

基于自适应鲁棒控制提升快速反射镜的抗扰能力

王正玺^{1,2}, 张葆^{1*}, 李贤涛¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 航空光电稳定平台广泛采用快速反射镜进行视轴稳定, 航空环境中的各种扰动, 尤其是振动会影响快速反射镜的稳定性能。针对传统的抗扰方法[如比例-积分-微分控制器(PID)、干扰观测器(DOB)等]抑制扰动效果不明显的问题, 提出一种基于自适应鲁棒控制(ARC)方法的快速反射镜抗扰策略。实验测试发现, 引入 ARC 以后, 快速反射镜在振动环境中的稳态均方根误差值相比于 PID 降低约 80%, 相比于 DOB 降低约 60%, 表明 ARC 对于提升快速反射镜的抗扰能力和稳定性能具有显著效果, 具有较大的工程应用价值。

关键词 机器视觉; 快速反射镜; 扰动; 干扰观测器; 自适应鲁棒控制

中图分类号 TP273

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0905002

Improving Anti-Disturbance Capability of Fast Steering Mirror by Adaptive Robust Control

Wang Zhengxi^{1,2}, Zhang Bao^{1*}, Li Xiantao¹

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Fast steering mirrors (FSM) are widely used in aeronautical optoelectronic stabilization platform for line-of-sight stabilization. The stability of the FSM is affected by various disturbances especially the vibration in the aviation environment. Traditional anti-disturbance methods, such as proportion integration differentiation controller (PID) and disturbance observer (DOB), have a little effect on suppressing disturbance in FSM. To solve these problems, a fast anti-disturbance strategy based on adaptive robust control (ARC) is proposed. The experimental results show that the steady-state root mean square error of FSM in vibration environment is reduced by about 80% compared with that of the PID control strategy and about 60% compared with that of the DOB control strategy after the introduction of the ARC. It shows that ARC has remarkable effect on improving the anti-interference ability and stability of FSM, and has large engineering application value.

Key words machine vision; fast steering mirror; disturbance; disturbance observer; adaptive robust control

OCIS codes 150.5758; 230.2090; 200.2605; 350.4600

1 引 言

快速反射镜(FSM)一般以音圈电机或压电陶瓷作为致动器,以涡流传感器或激光位置传感器(PSD)作为位置传感器,并配合一块反射镜组成,惯性较小,易于安装和控制,具有响应速度快和定位精度高的优点^[1-3]。FSM作为在目标和接收器之间控制光束方向的精密光学仪器,广泛应用于天文望远

镜、激光通信、图像稳定、自适应光学、复合轴精密跟踪、瞄准等光学系统中^[4-8]。

在航空光电稳定平台中,FSM用来稳定视轴、消除像移等^[9-10]。飞机飞行中所带来的位置波动、发动机振动等扰动会严重影响FSM的控制精度。受制于光电平台和航空成像系统空间的限制,除了位置传感器以外,FSM中很难再引入其他传感器以提高系统的扰动抑制能力。因此,在现有位置控制

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-05-05; 录用日期: 2019-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(61705225)

* E-mail: clearsky_zh@163.com

环路的基础上,通过改进控制算法来提高 FSM 的抗扰能力成为当前该领域的研究重点^[11]。

目前,最常见的抗扰方法是引入干扰观测器(DOB)^[12]。这种抗扰方法原理简单,工程实现也比较容易,且对绝大部分控制系统都有明显作用。因其对扰动的估计需要利用模型的逆模型,所以这种控制方法对于建模精度的要求非常高。由于 FSM 的被控对象是针对位置控制的二阶系统,所以引入 DOB 时会引入二阶微分环节,而二阶微分环节会放大传感器的高频噪声,进而引起控制系统振荡。

自适应鲁棒控制(ARC)是 Yao 等^[13]在 1996 年提出的一种结合滑模变结构控制(SMC)和自适应控制(AC)的抗扰算法。ARC 控制既有 AC 对于模型不确定性的容忍性,又具有 SMC 对于扰动的抑制能力和瞬态响应性能^[14-15]。相比于传统的 DOB 抗扰方法,ARC 对于模型变化的容忍度更好。同时,针对位置环的二阶系统 ARC 不会引入二阶微分环节,所以不会放大传感器的高频噪声。在 FSM 原有比例-积分-微分(PID)控制器的基础上引入 ARC,可以有效地降低外界扰动对于 FSM 性能的影响,提高其控制精度。

本文首先对 DOB 和 ARC 的控制原理及其抗扰抑制能力进行分析,之后对 FSM 进行建模和模型修正,最后通过仿真和实验对比分析证明 ARC 可以有效改善 FSM 在振动条件下的稳定精度。

