

压电式快速反射镜系统建模与传递函数辨识

陆金磊¹, 姜晓明², 王 军¹

(1. 南京理工大学 先进发射协同创新中心, 江苏 南京 210094; 2. 上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要:为在高精度跟瞄系统中对压电式快速反射镜(PFSM)实现稳定、精确的控制,构建了PFSM系统的传递函数模型,并结合实测的PFSM系统幅频和相频响应特性,使用非线性最小二乘曲线拟合法,针对不同频率特性进行分段拟合,得到了精确的PFSM系统传递函数。与实测结果相比,在中低频段,幅度辨识误差在0.1 dB以内,相位辨识误差小于1°。由此设计的双二阶滤波器和经典比例积分(PI)相结合的控制算法有效降低了机械谐振的影响,使系统的幅值裕度提高了10.94 dB,相位裕度提高了47.2°,开环截止频率提高了181 Hz。结果表明:通过理论推导建立的PFSM模型是合理的,辨识方法具有可行性,且精度很高,为PFSM系统的复杂控制器设计提供了依据。

关键词:压电式快速反射镜; 建模; 传递函数辨识; 最小二乘法; 双二阶滤波器

中图分类号:V 556

文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.01.017

Modeling and Transfer Function Identification of Piezoelectric Fast Steering Mirror System

LU Jinlei¹, JIANG Xiaoming², WANG Jun¹

(1. Advanced Launching Cooperative Innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 2. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The piezoelectric fast steering mirror (PFSM) is widely used in the high precision tracking system. In order to ensure that the PFSM system can work more stably and precisely, the transfer function model is deduced. Combined with actual measured data of PFSM's amplitude frequency response characteristics and phase frequency response characteristics, the exact transfer function of the PFSM system is obtained by carrying out piecewise fitting for different frequency characteristics which uses the nonlinear least square curve fitting method. Compared with the actual measured result, the error of the transfer function obtained by identification is less than 0.1 dB in magnitude and 1° in phase within the low and intermediate frequency. The dual two-order filter assisted PI control algorithm which is designed based on the identified transfer function effectively eliminates the mechanical resonance. The amplitude margin of the PFSM system is increased by 10.94 dB, the phase margin is increased by 47.2°, and the open loop cut-off frequency is increased by 181 Hz with the designed control algorithm. The results show that the PFSM model established by theoretical deduction is reasonable, and the identification method is feasible and highly accurate, providing the basis for the design of the complex controller of the PFSM system.

Keywords: piezoelectric fast steering mirror; modeling; transfer function identification; least square method; dual two-order filter

收稿日期:2018-04-11;修回日期:2018-05-16

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2011CB00000);国家自然科学基金(50875132, 60573172);国家高技术研究发展计划(2011AA06Z228);江苏省青年基金(BK20140792);南京理工大学自由探索基金(30915011336)。

作者简介:陆金磊(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为复合轴系统控制。

通信作者:王 军(1980—),男,博士,主要研究方向为精密伺服控制、随机控制和满意待机控制。

0 引言

压电式快速反射镜(PFSM)采用压电叠堆作为驱动器^[1],具有体积小、响应快、精度高、动态性能好等优点,在自适应光学^[2]、图像稳定系统^[3-4]、目标跟踪系统^[5-6]、生物医学系统^[7]等领域具有广泛的应用前景。本文将 PFSM 应用在光电精密跟踪系统中,将其作为复合轴子系统的执行机构,主要用于校正机架主系统的随机误差。为稳定跟踪目标,光电跟踪系统的精度需要达到微弧度级,这对 PFSM 的控制精度提出了很高要求。对于控制设计者来说,如何获得被控对象的精准数学模型极为关键。

目前,常用的传递函数参数辨识方法主要包括时域阶跃响应法和频域频率响应法。蔡莺等^[8]采用阶跃响应法对摆式倾斜仪传递函数进行了辨识,该方法测试方便,但只能将系统近似为低阶系统,精度较差。在频率响应辨识法中,常用的有曲线直接辨识和函数拟合辨识。刘金星等^[9]结合测量得到的伺服系统开环 Bode 图和自动控制原理,通过理论计算直接得出 PFSM 系统的传递函数,该方法较为简单直观,但误差较大。黄海波等^[10]采用最小二乘法辨识出复合轴精跟踪系统的传递函数,该方法操作方便,辨识精度较高。

