

DOI: 10.12086/oe.2018.170704

大口径压电倾斜镜模型辨识与控制

黄林海^{1,2*}, 凡木文^{1,2}, 周睿^{1,2}, 张浩田^{1,2},
黄奎^{1,2}, 胡诗杰^{1,2}, 罗曦^{1,2}, 李新阳^{1,2}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

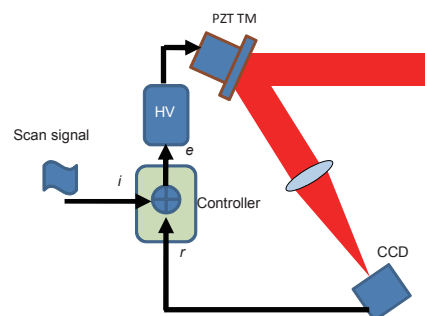
摘要: 本文提出了一种基于随机梯度优化算法的倾斜镜模型辨识方法, 实现对大口径压电倾斜镜的复杂频率响应规律的辨识与控制带宽提高。文章介绍了压电倾斜镜原理和数学模型, 描述了随机梯度优化算法在模型辨识的应用过程, 并通过实验验证的方式检验了算法辨识模型的准确性以及在提高系统控制带宽方面的能力; 最后, 利用随机梯度下降算法本文还开展了对抖动输入频谱的辨识, 结合倾斜镜模型的辨识结果, 获得了对特定频谱区域更高抑制能力的控制效果。

关键词: 倾斜镜; 结构谐振; 压电陶瓷; 大口径

中图分类号: TH74

文献标志码: A

引用格式: 黄林海, 凡木文, 周睿, 等. 大口径压电倾斜镜模型辨识与控制[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170704



System identification and control for large aperture fast-steering mirror driven by PZT

Huang Linhai^{1,2*}, Fan Muwen^{1,2}, Zhou Rui^{1,2}, Zhang Haotian^{1,2},

Huang Kui^{1,2}, Hu Shijie^{1,2}, Luo Xi^{1,2}, Li Xinyang^{1,2}

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract: Novel system identification for large aperture fast-steering mirror (FSM) is presented in this paper. Using the stochastic parallel gradient descent method (SPGD), the new system identification method is able to identify the complex piezoelectric fast-steering mirror (PZT-FSM) model exactly and greatly improve the correction effect. The principle and mathematical model of the PZT-FSM are stated briefly in the paper firstly. Then the use process of the SPGD algorithm in the system identification for the large aperture PZT-FSM is presented. By using the identified model, the validity and feasibility of the proposed approach is confirmed by our close-loop experiments. To expand the usage of the new method, the input jitter spectrum is also identified using the similar method, which enables us to get a higher correction effect for the special frequency region.

Keywords: fast steering mirror; structural resonance; PZT; large aperture

Citation: Huang L H, Fan M W, Zhou R, *et al.* System identification and control for large aperture fast-steering mirror driven by PZT[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170704

收稿日期: 2017-12-21; 收到修改稿日期: 2018-02-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11643008)

作者简介: 黄林海(1980-), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学技术的研究。E-mail: hlhai@ioe.ac.cn

1 引言

压电式(压电)快速反射镜具备上数百赫兹甚至更高的谐振频率和更高的执行精度,被广泛地应用于快速光轴控制系统中,提高了激光通讯、天文成像和生物医学成像等系统的探测精度。随着望远镜口径的不断增大,一方面,望远镜系统对光轴控制精度的要求在不断提高,系统期望倾斜镜能对更高频率的抖动进行抑制;另一方面,望远镜系统期望使用更大口径的快速反射镜,从而减少系统光路的复杂性,提高系统的光能利用率。

然而,口径越大,倾斜镜自身的第一阶谐振频率越低,如果不采用必要的倾斜镜谐振抑制方法,倾斜镜系统是无法正常工作的,这一点国内外相关学者已经开展了许多的研究^[1-4]。文献研究结果表明,通过对倾斜镜的谐振控制,可以获得更高的控制带宽。其中,文献[1]和[2]的主要针对音圈电机倾斜镜实现谐振抑制,而文献[3-4]则是针对压电倾斜镜实现的谐振抑制。

不同于上述通过抑制谐振提高控制带宽,文献[5-10]等则通过采用自适应滤波控制方法提高控制带宽,并且该方法实现了对特定谐振频率的高抑制控制效果。文献研究结果表明,通过采用自适应滤波控制算法,可以实现对输入谐振信号的高效抑制,控制效果明显优于传统的PID控制方法。

上述两种提高控制带宽的解决思路虽然存在差异,但是两种方法却存在一个共同的问题,即对控制对象模型的辨识。对第一种解决思路而言,只有准确的模型辨识才能实现倾斜镜谐振的抑制,对应于第二种解决思路,准确的模型辨识是控制方法工作的前提。文献[2]研究结果表明,控制对象模型辨识准确与否不仅决定了系统控制效果的好坏,也是系统能否稳定工作的重要条件,因此,准确的控制对象模型辨识是提高控制带宽的关键。

与小口径倾斜镜和基于音圈电机的倾斜镜不同,大口径压电倾斜镜具有更多的机械谐振峰,并且谐振峰之间高频段通常存在多个相互关联谐振频率,因而具有更为复杂的谐振分布曲线,传统的低阶系统模型拟合辨识方法,如Levy等提出的模型辨识算法,难以获得准确的系统模型^[11-14]。本文采用多个双二阶滤波器,利用随机梯度优化算法确定优化多个双二阶滤波器的系统,从而准确获取大口径压电倾斜镜对象模型。

