

## 基于概率统计的BK7玻璃磨削亚表层损伤深度在线预测技术

吕东喜, 陈明达, 姚友强, 赵岳, 祝颖丹

### 引用本文:

吕东喜, 陈明达, 姚友强, 等. 基于概率统计的BK7玻璃磨削亚表层损伤深度在线预测技术[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 102–109.

L Dong-xi, CHEN Ming-da, YAO You-qiang, et al. Prediction of subsurface damage depth in grinding of BK7 glass based on probability statistics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 102–109.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202801.0102>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 反复印压作用下光学玻璃的微裂纹交互作用

Interactive effects of micro-cracks in optical glass under multi-indentation tests

*光学精密工程*. 2019, 27(3): 594–601 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192703.0594>

### 光学硬脆材料固结磨料研磨中的亚表面损伤预测

Subsurface damage prediction for optical Hard-brittle material in fixed abrasive lapping

*光学精密工程*. 2017, 25(2): 367–374 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172402.0367>

### 石英玻璃的热辅助高效塑性域干磨削

Heat-assisted high efficiency ductile dry grinding of fused silica

*光学精密工程*. 2016, 24(1): 83–93 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162401.0083>

### 碳化硅陶瓷的超声振动辅助磨削

Ultrasonic assisted grinding for silicon carbide

*光学精密工程*. 2015, 23(8): 2229–2235 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152308.2229>

### 超声辅助磨削硬脆材料芯棒直径预测模型

Prediction model of core rod diameter of hard and brittle material processed by ultrasonic assisted grinding

*光学精密工程*. 2017, 25(8): 2106–2112 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172508.2106>

文章编号 1004-924X(2020)01-0090-13

# 大行程快速反射镜的结构设计及带宽特性

陈国真, 徐斯强, 刘品宽\*, 丁 汉

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:**为了解决音圈电机驱动的快速反射镜在大行程运动中电机动子和定子碰撞的问题,设计了新型的快速反射镜柔性机构,即采用柔性解耦机构来消除电机动子的横向位移。针对快速反射镜在大行程运动中由于力-位移的非线性特性而导致的共振频率随位置而变化的问题,设计了变值陷波滤波器来消除随位置变化而改变的共振模式的影响,并通过比例积分控制器实现闭环控制。与常值陷波滤波器相比,变值陷波滤波器的共振频率为快速反射镜运动位置的函数。通过有限元分析和实验比较了采用常值和变值陷波滤波器时快速反射镜的带宽性能。实验结果表明,采用常值陷波滤波器时,当系统的运动位置小于 15.2 mrad 时,快速反射镜沿  $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴的带宽分别在 95 Hz 和 110 Hz 左右;当系统运动到 18.2 mrad 时, $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴的带宽分别骤降为 47.92 Hz 和 57.1 Hz。采用变值陷波滤波器时,快速反射镜沿  $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴的带宽基本稳定在 95 Hz 和 110 Hz,说明了在运动行程较大的快速反射镜系统中设计变值陷波滤波器的必要性和有效性。

**关键词:**快速反射镜;音圈电机;柔性机构;大行程;陷波滤波器

中图分类号:TH74 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20202801.0090

## Structural design and bandwidth characteristic of a fast steering mirror with large travel range

CHEN Guo-zhen, XU Si-qiang, LIU Pin-kuan\*, DING Han

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

\* Corresponding author, E-mail: pkliu@sjtu.edu.cn

**Abstract:** For a Fast-Steering Mirror (FSM) driven by Voice Coil Motors (VCMs), the coil of the VCM touches the stator as the FSM achieves a broad range of motion. A novel FSM was developed to prevent the occurrence of undesired contact between the coil and stator. A compliant decoupling mechanism was designed to minimize the transverse displacement of the coil of the VCM. Moreover, for the FSM with a broad range of motion, the force-displacement relationship was nonlinear, which resulted in variable resonant frequencies at different motion positions. We developed a variable notch filter to eliminate the variable resonant modes, and a Proportional-Integral (PI) controller was designed to achieve closed-loop control. Compared to the fixed notch filter, the resonant frequencies of the variable notch filter were a function of the motion positions of the FSM. The bandwidth of the FSM was studied by finite-element analysis and experiments using fixed and variable notch filters. According to the experimental results, as a fixed notch filter was applied, the bandwidth of the FSM varied in dif-

收稿日期:2019-07-08;修订日期:2019-08-28.

基金项目:国家科学挑战计划资助项目(No. JCKY2016212A506-0105);国家重大专项(No. 2016ZX04002007)

ferent motion positions. When the motion position is less than 15.2 mrad, the bandwidths of the FSM along the  $\theta_x$  and  $\theta_y$  axes are approximately 95 Hz and 110 Hz, respectively; when the motion position is 18.2 mrad, the bandwidths of the  $\theta_x$  and  $\theta_y$  axes drop to 47.92 Hz and 57.1 Hz, respectively. As a variable notch filter is applied, the bandwidths of the FSM along the  $\theta_x$  and  $\theta_y$  axes are stable at 95 Hz and 110 Hz, respectively; this result illustrates the need and effectiveness of applying a variable notch filter in an FSM system with a broad range of motion.

**Key words:** fast steering mirror; voice coil motor; compliant mechanism; broad range of motion; notch filter

## 1 引 言

快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)是用于光源和目标之间用以改变光束指向的装置,广泛应用于成像系统、激光武器和空间光通信领域<sup>[1-4]</sup>。目前,基于柔性机构的 FSM 得到了广泛的研究,因为相比于刚性结构,柔性机构具有无摩擦、无装配间隙、运动精度高等优点<sup>[5]</sup>。

FSM 一般由音圈电机和压电陶瓷驱动<sup>[6-11]</sup>。相比于压电陶瓷,音圈电机可以实现毫米级的运动行程,基于音圈电机驱动的 FSM 可以实现更大的偏转角度。然而,传统机构中的音圈电机的动子会随着 FSM 的运动而发生相应的偏转,动子末端会有较大的横向位移。由于音圈电机的气隙较小(气隙和输出力成反比),当 FSM 行程较大时,动子末端会和定子碰撞<sup>[12]</sup>。因此,基于音圈电机驱动的 FSM 为了实现大行程运动,必须消除动子的横向位移。

对于运动控制系统,机构的共振模态会降低闭环系统的稳定裕度,从而限制了高增益反馈控制器的使用,因而影响了系统带宽的提高<sup>[13]</sup>。陷波滤波器是消除系统共振模态的有效方式,根据共振模态的频率和阻尼比即可设计相应的陷波滤波器<sup>[13-16]</sup>。为了补偿模型误差并提高抗干扰能力,采用比例积分(PI)控制器来实现闭环控制<sup>[16]</sup>。然而,当柔性机构的运动行程较大时,力-位移关系呈现出明显的非线性<sup>[17-18]</sup>。机构的刚度随运动位置的增加而增大,从而导致共振频率相应的增大。若采用常值陷波滤波器,即共振频率为常数,系统在不同位置处的带宽性能会有较大差异。因此,对于大行程运动的 FSM,采用常值陷波滤波器已不能有效地消除随位置而变化的共振模态的影响。

本文设计了基于音圈电机驱动的新型 FSM 来实现大行程运动,采用柔性解耦机构来消除电机动子的横向位移。采用变值陷波滤波器来消除随位置而变化的共振模态的影响,即将共振频率表示为 FSM 运动位置的函数,并配合 PI 控制器实现闭环控制。通过仿真分析和实验比较了采用常值和变值陷波滤波器时系统的带宽性能,验证了在运动行程较大的 FSM 系统中设计变值陷波滤波器的必要性和有效性。