本文根据压电叠堆材料的特性和反射镜的运动机理,构建了 PFSM 系统传递函数模型,并结合实测的 PFSM 系统幅频和相频响应特性,使用非线性最小二乘曲线拟合法,选定合适的迭代初值,针对不同频率特性进行分段拟合,得到了精确的 PFSM 系统传递函数,为控制器设计奠定了基础。

1 PFSM 系统建模

PFSM 系统主要由控制器、模数和数模(AD&DA)转换模块、功率驱动模块、PFSM 和电阻应变片传感器构成,如图 1 所示。图中:电阻应变片传感器检测到压电叠堆的位移量电压信号,依次经过滤波器、传感器放大模块和 AD 转换模块输入到控制器。电阻应变片传感器模块的传递函数可用一个比例环节描述;功率驱动模块采用线性功率运放直接驱动,具有很好的线性特性,其传递函数也可用一个比例环节描述;在忽略频率混叠效应后,AD 转换的传递函数为 $1/T$, T 为采样周期;DA 转换可被看作一个零阶保持器,其传递函数为 $(1 - e^{-Ts})/s$ 。在后续的辨识过程中,可人为去除 AD&DA 过程对

结果的影响。因此,在分析中,可不考虑 AD&DA 环节。



图 1 PFSM 系统控制框图

Fig. 1 Block diagram of PFSM system control

以下根据 PFSM 的运行机理,构建其传递函数模型。文中的 PFSM 采用 Physik Instrumente 公司的 S340 偏转头,该偏转头由四压电叠堆驱动。当电压施加在压电叠堆上时,压电叠堆产生逆压电效应,每对压电叠堆形成推拉运动,驱动镜面转动。图 2 为四压电叠堆的反射镜俯视图。图中: A, B, C, D 分别为 4 个压电叠堆,沿圆周呈 90° 垂直分布;镜面中心与致动器和反射镜接触点的距离为 r ; BD 轴为俯仰轴; AC 轴为方位轴; θ_a 为方位角; θ_p 为俯仰角。设压电叠堆的传递函数为 $G_1(s)$, PFSM 机械运动的传递函数为 $G_2(s)$,则 PFSM 的传递函数可表示为

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) \quad (1)$$

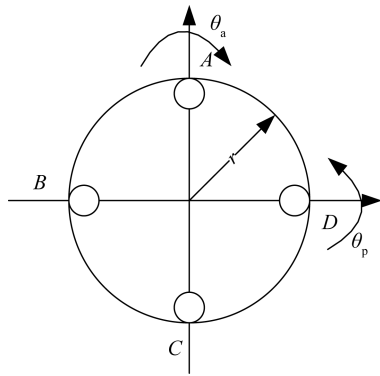


图 2 四压电叠堆的反射镜

Fig. 2 Fast steering mirror driven by four piezoelectric stacks

压电叠堆是将单个晶片做得很薄,然后将数百片叠加起来,从而实现机械上的串联和电路中的并联。可以将压电叠堆等效成一个电容来进行分析,如图 3 所示。

图中: t 为时间; $u_{in}(t)$ 为电源电压; $u_{out}(t)$ 为施加在压电叠堆上的电压; R 为电源的输出电阻; c 为压电叠堆的等效电容。根据基尔霍夫电压定律可得

$$u_{in}(t) = Rc \frac{du_{out}(t)}{dt} + u_{out}(t) \quad (2)$$

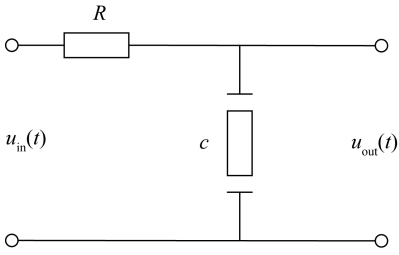


图 3 压电叠堆等效模型

Fig. 3 Equivalent model of piezoelectric stack

对式(2)进行拉普拉斯变化,设初始条件为 0, 可得

$$U_{in}(s) = RcsU_{out}(s) + U_{out}(s) \quad (3)$$

令 $\tau = Rc$ 为时间常数,则压电叠堆的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (4)$$

