速反射镜的应用需求。

在电流环的作用下,音圈电机的输出力与控制电压之间成线性关系,此时,音圈式-快速反射 镜的物理特性可以描述为:

$$\begin{cases} x_1 = x_2 \\ J\dot{x}_2 = u(t) + \Delta \end{cases}$$
 (6)

其中:*x*₁和*x*₂分别为镜面相对于基座的位置和 速度,*J*为驱动负载的转动惯量,△为系统中扰动 以及模型参数变化在电压上的等效,简称等效不 确定性电压。

取 $\theta = J$,那么上式可改写为: $\theta x_2 = u(t) + \Delta$. 假设 1:不确定参数 θ 的上下界定义为:

$$\theta \in [\theta: 0 < \theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}].$$

假设 2:不确定参数 △ 的上下界定义为:

$$|\Delta| \in D$$
,

其中 θ_{\min} , θ_{\max} 和 D 分别为不确定参数 θ 和 Δ 的 边界。

定义滑模函数为:

$$\begin{cases} s = \dot{e} + ce = x_2 - q \\ q = \dot{x}_d - ce \end{cases},$$

其中: $e = x_1 - x_d$,为位置跟踪误差,c > 0。由此 可得:

$$\dot{s}=\dot{x}_2-\dot{q}$$
.

控制律设计为:

$$u = u_a + u_{s1} + u_{s2}$$
, (7)

其中:

$$\begin{cases} u_{a} = \hat{\theta} \dot{q} \\ u_{s1} = -k_{s} s \\ u_{s2} = -\eta \text{sign}(s) \end{cases}$$

其中: u_a 为自适应补偿项, u_{s1} 为反馈项(这里采用 PD 控制器), u_{s2} 为鲁棒项, $k_s > 0, \eta < D$ 。则控制 律可以写成:

$$u = \hat{\theta} \dot{q} - k_s s - \eta \text{sign}(s). \tag{8}$$

定义 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2}\theta s^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}^2, \qquad (9)$$

式中: $\hat{\theta} = \hat{\theta} - \theta, \gamma > 0$ 。

则:

则:

$$\dot{V} = \theta \dot{ss} + \frac{1}{\gamma} \ddot{\theta} \dot{\bar{\theta}} = s \left(\dot{\theta x_2} - \dot{\theta q} \right) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\bar{\theta}}.$$

取自适应律为:

$$\tilde{\theta} = -\dot{\gamma}\dot{q}s, \qquad (10)$$
$$\dot{V} = s(u + \Delta - \dot{\theta}\dot{q}) + \frac{1}{\tilde{\theta}}\dot{\tilde{\theta}}$$

$$= s(\hat{\theta}\dot{q} - k_s s - \eta \operatorname{sign}(s) + \Delta - \dot{\theta}\dot{q}) + \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\hat{\theta}}$$
$$= s(\hat{\theta}\dot{q} - k_s s - \eta \operatorname{sign}(s) + \Delta) + \tilde{\theta}(\dot{q}s)$$
$$= -k_s s^2 - \eta |s| + \Delta \cdot s < -k_s s^2 \leq 0. \quad (11)$$

为了防止 $\hat{\theta}$ 过大而造成控制输入信号 u(t)过大,对自适应律进行如下修正:

$$\hat{\theta} = Proj_{\hat{\theta}} \left(\dot{\gamma}qs \right), \qquad (12)$$

其中:

$$Proj_{\hat{\theta}}(\cdot) = \begin{cases} 0 \text{ if } \hat{\theta} = \theta_{\max} \text{ and } \cdot > 0 \\ 0 \text{ if } \hat{\theta} = \theta_{\min} \text{ and } \cdot < 0. \\ \cdot \text{ otherwise} \end{cases}$$

4 实验结果

为了对 ARC 型音圈式-快速反射镜的性能进 行全面测试,本文分别进行了带宽测试实验、扰动 抑制能力实验以及参数波动适应能力实验(在高 低温-振动实验装置中进行)。同时,对 DOB 型音 圈式-快速反射镜和压电式-快速反射镜也进行了 上述测试实验用于对比分析。

4.1 带宽测试实验

采用 PI 公司已经产品化的压电式-快速反射 镜作为基准,将 ARC 型音圈式-快速反射镜和 DOB 型音圈式-快速反射镜同时安装在光路中,以测试 二者的闭环带宽,测试结果如图 3 所示。



