

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 $5 \mu\text{rad}(\text{RMS})$ 以内; 同时在 $-40 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 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

收稿日期: 2016-07-15; **修订日期:** 2016-09-14.

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)

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 $5 \mu\text{rad}$ (RMS) can all be achieved under disturbance influence of any frequency within 80 Hz. This outstanding performance can be maintained at the temperature of $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ to $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 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、航空领域的航空光电稳定平台,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 $5 \mu\text{rad}$ (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 $\pm 5 \text{ mrad}$ 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 $\pm 5^\circ$,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 $-1.5^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$ 。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。

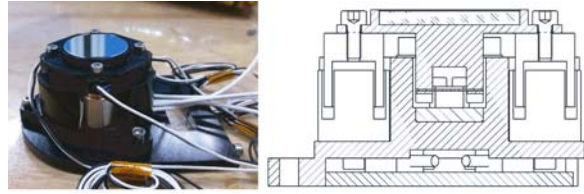


图 1 音圈式-快速反射镜

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。

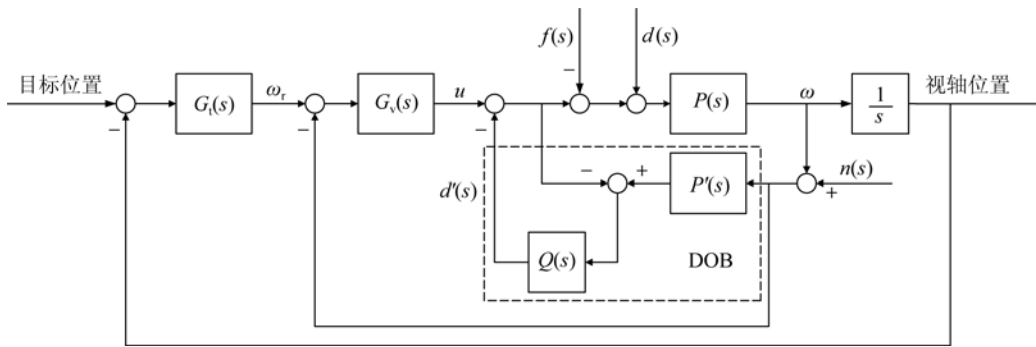


图 2 摩擦力补偿性 DOB 控制策略

Fig. 2 Controller scheme of DOB with friction compensation

图中, $P(s)$ 为音圈式-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:

$$\omega(s) = P'(s) * u(s), \quad (2)$$

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:

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

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:

$$\begin{aligned} \frac{\omega(s)}{\omega_r(s)} &= \frac{G_v(s) \frac{P(s)P'(s)}{P(s) - (P(s) - P'(s))Q(s)}}{1 + G_v(s) \frac{P'(s) - (P(s) - P'(s))Q(s)}{P'(s)P'(s)}} \\ &= \frac{G_v(s)P(s)P'(s)}{P'(s) - (P(s) - P'(s))Q(s) + G_v(s)P(s)P'(s)} \\ &= \frac{G_v(s)P(s)}{(1 + G_v(s)P'(s)) + (Q(s) + G_v(s)P'(s))\frac{\hat{P}(s)}{P'(s)}} \end{aligned}$$

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:

$$\frac{\hat{P}(s)}{P'(s)} < \frac{1 + G_v(s)P'(s)}{Q(s) + G_v(s)P'(s)} \quad (4)$$

由于在系统实际工作频段,滤波器 $Q(s) \approx 1$,因此:

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

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^[16]。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:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ J\dot{x}_2 = u(t) + \Delta \end{cases} \quad (6)$$

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, Δ 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:

$$\theta\dot{x}_2 = u(t) + \Delta$$

假设 1:不确定参数 θ 的上下界定义为:

$$\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$$

假设 2:不确定参数 Δ 的上下界定义为:

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

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

定义滑模函数为:

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

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:

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

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:

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

定义 Lyapunov 函数为:

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

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

则:

$$\dot{V} = \theta s\dot{s} + \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}} = s(\theta\dot{x}_2 - \theta\dot{q}) + \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}}$$

