

压电倾斜镜中堆叠式压电陶瓷驱动器 动态应力计算分析

冉兵¹, 赵帝植², 文良华^{1*}

¹宜宾学院智能制造学部, 四川 宜宾 644000;

²盲信号处理国家级重点实验室, 四川 成都 610000

摘要 针对压电快速倾斜镜(PFSM)堆叠式压电陶瓷(PZT)($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$)驱动器伸长和弯曲变形的应力集中问题,依据 Timoshenko 模型,分析了堆叠式 PZT 驱动器的伸长弯曲变形模型。基于压电耦合理论分析了堆叠式 PZT 驱动器动态应力与驱动电压幅值、驱动电压频率和 PZT 驱动器顶部柔性铰链抗弯刚度的关系。采用响应曲面法获得了 300 mm 口径 PFSM 的优化设计和工作参数。研究方法和分析结果可以为优化 PFSM 关键元件参数,降低堆叠式 PZT 驱动器应力集中,提高 PFSM 的耐久性和可靠性提供参考和借鉴。

关键词 压电倾斜镜; 堆叠式 PZT 驱动器; 应力集中; 压电耦合; 响应曲面

中图分类号 TH74

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0523001

Research on Dynamic Stress of Piezoelectric Fast Steering Mirror Stacked PZT Actuator

Ran Bing¹, Zhao Dizhi², Wen Lianghua^{1*}

¹Faculty of Intelligence Manufacturing, Yibin University, Yibin, Sichuan 644000, China;

²National Key Laboratory of Science and Technology on Blind Signal Processing, Chengdu, Sichuan 610000, China

Abstract In order to solve the stress concentration problem of the extension and bending deformation of the stacked PZT ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$) actuator used in piezoelectric fast steering mirror (PFSM), the extension and bending deformation model of the stacked PZT actuator was analyzed firstly based on Timoshenko model. Then, the relationships between the dynamic stress of stacked PZT actuator and the driving voltage amplitude, the driving voltage frequency and bending stiffness of flexible hinge on top of PZT actuator were analyzed by the method of piezoelectric coupling theory. Finally, the optimal design parameters of 300 mm diameter PFSM were obtained by response surface method. The research method and analysis results of this paper could provide reference for optimizing the parameters of key components of PFSM, reducing the stress concentration of stacked PZT actuator, and improving the durability and reliability of PFSM.

Key words piezoelectric fast steering mirror; stacked PZT actuator; stress concentration; piezoelectric coupling; response surface

1 引言

压电驱动器是基于压电陶瓷材料逆压电效应,

在外加电场作用下输出相应机械变形位移的一类线性驱动器,多数压电驱动器以锆钛酸铅($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$, PZT)为压电材料^[1-4]。压电快速倾斜镜

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-05-17; 录用日期: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61975171)、四川省计算物理高校重点实验室开放课题(JSWL2018KFZ02)

通信作者: *wlh45@126.com

(PFSM)就是以堆叠式PZT驱动器作为驱动元件的一种自适应光学系统波前校正器^[5-8]。堆叠式PZT驱动器具有抗压性能强,但抗拉和抗剪切性能极弱的特点。

近年来,随着堆叠式PZT驱动器在大口径、高谐振频率和大角行程PFSM系统中的应用^[9-11],由弯曲拉伸或者剪切应力集中导致的驱动器断裂损坏将不容忽视^[12-14]。针对堆叠式PZT驱动器的耐久性和可靠性研究,1993年,Furuta和Uchino^[15-16]研究发现堆叠式PZT驱动器在循环电场作用下,裂纹通常在内部电极边缘处萌生,沿电极边缘向三个方向传播。2000年,潘亦苏等^[17]对压电材料的非线性断裂性能进行了有限元分析,导出了作用电场与断裂载荷的关系曲线。2006年,毕美田等^[18]发现堆叠式PZT驱动器粘接残余应力主要分布在Ag和PZT陶瓷片的连接区,且靠近PZT层外表面。2007年,Woo等^[19]针对压电陶瓷(PZT)和平板型压电复合驱动器(PCA)在三点弯曲载荷作用下的断裂研究表明,损伤起始于脆性PZT层。2013年,Wang等^[20]建立了研究压电致动器与含界面裂纹的弹性基底的力-电效应的分析模型。2018年,Gao等^[21]研制了一款基于 d_{15} 模式的多层圆柱压电剪切驱动器,测试所得最大剪切驱动力为22 N。研究现状表明,国内外学者虽然对堆叠式PZT驱动器的应力集中分布和断裂载荷特性进行了研究,但是鲜有堆叠式PZT驱动器在大口径PFSM系统中动态应力产生机理和分布的相关报道。