本次实验中,通过控制给定电压,使压电式-快速反射镜在频带和行程内以任意幅值和频率运动,从而使目标在探测器靶面上晃动。令音圈式-快速反射镜按照与压电式-快速反射镜的光学关 系进行实时反向补偿运动。如果目标在靶面上稳 定成像,则可以分辨出鉴别率板的条纹,那么便说 明音圈式-快速反射镜的闭环带宽可以达到这一 频率。

逐渐提高压电式-快速反射镜的运动频率重 复进行实验,直至成像不清晰,此时对应的频率就 是音圈式-快速反射镜的闭环带宽。图4为 150 Hz下,目标成像前后的对比图。

经测试,ARC 型音圈式-快速反射镜和 DOB 型音圈式-快速反射镜的闭环带宽均可以达到 200 Hz 以上,与成型的产品化压电式-快速反射 镜带宽基本相当,完全满足航空光电稳定平台在 实际工作中的需求。



图 4 实验中鉴别率板对比图 Fig. 4 Contrasting patterns of discrimination plate in experiment

4.2 扰动抑制能力试验

为了对比测试3种快速反射镜对扰动的抑制 能力,本实验将3种快速反射镜同时安装在高频 飞行模拟状态,具体安装结果如图5所示。

图 5 中 1、2、3 分别代表 ARC 型音圈式-快速 反射镜、DOB 型音圈式-快速反射镜以及压电式-快速反射镜。实验中控制 3 个反射镜,使它们稳 定在各自的零位,然后根据航空光电稳定平台的 实际工作情况调整高频转台的姿态,同时观测各 个快速反射镜相对于零点的波动情况。图 6(彩 图见期刊电子版)为 3 个快速反射镜在 80 Hz 以 内任意频率扰动影响下的角度波动情况。





由图 6 可以明显看出,在 80 Hz 内任意频率 扰动下,压电式-快速反射镜的扰动抑制能力最 强,角度误差在整个频段内均在 0.85 μ rad (RMS)以内;ARC型音圈式-快速反射镜和 DOB 型音圈式-快速反射镜扰动抑制能力不相上下,波 动均在 1 μ rad(RMS)左右,均满足实际使用的 需求。



4.3 视轴稳定精度测试

第9期

为了测试 ARC 型音圈式-快速反射镜、DOB 型音圈式-快速反射镜以及压电式-快速反射镜在 复合轴式航空光电稳定平台中的实际应用效果, 将三者分别安装在已经设计好的光学系统中,具 体细节如图 7 所示。



Fig. 7 Schematic of precision test of LOS stability

令航空光电稳定平台框架在快速反射镜的频 带和行程内以任意幅值和频率运动(本文选取快 速反射镜能力范围内的最高幅值,以最为严格的 条件对其进行测试)。同时,快速反射镜系统根据 与平台框架间的角度运动关系进行相应的反向运 动,以保持系统视轴在空间上的指向稳定。此过 程中,音圈式一快速反射镜不仅要根据与平台框架 的角度关系运动至指定角度,还要抑制框架晃动 的影响,在指定角度位置稳定不变。此过程同时 考验了系统的闭环带宽和扰动抑制能力。

通过图像分析仪计算靶标相对于视轴的晃动 情况,从而测试复合轴式航空光电稳定平台的视 轴稳定精度。图 8 为图像分析仪的操作界面(对 应温度为一40 ℃,扰动频率为 70 Hz 时,系统在 方位和俯仰方向视轴稳定精度的测试结果)。



Fig. 8 Image analysis system

采用同样的方法,在各个扰动频率下,3种快速反射镜作用下的平台在各个频率处的视轴稳定 精度如图 9(彩图见期刊电子版)所示。



19 早纯抗动作用下,3种快速反射镜的视轴稳定有度 对比图

Fig. 9 Contrasting patterns of stability precision of LOS for different FMSs in disturbance

由图 9 可以明显看出,在 80 Hz 频率内,压电 式-快速反射镜的视轴稳定效果最佳,在1.7 μrad (RMS)以内;ARC 型音圈式-快速反射镜和 DOB 型音 圈 式-快 速 反 射 镜 虽 较 之 稍 差, 但 均 在 2.5 μ rad(RMS)以内,仍远远小于 5 μ rad(RMS) (小于 1 个像元),完全符合实际工程的需要。 4.4 参数鲁棒性实验