根据压电叠堆运动特性,建立机构简化模型,如图 4 所示。

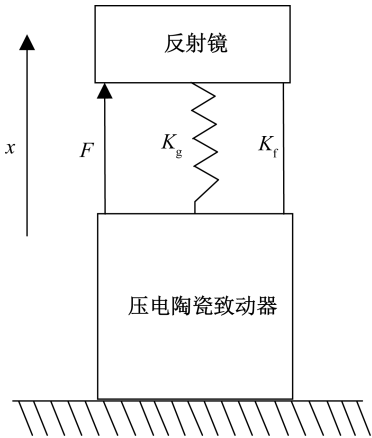


图 4 机构简化模型

Fig. 4 Simplified model of mechanism

图中: F 为压电叠堆输出驱动力; K_f 为阻尼系数; K_g 为连接刚度; x 为压电叠堆变形量。设反射镜质量为 m ,则压电叠堆机械运动的数学模型可用微分方程描述为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -K_g x - K_f \frac{dx}{dt} + F \quad (5)$$

根据压电叠堆的变形特性,压电叠堆输出驱动力 F 与压电叠堆变形量 x 之间的关系为

$$F = K_p (au_o(t) - x) \quad (6)$$

式中: K_p 为压电叠堆等效刚度系数; a 为待定系数。

将式(6)代入式(5),整理得

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -(K_g + K_p)x - K_f \frac{dx}{dt} + K_p au_o(t) \quad (7)$$

对式(7)进行拉普拉斯变换,设初始条件为 0, 则得到 PFSM 机械运动传递函数为

$$G_2(s) = \frac{aK_p}{ms^2 + K_f s + (K_g + K_p)} \quad (8)$$

结合式(4),(8),可得 PFSM 传递函数为

$$G_{PFSM}(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{aK_p}{(\tau s + 1)[ms^2 + K_f s + (K_g + K_p)]} \quad (9)$$

由式(9)可见,PFSM 的传递函数为一个惯性环节和一个二阶振荡环节(也可能是过阻尼的)的串联,可表示为

$$G_{IPFSM}(s) = \frac{a_0}{b_0 s^2 + b_1 s + 1} \cdot \frac{1}{b_2 s + 1} \quad (10)$$

式中: $a_0, b_i (i=0,1,2)$ 即为要辨识的参数。因功率放大环节和电阻应变片传感器的传递函数都可被看作比例环节,故这 2 个比例环节的系数也可包含在参数 a_0, b_i 中。事实上,由于 PFSM 的机械刚度有限,因此系统的开环特性往往在高频段附加一个或多个如式(11)所示的双二阶的机械谐振环节^[11],

$$G_{resons}(s) = \frac{b_3 s^2 + b_4 s + 1}{b_5 s^2 + b_6 s + 1} \quad (11)$$

式中: $b_i (i=3,4,5,6)$ 即为要辨识的参数。根据以上分析,PFSM 系统的开环传递函数可被看作式(10)和一个或多个式(11)的串联。

2 PFSM 系统数学模型辨识

使用动态信号分析仪,产生的线性扫频信号为

$$u_i = A \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{k}{2} t \right) t \right] \quad (12)$$

式中: A 为振幅; f_0 为初始频率; k 为频率随时间增加的斜率。用此信号,可以获得 PFSM 系统的频率特性,如图 5 所示。

由幅频特性曲线可知,PFSM 系统的传递函数可能为一个惯性环节、一个二阶振荡环节和一个双二阶环节的串联,这也符合之前的模型分析。因系统传递函数包含的参数较多,故在多维空间进行参数搜索很困难。机械谐振往往出现在高频段,由于主函数的衰减作用,因此 PFSM 系统的幅频特性已在 -30 dB 水平,转换为绝对值,约为 10^{-2} 的量级。若将传递函数模型以绝对值表示,则式(11)对幅频