为表征PFSM系统中堆叠式PZT驱动器动态弯曲拉伸和剪切应力的产生机理和集中分布。首

先介绍了堆叠式PZT驱动器的结构组成和驱动原理,提取了堆叠式PZT驱动器在PFSM系统中的弯曲模型,基于Timoshenko模型,分析了堆叠式PZT驱动器在PFSM系统中的横向振动变形。在此基础上,采用基于压电耦合理论的Finite Element (FE)分析方法,获取了在不同驱动电压幅值、不同驱动电压频率和不同驱动器柔性铰链等效刚度下,堆叠式PZT驱动器的伸长和压缩变形形态,并提取了堆叠式PZT驱动器的最大拉伸Von Miss应力、 X 方向主应力和 Z 方向主应力。最后,对所设计300 mm口径PFSM的驱动器柔性铰链的等效抗弯抗弯刚度进行了优化设计。本文的研究方法和结果可以为大口径PFSM系统中堆叠式PZT驱动应力峰值的动态分析提供参考,同时可为避免堆叠式PZT驱动器在PFSM系统中发生断裂损坏而优化设计相关元件参数提供借鉴。

2 堆叠式PZT驱动器在PFSM系统中的受弯模型

2.1 堆叠式PZT驱动器在PFSM系统中的受弯模型分析

基于逆压电效应的PZT驱动器的两种基本设计为堆叠式轴向驱动和薄片式弯曲驱动。PFSM通常采用堆叠式轴向PZT驱动器,实现反射镜绕工作轴的tip/tilt动作。堆叠式PZT驱动器的结构组成如图1(a)所示,主要包括PZT层、内部金属电极层、外部供电电极、绝缘层和底座等。其中,PZT层由内部金属电极层隔开,并通过环氧树脂胶粘接,内部金属电极层通过外部供电电极交替连接在电源两极。

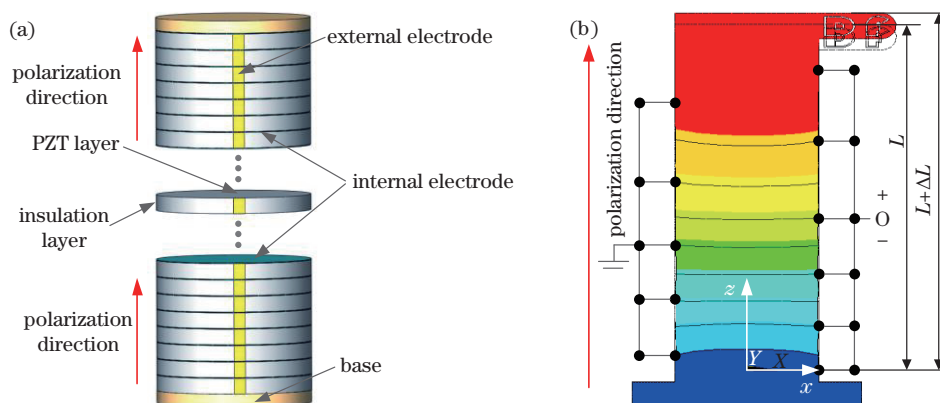


图1 堆叠式PZT驱动器结构组成及 d_{33} 效应模式。(a)堆叠式PZT结构;(b) d_{33} 效应模式

Fig. 1 Structure and d_{33} effect mode of stacked PZT actuator. (a) Structure of stacked PZT actuator;

(b) d_{33} effect mode

堆叠式 PZT 驱动器采用压电材料的轴向模式, 即 d_{33} 效应模式, 在 '3' 方向施加电压, 则 PZT 材料在 '3' 方向或者极化方向产生的应变位移, 在 '3' 方向的压电本构方程可以表示为:

$$\begin{cases} S_{33} = s_{33}\sigma_{33} + d_{33}\epsilon_3 \\ D_3 = d_{33}\sigma_{33} + \xi_{33}\epsilon_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_{33} 表示 PZT 材料在极化方向应变; s_{33} 表示 PZT 材料在零电场条件下的弹性柔度系数, 单位为 N/m^2 ; σ_{33} 表示 PZT 材料内部应力, 单位为 Pa ; d_{33} 表示 PZT 材料在定应力条件下的压电常数, 单位为 C/m^2 ; D_3 表示 PZT 材料的电位移, 单位为 C/m^2 ; ϵ_3 表示 PZT 材料的外加电场, 单位为 N/C ; ξ_{33} 表示 PZT 材料自由状态下的介电常数。