## 2 结构设计

FSM 的结构设计如图 1 所示。FSM 由反射镜、4 个音圈电机、基座和柔性解耦机构组成。反射镜为椭圆,尺寸为  $\Phi 100 \times \Phi 70.7 \times 15$  mm(长径  $\times$  短径  $\times$  厚度)。柔性解耦机构由平动板、解耦板和转动板组成,如图 2 所示。FSM 由 4 个音圈电机驱动,每两个电机为一对(一个往上推,一个往下拉)驱动 FSM 来实现绕  $x(y)$  轴的转动。当 4 个音圈电机同时往上推或往下拉时,FSM 即可实现沿  $z$  轴的平动。平行四杆机构由 4 个平动板组

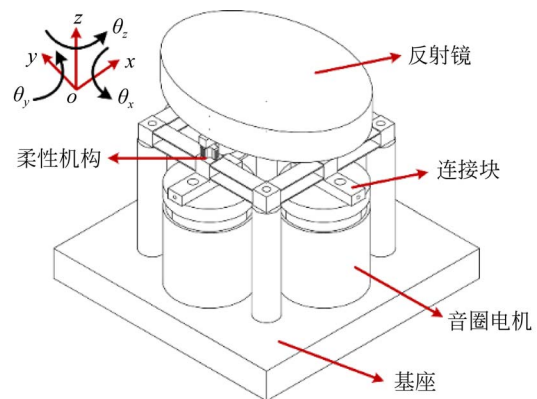


图 1 快速反射镜的机械结构

Fig. 1 Mechanical design of fast steering mirror

成,实现沿  $z$  轴的平动,同时约束其它自由度的运动。电机沿  $z$  轴的竖直运动通过转动板转化为 FSM 的旋转运动。解耦板可以实现绕  $x(y)$  轴的转动,电机动子的横向位移可转化为解耦板的转动。因此,通过柔性解耦机构可以消除电机动子的横向位移来实现 FSM 的大行程运动。

### 3 实验系统搭建

FSM 的柔性机构通过电火花线切割技术进

行加工,其结构参数如表 1 所示。为便于设计和加工,解耦板和转动板的结构参数相同。利用线性驱动器(LA-210s-02-RA, VREDAN, Inc.)驱动音圈电机(LVCA-038-038-01, MOTICONT, Inc.)来实现电机沿竖直方向的运动,音圈电机的性能参数如表 2 所示。采用光栅尺(CE300-40, MicroE, Inc.)来测量 FSM 的输出位移。光栅尺的分辨率为  $1 \mu\text{m}$ 。将 dSPACE-DS1103 作为控制器来实现 FSM 系统的运动控制。实验平台系统如图 3 所示。

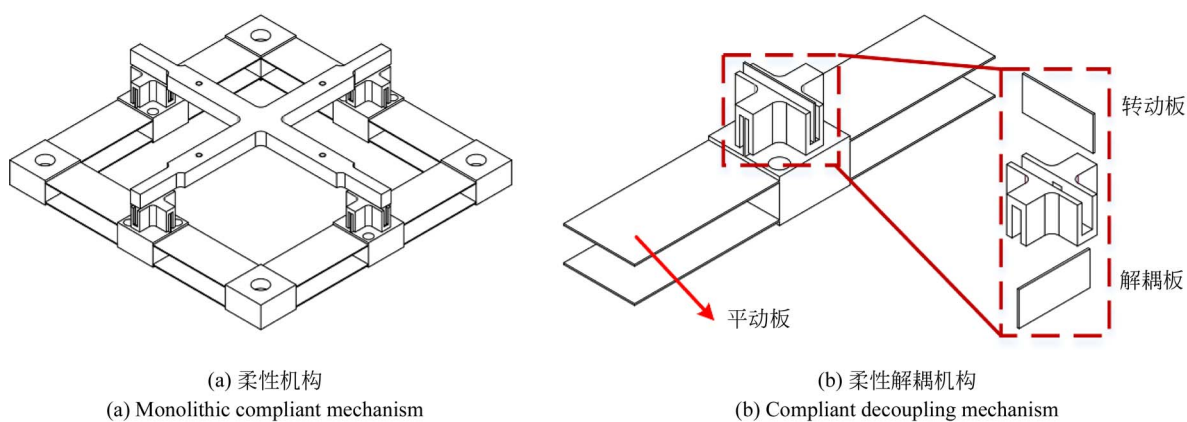


图 2 快速反射镜的柔性机构

Fig. 2 Compliant mechanism of fast steering mirror

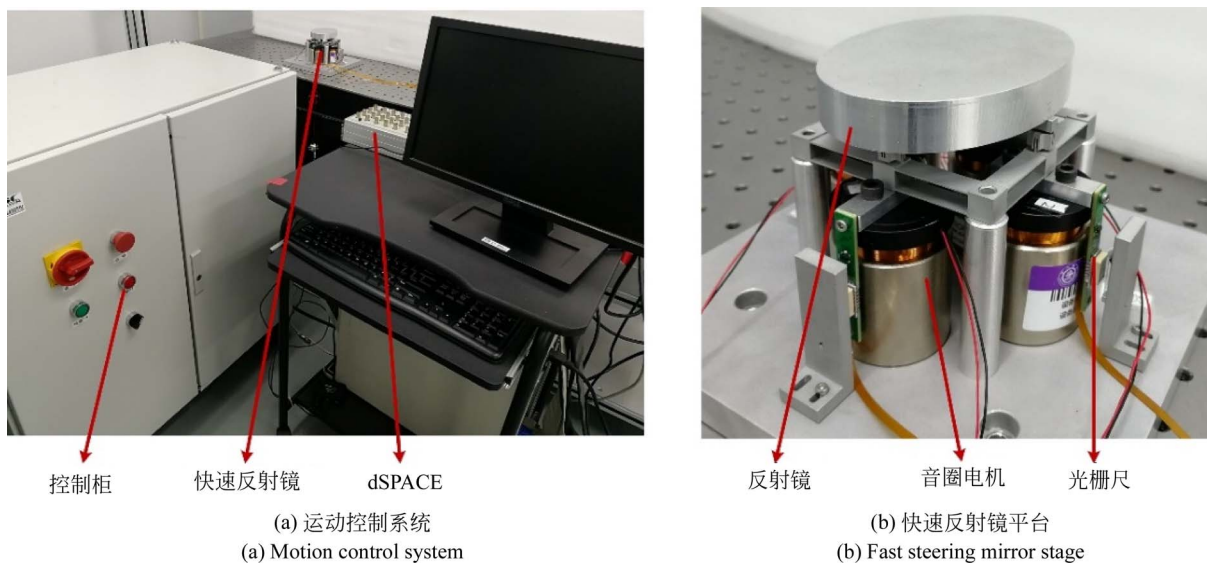


图 3 基于音圈电机驱动的快速反射镜实验平台搭建

Fig. 3 Experimental platform for fast steering mirror driven by voice coil motors