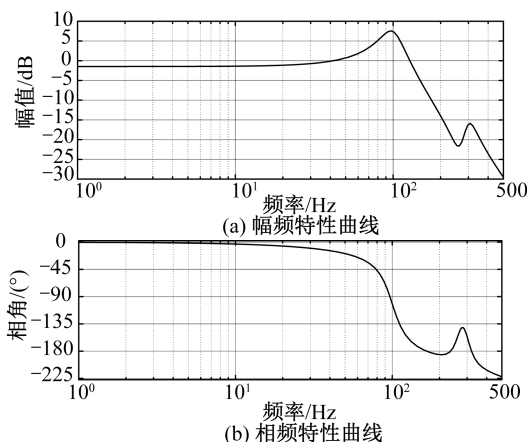


图5 PFSM系统开环传递函数的频率特性

Fig. 5 Frequency characteristics of open loop transfer function of PFSM system

特性曲线的影响极小。因此,在辨识过程中,将PFSM系统的传递函数分为式(10)和式(11)两部分,先以式(10)拟合,得到拟合结果后,从测量得到的频率特性中提出式(10),再以式(11)拟合。

由于实测的PFSM系统开环传递函数的频率特性是非线性的,因而使用非线性最小二乘法辨识参数,用幅频模型进行拟合,以相频特性辅助进行结果检验。Matlab的Curve Fit工具箱提供了丰富的曲线拟合功能。将幅频特性以绝对值表示,导入工具箱,同时提供函数模型为式(9)的幅频模型,即

$$M(f) = \frac{a_0}{\sqrt{[1 - b_0(2\pi f)^2]^2 + (2\pi f b_1)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f b_2)^2}} \quad (13)$$

在Curve Fit里使用非线性最小二乘法进行曲线拟合,同时选择鲁棒性为最小残差法,置信区间为使系数限制有效。非线性最小二乘法需要提供参数初始值,若初始值选择不当,则容易使误差函数陷入局部极小值,不能给出期望的拟合效果。使用Matlab的单输入单输出(SISO)工具,根据传递函数模型选择零极点,构造出一个频率特性与实测的PFSM系统频率特性相接近的传递函数,然后将选择的零极点作为拟合的初始值,从而有效避开局部极小值的影响。式(13)中,将 a_0, b_0, b_1, b_2 的初始值分别设定为 $1, 1 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-4}$,并限定各参数最小值为0。拟合出的4个参数的值分别为 $0.856, 2.539 \times 10^{-6}, 5.388 \times 10^{-4}, 3.788 \times 10^{-4}$ 。

拟合出的主传递函数与实测传递函数的频率特

性的对比结果如图6所示。根据上述分析,从图6中剔除主传递函数的频率特性,以相同方法拟合机械谐振环节的传递函数。式(11)中,将 b_3, b_4, b_5, b_6 的初始值分别设定为 $2 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-4}$,并限定各参数最小值为0,拟合出的4个参数的值分别为 $3.610 \times 10^{-7}, 1.221 \times 10^{-4}, 2.825 \times 10^{-7}, 1.081 \times 10^{-4}$ 。机械谐振环节幅频特性的拟合情况如图7所示。

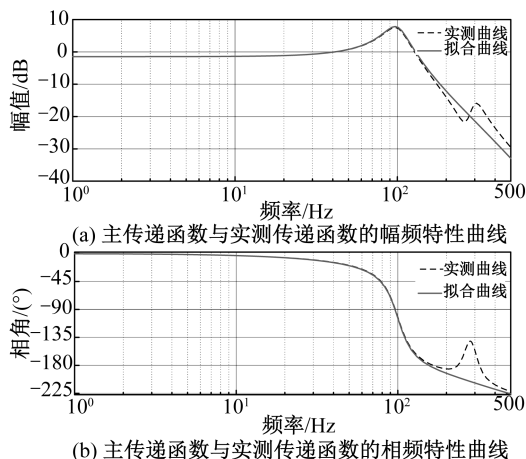


图6 主传递函数与实测传递函数的频率特性对比

Fig. 6 Comparison of frequency characteristics between main transfer function and measured transfer function