2 快速反射镜抗扰策略分析

2.1 扰动分析

当 FSM 工作在航空环境中时,会受到飞机发动机振动、飞机姿态波动,以及超重、失重所造成的模型变化等各种外部扰动的影 响。其中,振动包含的频率最高(可达 2000 Hz),对 FSM 性能的影响也最大,是 FSM 抗扰控制算法的主要研究对象。

在具体的分析中用 d 来代表总的外部扰动。加入扰动后的系统控制框图如图 1 所示。

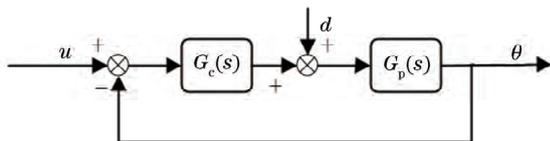


图 1 带有扰动的快速反射镜控制系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of FSM control system with disturbance

图 1 中, $G_c(s)$ 是控制器函数, $G_p(s)$ 是被控模型, u 是系统输入量, θ 是系统输出量, s 为复变量。

设系统在没有外部扰动情况下的理想输出是 θ_i , 外部扰动 d 带来的输出量为 θ_d , 则:

$$\theta_i = G_{u\theta}(s)u, \quad (1)$$

$$\theta_d = G_{d\theta}(s)d, \quad (2)$$

其中

$$G_{u\theta}(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)}, \quad (3)$$

$$G_{d\theta}(s) = \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)}. \quad (4)$$

系统实际的输出量为

$$\theta = \theta_i + \theta_d = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)}u + \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)}d = \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)}[G_c(s)u + d]. \quad (5)$$

从(5)式可以看出,扰动会通过系统对输出造成影响,导致系统的实际输出量偏离理想输出量。从(5)式还可以看出,增大控制器的幅值可以减小扰动的影响,这也是经典 PID 控制理论常采用的控制手段。但是,受控制系统和机械谐振的限制,控制器的幅值并不能无限制增大;所以,要想抑制扰动对控制系统的影响,还需要在传统控制器的基础上引入其他的控制方法。

2.2 干扰观测器抗扰抑制能力分析

扰动观测器是一种根据内模原理设计的控制方法,也是最常用的抗扰控制算法。其基本原理是通过名义模型来估计实际输出量和理想输出量的差值,并以此作为估计扰动补偿到控制量中,以达到抑制扰动的目的。其基本原理如图 2 所示。

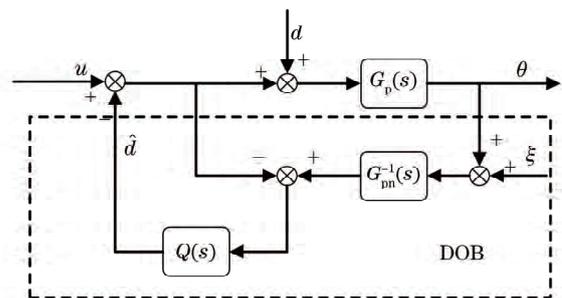


图 2 干扰观测器原理框图

Fig. 2 Principle diagram of disturbance observer

图 2 中, $G_{pn}(s)$ 是名义被控对象模型函数, $Q(s)$ 是低通滤波器函数, \hat{d} 是 DOB 对扰动的估计值, ξ 是检测噪声。

由图 2 可知,系统总的输入输出关系为

$$\theta(s) = G_{u\theta}(s)u(s) + G_{d\theta}(s)d(s) + G_{\xi\theta}(s)\xi(s), \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} G_{u\theta}(s) = \frac{G_{pn}(s)G_p(s)}{G_{pn}(s) + [G_p(s) - G_{pn}(s)]Q} \\ G_{d\theta}(s) = \frac{(1-Q)G_{pn}(s)G_p(s)}{G_{pn}(s) + [G_p(s) - G_{pn}(s)]Q} \\ G_{\xi\theta}(s) = \frac{G_p(s)Q}{G_{pn}(s) + [G_p(s) - G_{pn}(s)]Q} \end{cases} \quad (7)$$

$Q(s)$ 的设计原则为:在理想情况下低频的增益为1,高频段增益为0。低频段 $Q(s) = 1$ 时, $G_{d\theta}(s) = 0$,此时扰动 d 对输出 θ 没有影响,系统的外部等效扰动被完全抑制。 $Q(s)$ 在高频段的增益为0, $G_{\xi\theta}(s) = 0$ 使系统对高频噪声不敏感。

在实际的工程应用中,干扰观测器主要存在以下3个问题:

1) 如果要抑制扰动 d 中的高频分量,则要求低通滤波器 $Q(s)$ 的截止频率应尽可能高;但为了抑制传感器高频噪声, $Q(s)$ 的截止频率又要尽可能低。

这是干扰观测器在应用过程中面临的最大矛盾;

2) 理想的低通滤波器并不存在,实际应用的低通滤波器在通带和阻带之间存在一段过渡带,在过渡带中低频增益不为1,高频增益也不为0,滤波效果较差;

3) 虽然可以采用精确建模方法,但是并不能保证名义模型 $G_{pn}(s)$ 与实际模型 $G_p(s)$ 完全相等,这个误差会导致扰动欠补偿或者是过补偿。

综上所述,DOB具有原理简单、设计方便、通用性强的优点,但是在实际工程应用中DOB也面临很多的问题,影响和限制了它的抗扰能力。

2.3 自适应鲁棒控制器设计

由于DOB存在许多问题,因此它在FSM控制系统中并不能很好地起到抑制外部扰动的作用。为了更好地抑制外部扰动,引入一种更加有效的抗扰控制算法——ARC,其控制结构框图如图3所示。

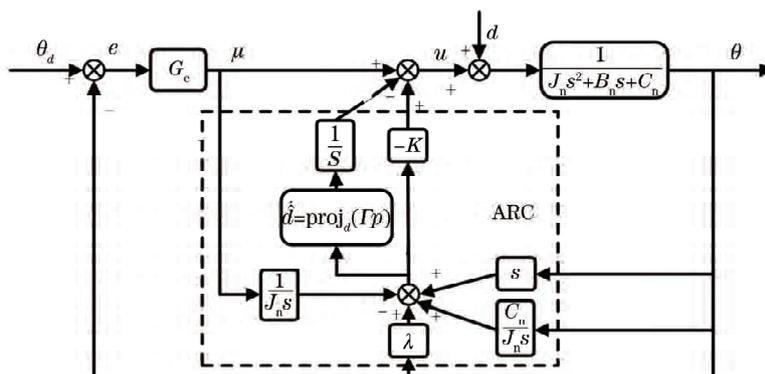


图3 ARC原理框图

Fig. 3 Principle diagram of ARC

快速反射镜系统输入 u 和输出 θ 之间的关系为

$$J\dot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta = u + d, \quad (8)$$

式中: J 是系统转动惯量; B 是速度阻尼系数; C 是弹性阻尼系数。鲁棒控制的核心思想是构造一个输入量 μ ,使得这种情况下的输入 μ 和输出 θ 之间的关系符合名义模型:

$$J_n\dot{\theta} + B_n\dot{\theta} + C_n\theta = \mu, \quad (9)$$

式中: J_n 、 B_n 和 C_n 分别是 J 、 B 和 C 的名义模型值。为简单起见,假设名义模型值和真实值之间差别不大,对系统的影响也可以忽略不计,即 $J = J_n$ 、 $B = B_n$ 、 $C = C_n$

定义滑模变量 p 表示为

$$p = \dot{\theta} + \lambda\theta - \frac{1}{J_n} \int_0^t \mu(\tau) d\tau + \frac{C_n}{J_n} \int_0^t \theta(\tau) d\tau, \quad (10)$$

式中: $\lambda = B_n/J_n$ 。由(8)~(10)式可得

$$J_n \dot{p} = u + d - \mu. \quad (11)$$

设计控制律为

$$u = u_1 + u_2, \quad u_1 = -Kp, \quad u_2 = \mu - \hat{d}, \quad (12)$$

式中: K 为正定常量。假设 d_M 和 d_m 分别为扰动的上下边界,则有

$$d \in (d_m, d_M). \quad (13)$$

将(12)式代入(11)式,可得

$$J_n \dot{p} + Kp = -\bar{d}, \quad (14)$$

式中: $\bar{d} = \hat{d} - d$ 为估计误差。如果将 \bar{d} 看作输入量, p 看作输出量,则(14)式可以看作是一个一阶系统。由一阶系统性质可知: $|p(\infty)| \leq |\bar{d}(\infty)|/K$,因此只要尽可能地增大 K 值就可以达到减小 p 值的目的,这也是鲁棒控制中最常见的策略。但是在实际控制系统中,由于系统抖振和机械谐振问题的存在, K 值不能无限制增大。当 K 值增大到上限时,