堆叠式 PZT 驱动器驱动 PFSSM 反射镜绕 Y 轴的偏转型态如图 2(a) 所示。图 2(b) 为反射镜相应偏转型态下, 堆叠式 PZT 驱动器的放大视图, 由图可知, 堆叠式 PZT 驱动器顶部虽然配套柔性铰链, 以内部出力 F_{PZT} 驱动反射镜组件偏摆, 但受柔性铰链弯矩 M 、反射镜组件偏摆的反作用力 F_R 和基座固

定反弯矩 M' 的作用, 堆叠式 PZT 驱动器在极化方向 (z 方向) 产生驱动伸长位移 ΔL 的同时, 仍然发生绕 Y 轴的弯曲变形, 弯曲变形在如图 2(b) 中以 α 角标注。图 2(c) 为 PZT 层某一微元体变形图, 定义微元体的横向位移 $W(z, t)$ 为

$$W(z, t) = W_w(z, t) + W_j(z, t), \quad (5)$$

式中, W_w 和 W_j 分别表示 PZT 驱动器微元体的弯曲变形和剪切变形。根据角度与位移关系, 微元体的偏转角度可以表示为:

$$\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{\partial W_w}{\partial z} + \frac{\partial W_j}{\partial z} = \alpha_w + \alpha_j, \quad (6)$$

式中, α_w 和 α_j 分别表示弯曲变形和剪切变形引起的微元体偏转角度。根据微元体在横向的受力平衡方程可得:

$$\frac{\partial Q}{\partial z} + f = 0, \quad F + Q - \frac{\partial M}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

式中, Q 代表总剪切力, f 表示分布剪切力, F 表示 PZT 驱动器单位长度的惯性力偶, M 为 PZT 驱动器微元体所受弯曲力矩。

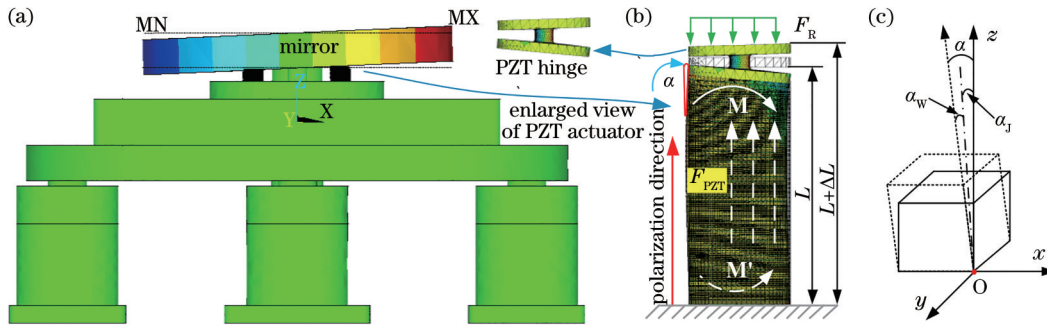


图 2 堆叠式 PZT 驱动器的受弯模型。(a) 300 mm 口径 PFSSM 偏摆型态; (b) 堆叠式 PZT 驱动器的受力和弯曲情况; (c) 堆叠式 PZT 驱动器微元体变形分析

Fig. 2 Bending mode of stacked PZT actuator. (a) Tilting shape of 300 mm PFSSM; (b) force and bending shape analysis of stacked PZT actuator; (c) microelement analysis of stacked PZT actuator

2.2 堆叠式 PZT 驱动器在 PFSSM 系统中的动态应力分析

由于 PZT 陶瓷材料脆性大、抗张强度低, 且很难加工成 ISO、GB、ASTM 和 JIS 等标准规定的试验几何体, 因此, 量化堆叠式 PZT 驱动器粘接断裂韧性的实验方法以及 ISO 测试标准受到挑战。为了表征 PFSSM 在动态工作过程中, 堆叠式 PZT 驱动器的应力峰值变化和分布情况, 这里采用基于压电耦合理论的 FE 分析方法进行瞬态动力学分析。根据 IEEE 压电标准^[22], 压电本构方程的矩阵形式可以简化为:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

在 ANSYS 环境中, 根据 ANSI/ IEEE Std.