为了更加真实地模拟实际复杂、多变的工作 环境,将上述复合轴系统安装在高低温-振动测试 装置中。该装置可以同时进行高低温和随机振动 试验,具体如图 10 所示。



图 10 高低温-振动测试装置 Fig. 10 High-low temperature and vibration device

在3组对比实验中,平台框架均采用相同的 控制器进行框架稳定控制。

图 11 为在一40 ℃的情况下,系统在80 Hz 频率内振动时的视轴稳定精度(测试结果同样是 由图像分析仪测试得到)。



Fig. 11 Contrasting patterns of stability precision of LOS at $-40~^\circ\!\!\mathbb{C}$

与常温状态下的测试结果相比可以看出, ARC型音圈式-快速反射镜和压电式-快速反射 镜的视轴稳定精度对温度变化不大,仍在 5 μrad (RMS)以内,而 DOB型音圈式-快速反射镜受温 度的影响则十分明显,尤其在低温高频段,对应的 视轴稳定精度已经大于 9 μrad(RMS),接近于 2 个像元,不满足实际工程需求。

综合上述实验结果可以看出,相比于 DOB 型 音圈式-快速反射镜,本文提出的 ARC 型音圈式-快速反射镜对系统模型具有更强的鲁棒性;同时 具备与压电式-快速反射镜相当的扰动抑制能力 和带宽。在低温高频振动下,系统的视轴稳定精 度依然可以保持在 5 μ rad(RMS)以内,同时还具 备十倍于压电式-快速反射镜的行程(最大运动范 围可达 — 1.5°~1.5°),满足实际工程中的应用 要求。

5 结 论

为了进一步提高复合轴航空光电稳定平台的 性能,本文提出了一种 ARC 型音圈式-快速反射 镜系统,其比 DOB 型音圈式-快速反射镜系统具 有更强的参数鲁棒性;本文系统的扰动抑制能力 和带宽与传统的压电式-快速反射镜系统不相上 下,而且行程更长、驱动电路更为简单、功耗更低。

本文提出的 ARC 型音圈式-快速反射镜彻底 克服了传统音圈式-快速反射镜扰动抑制能力弱 和参数鲁棒性差的不足,在保证复合轴光电稳定 平台视轴稳定精度的同时,有效提高了系统的行 程,简化了驱动电路,降低了功耗。

在基于 ARC 型音圈式-快速反射镜的复合轴 航空光电稳定平台的整机实验中,其各项参数均 满足实际应用要求,在 80 Hz 内任意频率扰动下 的视轴稳定精度可以达到 5 μ rad(RMS),同时最 大行程可以达到-1.5°~1.5°,具有极强的参数 鲁棒性。本文研究为音圈式-快速反射镜在复合 轴航空光电稳定平台中的工程化应用提供了有力 的支撑,具有较高的参考价值和使用价值。

参考文献:

- [1] 魏伟,戴明,李嘉全,等.基于重复-自抗扰控制的 航空光电稳定平台控制系统设计[J].吉林大学学 报(工学版),2015,45(6):1924-1932.
 WEI W, DAI M,LI J Q, et al.. Design of airborne opto-electric platform control system based on AD-RC and repetitive control theory [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2015, 46(6):1924-1932. (in Chinese)
- [2] 彭树萍,陈涛,刘廷霞,等.激光发射系统快速反 射镜的光线反射过程[J].光学精密工程,2015, 23(2):378-386.
 PENG SH P, CHEN T, LIU T X, *et al.*. Reflec-

tion process of fast-steering mirror of laser launching system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23 (2):378-386. (in Chinese)

[3] 徐新行,刘廷霞,时魁,等.提高万向轴系式快速 反射镜指向精度的装置[J].光学精密工程,2015, 23(6):1688-1694.