2 压电倾斜镜的机械谐振原理及数学模型

压电倾斜镜与音圈电机等倾斜镜结构相似,一般由底座、镜面、压电驱动器和镜架组成。压电倾斜镜可以等效为支撑在一个弹性结构上的刚体^[3]。这个弹性系统存在多个谐振模式,但对倾斜镜控制稳定性影响最大的是机械谐振频率最低的一个,其谐振圆频率:

$$\omega = \frac{8\alpha}{D^2} \cdot \left(\frac{SL}{\theta h} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

其中: $\omega=2\pi f$,时间频率 f 的单位为赫兹。可以看出,谐振频率主要与镜面直径 D 、镜面厚度 h 、镜面的倾斜角 θ 、驱动器间距 L 、驱动器面积 S 以及所用材料的特性常数 α 等有关。从式(1)不难看到,镜面直径越大谐振频率越低,对控制稳定性和控制带宽的影响就很大。

文献[3]指出,在谐振频率处,倾斜镜的实际响应量比相应的控制信号放大或缩小很多,在频率响应特性上存在的每一对峰谷值,对应倾斜镜的一个机械谐振模式,式(1)仅分析了最低频率的谐振模式。对频率响应特性的测量和分析表明,倾斜镜的每一个机械谐振模式都可以近似看作一个双二阶振荡模型,第 k 个谐振模式的传递函数为

$$F_k(s) = \frac{s^2 + 2\varepsilon_{zk}\omega_{zk}s + \omega_{zk}^2}{s^2 + 2\varepsilon_{pk}\omega_{pk}s + \omega_{pk}^2}, \quad (2)$$

其中: $k=1,2,\dots,L$, $s=j\omega$ 是Laplace算子, ε_{zk} 、 ε_{pk} 分别是传递函数零点和极点的振荡因子, ω_{zk} 、 ω_{pk} 分别是传递函数零点和极点的振荡圆频率,其对应机械谐振的峰谷值频率。振荡因子越小,机械谐振峰谷值越大,式(2)分母二次项的极小值对应谐振峰值;分子二次项的极小值对应谐振谷值。整个倾斜镜的振荡特性是各个振荡模式的综合效果:

$$F_{FSM}(s) = F_1(s)F_2(s)\dots F_M(s), \quad (3)$$

其中: M 是谐振模式的个数。由此要准确地建立压电倾斜镜模型实质上就是找到最优的系统模型参数,对此采用了在无波前自适应光学系统中常用的随机梯度优化算法(stochastic parallel gradient descent, SPGD)。

3 随机梯度下降算法

SPGD算法是一种广泛应用于无波前传感自适应

光学技术的盲优化算法,其在激光相干合成、激光光束净化中校正光束像差的能力,已经被大量的理论和实验验证^[15-17]。

SPGD 算法使用的关键是找到合适的性能指标 J ,而后对该性能指标 J 进行优化。在压电倾斜镜的模型识别工作中, J 被定义为计算模型与实测模型之差的均方根值:

$$J = J(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\omega}), \quad (4)$$

其中: $\boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N\}$ 是传递函数零点和极点的振荡因子, $\boldsymbol{\omega} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N\}$ 是传递函数零点和极点的振荡圆频率, $N=2M$ 。基于 SPGD 算法的压电倾斜镜模型辨识迭代步骤可表示为

1) 生成一组微小扰动系数

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon} = \{\Delta \varepsilon_1, \Delta \varepsilon_2, \dots, \Delta \varepsilon_N\}$$

和

$$\Delta \boldsymbol{\omega} = \{\Delta \omega_1, \Delta \omega_2, \dots, \Delta \omega_N\}。$$

其中:

$$\begin{aligned} |\Delta \varepsilon_1| &= |\Delta \varepsilon_2| = \dots = |\Delta \varepsilon_N|, \\ |\Delta \omega_1| &= |\Delta \omega_2| = \dots = |\Delta \omega_N|. \end{aligned}$$

2) 将 $\boldsymbol{\varepsilon}_+ = \boldsymbol{\varepsilon} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{\omega}_+ = \boldsymbol{\omega} + \Delta \boldsymbol{\omega}$ 用式(3)生成新的压电倾斜镜模型,而后利用生成的模型评估出不同频率位置系统的响应效果,并与真实测量的系统响应作差,得到性能指标 $J_+ = J_+(\boldsymbol{\varepsilon}_+, \boldsymbol{\omega}_+)$;再利用 $\boldsymbol{\varepsilon}_- = \boldsymbol{\varepsilon} - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{\omega}_- = \boldsymbol{\omega} - \Delta \boldsymbol{\omega}$ 得到性能指标 $J_- = J_-(\boldsymbol{\varepsilon}_-, \boldsymbol{\omega}_-)$ 。

3) 更新模型参数:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon} &= \boldsymbol{\varepsilon} + \gamma_\varepsilon \Delta \boldsymbol{\varepsilon} (J_+ - J_-), \\ \boldsymbol{\omega} &= \boldsymbol{\omega} + \gamma_\omega \Delta \boldsymbol{\omega} (J_+ - J_-), \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $\gamma_\varepsilon = \{\gamma_{\varepsilon_1}, \gamma_{\varepsilon_2}, \dots, \gamma_{\varepsilon_N}\}$ 和 $\gamma_\omega = \{\gamma_{\omega_1}, \gamma_{\omega_2}, \dots, \gamma_{\omega_N}\}$ 是算法增益。

将更新后的 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{\omega}$ 生成新的压电倾斜镜模型并与实测模型作差,得到新的性能指标 J 。

4 实例与分析

下面以一个口径为 250 mm 的压电倾斜镜为例,检验上述方法的有效性。该压电倾斜镜由中国科学院光电技术研究所研制完成,为保证镜面在高速摆动过程中的面型,采用了一个口径为 250 mm × 30 mm 的实心镜面,以保证系统的刚性。