176-1987 标准,定义 PZT 陶瓷材料的弹性刚度系数、压电常数和介电常数。PZT 陶瓷片设定为 Solid 5 单元,PFSM 其他元件设定为 Solid 185 单元。堆叠式 PZT 驱动器驱动 PFSM 反射镜动态偏摆的瞬态激励电压定义为:

$$U=U_A \times \sin \left\{ 2 \times \pi \times f \times \left[T \times (L_n - 1) + t_{int} \times i \right] \right\}, \quad (13)$$

式中, U_A 为驱动电压幅值,单位为 V; f 表示驱动器电压频率,单位为 Hz; T 表示周期,单位为 s; L_n 为周期数, t_{int} 为每一载荷步的时间间隔,单位为 s; i 表示

迭代计算索引。

为验证 PFSM 系统反射镜在动态偏摆过程中,堆叠式 PZT 驱动器拉伸应力和剪切应力与驱动电压幅值之间的关系,基于(13)式和前期分析,设定 PZT 驱动器顶部柔性铰链等效抗弯刚度为 $6.25 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ (对应 PFSM 一阶谐振频率为 367.66 Hz),驱动电压频率为 180 Hz 。在驱动电压幅值分别设定为 50 V 、 200 V 、 350 V 和 500 V 的工况下,提取堆叠式 PZT 驱动器的伸长变形形态如图 3 所示。

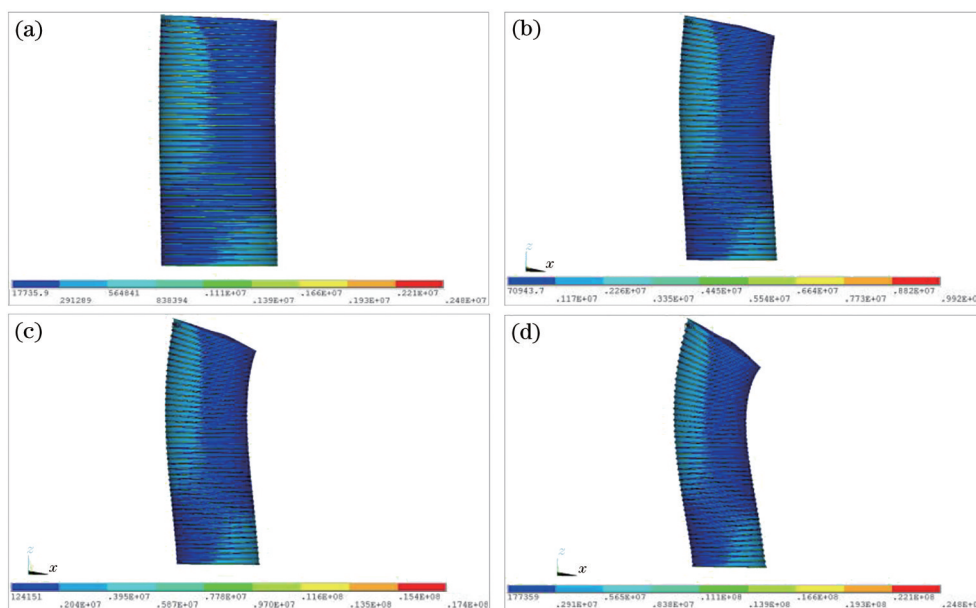


图 3 不同驱动电压幅值下堆叠式 PZT 驱动器变形形态和应力值。(a)驱动电压为 50 V ; (b)驱动电压为 200 V ; (c)驱动电压为 350 V ; (d)驱动电压为 500 V

Fig. 3 Deformations and stresses of the actuator under different driving voltage amplitudes. (a) Amplitude is 50 V ; (b) amplitude is 200 V ; (c) amplitude is 350 V ; (d) amplitude is 500 V

由图 3 可知,随着驱动电压幅值的提高,堆叠式 PZT 驱动器伸长驱动变形增大的同时,弯曲变形也增大,弯曲变形方向与 PFSM 反射镜的偏摆方向相反。在 50 V 、 200 V 、 350 V 和 500 V 的驱动电压工况下,堆叠式 PZT 驱动器的等效 Von Miss 应力值分别为 2.48 MPa 、 9.92 MPa 、 17.4 MPa 和 24.8 MPa 。根据唐义政等^[23]的研究文献报道,PZT-4 和 PZT-6 陶瓷材料的抗拉强度为 24.5 MPa 。因此,在保持 PFSM 其他设计结构参数不变的工况下,若堆叠式 PZT 驱动器顶部柔性铰链的等效刚度为 $6.25 \text{ N} \cdot \text{m}^2$,驱动电压频率为 180 Hz ,则当 PFSM 驱动电压幅值达到 500 V 时堆叠式 PZT 驱动器极易发生断裂损坏。