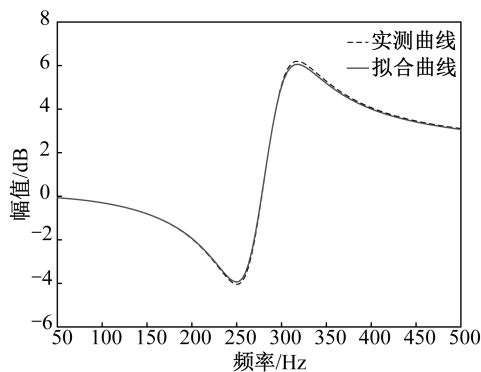


图7 机械谐振环节幅频特性拟合情况

Fig. 7 Fitting of amplitude frequency characteristics of mechanical resonance

综合上述拟合参数,可得出PFSM系统实测频率特性与拟合得到的传递函数频率特性的对比结果,如图8所示。由图可见:经过参数辨识的PFSM系统传递函数幅频和相频特性曲线与实测曲线吻合度很高。实测频率特性与辨识频率特性之间的误差如图9所示。由图可见:在低频段(小于150 Hz),

幅频误差小于 0.1 dB,相频误差小于 1°;在高频段,幅频误差约为 0.3 dB,相频误差最大为 3°。这一方面是由于系统在高频段对一些小噪声比较敏感,另一方面是由于在辨识中忽略了高频段存在的一些小的机械谐振。不过,拟合误差都在可接受范围内。

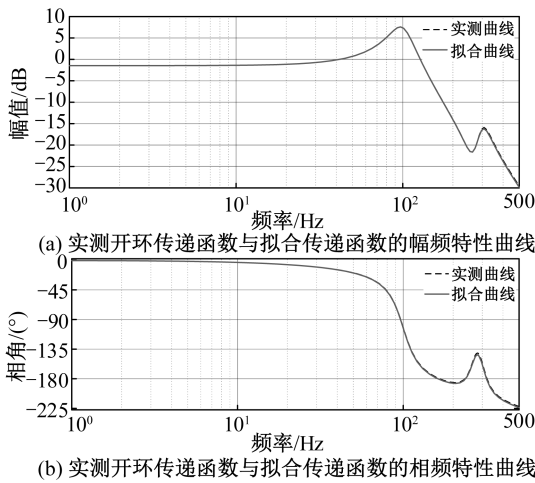


图 8 PFSM 系统开环传递函数与拟合频率特性

Fig. 8 PFSM system's frequency characteristics of open loop transfer function and fitting transfer function

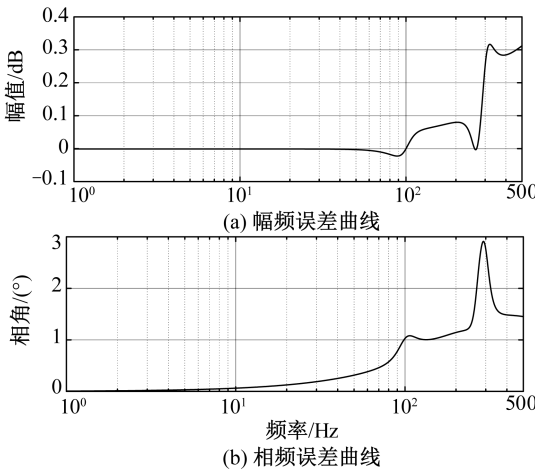


图 9 PFSM 系统开环传递函数与拟合频率特性之间的误差

Fig. 9 PFSM system's frequency characteristic errors between open loop transfer function and fitting transfer function

3 PFSM 系统传递函数辨识在实际控制系统中的应用

针对以上分析,为检验辨识效果,设计补偿器为

$$C(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \frac{1}{G_{\text{resons}}(s)} \times \frac{b_0 s^2 + b_1 s + 1}{0.0004s + 1} \quad (14)$$