p 值的大小将取决于 \hat{d} 的大小。为了进一步提高系统的性能,在此基础上对 \hat{d} 的估计引入自适应律来减小估计误差 \hat{d} 的值。

自适应律的表达式为

$$\dot{\hat{d}} = \text{Proj}_d(\Gamma p) = \begin{cases} 0, & \text{if } \begin{cases} \hat{d} = d_M & \text{and } p > 0 \\ \hat{d} = d_m & \text{and } p < 0 \end{cases} \\ \Gamma p, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\Gamma > 0$ 是自适应系数。从(13)式可以看出:

$$\hat{d} \in (d_m, d_M)。 \quad (16)$$

由以上分析可知:如果外部扰动 d 是一个定值,那么无论 K 值为多少,自适应鲁棒控制器都可以通过自适应算法让 \hat{d} 无限逼近 d 值,最后消除估计误差 \hat{d} ,也就可以使 $p=0$,从而消除扰动的影响。如果外部扰动 d 是一个变化的值,则需要增大自适应系数 Γ ,使之可以匹配 d 的变化率。由于 Γ 和 K 相关,并不能一直增大,所以此自适应律虽然可以很好地应对低频扰动,但对于频率比较高的扰动,其抑制效果仍受到 Γ 的限制。

3 系统辨识与模型修正

视轴稳定精度是航空光电稳定平台的重要性能

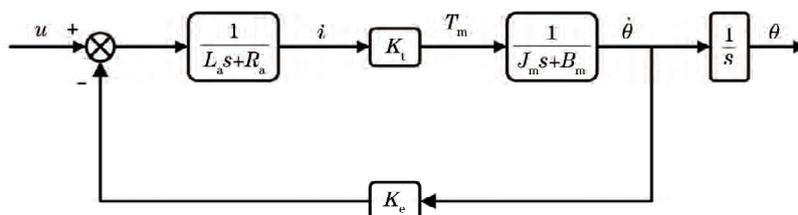


图 5 快速反射镜的模型原理图

Fig. 5 FSM model diagram

图 5 中, u 为输入电压信号, θ 为输出角度, L_a 为电枢电感, R_a 为电枢电阻, i 为电枢电流, K_t 为电磁转矩常数, T_m 为电机输出力矩, J_m 为电机转动惯量, B_m 为电机端黏性阻尼系数, $\dot{\theta}$ 为角速度, K_e 为反电动势系数。

根据图 5 中, FSM 系统的模型为二阶系统,其传递函数可以表示为

$$G(s) = \frac{k\omega_n}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (17)$$

式中: k 为开环增益; ω_n 为无阻尼振荡频率; ξ 为阻尼比。

通过白噪声扫频的方法可以获得 FSM 的开环

指标,直接决定成像系统拍摄的图像质量和分辨率^[16]。由于单独的框架式结构稳定能力有限,为了进一步提高视轴稳定精度,通常采用图 4 所示的框架和 FSM 相结合的二级稳定形式,即对载体的扰动先经过传统框架进行第一级衰减,然后对光线的残余扰动通过 FSM 的补偿运动进行再一次衰减,从而达到提高光电平台视轴稳定精度的目的。

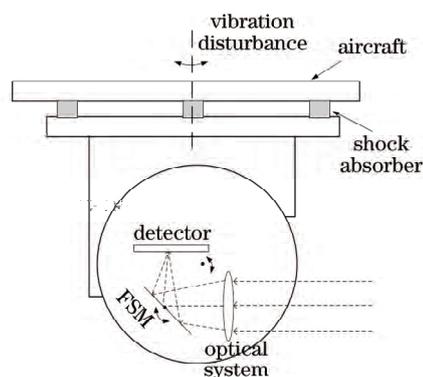


图 4 基于 FSM 的二级稳定系统示意图

Fig. 4 Diagram of secondary stabilization system based on FSM

3.1 快速反射镜模型辨识

脉冲宽度调制(PWM)功率级驱动的音圈电机作为 FSM 的制动器,是 FSM 建模的主要对象。PWM 电压信号经过电流环转换成对应的电流,然后进入电机被转换成输出力矩,如图 5 所示。

模型幅频响应和相频响应曲线,如图 6 中实曲线所示。利用 Matlab 软件中的系统辨识工具箱(Matlab System Identification Toolbox)结合推导出的理论模型,基于白噪声扫频数据可以拟合出一个简单的二阶模型,如图 6 中虚线所示。但是,这种建模方法是比较粗糙的,所建的模型曲线并不能与实际的模型相匹配,需要手动进行调整。

手动修正的方法有很多,如通过阶跃指令响应、速度指令响应、加速度指令响应等进行修正,其中,阶跃指令容易实现,而且二阶系统的阶跃响应曲线的一些明显特点(如超调量、上升时间稳定时间等)