为了准确辨识压电倾斜镜模型,需要准确获得压电倾斜镜对各个不同频率的实际响应,值得注意的是这个实际响应不仅包括压电倾斜镜本身,还包括高压驱动器、探测器曝光延时和处理机的计算延时等各个部分对不同输入频率的响应。因此,首先建立倾斜镜

的系统光路,如图 1 所示,入射光经压电倾斜镜后聚焦于高速 CCD 上,控制器通过记录并计算 CCD 上光斑质心位置获得当前输入光束的实际光轴方向。与其他文献中采用两个倾斜镜(一个作为输入扰动源,另一个作为被测对象)的检测方法不同,我们的检测方法中只采用了单一的检测镜,该镜同时作为扰动镜和检测镜,减少了一面扰动镜,一方面减少了系统的复杂性,便于在实际光路中使用;另一方面,也减少了另一面大口径压电快反镜谐振位置对被测镜的测量影响。

为了获得被测压电倾斜镜对不同频率的响应,需

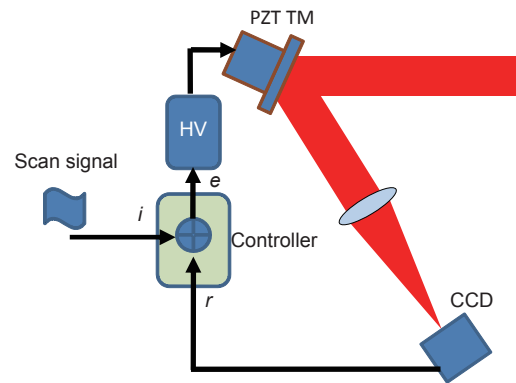


图 1 用于辨识压电倾斜镜系统模型光路结构示意图
Fig. 1 Optical structure for piezoelectric fast-steering mirror system identification

要将正弦扫频信号 i (幅度相同频率逐渐增加)直接输入到高压放大器(high voltage amplifier, HV)中,这时候控制器的输出 $e=i$, r 代表压电倾斜镜当前时刻的实际响应。

将系统的实际响应信号 r 做频谱变换,可以获得压电倾斜镜以及相应系统对不同输入频率的实际响应。如图 2 所示,该倾斜镜的一阶谐振峰在接近 300 Hz 的位置,而后在 500 Hz 和 700 Hz 附近存在多个复杂谐振峰。

与文献[3]实际测量得到的倾斜镜响应曲线相比,新的压电倾斜镜在口径加大(从 140 mm 口径增加为 250 mm)条件下,一阶谐振峰位置反而往后增加,从原来的 250 Hz 位置后移至接近 300 Hz 的位置,这对简单 PI 控制带宽的提高是有利的。然而,响应曲线的分布较先前镜子复杂,特别是 500 Hz 之后的结构,没有明显的双二阶振荡模型结构,无法直接通过拟合的方式给出系统的模型。

利用 SPGD 算法,对实测压电倾斜镜响应曲线进行辨识,分别设定了倾斜镜的谐振阶次为 7 和 9,即式(3)的 $M=7$ 和 9。其中,设定阶次为 7 是根据实测曲

线中存在明显的 7 个拐点确定的；阶次 9 的设定是因为模型中存在额外的两个隐性拐点，这两个隐性拐点被上述的 7 个显性拐点打破而无法明显的观察到。

为了加快 SPGD 的收敛速度，将参数中的振荡圆频率 ω 参数的初始值设定为实测曲线中的峰谷值对应的频率，从图 2 可以看到，将 ω 设定在 7 个拐点的峰谷位置，同时设定隐性拐点的初始值为零。

经过 1000 次的迭代，给出了两个不同阶次辨识获得的模型的频率响应曲线，如图 3 所示，与实测曲线

相比，两种阶数所辨识获得的模型的频率响应曲线与实测曲线均具有很高的-致性，但是 9 阶次模型具有更高的模型精度，无论是曲线的整体分布或是局部的细节分布(如插图中 500 Hz 到 700 Hz 附近复杂曲线分布)。同时，观察辨识后的结果如表 1 所示，各个零极点并不完全与曲线中的峰值吻合，特别是 500 Hz 后的辨识结果，与实测相应曲线的峰谷点所对应的频率并不一致，并且部分零极点无法通过直接观测曲线中的峰谷点进行确定，如序号为 3 的零极点。因此，辨识

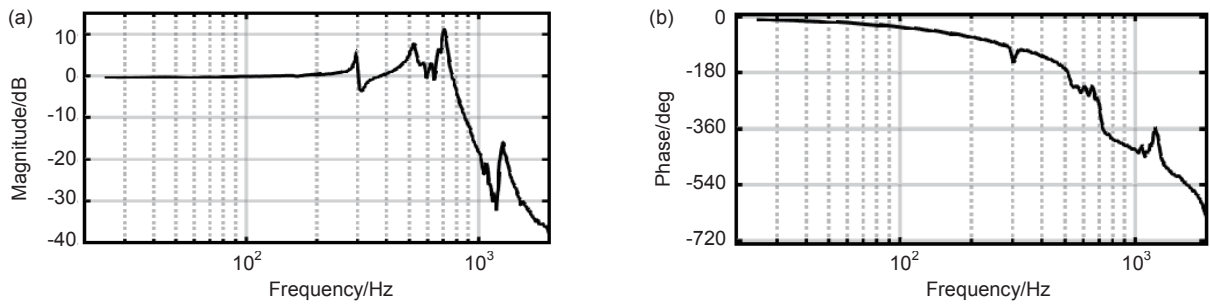


图 2 250 mm 口径压电倾斜镜系统对不同频率的响应曲线
Fig. 2 Frequency response of piezoelectric fast-steering mirror with a 250 mm aperture