表1 柔性机构的结构参数

参数	$L_1$	$L_2$	$b_1$	$b_2$	$t_1$	$t_2$
数值	25	5	8	8	0.43	0.42

表1中, $L_1, L_2, b_1, b_2$ 和 $t_1, t_2$ 分别表示平动板和转动板(解耦板)的长度、宽度和厚度。

表2 音圈电机的性能参数

性能	力常数/ ( $\text{N} \cdot \text{A}^{-1}$ )	反电动势常数/ ( $\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	线圈质量/g	电阻/ $\Omega$	电感/mH
数值	10.1	10.1	54	10.1	3.7

## 4 控制器设计

FSM $\theta_x$ 和 $\theta_y$ 轴的控制器设计原理一样,因此,本节以 $\theta_x$ 轴为例进行阐述。首先,通过实验测试得到FSM在旋转运动时的力-位移关系。然后,针对FSM的旋转运动进行动力学建模,得到其开环传递函数。最后,计算得到FSM的共振模态与旋转角度的关系,并据此设计相应的变值陷波滤波器。

### 4.1 力-位移非线性特性

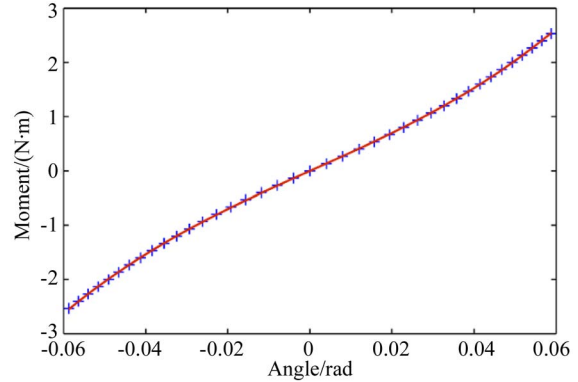
当柔性机构实现大行程运动时,其力-位移关系呈现出非线性特性。一般来说,随着位移的增大,柔性机构的刚度逐渐变大,从而导致系统的动力学模型发生变化。因此,要实现对大行程FSM的控制,必须得到其力-位移的非线性关系。经实验测试,FSM $\theta_x$ 轴的力-位移关系如图4所示。力和位移的关系可表示为:

$$M_x = 2.73 \times 10^3 \theta_x^3 - 0.82 \theta_x^2 + 33.91 \theta_x - 2.13 \times 10^{-3}, \quad (1)$$

对式(1)求导,即可得到旋转刚度和位移的关系,如下所示:

$$K_x = 8.19 \times 10^3 \theta_x^2 - 1.64 \theta_x + 33.91. \quad (2)$$

综上所述,FSM在大行程运动时,力-位移关系呈现明显的非线性,其旋转刚度随位移的增加而增大。

图4  $\theta_x$ 轴力-位移关系Fig.4 Force-displacement relationship of  $\theta_x$  axis

### 4.2 动力学建模

FSM的动力学方程可表示为:

$$2rk_i i(s) - K\theta(s) = s^2 J\theta(s), \quad (3)$$

其中: $r$ 和 $K$ 分别表示FSM的旋转半径和旋转刚度; $k_i$ 和 $i$ 分别表示音圈电机的力常数和电机电流; $J$ 和 $\theta$ 分别表示FSM的转动惯量和转动角度。

$$J = 2r^2(m_1 + m_2) + J_1, \quad (4)$$

其中: $m_1$ 和 $m_2$ 分别表示音圈电机动子和连接块的质量; $J_1$ 为FSM的转动惯量。

根据基尔霍夫定律,可以推导出音圈电机的电学模型得到:

$$U(s) = (R + Ls)i(s) + k_i r \theta(s), \quad (5)$$

其中: $U$ 表示音圈电机两端的电压; $R$ 和 $L$ 分别表示音圈电机的电阻和电感。

控制信号 $u$ 经dSPACE放大十倍后即为驱动器的输入信号,同时将Varedan驱动器近似为电流放大环节,即可得到dSPACE控制指令 $u$ 和音圈电机两端电压 $U$ 之间的关系:

$$u = \frac{U}{5R}. \quad (6)$$

根据式(3)~式(6),FSM的传递函数可表示为:

$$G_x = \frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{2.98 \times 10^7}{s^3 + 2.73 \times 10^3 s^2 + B_1 s + B_2}, \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} B_1 = 3.28 \times 10^3 K_x + 1.97 \times 10^5 \\ B_2 = 8.95 \times 10^6 K_x \end{cases}.$$

### 4.3 变值陷波滤波器设计

FSM 的开环传递函数为三阶系统,包括一个二阶阻尼振荡环节和一个一阶惯性环节。二阶阻尼振荡环节的共振会导致系统稳定裕度的降低,从而限制了高增益反馈控制器的应用。因此,陷波滤波器被广泛地用来消除系统共振模态的影响。

陷波滤波器可表示为:

$$N(s) = \frac{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2\omega_b s + \omega_b^2}, \quad (8)$$

其中  $\xi$  和  $\omega_0$  分别表示系统的阻尼比和共振频率。

陷波滤波器是一种特殊的带阻滤波器,将带阻滤波器的阻带改成一个频率点即为陷波滤波器。常值陷波滤波器只在目标频率处具有幅值衰减的作用,在其他频率点处基本没有影响。然而,根据 4.1 和 4.2 节可知,本文设计的 FSM 的共振模态随运动位置的变化而变化。由式(7)可得到 FSM 的共振频率与旋转角度的关系:

$$\omega_x = 3.60 \times 10^4 \theta_x^2 - 7.06 \theta_x + 339.17. \quad (9)$$

因此,必须采用变值陷波滤波器来消除系统随运动位置的变化而改变的共振模态的影响,即将式(8)中的固定值  $\omega_b$  替换为式(9)所示的  $\omega_x$ 。

在零点位置处,根据开环传递函数得到的阻尼比为 0.108 4。相比于共振频率的变化,阻尼比的变化对闭环带宽的影响可忽略不计。因此,在

不同位置处将阻尼比近似为常值 0.108 4。

综上所述,变值陷波滤波器可表示为位置的函数,即有:

$$\begin{cases} N_x = \frac{s^2 + 0.2168\omega_x s + \omega_x^2}{s^2 + 2\omega_x s + \omega_x^2} \\ \omega_x = 3.60 \times 10^4 \theta_x^2 - 7.06 \theta_x + 339.17 \end{cases}. \quad (10)$$

采用 PI 控制器来实现整个系统的闭环控制。

PI 控制器可表示为:

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s}. \quad (11)$$

## 5 仿真分析

采用 Matlab 软件分别对常值和变值陷波滤波器进行仿真分析,从而验证变值陷波滤波器的必要性和有效性。

根据式(10),常值陷波滤波器可表示为:

$$N_c(s) = \frac{s^2 + 73.53s + 1.15 \times 10^5}{s^2 + 678.34s + 1.15 \times 10^5}. \quad (12)$$