取自适应律为:

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\gamma\dot{q}s \quad (10)$$

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

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

为了防止 $\dot{\tilde{\theta}}$ 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:

$$\dot{\tilde{\theta}} = \text{Proj}_{\tilde{\theta}}(\gamma\dot{q}s) \quad (12)$$

其中:

$$\text{Proj}_{\tilde{\theta}}(\cdot) = \begin{cases} 0 & \text{if } \tilde{\theta} = \theta_{\max} \text{ and } \cdot > 0 \\ 0 & \text{if } \tilde{\theta} = \theta_{\min} \text{ and } \cdot < 0 \\ \cdot & \text{otherwise} \end{cases}$$

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。

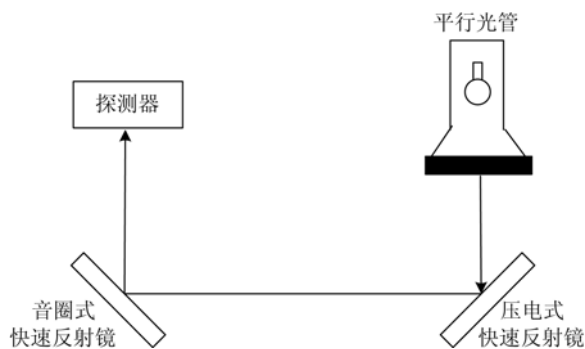


图 3 快速反射镜的带宽测试

Fig. 3 Bandwidth testing of FSM

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。

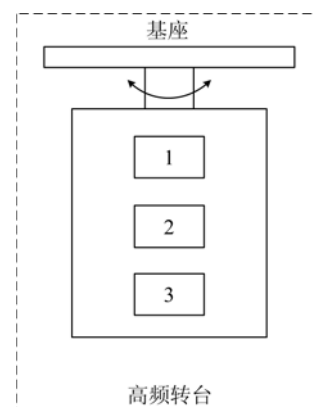


图 5 扰动抑制能力测试

Fig. 5 Disturbance suppression capability test

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 $0.85 \mu\text{rad}$ (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 $1 \mu\text{rad}$ (RMS) 左右,均满足实际使用的需求。

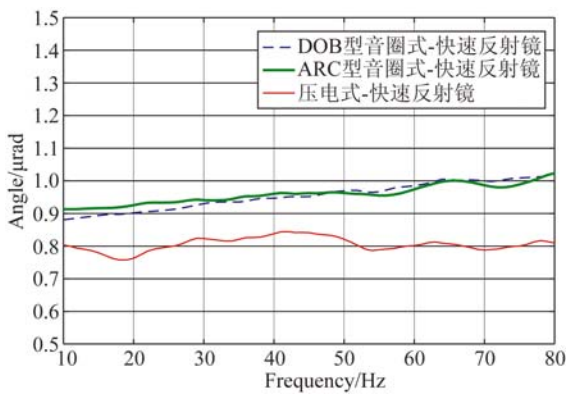


图 6 实验中快速反射镜的角度误差
Fig. 6 Angular error of FSM in experiment

4.3 视轴稳定精度测试

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。

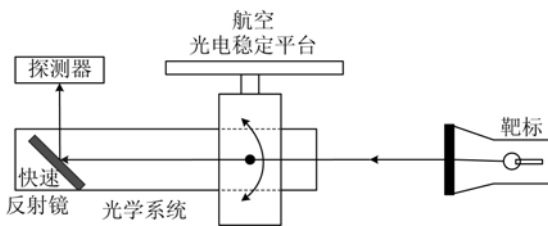


图 7 视轴稳定精度测试示意图
Fig. 7 Schematic of precision test of LOS stability

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-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 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,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)。