和系统模型参数的对应关系比较明确,因此选取阶跃响应对系统模型进行修正。通过对比模型仿真阶跃曲线和实际阶跃曲线寻找数学模型和实际模型的差别,然后逐步调节模型参数使模型仿真曲线逐步接近实际阶跃曲线。手动修正之后的模型曲线如图6虚线所示。从图中可以看出,手动修正之后的曲线基本与扫频曲线重合,证明此建模方法具有较高的精度。

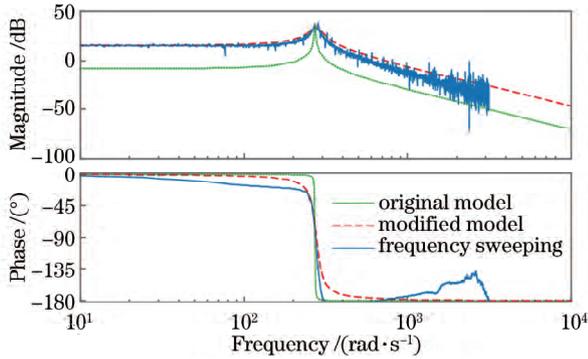


图6 FSM模型扫频及拟合曲线对比图

Fig. 6 Comparison of scanning and fitting curves of FSM model

手动修正之后的 FSM 的传递函数模型为

$$G(s) = \frac{455000}{s^2 + 32.5s + 77000} \quad (18)$$

3.2 模型修正

从图6可以看出,FSM幅频特性曲线在240 rad/s附近有一谐振峰,在FSM的控制系统中,谐振会严重限制FSM的控制带宽,进而限制其动态性能,甚至可能导致系统不稳定。在给被控对象设计控制器时,系统闭环带宽要小于系统机械谐振频率,通常为谐振频率的一半,甚至更低。因此,在设计控制器之前,应首先抑制谐振问题。

根据FSM模型的特点,可以通过引入速率反馈来改善系统的阻尼系数,从而消除谐振。这主要是通过通过在FSM系统的反馈路径中添加一个导数项来实现,其原理框图如图7所示。

由图7可知,引入补偿环节以后,二阶系统的传

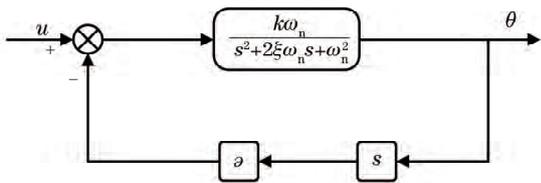


图7 引入速度反馈抑制谐振的原理框图

Fig. 7 Principle diagram of resonance suppression by introducing velocity feedback

递函数模型为

$$G(s) = \frac{k\omega_n}{s^2 + (2\xi\omega_n + \partial k\omega_n)s + \omega_n^2} \quad (19)$$

式中: ∂ 为速度反馈系数。通过调节 ∂ 的大小可改变系统阻尼的大小,进而起到抑制二阶谐振的目的。引入微分补偿环节以后,系统的幅频响应和相频响应曲线如图8所示。

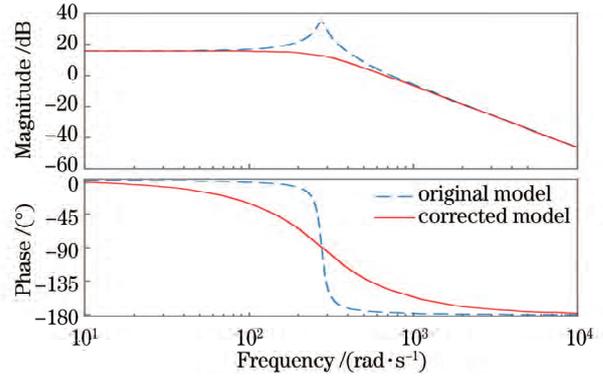


图8 引入速率反馈前后快速反射镜的开环频率响应

Fig. 8 Open-loop frequency responses of FSM with and without rate feedback

如图8所示,引入速率反馈环节之后,模型中的二阶谐振峰值被压制,降低了后续控制器设计时发生振荡的风险。

4 实验验证

根据FSM的传递函数模型,选取速度反馈系数 $\partial=0.001$ 对二阶谐振进行抑制。引入速度反馈后的系统传递函数模型为

$$G(s) = \frac{455000}{s^2 + 487.5s + 77000} \quad (20)$$

根据(20)式可得ARC的相关参数如下: $J_n = 2.1978 \times 10^6, B_n = 0.0011, C_n = 0.1692, \lambda = 487.5, K = 0.04, \Gamma = 0.004$ 。