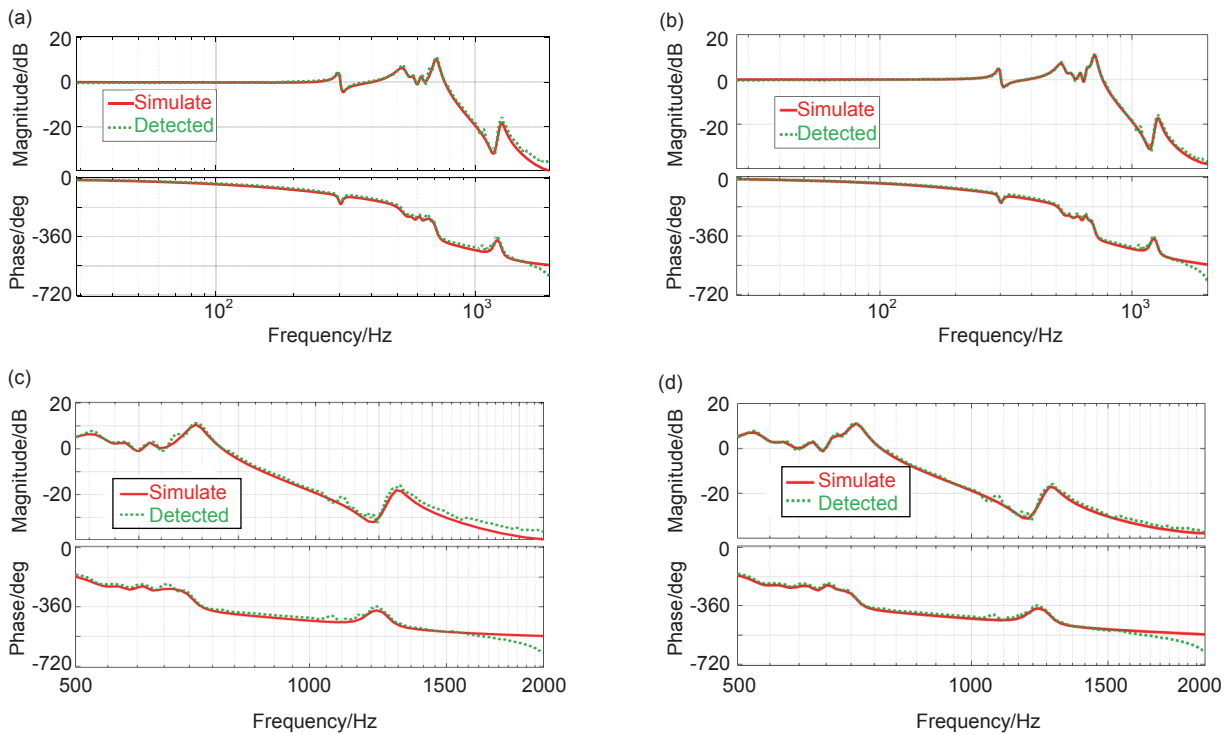


图 3 辨识模型与实测模型对不同频率的响应曲线。(a) 7 阶模型辨识结果；(b) 9 阶模型辨识结果；(c) 7 阶模型辨识局部细节；(d) 9 阶模型辨识局部细节

Fig. 3 Frequency responses of identified model and detected models. (a) Identification of a 7th order model; (b) Identification of a 9th order model; (c) Local detail for the 7th order identification; (d) Local detail for the 9th order identification

表 1 9 阶参数模型辨识结果

Table 1 Identification results for the 9th order model

序号	极点频率	零点频率	极点振荡因子	零点振荡因子
1	1261.6	2243.2	0.021	0.384
2	715.2	1337.4	0.192	0.464
3	710.0	1186.8	0.020	0.030
4	661.6	664.5	0.018	0.055
5	625.9	649.3	0.019	0.117
6	576.2	643.2	0.021	0.023
7	528.2	577	0.822	0.047
8	527.6	577	0.046	0.063
9	298.6	304	0.016	0.020

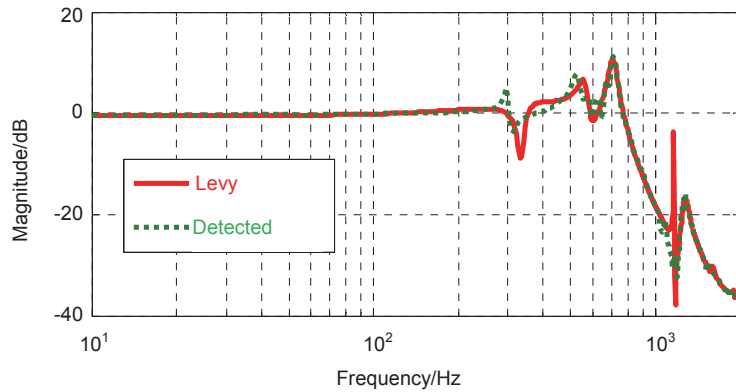


图 4 同样阶次条件下利用 Levy 方法辨识结果

Fig. 4 Identification result using Levy method with the same identified

的结果表明，利用 SPGD 算法，不仅可以解耦各个谐振点之间的耦合关系，还可以确定出额外的隐性谐振点，从而准确地表述出系统。迭代结束后，7 阶和 9 阶辨识模型的最终性能指标 J 分别为 0.62 和 0.55。作为对比，还给出了利用 Levy 方法辨识的结果，如图 4 所示，可以看到，Levy 方法无法针对文章中的复杂模型进行准确的辨识，即使辨识采用的阶次继续增加，辨识结果并没有明显的改善。