PI 控制器可表示为:

$$C(s) = 20.2 + \frac{2391}{s}. \quad (13)$$

将式(12)所示的滤波器作为常值陷波滤波器来消除共振模态的影响,分别得到系统在零点和 25 mrad 处的频率响应,如图 5 所示。

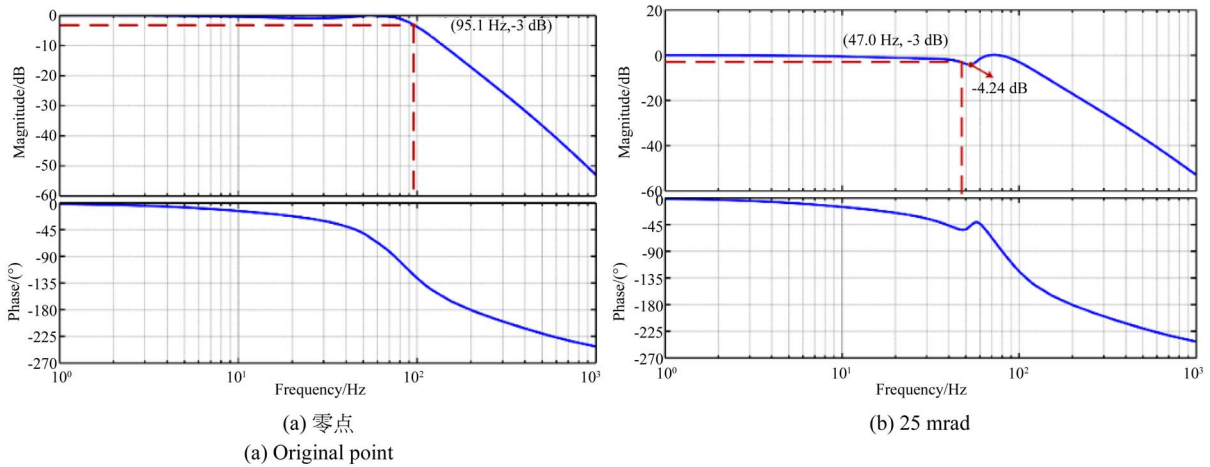


图 5 采用常值陷波滤波器时  $\theta_x$  轴在不同位置处的带宽

Fig. 5 Simulated bandwidth of  $\theta_x$  axis at different positions using fixed notch filter

采用常值陷波滤波器时,系统在零点处的带宽为 95.1 Hz;当系统运动到 25 mrad 时,系统的频率响应在共振频率处有一个明显的衰减,为 -4.24 dB。因此,系统在 25 mrad 处的带宽大幅度降低,为 47.0 Hz。

采用式(10)所示的变值陷波滤波器来消除共

振模态的影响,分别得到系统在零点和 25 mrad 处的频率响应,如图 6 所示。采用变值陷波滤波器,系统运动到 25 mrad 时,它在共振频率处的频率响应并没有明显的衰减,系统带宽为 91.2 Hz。

综上所述,FSM 沿  $\theta_x$  轴运动时,变值陷波滤波器可以消除共振模态的影响。

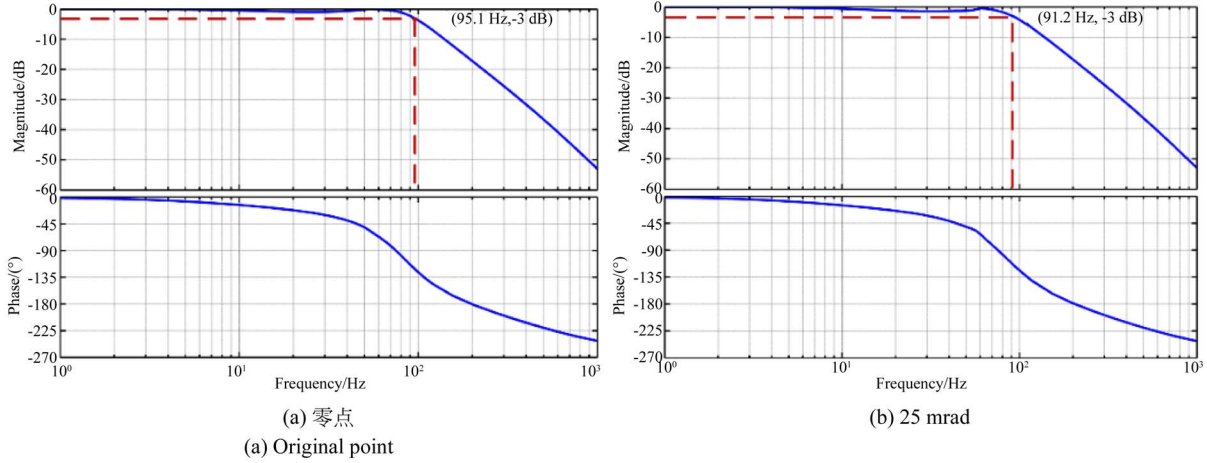


图 6 采用变值陷波滤波器时  $\theta_x$  轴在不同位置处的带宽

Fig. 6 Simulated bandwidth of  $\theta_x$  axis at different positions using variable notch filter

## 6 实验

当采用常值和变值陷波滤波器作为 FSM 系统的控制策略时,这里分别测试了系统在不同位置处的闭环带宽性能,并通过对比实验验证了变值陷波滤波器的必要性和有效性。

### 6.1 常值陷波滤波器

在 dSPACE 中输入扫频信号,通过辨识得到  $\theta_x$  轴的开环传递函数,拟合和实验得到开环传递函数的频率响应结果,如图 7 所示。

辨识结果可表示为:

$$G_x = \frac{1.47 \times 10^9}{s^3 + 3621s^2 + 2.99 \times 10^5 s + 4.04 \times 10^8} \quad (14)$$

由式(14)可知,  $\theta_x$  轴的共振频率和阻尼比分别为:

$$\omega_x = 336.15 \text{ rad/s}, \xi = 0.07747. \quad (15)$$

根据式(8)设计相应的常值陷波滤波器得到:

$$N_{xc} = \frac{s^2 + 52.08s + 1.13 \times 10^5}{s^2 + 672.30s + 1.13 \times 10^5}. \quad (16)$$

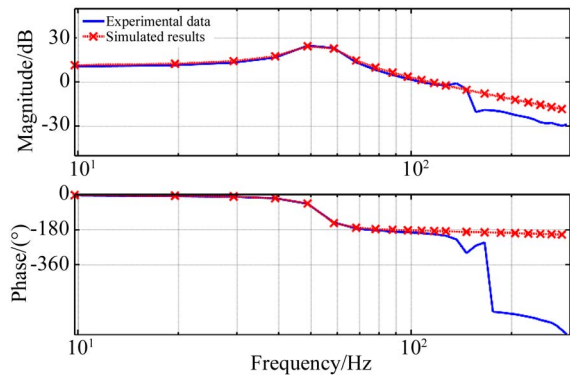


图 7  $\theta_x$  轴开环辨识

Fig. 7 Open-loop system identification of  $\theta_x$  axis

PI 控制器可表示为:

$$C_x = 0.55 + \frac{74}{s}. \quad (17)$$

采用式(16)设计的常值陷波滤波器和式(17)设计的 PI 控制器对 FSM 进行闭环控制,测试了  $\theta_x$  轴在不同位置处的带宽性能,如图 8 所示。同理可得到  $\theta_y$  轴在不同位置处的带宽性能,如图 9 所示。

根据实验结果可知,随着运动位置的增大,

FSM 在共振频率附近点处的频率响应出现明显的衰减。在零点处,  $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴在共振频率附近点处频率响应的最小值分别为  $-0.56$  dB 和  $-0.69$  dB, 但随着位置的增大, 其值一直减小。当系统运动到  $21.2$  mrad 时,  $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴频率响应的最小值分别约为  $-3.93$  dB 和  $-4.45$  dB。

系统在共振频率附近点处频率响应的最小值的变化直接影响了其带宽性能。如表 3 所示, 当系统的运动位置小于  $15.2$  mrad 时,  $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴的带宽分别为  $95$  Hz 和  $110$  Hz 左右。当系统运动到  $18.2$  mrad 时, 系统沿  $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴运动的带宽分别骤降为  $47.92$  Hz 和  $57.1$  Hz。