4.1 仿真验证

为了考察ARC在FSM系统对抗扰动的抑制效果,首先在Simulink环境下进行了仿真验证。仿真中引入随机扰动力矩模拟系统受到的随机振动,仿真结构如图9所示。在Simulink仿真条件下,系统阶跃响应对比曲线如图10所示。从仿真结果可以发现,在仿真条件下ARC的阶跃响应上升时间最短,比PID和DOB都要低50%以上。从稳态误差曲线也可以看出,ARC的系统稳态误差水平最低,受随机扰动的影响,采用DOB的FSM稳态误差波动比较剧烈。

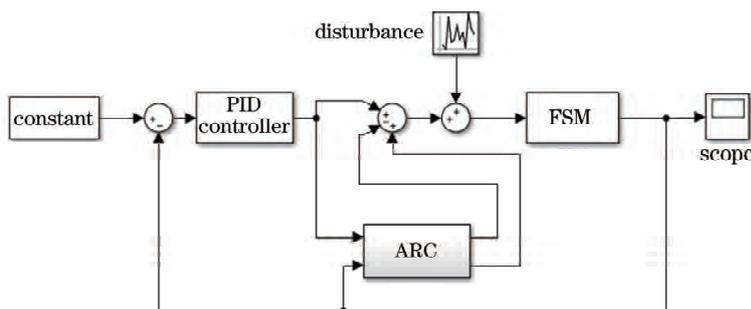


图 9 ARC 系统 Simulink 仿真图

Fig. 9 Simulink simulation diagram of ARC system

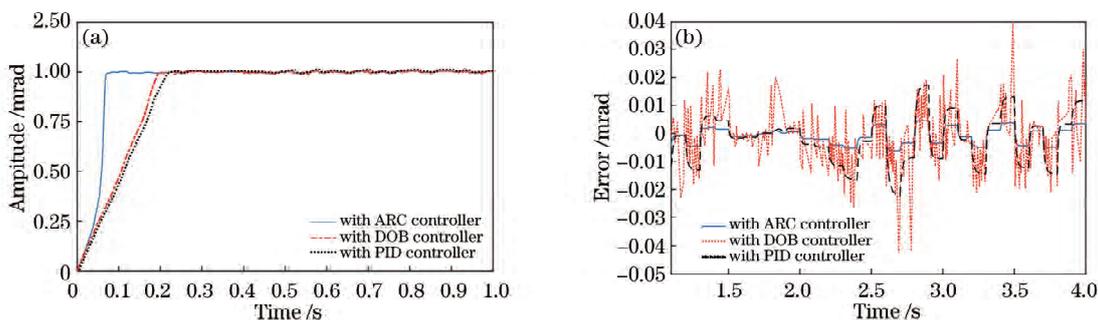


图 10 仿真结果对比曲线。(a) 阶跃响应曲线；(b) 稳态误差曲线

Fig. 10 Comparison of simulation results. (a) Step response curve; (b) steady-state error curve

4.2 对比实验

利用振动台对 FSM 施加随机振动扰动, 然后分别对 PID、DOB、ARC 等 3 种控制算法进行测试。为了更真实地仿真扰动, 本实验所用的振动频谱依据飞机实际飞行时振动情况给定, 随机振动频率范围为 2000 Hz 以内, 其中低频部分幅度较大, 高频部分幅度较小, 总幅值为 5 g。

首先测试在没有振动的条件下, 3 种控制方法下的 FSM 稳定精度, 结果如图 11 所示。

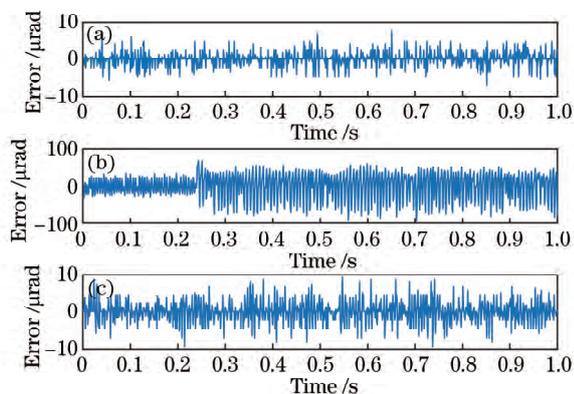


图 11 无振动扰动条件下 FSM 的稳定误差曲线。

(a) PID; (b) PID+DOB; (c) PID+ARC

Fig. 11 FSM stability error curves without vibration disturbance. (a) PID; (b) PID+DOB; (c) PID+ARC

然后通过振动台对 FSM 施加随机振动, 测试 3 种控制方法的抗扰能力, 其中时域曲线如图 12 所示。振动条件下 3 种方法控制误差的频谱图如图 13 所示。