图 4 为堆叠式 PZT 驱动器在不同驱动电压条件下,等效 Von Miss 应力、X 方向主应力和 Z 方向主

应力的直观分析。由图 4 可知,堆叠式 PZT 驱动器伸长变形的等效 Von miss 应力、X 轴方向主应力和 Z 轴方向主应力随驱动电压幅值呈近似线性增大。

设定驱动电压频率为 150 Hz ,驱动电压幅值为 500 V ,验证堆叠式 PZT 驱动器拉伸应力和剪切应力与 PZT 顶部柔性铰链等效抗弯刚度之间的关系。在 PZT 顶部柔性铰链等效抗弯刚度分别 $0.16 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 、 $2.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 、 $12.56 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 和 $40.2 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 的条件下,提取伸长变形 PZT 驱动器的部分 PZT 层显示,如图 5 所示。从变形前后 PZT 层的形态和位置(虚线层为 PZT 层初始位置)可以看出,当 PZT 顶部柔性铰链的等效抗弯刚度、柔性铰链与 PZT 驱动器顶部粘接部分的刚度较小时,PZT 驱动器的弯曲方向与 PFSM 反射镜的偏转方向相同,最大应力区域主要集中在驱动器顶层中心位置。随着 PZT 顶部柔性

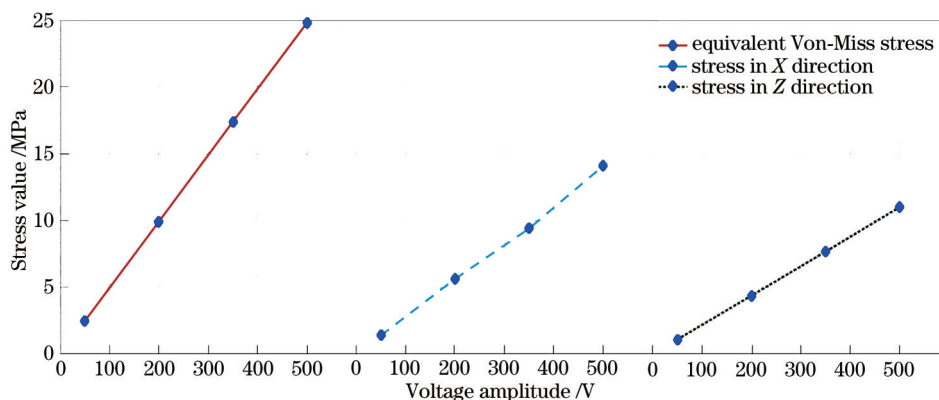


图 4 不同驱动电压幅值工况下堆叠式 PZT 驱动器动态应力的直观分析

Fig. 4 Analyses of stresses of stacked PZT actuator under different driving voltage amplitudes