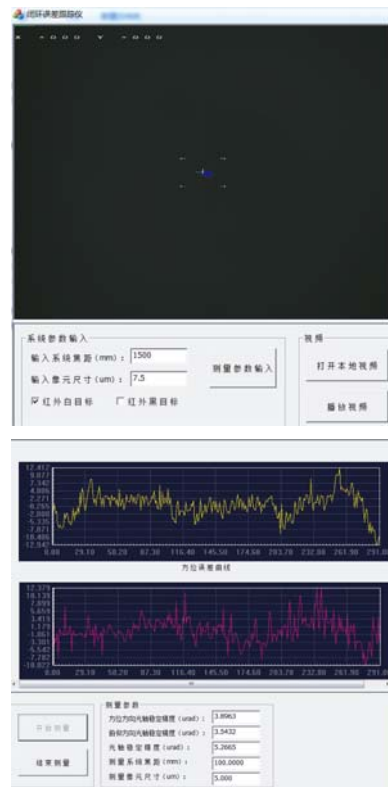


图 8 图像分析系统
Fig. 8 Image analysis system

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。

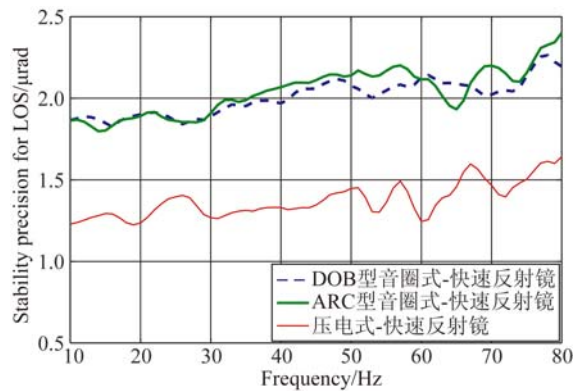


图 9 单纯扰动作用下,3 种快速反射镜的视轴稳定精度对比图
Fig. 9 Contrasting patterns of stability precision of LOS for different FSMs in disturbance

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 $1.7\text{ }\mu\text{rad}$ (RMS)以内;ARC 型音圈式-快速反射镜和 DOB

型音圈式-快速反射镜虽较之稍差,但均在 $2.5 \mu\text{rad}$ (RMS)以内,仍远远小于 $5 \mu\text{rad}$ (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。

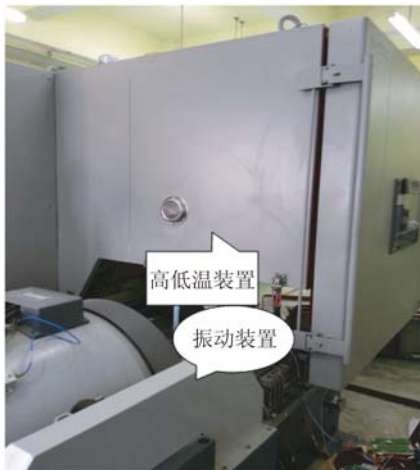


图 10 高低温-振动测试装置

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 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 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)。

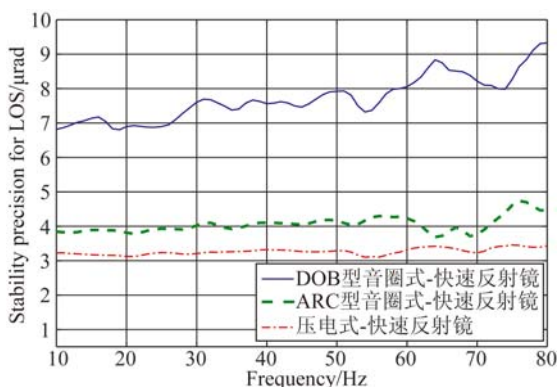


图 11 在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,视轴稳定精度对比图

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

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 $5 \mu\text{rad}$ (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 $9 \mu\text{rad}$ (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 $5 \mu\text{rad}$ (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 $-1.5^\circ \sim 1.5^\circ$),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 $5 \mu\text{rad}$ (RMS),同时最大行程可以达到 $-1.5^\circ \sim 1.5^\circ$,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 ADRC 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.*. Reflection 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 elastic 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 American 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 friction 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,

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)

作者简介:



李贤涛(1986—),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



张晓沛(1994—),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