为了检验辨识的模型的准确性，进行了两个验证性实验，其一验证辨识模型的消谐振能力，其二，检验辨识模型对系统带宽的提高能力。首先，我们检验辨识获得的模型对压电倾斜镜的谐振消谐振效果。将辨识的模型求逆，获得该压电倾斜镜的消谐振模型，如果辨识的模型足够准确，那么将消谐振模型作为控制器，应该可以获得接近理想响应的系统响应曲线。将消谐振器加入到控制器中，利用消谐振器对输出到

高压放大器的信号 e 进行滤波，而后将滤波后的信号输出到高压放大器，实测结果如图 5 所示。可以看到，加入消谐振器后，系统响应接近纯时延响应系统，系统响应中幅值部分已经接近理想响应，在 2000 Hz 的范围内，曲线幅值的差异已经控制在 ± 2 dB 范围内，相位方面，由于消谐振器是无法直接进行相位消谐振，因此，系统仍然随频率增加存在明显的延时滞后，消谐振后的压电倾斜镜系统可以简单地视为一个惯性纯延时系统，便于后续的各种先进控制。

利用消谐振后的时延系统，比较了消谐振前后的压电倾斜镜闭环控制效果，此时，控制器的输出 $e=i-r$ ，观测消谐振前后系统的输出响应。图 6 给出的是消谐振前后，系统控制带宽的实测结果。可以看到，消谐振后，原有压电倾斜镜的误差带宽获得明显的提高，在相同超调量条件下，闭环误差带宽从原来的 105 Hz 提高到接近 210 Hz。

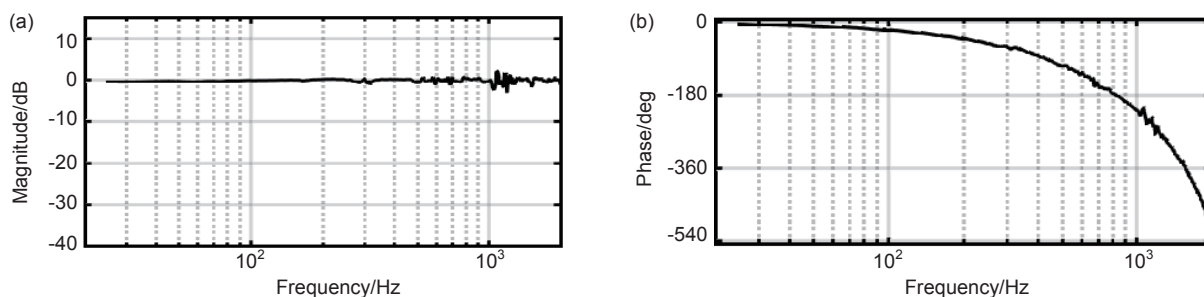


图 5 250 mm 压电倾斜镜系统中消谐振后, 系统的实测响应曲线

Fig. 5 Actual detected frequency response after resonant depression for the 250 mm piezoelectric fast-steering mirror

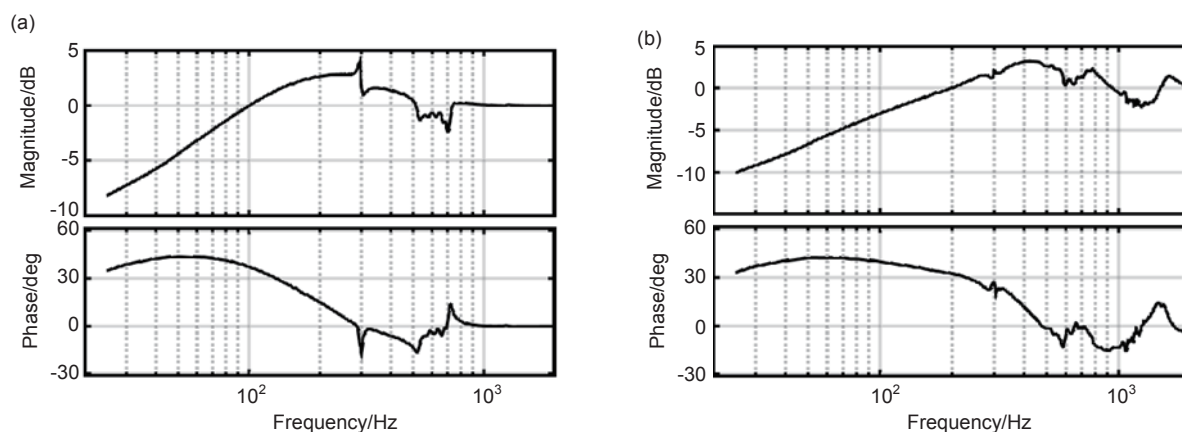


图 6 消谐振前后闭环误差控制曲线。(a) 未消谐振闭环误差曲线; (b) 消谐振后闭环误差曲线

Fig. 6 Close loop of the FSM before and after resonant depression. (a) Close loop of the FSM without resonant depression; (b) Close loop of the FSM with resonant depression

这种提升的原因是, 去除 PZT 倾斜镜的谐振点将原来在压电倾斜镜谐振频率附近及其后续的闭环误差收益进行了重新分配, 将其集中到 200 Hz 以内, 从而在 200 Hz 范围内获得更佳的闭环误差收益。我们通过观测图 2 和图 5 在 100 Hz 位置的相位延时可以检验上述的分析, 消谐振前相位延时为 32° , 消谐振后相位延时下降为 $180^\circ - 156.6^\circ = 23.4^\circ$, 消谐振后的响应曲线在 200 Hz 以前具有较小的相位延时, 因而总体闭环带宽明显提高。

值得注意的是, 我们还发现消谐振后的误差控制曲线在 500 Hz 至 700 Hz 附近起伏较大, 这说明辨识曲线参数离散化后在实际运用时仍然存在一定的误差, 但是这种误差的起伏量并不影响系统闭环的稳定性以及闭环误差带宽, 因此没有必要再通过增加辨识模型的阶次减少误差曲线的起伏量。