综上所述, 当采用常值陷波滤波器时, 系统在不同位置处的带宽性能会有巨大的差异, 因而无法保证 FSM 系统在大行程运动时的带宽性能。

其原因在于: 当 FSM 系统的运动位置增大时, 其刚度增大, 从而导致共振频率随之变大。此时, 常值陷波滤波器已无法很好地消除共振模式的影响。

表 3 采用常值陷波滤波器时不同位置处 FSM 的带宽  
Tab. 3 Bandwidth of FSM at different positions using fixed notch filter

位置/mrad	$\theta_x$ 轴带宽/Hz	$\theta_y$ 轴带宽/Hz
0	112.6	98.06
15.2	108.9	94.03
18.2	57.1	47.92
21.2	52.2	44.52

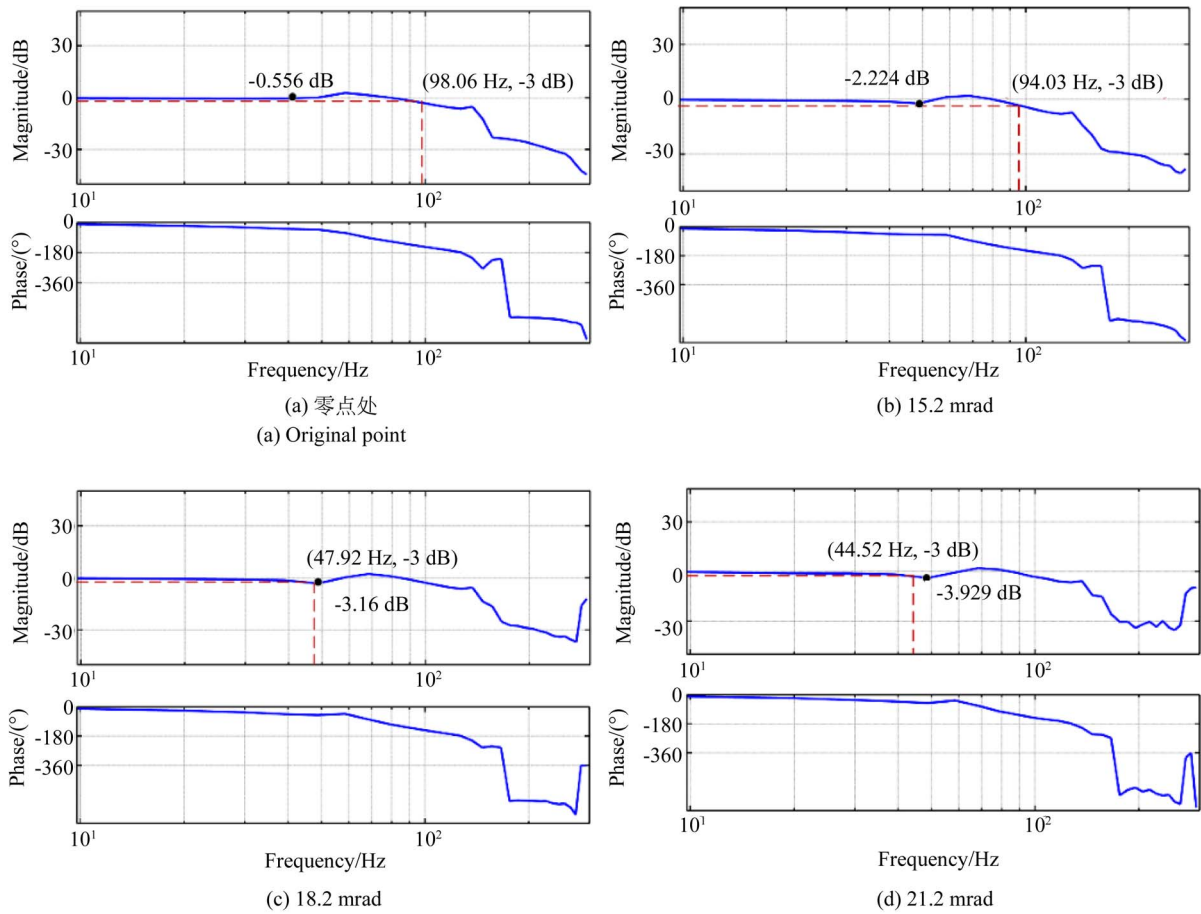


图 8 采用常值陷波滤波器时  $\theta_x$  轴在不同位置处的带宽  
Fig. 8 Bandwidth of  $\theta_x$  axis at different positions using fixed notch filter

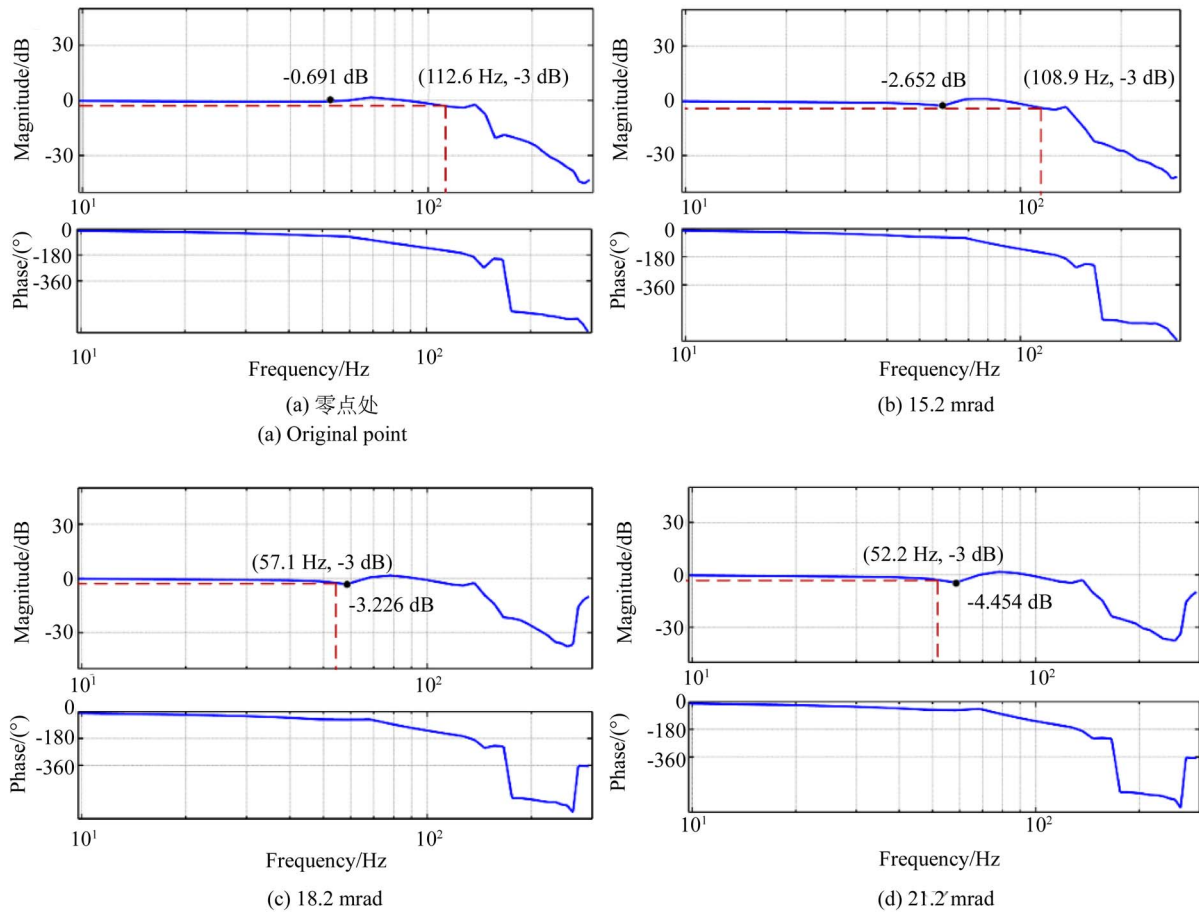


图 9 采用常值陷波滤波器时  $\theta_y$  轴在不同位置处的带宽  
 Fig. 9 Bandwidth of  $\theta_y$  axis at different positions using fixed notch filter