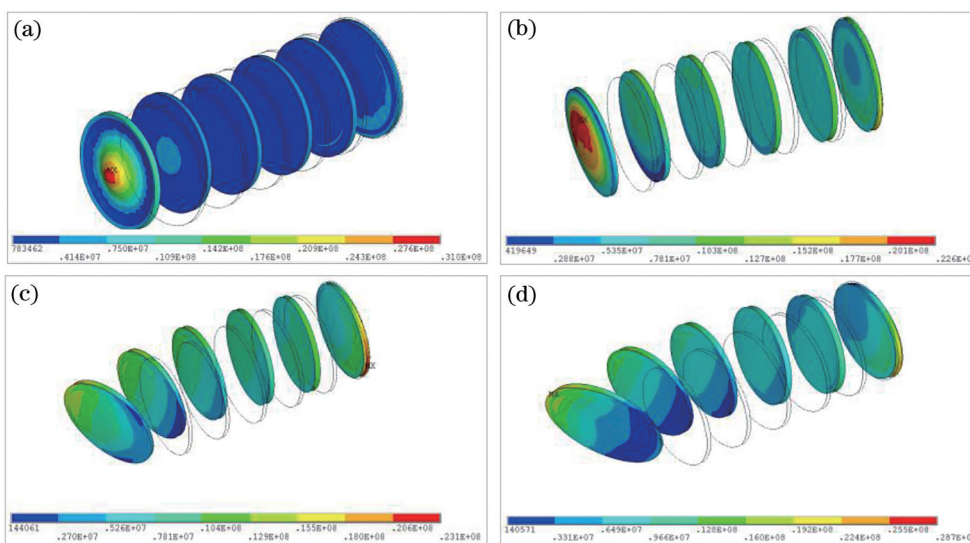


图 5 不同 PZT 驱动器顶部铰链等效抗弯刚度下 PZT 层型态和应力值。(a)抗弯刚度为 $0.16 \text{ N}\cdot\text{m}^2$; (b)抗弯刚度为 $2.5 \text{ N}\cdot\text{m}^2$; (c)抗弯刚度为 $12.56 \text{ N}\cdot\text{m}^2$; (d)抗弯刚度为 $40.2 \text{ N}\cdot\text{m}^2$

Fig. 5 Shapes and stresses PZT layer under different bending stiffnesses of PZT hinge. (a) Bending stiffness is $0.16 \text{ N}\cdot\text{m}^2$; (b) bending stiffness is $2.5 \text{ N}\cdot\text{m}^2$; (c) bending stiffness is $12.56 \text{ N}\cdot\text{m}^2$; (d) bending stiffness is $40.2 \text{ N}\cdot\text{m}^2$

铰链的等效抗弯刚度、柔性铰链与 PZT 驱动器顶部粘接部分的刚度的增大, PZT 驱动器的弯曲方向发生反转, 弯曲方向将与 PFMS 反射镜偏摆方向相反, 最大应力区域主要集中在驱动器底部位置和顶部位置。

以 PFMS 绕 Y 轴方向逆时针偏摆为例, 在底部位置, 伸长变形 PZT 驱动器的最大等效应力主要集中在远离反射镜回转中心的 PZT 层的外边缘侧; 在顶部位置, 伸长变形 PZT 驱动器的最大等效应力主要集中在靠近反射镜回转中心的 PZT 层的外边缘侧。在相应驱动器顶部柔性铰链等效抗弯刚度条件下, PFMS 所对应的一阶谐振频率分别为 225 Hz、335 Hz、372.67 Hz 和 392.88 Hz。图 6 所示为相应

等效抗弯刚度下的动态应力数据直观分析。

由最大应力数据的直观分析可知, 当 PZT 顶部柔性铰链的等效抗弯刚度、柔性铰链与 PZT 驱动器顶部粘接部分的刚度较小时, 一方面, PFMS 绕工作轴方向偏摆的谐振频率较低; 另一方面, PZT 驱动器可能在顶层中心位置发生拉伸或者剪切破坏。当 PZT 顶部柔性铰链的等效抗弯刚度、柔性铰链与 PZT 驱动器顶部粘接部分的刚度较大时, PFMS 绕工作轴方向的谐振频率提高; 同时, PZT 驱动器可能在底层位置或者顶层的外边缘位置发生拉伸或者剪切破坏。因此, 在 PFMS 系统设计中, 达到谐振频率指标后, 需寻求堆叠式 PZT 驱动器承受最小拉伸应力和剪切应力所对应的柔

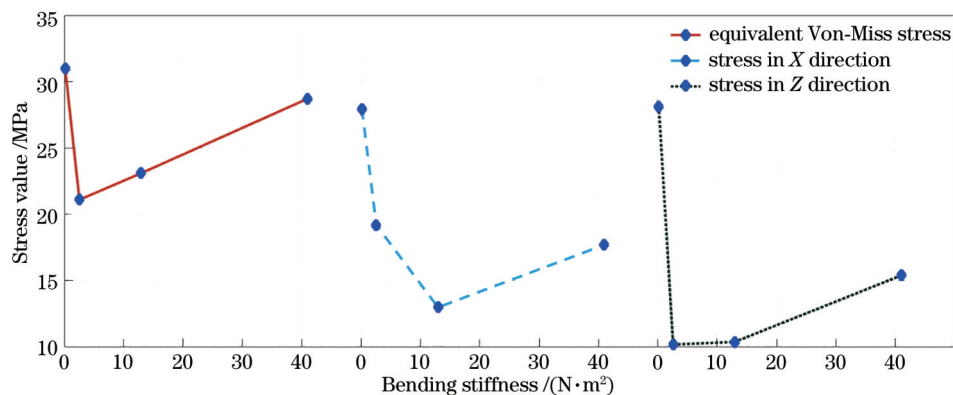


图 6 不同等效抗弯刚度工况下堆叠式 PZT 驱动器动态应力的直观分析

Fig. 6 Analyses of stresses of stacked PZT actuator under different bending stiffnesses of PZT hinge