利用消谐振前后的控制曲线, 仿真对比了两者对

抖动的校正能力。将这两个控制器分别对同一组实测光束抖动进行抑制, 抖动抑制前后光斑质心分布见图 7 和图 8。

图 7 给出的是输入抖动时间分布曲线, 图 8 给出的是消谐振前后抖动抑制残差随时间的分布曲线。输入抖动幅度的 RMS 值为 $11.6 \mu\text{rad}$, 经过未消谐振的抖动校正后, 输出残差 RMS 值仍然有 $7.9 \mu\text{rad}$; 然而, 经过消谐振后的抖动校正后, 残余抖动幅值的 RMS 值下降 $3.5 \mu\text{rad}$, 抖动幅度得到明显抑制。

从控制后的频谱分布图 9 可以看到, 未经过消谐振的控制方法在 80 Hz 以后基本没有明显的收益, 并在 100 Hz 以后对输入频谱起放大作用; 而经过消谐振后的校正方法, 在 100 Hz~200 Hz 位置仍然有明显的收益, 并且只对 300 Hz 以后的频谱分布有放大作用。图 9(b)则给出了两种控制方法的频谱积分曲线, 经过消谐振后的控制方法明显优于未消谐振的控制方法。

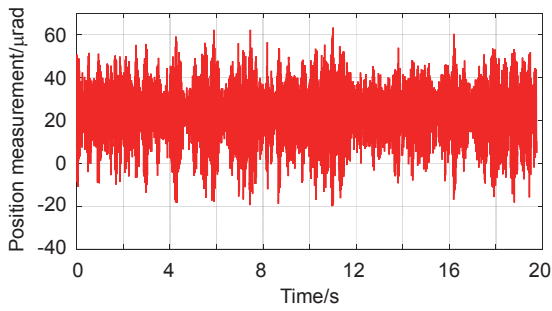


图7 输入测试抖动随时间的变化曲线
Fig. 7 The curl of input jitter against time

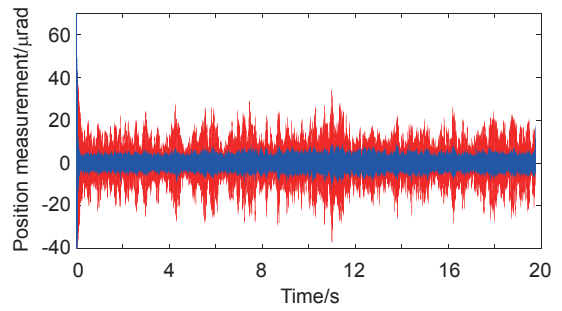


图8 消谐振前后倾斜镜校正残差分布
Fig. 8 Residual jitter error with and without resonant depression

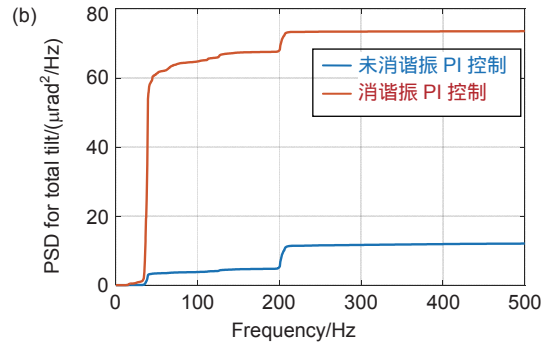
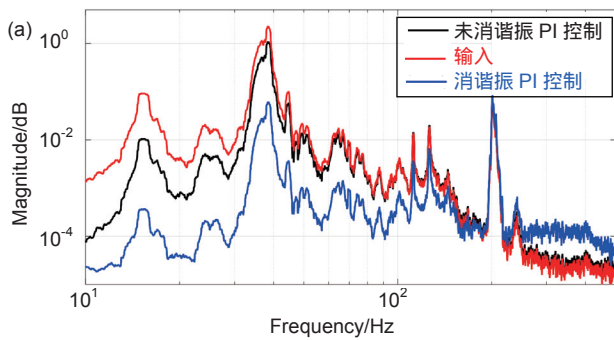


图9 (a) 输入抖动频谱分布和校正后残余抖动频谱分布; (b) 积分功率谱曲线
Fig. 9 (a) Power spectrums of input jitter and residual jitter error; (b) Power spectrum integral of (a)

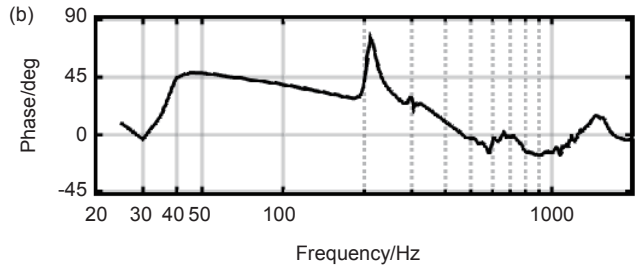
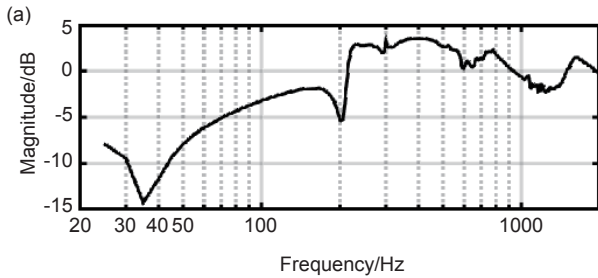


图10 含输入抖动频谱成分的系统误差控制曲线
Fig. 10 The close loop of the FSM considering input jitter spectrum