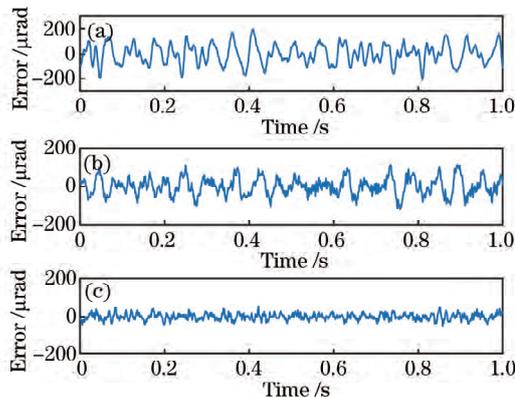


图 12 振动扰动条件下 FSM 的稳定误差曲线。

(a) PID; (b) PID+DOB; (c) PID+ARC

Fig. 12 FSM stability error curves under vibration disturbance. (a) PID; (b) PID+DOB; (c) PID+ARC

4.3 实验分析

FSM 分别在 3 种方法控制下的稳定误差曲线如图 11 所示, 其最大值、平均值和均方根误差 (RMSE) 如表 1 所示。由图 11 和表 1 可以看出, 静态时 PID 和 ARC 的稳定性较好, 稳态误差的

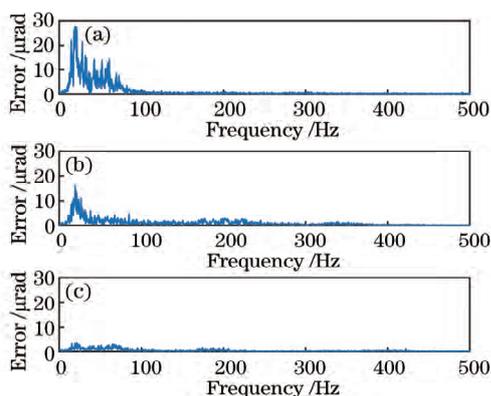


图 13 振动扰动条件下 FSM 的稳定误差频谱图。
(a) PID; (b) PID+DOB; (c) PID+ARC

Fig. 13 FSM stability error spectra under vibration disturbance. (a) PID; (b) PID+DOB; (c) PID+ARC

RMSE 分别为 $1.6938 \mu\text{rad}$ 和 $2.8877 \mu\text{rad}$, 但是 DOB 的稳定性相对较差, 稳态误差 RMSE 为 $33.4699 \mu\text{rad}$ 。造成这种结果的主要原因就是在第 3 节中提到过的高频噪声。由于 FSM 模型为二阶系统, 所以 DOB 中会引入一个二阶微分环节, 这一部分对高频信号噪声具有明显的放大作用, 被放大的高频噪声最终导致系统的稳态误差变大。

表 1 无振动扰动条件下快速反射镜的稳态误差最大值、平均值和均方根误差对比

Table 1 Comparison of maximal and average steady-state errors and RMSE of fast FSM without vibration disturbance μrad

Control method	disturbance		RMSE
	Maximal steady-state error	Average steady-state error	
PID	8.1872	1.0041	1.6938
DOB	67.8370	27.2953	33.4699
ARC	9.3568	1.9641	2.8877

表 2 振动扰动条件下快速反射镜的稳态误差最大值、平均值和均方根误差对比

Table 2 Comparison of maximal and average steady-state errors and RMSE of fast FSM with vibration disturbance μrad

Control method	disturbance		RMSE
	Maximal steady-state error	Average steady-state error	
PID	190.0618	67.3275	82.4228
DOB	163.1598	34.4581	43.2125
ARC	59.6498	13.4877	17.0788

在振动条件下, 3 种控制方法的稳态误差曲线如图 12 所示, 其最大值、平均值和 RMSE 如表 2 所示, 3 种控制方法的误差频谱图如图 13 所示。下面

是对 3 种控制方法的稳定性能和抗扰能力的分析。

1) PID 系统的稳态最大误差为 $190.0618 \mu\text{rad}$, RMSE 为 $82.4228 \mu\text{rad}$ 。误差的频谱成分主要集中在 100 Hz 以内, 其中 20 Hz 的频谱分量最大。

2) DOB 系统的稳态最大误差为 $163.1598 \mu\text{rad}$, 相比于 PID 降低 14%; RMSE 为 $43.2125 \mu\text{rad}$, 较 PID 降低 48%。频谱成分中低频部分受到抑制, 但是仍有较大的余量。高频部分则由于噪声被放大而变得比较明显, 其中峰值频率约为 200 Hz, 幅度被放大了 5.2 倍。