XU X H, LIU T X, SHI K, *et al.*. Device for improving pointing precision of fast steering mirror with spherical gemel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1688-1694. (in Chinese)

- [4] 魏君成,杨永明.基于压电陶瓷直驱的前向像移补 偿系统[J].液晶与显示,2015,30(3):519-524.
 WEI J CH, YANG Y M. Forward motion compensation system based on piezoelectric direct drive
 [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015,30(3):519-524. (in Chinese)
- [5] 方楚,郭劲,徐新行,等. 压电陶瓷驱动 FSM 三自 由度柔性支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44 (10):2987-2994.
 FANG CH, GUO J, XU X H, et al.. Design of three DOFs flexure support for FSM driven by piezoelectric ceramics [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10):2987-2994. (in Chinese)
- [6] 杨明,郝亮,徐殿国.双惯量弹性负载系统机械谐振机理分析及谐振特征快速辨识[J]. 电机与控制 学报,2016,20(4):112-120.
 YANG M, HAO L, XU D G. Analysis of mechanical resonance mechanism and fast identification of resonance characteristic for 2-mass system with e-lastic load [J]. *Electric Machines and Control*, 2016,20(4):112-120. (in Chinese)
- [7] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]. *Proceedings of the A-*

merican Control Conference, Evanston, IL: IEEE, 2003:4989-4996

- [8] GAO Z Q. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design
 [C]. American Control Conference, 2006.
- [9] GAO Z Q, HUANG Y, HAN J Q. An alternative paradigm for control system design [C]. Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 2001.
- [10] 李玉霞,孟浩然,张斌,等. 基于 LabView 的伺服 转台 Stribeck 摩擦测量系统[J]. 液晶与显示, 2015,30(1):180-185.
 LI Y X, MENG H R, ZHANG B, et al.. Stribeck friction measure system of servo table based on Labview [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015,30(1):180-185. (in Chinese)
- [11] 克晶,苏宝库,曾鸣. 一种直流力矩电机系统的滞 滑摩擦补偿方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005, 37(6):736-739.
 KE J,SU B K,ZENG M. Nonlinear stick-slip fric-

tion compensation for DC motors [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37 (6): 736-739. (in Chinese)

- [12] 王三秀, 俞立, 徐建明, 等. 机械臂自适应鲁棒轨 迹跟踪控制[J]. 控制工程, 2015, 22(2): 241-245.
 WANG S X, YU L, XU J M, et al.. Adaptive robust tracking control for robotic manipulators
 [J]. Control Engineering of China, 2015, 22(2): 241-245. (in Chinese)
- [13] 唐莺,赵建强,胡恒江,等.平面柔性涡流传感器 工作频率影响分析与验证[J]. 仪表技术与传感器,2015(8):4-6.
 TANG Y, ZHAO J Q, HU H J, et al.. Analysis and validation of effect of frequency on planar eddy sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(8):4-6. (in Chinese)
- [14] 汪永阳,戴明,丁策,等.光电稳定平台中高阶扰 动观测器的应用[J].光学精密工程,2015,23 (2):459-466.
 WANG Y Y, DAI M, DING C, et al.. Application of order observer in EO stabilized platform [J]. Opt. Precision Eng., 2015, 23(2):459-466. (in Chinese)
- [15] 胡异丁,任伟新,颜健毅,等. Hilbert 低通滤波
 器特性分析及改进数值计算方法[J]. 振动、测试
 与诊断,2016,36(2):383-389+408.
 HU Y D, REN W X, YAN J Y, et al.. Analysis of

characteristic of hilbert low-pass filter and improved numerical calculated method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(2):383-389+408. (in Chinese)

[16] 黄莎莎,乔嘉,王赞超.动平台光电跟踪测量系统 在飞行试验中的应用研究[J].中国科技信息,

作者简介:



李贤涛(1986一),男,吉林长春人,博 士,2009年于吉林大学物理学院获得 学士学位,主要从事视轴稳定及自抗扰 控制方面的研究。E-mail;lixiantao_86 @126.com

2015(7):16-18.

HUANG SH SH, QIAO J, WANG Z CH. Application of moving platform electro-optical tracking measurement system in flight trials [J]. *China Science and Technology Information*, 2015(7):16-18. (in Chinese)



张晓沛(1994一),男,吉林长春人,本科 生,现就读于美国加利福尼亚大学洛杉 矶分校,亨利・萨缪里工程与应用科学 学院电子工程专业,主要从事机器视 觉、人工智能技术的研究。E-mail: zxpmirror1994@gmail.com