### 6.2 变值陷波滤波器

在不同位置处,对 FSM 系统进行辨识,得到其共振频率与运动位置的关系为:

$$\omega_x = 13.85x^2 - 2.82x + 337.67. \quad (18)$$

对于变值陷波滤波器,由于其共振频率随着运动位置的变化而变化,在 Simulink 中直接采用“Transfer Fun”将它写为传递函数的方式无法实现。在本文中,变值陷波滤波器的实现方法如图 10 所示。

首先将式(8)所示的陷波滤波器的传递函数改写为状态变量,即为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_b^2 & -2\omega_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ y = [0 \quad 2\xi\omega_b - 2\omega_b] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + u \end{cases}, \quad (19)$$

其中:  $x_1, x_2$  代表状态变量,  $y$  和  $u$  分别代表输出和输入。

然后,在 Simulink 中调用“S-Function Builder”,根据式(18)和式(19),模块“Outputs”中的程序可表示为:

```
“double w;
w=13.85 * pow(u2[0],2) - 2.82 * u2[0] + 337.67;
y0[0]=(2 * 0.07747 * w - 2 * w) * xC[1] + u1[0];”
```

模块“Continuous Derivatives”中的程序可表示为:

```
“double w;
w=13.85 * pow(u2[0],2) - 2.82 * u2[0] + 337.67;
dx[0]=xC[1];
dx[1]=-pow(w,2) * xC[0] - 2 * w * xC[1] + u1[0].”
```

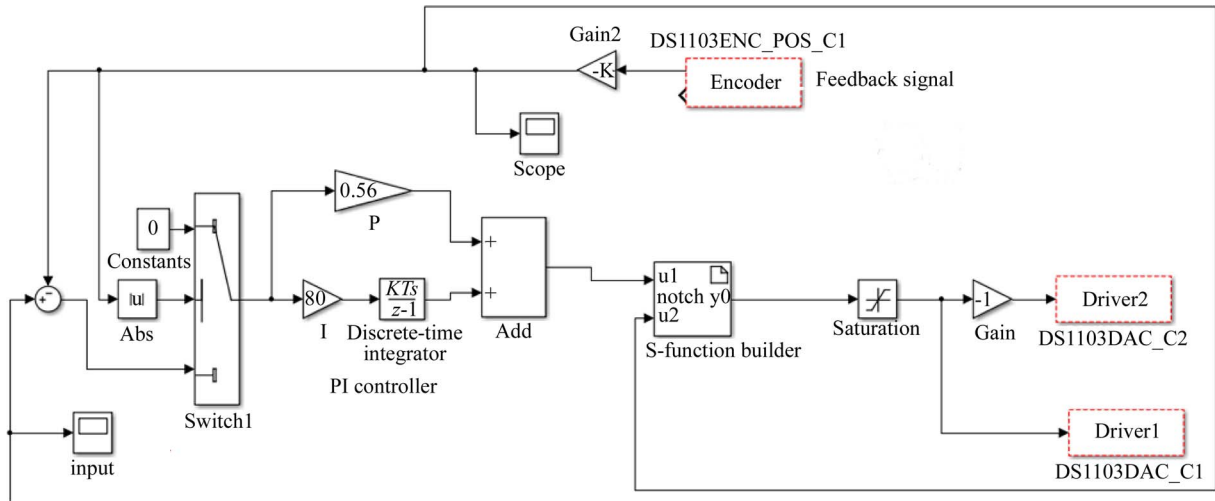


图 10 变值陷波滤波器 Simulink 软件程序  
Fig. 10 Simulink program of variable notch filter

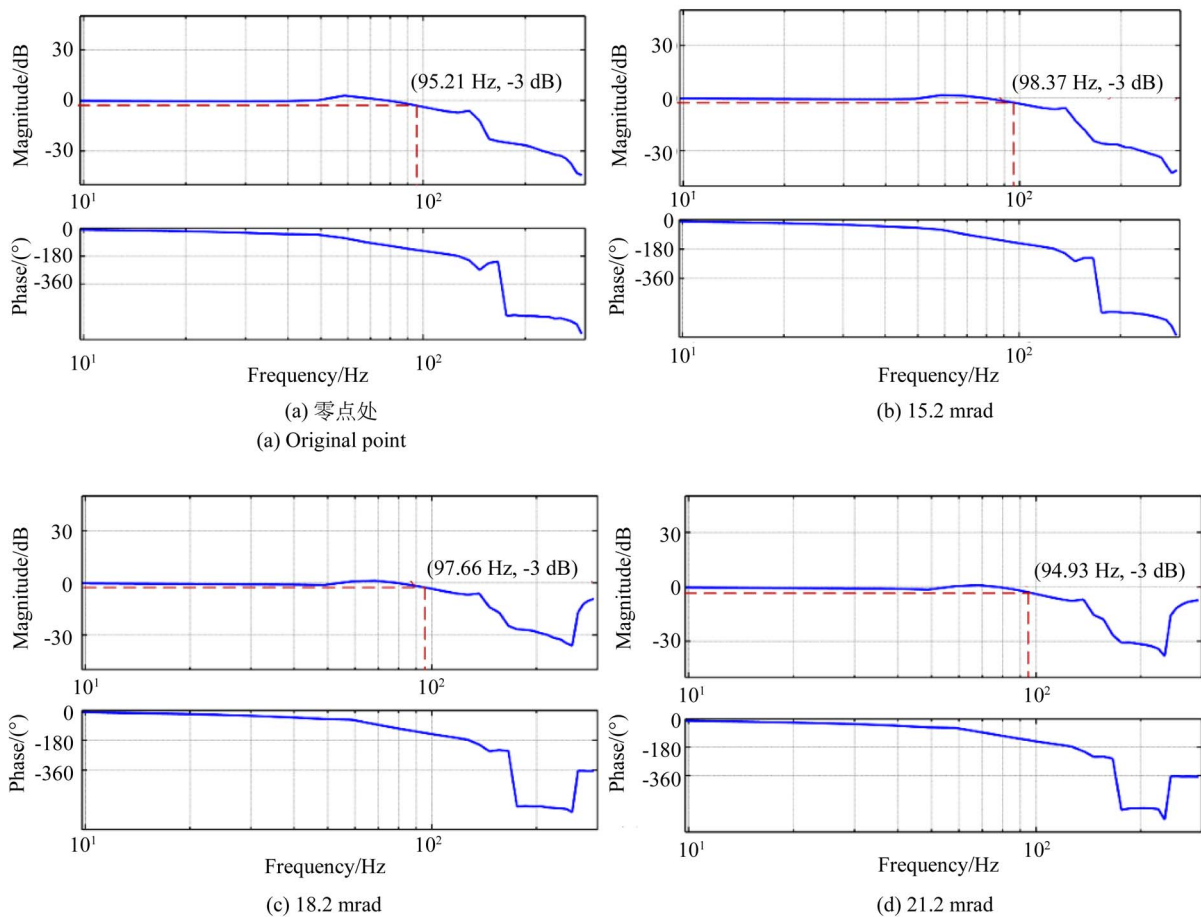


图 11 采用变值陷波滤波器时  $\theta_x$  轴在不同位置处的带宽  
Fig. 11 Bandwidth of  $\theta_x$  axis at different positions using variable notch filter