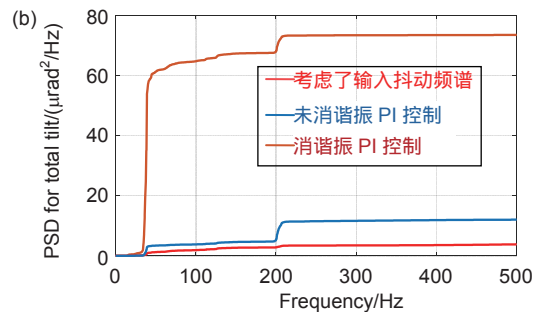
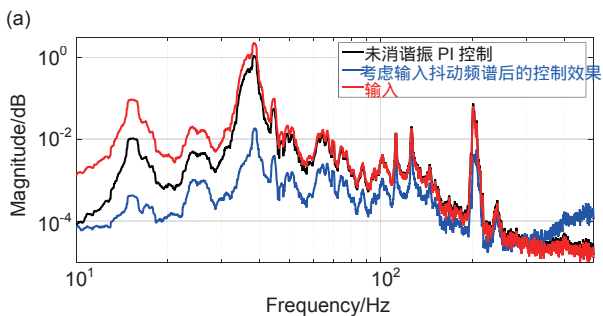


图11 将入射抖动频谱进行辨识后结合 PZT 倾斜镜模型进行抖动抑制效果。(a) 输入抖动频谱分布和校正后残余抖动频谱分布; (b) 积分功率谱曲线

Fig. 11 The effect of jitter control combining identification of PZT-FSM and input jitter spectrum. (a) Power spectrum of input jitter and residual jitter error; (b) Corresponding power spectrum integral of (a)

从校正结果还发现,虽然经过对 PZT 倾斜镜谐振点的抑制,我们获得了明显的控制效果,但是,在 35 Hz 和 200 Hz 位置校正后残余像差仍然较大,特别是 200 Hz 位置,还存在一定程度的放大,为了提高光斑抖动抑制效果,需要进一步针对 35 Hz 和 200 Hz 的抖动进行控制。

既然输入的光斑抖动也是由于某些机械部件引起的,这种抖动也应该可以采用双二阶振荡模型进行拟合,结合前面已经实现的对 PZT 倾斜镜模型的辨识,我们重新构建出新的系统误差控制曲线,如图 10 所示。新的频谱抑制曲线在 35 Hz 和 200 Hz 位置加强了对抖动的抑制,其中 200 Hz 点的抑制能力提高到 5 dB。利用新构建的抖动控制器,对同样的输入光束抖动进行抑制,抑制后的抖动幅度进一步下降,如图 11(b) 所示,35 Hz 和 200 Hz 的抖动被明显的抑制,输出光束的抖动残差 RMS 进一步下降为 2.3 μ rad。

5 小结

利用 SPGD 算法,准确辨识了大口径压电倾斜镜系统模型,并利用辨识模型实现的谐振消除和闭环误差带宽提升工作,实验结果验证了基于 SPGD 算法的系统辨识的准确性。准确的辨识出 PZT 倾斜镜的模型后,对于使用自适应滤波控制,LQG(linear quadratic gaussian)控制也十分有意义,通过与各种先进控制方法相结合,可以实现对特定谐振频率点在线辨识与校正,这些工作将在后续的工作中进一步开展研究。