则系统开环传递函数变为

$$G_{\text{ol}}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \times \frac{0.8455}{(0.0004s + 1)(b_2 s + 1)} G_{\text{AD}}(s) \quad (15)$$

式中: $G_{\text{AD}}(s) = (1 - e^{-Ts})/(Ts)$, T 为采样时间; K_P, T_I 分别为需要调节的 PI 控制器参数。采样时间 T 为 0.0002 s,在仿真时将 $G_{\text{AD}}(s)$ 进行 Pade 线性化。用式(15)补偿一个惯性环节,其目的是保证补偿器 $C(s)$ 的分母阶数不小于分子阶数,使之符合因果性。当系统跟踪如下正弦信号时,即

$$x(t) = 12.5 \sin(10\pi t) \quad (16)$$

调节 PI 参数,令 $K_P = 1.411, T_I = 1/2073$,此时 PFSM 系统输出曲线如图 10 所示,其误差曲线如图 11 所示。由图可见:对于振幅为 12.5 mrad,频率为 5 Hz 的正弦目标,其跟踪误差最终稳定在 0.25 mrad 以内。

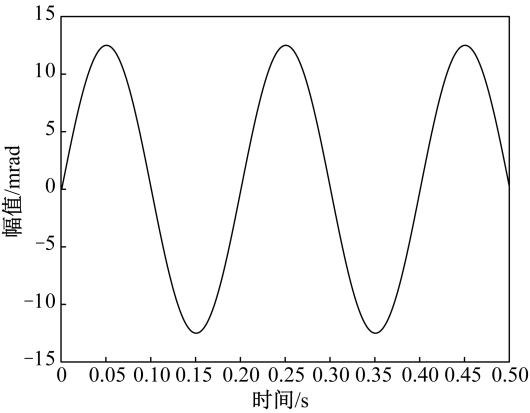


图 10 校正后的 PFSM 系统输出曲线

Fig. 10 Output curve of corrected PFSM system

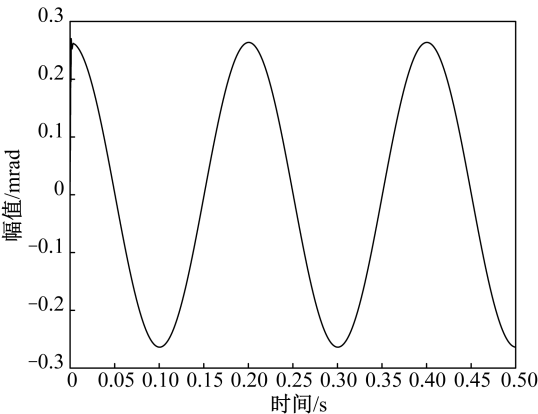


图 11 校正后的 PFSM 系统输出误差曲线

Fig. 11 Output error curve of corrected PFSM system

对于校正后的 PFSM 系统,其开环频率特性如

图12所示。此时,系统的幅值裕度为15.9 dB,相位裕度为 61.6° ,开环截止频率为308 Hz。如果未对PFMS系统进行校正,则其开环频率特性如图13所示。此时,系统的幅值裕度为4.96 dB,相位裕度为 14.4° ,开环截止频率为127 Hz,300 Hz处的机械谐振环节会导致该频率附近的误差和噪声放大,降低系统性能。通过双二阶滤波器和经典PI算法,系统的幅值裕度提高了10.94 dB,相位裕度提高了 47.2° ,开环截止频率提高了181 Hz。