通过实验测试了  $\theta_x$  轴采用变值陷波滤波器时 FSM 在不同位置处的带宽性能, 如图 11 所

示。同理可得到  $\theta_y$  轴在不同位置处的带宽性能, 如图 12 所示。

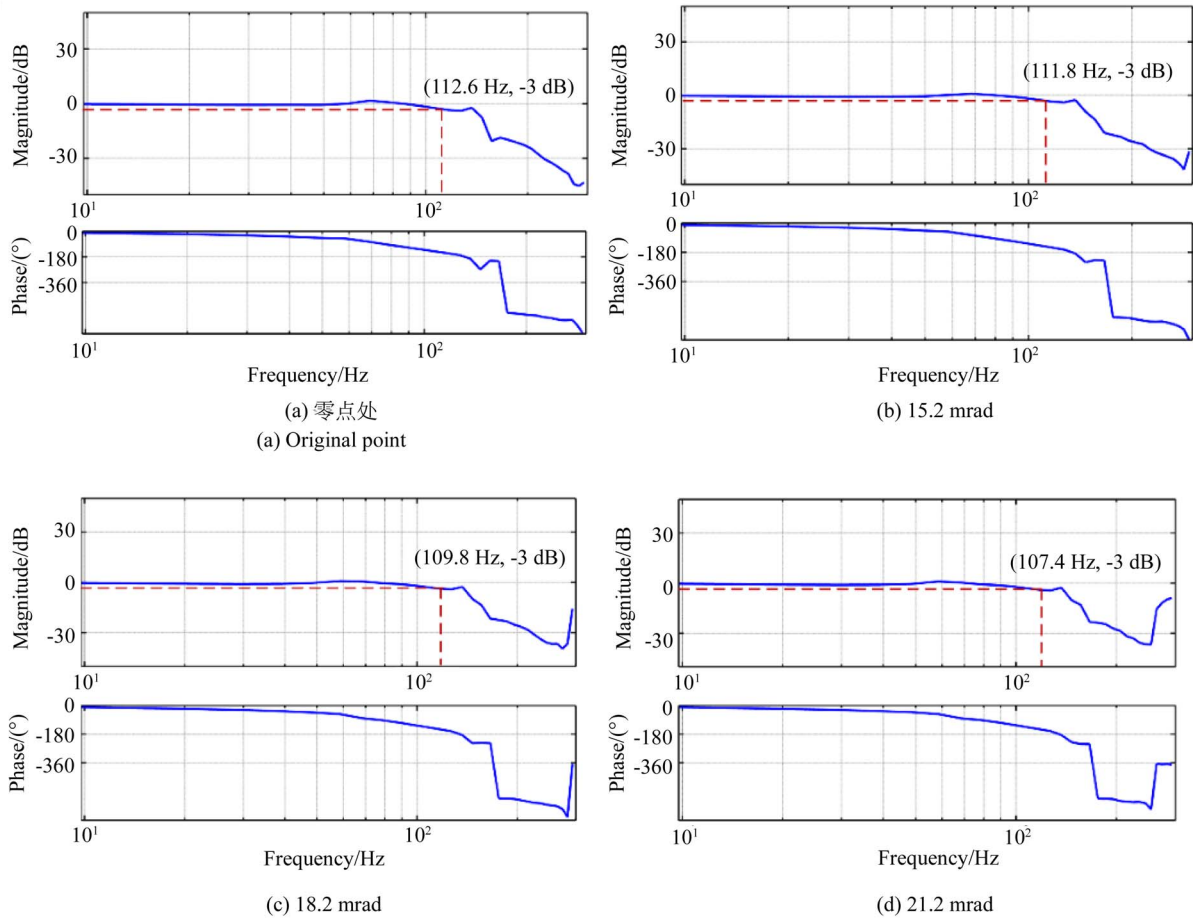


图 12 采用变值陷波滤波器时  $\theta_y$  轴在不同位置处的带宽  
 Fig. 12 Bandwidth of  $\theta_y$  axis at different positions using variable notch filter

根据实验结果可知,随着运动位置的增大,FSM 系统在共振频率点附近的频率响应基本平稳,并未出现明显的衰减。如表 4 所示,系统沿  $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴运动时的闭环带宽基本稳定在 95 Hz 和 110 Hz。

表 4 采用变值陷波滤波器时不同位置处 FSM 的带宽

Tab. 4 Bandwidth of FSM at different positions using variable notch filter

位置/mrad	$\theta_x$ 轴带宽/Hz	$\theta_y$ 轴带宽/Hz
0	112.6	95.21
15.2	111.8	98.37
18.2	109.8	97.66
21.2	107.4	94.93

通过对 FSM 平台输入阶梯信号来测试其最小分辨率,如图 13 所示,FSM 平台的最小分辨率

为  $\pm 0.03$  mrad。

综上所述,采用变值滤波器可以有效地消除 FSM 系统随位置变化而改变的共振模态的影响,使系统的带宽性能在各个位置保持稳定。通过实验验证了变值滤波器的有效性和必要性。

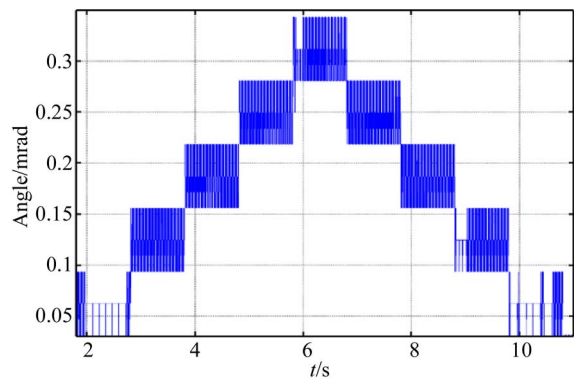


图 13 快速反射镜平台的最小分辨率  
 Fig. 13 Minimal motion resolution of FSM

## 7 结 论

本文针对基于音圈电机驱动的 FSM 在大行程运动时电机动子和定子发生碰撞的问题,设计了新型的 FSM 柔性机构来消除电机动子的横向位移。针对 FSM 在大行程运动时的共振频率会随运动位置的变化而改变的问题,设计了变值陷波滤波器来保证系统在不同位置处的带宽性能保持一致。设计的变值陷波滤波器的共振频率为

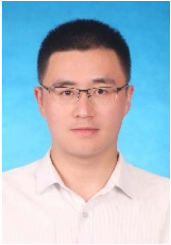
FSM 运动位置的函数,并结合 PI 控制器实现闭环控制。实验结果表明:采用常值陷波滤波器时,系统在不同位置处的带宽差异较大;当系统的运动位置小于 15.2 mrad 时,FSM 沿  $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴的带宽分别为 95 Hz 和 110 Hz 左右;当系统运动到 18.2 mrad 时, $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴的带宽分别骤降为 47.92 Hz 和 57.1 Hz。采用变值陷波滤波器时,快反镜沿  $\theta_x$  和  $\theta_y$  轴在不同位置处的带宽基本稳定在 95 Hz 和 110 Hz,验证了变值陷波滤波器的有效性。