参考文献

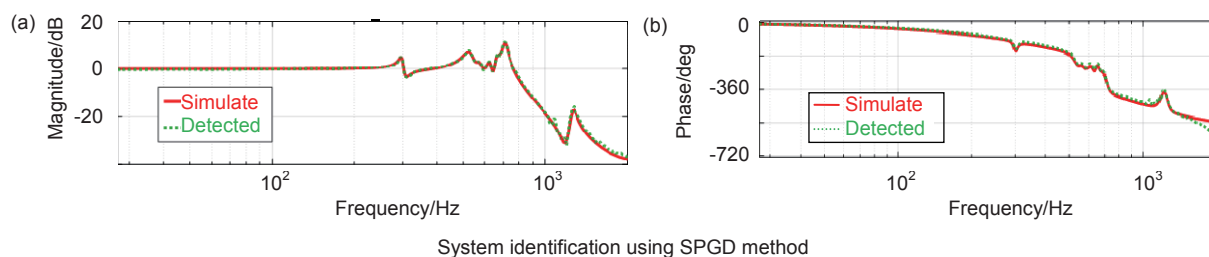
- [1] Wu Q Y, Wang Q, Peng Q, et al. Wide bandwidth control of fast-steering mirror driven by voice coil motor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(8): 15–18.
吴琼雁, 王强, 彭起, 等. 音圈电机驱动的快速控制反射镜高带宽控制[J]. *光电工程*, 2004, **31**(8): 15–18.
- [2] Zhou Q K, Ben-Tzvi P, Fan D P, et al. Design of Fast Steering Mirror systems for precision laser beams steering[C]//*International Workshop on Robotic and Sensors Environments*, 2008: 144–149.
- [3] Li X Y, Ling N, Chen D H, et al. Stable control of the fast steering mirror in adaptive optics system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(1): 31–36.
李新阳, 凌宁, 陈东红, 等. 自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(1): 31–36.
- [4] Li X Y, Jiang W H. Effective bandwidth analysis of adaptive optics control system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1697–1702.
李新阳, 姜文汉. 自适应光学控制系统的有效带宽分析[J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1697–1702.
- [5] 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.
- [6] Monirabbasi S, Gibson S. Adaptive control in an adaptive optics experiment[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science, and Vision*, 2010, **27**(11): A84–A96.
- [7] Kim B S, Gibson S, Tsao T C. Adaptive control of a tilt mirror for laser beam steering[C]//*Proceedings of the 2004 American Control Conference*, 2004, **4**: 3417–3421.
- [8] Wang Q, Chen K, Fu C Y. Method for controlling fast-steering mirror driven by voice coil motor based on the closed-loop performance[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(2): 9–11, 18.
王强, 陈科, 付承毓. 基于闭环特性的音圈电机驱动快速反射镜控制[J]. *光电工程*, 2005, **32**(2): 9–11, 18.
- [9] Kim J J, Nagashima M, Agrawal B N. Optical beam jitter control for the NPS HEL beam control testbed[R]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School Monterey CA, 2011.
- [10] Watkins R J, Chen H J, Agrawal B N, et al. Optical beam jitter control[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5338**: 204–213.
- [11] Shi J J, Yao B D, Lu J G. Modeling and transfer function identification of FSM system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(10): 2748–2752.
时晶晶, 姚佰栋, 鲁加国. 高速倾斜镜建模与传递函数辨识[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(10): 2748–2752.
- [12] Hu H J, Ma J G, Wang Q, et al. Transfer function identification in a fast steering mirror system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(7): 1–3, 10.
胡浩军, 马佳光, 王强, 等. 快速控制反射镜系统中的传递函数辨识[J]. *光电工程*, 2005, **32**(7): 1–3, 10.
- [13] Fan M W, Huang L H, Li M, et al. High-voltage drive and control for piezoelectric fast steering mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(10): 2803–2809.
凡木文, 黄林海, 李梅, 等. 压电倾斜镜的高压驱动及高速控制[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(10): 2803–2809.
- [14] Fan M W, Huang L H, Li M, et al. High-bandwidth control of piezoelectric steering mirror for suppression of laser beam jitter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(2): 024209.
凡木文, 黄林海, 李梅, 等. 抑制光束抖动的压电倾斜镜高带宽控制[J]. *物理学报*, 2016, **65**(2): 024209.
- [15] Geng C, Tan Y, Mu J B, et al. Experimental research of tip/tilt control of a multi-channel fiber-laser array[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(2): 024206.
耿超, 谭毅, 牟进博, 等. 多单元光纤激光阵列的倾斜控制实验研究[J]. *物理学报*, 2013, **62**(2): 024206.
- [16] Zheng Y, Shen F. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for coherent combining[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, **7156**: 71563C.
- [17] Zheng Y, Shen F. Research on phase-locking technique for 2-channels fiber laser coherent beam combination based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(3): 631–635.
郑轶, 沈锋. 基于随机并行梯度下降算法的两路光纤激光相干合成锁相控制技术的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 631–635.

System identification and control for large aperture fast-steering mirror driven by PZT

Huang Linhai^{1,2*}, Fan Muwen^{1,2}, Zhou Rui^{1,2}, Zhang Haotian^{1,2},
Huang Kui^{1,2}, Hu Shijie^{1,2}, Luo Xi^{1,2}, Li Xinyang^{1,2}

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China



Overview: Fast steering mirror driven by piezoelectric material has been used widely for control of opto-axis stabilization. The system identification for such fast steering mirror is very important. It has decided whether we are able to reach the mirror's full correction potential. However, the system identification is difficult for mirror with large aperture, because we found that the larger aperture, the more complex of the mirror responding.

Novel system identification method based on the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is presented for the large aperture fast-steering mirror (FSM). The proposed method can identify the complicated frequency response of the large aperture FSM accurately and improve the correcting effect of the system. The principle and mathematical model of the piezoelectric fast-steering mirror (PZT-FSM) are stated briefly in the paper firstly. Then the use process of the SPGD algorithm in the system identification for the large aperture PZT-FSM is presented. A PZT-FSM with the diameter of 250 mm is taken as an example to test the effectiveness of the proposed method. Compared with the actual frequency response curves, the frequency response curves of the two kinds of models identified by different order (7th-order and 9th-order) are consistent with the actual curves. Especially for the 9th-order identified model, both the overall distribution of the curves and the local details are highly consistent with the actual curves. As a contrast, the results using the Levy method for identification are also presented. Levy method cannot accurately identify complex models. Even if the order of identification is increased, there is no significant improvement in performance.

In order to verify the accuracy of the identified model, we conduct two confirmatory experiments. First, we explore the resonance elimination of PZT-FSM by the identified model. After the resonance elimination, the frequency response is close to the frequency response of a pure-delay system. The amplitude response of the system is close to the ideal case, and the fluctuation of the amplitude response is within ± 2 dB in the range of 0 Hz to 2000 Hz. The closed-loop control effects of PZT-FSM before and after the resonance elimination are presented in the next section, where we found that the error bandwidth of the PZT-FSM has been significantly improved after the resonance elimination. Under the same condition of overshoot, the closed-loop error bandwidth increases from 105 Hz to 210 Hz. We compared the correction capability of beam jitter before and after the resonance elimination. After the correction without resonance elimination, the root mean square (RMS) of the jitter amplitude declined from 11.6 μrad to 7.9 μrad . However, after the resonance elimination and correction, the RMS of the jitter amplitude decreased to 3.5 μrad . The experimental results show that the proposed method can not only eliminate the resonance, but also improve the closed-loop error bandwidth.

To expand the usage of the new method, the input jitter spectrum is also identified using the similar method, which enables us to get a higher correction effect for the special frequency region. Accurate model identification for the large aperture FSM is also meaningful to advanced control methods, such as LQG control and adaptive filters control method. Through the combination of these advanced control methods, on-line identification and correction of specific resonance frequency can be realized.

Citation: Huang L H, Fan M W, Zhou R, *et al.* System identification and control for large aperture fast-steering mirror driven by PZT[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170704

Supported by National Natural Science Foundation of China (11643008)

* E-mail: hlhai@ioe.ac.cn