性铰链等效抗弯刚度。

为验证堆叠式 PZT 驱动器动态受弯应力与驱动电压频率之间的关系,在 FE 分析中,设定驱动电压幅值为 500 V, PZT 顶部柔性铰链的抗弯刚度为 $6.25 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ (PFMSM 一阶谐振频率为 367.66 Hz)。在驱动电压频率分别 60 Hz、120 Hz、180 Hz 和 250 Hz 的条件下,提取堆叠式 PZT 驱动器的应力值和 PZT 层部分型态如图 7 所示。由图可知,随着驱动频率的提高,堆叠式 PZT 驱动器的弯曲变形随之

增大,等效 Von miss 应力也随之上升, PZT 驱动器的最大应力区域主要集中在驱动器底层位置和顶层位置的外侧边缘。不同驱动频率工况下动态应力的直观分析如图 8 所示,在驱动频率为 180 Hz 的工况下,等效 Von miss 应力已达 24.8 MPa, 超过 PZT-4 和 PZT-6 陶瓷材料的抗拉强度极限,驱动器极易发生拉伸或剪切损坏。因此,在 PFMSM 系统设计完成后,需校验堆叠式 PZT 驱动器可承受的最大工作频率,并非仅以谐振频率为参考指标。

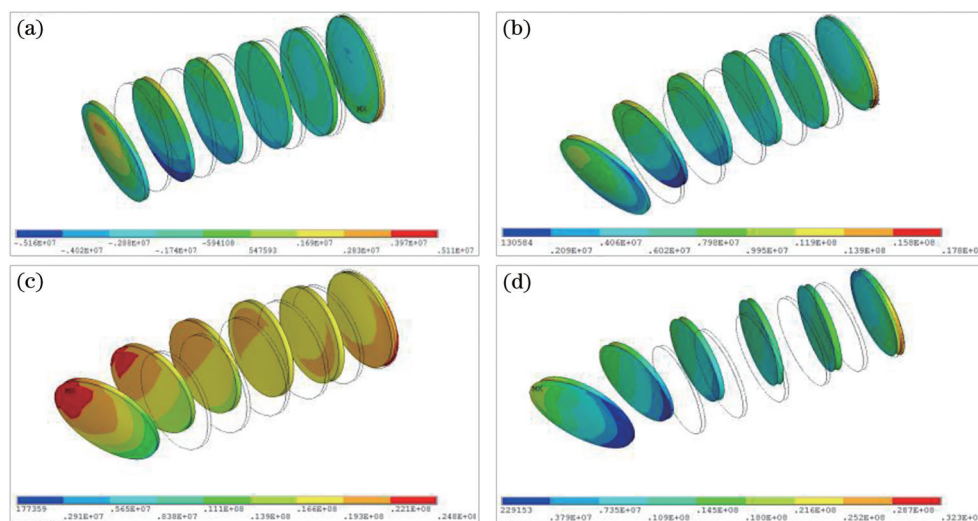


图 7 不同驱动电压频率下 PZT 层型态和应力值。(a) 驱动电压频率为 60 Hz; (b) 驱动电压频率为 120 Hz; (c) 驱动电压频率为 180 Hz; (d) 驱动电压频率为 250 Hz

Fig. 7 Shapes and stresses PZT layer under different voltage frequencies. (a) Frequency is 60 Hz; (b) frequency is 120 Hz; (c) frequency is 180 Hz; (d) frequency is 250 Hz.