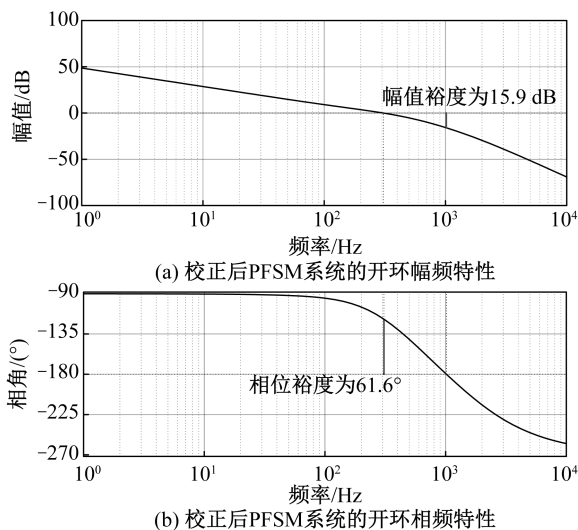


图12 校正后PFMS系统的开环特性

Fig. 12 Open loop characteristics of corrected PFMS system

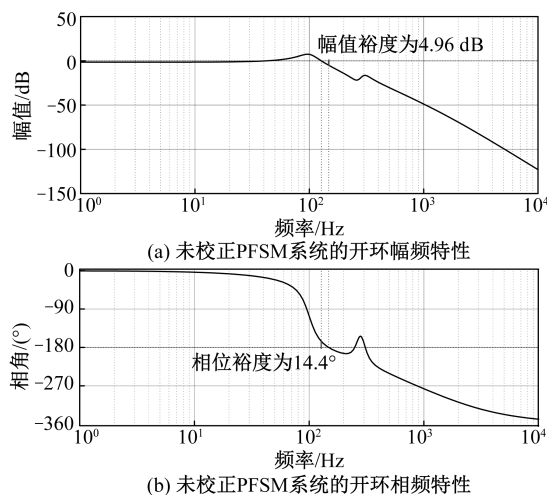


图13 未校正PFMS系统的开环特性

Fig. 13 Open loop characteristics of uncorrected PFMS system

4 结束语

本文根据压电叠堆材料的特性和反射镜的运动机理,构建了PFMS系统传递函数模型,并结合实测的PFMS系统幅频和相频响应特性,应用非线性

最小二乘曲线拟合法,通过Matlab SISO工具箱放置开环零点,从而选定合适的迭代初值,针对不同频率特性进行分段拟合,得到了精确的PFMS系统传递函数。通过实测传递函数与拟合传递函数的对比,验证了PFMS系统传递函数模型的合理性。由此设计的双二阶滤波器和经典PI相结合的控制算法有效降低了机械谐振的影响,拓宽了控制系统的闭环带宽。通过辨识建立的精确的PFMS系统传递函数,为高性能的光电跟踪系统提供了控制器设计依据。

参考文献

- [1] KURIHARA K, HIDA M, UMEMIYA S, et al. Rotating symmetrical piezoelectric microactuators for magnetic head drives[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(9): 7471-7474.
- [2] WATKINS R J, CHEN H J, AGRAWAL B N, et al. Optical beam jitter control[C]// Proceedings of SPIE. [S.l.]: SPIE, 2004: 204-213.
- [3] 向思桦,陈四海,吴鑫,等.基于新型压电驱动器的快速扫描反射镜[J].中国激光,2009,36(增刊1): 208-212.
- [4] CHEN N, POTSAID B, WEN J T, et al. Modeling and control of a fast steering mirror in imaging applications[C]// IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. Toronto: IEEE, 2010: 27-32.
- [5] LI N, PAN W, YAN L, et al. Analysis of nonlinear dynamics and detecting messages embedded in chaotic carriers using sample entropy algorithm[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(8): 2018-2024.
- [6] 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): 154-161.
- [7] WASSOM S R. Low-cost large-angle steering mirror development[C]// Advances in Optomechanics. San Diego: SPIE, 2009: 74240L1-74240L12.
- [8] 蔡骞,周云耀,吕永清,等.摆式倾斜仪传递函数的识别与仿真研究[J].测绘地理信息,2013,38(1): 60-62.
- [9] 刘金星,李洪文,年朋,等.伺服系统传递函数的全数字测量方法[J].电子测量技术,2010,33(9): 8-10.
- [10] 黄海波,左韬,陈晶,等.复合轴精跟踪系统伺服带宽的优化设计[J].红外与激光工程,2012,41(6): 1561-1565.
- [11] 周辉,杨明冬,贾建军,等.压电驱动FSM的动态性能分析[J].科学技术与工程,2013,13(18): 5168-5171.

(本文编辑:李栋飏)