3) RC 系统的稳态最大误差仅为 $59.6489 \mu\text{rad}$, 仅为 PID 的 20.5%; RMSE 为 $17.0788 \mu\text{rad}$, 仅为 PID 的 20.7%。频谱成分中低频部分受到显著压制, 峰值大小约降低为原来的 1/8, 同时高频部分也没有被放大。

5 结 论

复杂的航空环境, 尤其是各种振动会影响快速反射镜的稳态性能。传统的抗扰控制算法, 如 PID、DOB 等, 虽然可以在一定程度上抑制扰动对快速反射镜的影响, 但是效果不明显, 而且其对高频噪声的放大作用会导致系统的稳态性能受到影响。本文提出用 ARC 策略来抑制快速反射镜的外部扰动, 实验结果表明, 静态条件下, 加入 ARC 对于系统的控制精度影响不大, 但是加入 DOB 以后, DOB 对高频噪声的放大作用影响了系统的控制精度。在振动条件下, 加入 DOB 和 ARC 对系统的抗扰能力都有提升, 但是 ARC 对于系统抗扰能力的提升效果更明显, 且不会放大高频噪声。

参 考 文 献

[1] Sweeney M N, Rynkowski G A, Ketabchi M, *et al.* Design considerations for fast-steering mirrors (FSMs)[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4773: 63-73.

[2] Xu X H, Yang H B, Wang B, *et al.* Research on key technology of fast-steering mirror [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10): 1095-1103.
徐新行, 杨洪波, 王兵, 等. 快速反射镜关键技术研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1095-1103.

[3] Wan M, Zhang J R, Nie W J, *et al.* Precise pointing system using fast steering mirror [J]. Laser & Infrared, 1999, 29(3): 145-147.
万敏, 张家如, 聂文杰, 等. 快速倾斜反射镜精跟踪系统[J]. 激光与红外, 1999, 29(3): 145-147.

[4] Csencsics E, Schitter G. System design and control of

- a resonant fast steering mirror for lissajous-based scanning[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(5): 1963-1972.
- [5] Chen N H, Potsaid B, Wen J T, *et al.* Modeling and control of a fast steering mirror in imaging applications[C]//2010 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, August 21-24, 2010, Toronto, ON, USA. New York: IEEE, 2010: 27-32.
- [6] Portillo A A, Ortiz G G, Racho C. Fine pointing control for optical communications[C]//2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 01TH8542), March 10-17, 2001, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE, 2001: 1541-1550.
- [7] Ding K, Huang Y M, Ma J G, *et al.* Error adaptive feedforward composite control of fast-steering-mirror [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38 (7): 0705007.
丁科, 黄永梅, 马佳光, 等. 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制 [J]. 中国激光, 2011, 38 (7): 0705007.
- [8] Teng Y J, Song Y S, Tong S F, *et al.* Acquisition performance of laser communication system based on airship platform[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (6): 0606005.
滕云杰, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 基于飞艇平台激光通信系统的捕获性能研究[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0606005.
- [9] Ding K, Huang Y M, Ma J G, *et al.* Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19 (9): 1991-1998.
丁科, 黄永梅, 马佳光, 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.
- [10] Liu H Q, Ma H M, Yan D J, *et al.* Image motion detection for space camera [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 080006.
刘海秋, 马慧敏, 闫得杰, 等. 空间相机像移探测方法的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56 (8): 080006.
- [11] Zhao J T, Jin G S, Gao X H. Fuzzy adaptive PID control algorithm based on fast steering mirror[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(6): 756-761.
赵继庭, 金刚石, 高旭辉. 基于快速反射镜的模糊自适应 PID 控制算法研究[J]. 激光与红外, 2018, 48 (6): 756-761.
- [12] Kempf C J, Kobayashi S. Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(5): 513-526.
- [13] Yao B, Tomizuka M. Adaptive robust control of a class of multivariable nonlinear systems[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1996, 29(1): 2732-2737.
- [14] Lee Y, Gong J Q, Yao B, *et al.* Fuzzy adaptive robust control of a class of nonlinear systems[C]//2001 American Control Conference (Cat. No. 01CH37148), June 25-27, 2001, Arlington, VA, USA. New York: IEEE, 2001: 4040-4045.
- [15] Yao B, Xu L. Adaptive robust motion control of linear motors for precision manufacturing [J]. Mechatronics, 2002, 12(4): 595-616.
- [16] Ma J G. The basic technologies of the acquisition, tracking and pointing systems[J]. Opto-Electronic Engineering, 1989, 16(3): 1-42.
马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989, 16(3): 1-42.