### 参考文献:

- [1] SUN C, DING Y, WANG D, *et al.*. Backscanning step and stare imaging system with high frame rate and wide coverage [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16):4960-4965.
- [2] AIGOUY G, BENOIT K, BETSCH E, *et al.*. Development of magnetic fast steering mirror prototype for optical pointing applications[C]. *16th International Conference on New Actuators, Germany*: VDE, 2018:559-562.
- [3] 赵磊,纪明,王佳,等. 万向柔性铰链连接快速反射镜的设计与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2):164-170.  
ZHAO L, JI M, WANG J, *et al.*. Design and simulation of fast steering mirrors connected by universal flexure hinges[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2):164-170. (in Chinese)
- [4] XU X X, ZHANG G M, CHEN C H B. Design and performance test of the fast-steering mirror with flexure hinge used in vehicle track-launch system [J]. *Optoelectronics Letters*, 2019, 15(3):179-184.
- [5] YANG M, DU Z H J, SUN L N, *et al.*. Optimal design, modeling and control of a long stroke 3-PRR compliant parallel manipulator with variable thickness flexure pivots[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 60:23-33.
- [6] LIU L, LI Q, YUN H, *et al.*. Composite modeling and parameter identification of broad bandwidth hysteretic dynamics in piezoelectric fast steering platform[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 121:97-111.
- [7] WANG G, WANG Y, ZHOU H, *et al.*. Comprehensive approach to modeling and identification of a two-axis piezoelectric fast steering mirror system based on multi-component analysis and synthesis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 127:50-67.
- [8] Shubao S, Zheng T, Siyang S, *et al.*. Two-degrees-of-freedom piezo-driven fast steering mirror with cross-axis decoupling capability[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(5):055003.
- [9] 赵磊,纪明,王明歆,等. 快速反射镜驱动形式对伺服带宽的影响[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(2):393-401.  
ZHAO L, JI M, WANG M X, *et al.*. Influence of driving forms on servo bandwidth in fast steering mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2):393-401. (in Chinese)
- [10] 李贤涛,张晓沛,毛大鹏,等. 高精度音圈快速反射镜的自适应鲁棒控制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9):2428-2436.  
LI X T, ZHANG X P, MAO D P, *et al.*. Adaptive robust control over high-performance VCM-FSM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9):2428-2436. (in Chinese)
- [11] WU X, CHEN S, CHEN W, *et al.*. Large angle and high linearity two-dimensional laser scanner based on voice coil actuators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(10):105103.
- [12] WU X, CHEN S, SHI B, *et al.*. High-powered voice coil actuator for fast steering mirror [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(2):023002.
- [13] WADIKHAYE S P, YONG Y K, BHIKKAJI B, *et al.*. Control of a piezoelectrically actuated high-speed serial-kinematic AFM nanopositioner[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23: 025030.
- [14] LING J, FENG Z, MING M, *et al.*. Damping controller design for nanopositioners: A hybrid reference model matching and virtual reference

- feedback tuning approach[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19(1): 13-22.
- [15] VORBRINGER-DOROZHOVETS N, HAUSOTTTE T, MANSKE E, *et al.*. Novel control scheme for a high-speed metrological scanning probe microscope[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(9):094012.
- [16] GU G Y, ZHU L M. Motion control of piezoceramic actuators with creep, hysteresis and vibration compensation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 197: 76-87.
- [17] AWTAR S, SLOCUM A H, SEVINCER E. Characteristics of beam-based flexure modules [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2007; 129(6): 625-639.
- [18] HAO G, LI H. Nonlinear analytical modeling and characteristic analysis of a class of compound multibeam parallelogram mechanisms [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2015,7(4):041016.

#### 作者简介:



陈国真(1989—),男,山东泰安人,博士研究生,2011年于吉林大学获得学士学位,主要从事柔性机构设计和控制方面的研究。E-mail: guozhen8912@163.com

#### 通讯作者:



刘品宽(1969—),男,湖北天门人,研究员,博士生导师,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事纳米级微定位技术、微操作机器人,电子制造中的高速高精度定位与操纵,以及纳米制造中的精密驱动与控制等方向的研究。E-mail: pkliu@sjtu.edu.cn

#### 导师简介:



丁汉(1963—),男,安徽枞阳人,中国科学院院士,教授,博士生导师,1982年于长安大学获得学士学位,1985年于武汉理工大学获得硕士学位,1989年于华中科技大学获得博士学位,主要从事数字制造理论与技术的研究。E-mail: hding@sjtu.edu.cn

文章编号 1004-924X(2020)01-0102-08

## 基于概率统计的 BK7 玻璃磨削亚表层 损伤深度在线预测技术

吕东喜<sup>1</sup>, 陈明达<sup>1</sup>, 姚友强<sup>1</sup>, 赵岳<sup>1</sup>, 祝颖丹<sup>1,2\*</sup>

- (1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室, 浙江 宁波 315201;
2. 中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049)

**摘要:**为了在线预测硬脆材料磨削加工引起的亚表面损伤深度, 本文利用概率统计法对磨粒高度进行分析, 建立了刀具切削力与亚表层裂纹扩展深度之间的理论关系模型。首先, 基于硬脆材料的压痕断裂力学理论, 分析了中位裂纹扩展长度与磨粒压痕深度之间的内在关联。随后, 对刀具端面边缘的磨粒数目进行了数理统计, 建立了刀具切削力与单个磨粒切削深度之间的理论关系。在此基础上, 提出了工件亚表层损伤深度的在线预测模型  $SSD^{max} = 1.284 \times SSD_{\text{max}}^{max} - 36.23$ , 并结合 BK7 玻璃的实际磨削实验验证了其正确性。通过对比实验结果与理论模型的预测结果发现, 该方法可以在线、准确地预测磨削加工引起的工件亚表层损伤深度。

**关键词:**亚表层损伤深度; 中位裂纹; 在线预测; 概率统计; BK7 玻璃

中图分类号: TG663 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20202801.0102

## Prediction of subsurface damage depth in grinding of BK7 glass based on probability statistics

LÜ Dong-xi<sup>1</sup>, CHEN Ming-da<sup>1</sup>, YAO You-qiang<sup>1</sup>, ZHAO Yue<sup>1</sup>, ZHU Ying-dan<sup>1,2\*</sup>

- (1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Robotics and Intelligent Manufacturing Equipment Technology, Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;
  2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
- \* Corresponding author, E-mail: y.zhu@nimte.ac.cn

**Abstract:** In order to predict online the subsurface damage depth of the specimen induced in grinding of hard-brittle material, a theoretical relationship between the cutting force of the diamond tool and the subsurface crack depth of the specimen was established. This relationship was based on the statistical analysis of abrasive height using probability and statistics. First, based on the indentation fracture

收稿日期: 2019-08-29; 修订日期: 2019-10-17.

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No. LY18E050028); 中科院战略性先导专项 A (No. XDA-Y04-02-01); 宁波市国际合作项目 (No. 2017D10025); 宁波市自然科学基金资助项目 (No. 2018A610173); 宁波市工业重大专项 (No. 2017B10007)