3 基于响应曲面的 PZT 驱动器顶部柔性铰链参数优化

由基于压电耦合理论的分析可知,堆叠式 PZT

驱动器在 PFMSM 系统中的动态应力与驱动电压幅值、驱动电压频率和 PZT 驱动器顶部柔性铰链抗弯刚度显著相关,为了提高 PFMSM 系统的稳定性和可靠性,基于响应曲面(RSM)分析法,通过中心复合

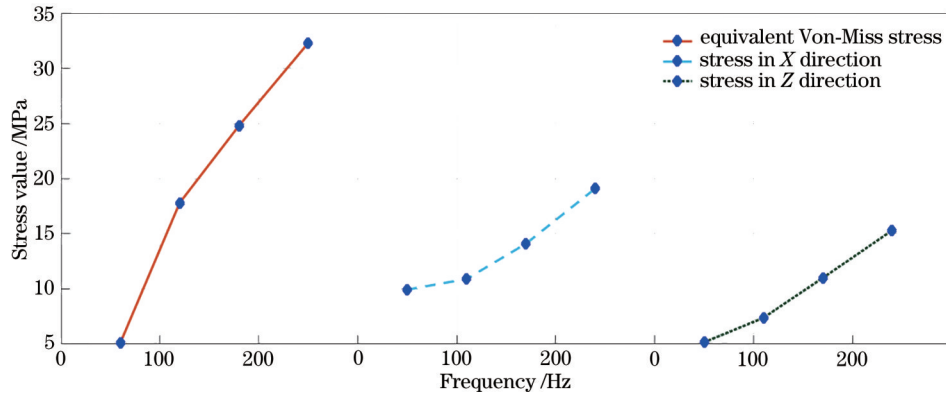


图 8 不同驱动电压频率工况下堆叠式 PZT 驱动器动态应力的直观分析

Fig. 8 Analyses of stresses of stacked PZT actuator under different voltage frequencies

试验设计 (CCD) 对 PZT 驱动器顶部柔性铰链进行参数优化。在 500 V 的驱动电压幅值条件下, 即反射镜偏摆角行程最大时, 以堆叠式 PZT 驱动器顶部柔性铰链等效抗弯刚度和驱动电压频率为优化因素, 试验因素编码和水平如表 1 所示。表 1 中, B_s 代表 PZT 驱动器顶部柔性铰链的等效抗弯刚度, F_R 代表 PZT 驱动器的驱动电压频率。

表 1 因素编码水平表

Table 1 Levels and codes of independent variables

Test points	Factors	Unit	Code value	Actual value	Code value	Actual value
Cubic points	B_s	$N \cdot m^2$	-1	5	+1	25
	F_R	Hz	-1	120	+1	250
Central points	B_s	$N \cdot m^2$	0	15		
	F_R	Hz	0	185		
Axial points	B_s	$N \cdot m^2$	-1.414	0.9	1.414	29.1
	F_R	Hz	-1.414	93	1.414	277

RSM 分析中, 堆叠式 PZT 驱动器伸长弯曲变形的 Von Miss 应力分析采用二次多项式模型:

$$V_M = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \times B_{S_i} + \sum_{i=1}^n a_i \times B_{S_i}^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq n} a_{ij} \times B_{S_i} \times B_{S_j}, \quad (14)$$

式中, V_M 表示堆叠式 PZT 驱动器伸长弯曲变形 Von Miss 应力的响应曲面值, 单位为 Pa; a_0 代表常数, a_i 代表线性回归系数, a_{ij} 代表交互作用回归系数, B_{S_i} 为分析因素的编码。通过基于压电耦合理论的 FE 分析, 获得不同因素水平的优化目标值, 得到堆叠式 PZT 驱动器伸长变形的 Von Miss 应力回归模型位

$V_M = 1.828 + 0.003 \times B_s + 0.175 \times F_R + 0.002 \times B_s \times F_R - 0.003 \times B_s^2 - 0.0003 \times F_R^2$, (15) 模型的 R^2 值为 0.9328, 具有较好的拟合度和可信度。

堆叠式 PZT 驱动器伸长弯曲变形的 Von Miss 应力的 CCD 设计实际计算值和回归模型预测值的关系如图 9(a) 所示, 可得出模型预测值基本处于压电耦合 FE 分析值周围, 沿直线 $y = x$ 分布, 表明所建立响应曲面回归模型的预测结果与 FE 分析值较吻合, 模型可精确预测驱动电压频率和驱动器顶部柔性铰链等效抗弯刚度对 PZT 驱动器伸长弯曲变形应力的影响。图 9(b) 为 Von Miss 应力的学生化内残差的概率分布, 数据值较好的沿一条直线分布, 表明 RSM 模型拟合程度较高。

基于响应曲面预测方程 (15) 式建立的 B_s 和 F_R 与堆叠式 PZT 驱动器 Von Miss 应力的等高线和 3D 响应曲面, 如图 10 所示。由图 10(a) 可知, 等高线同心圆为椭圆形, B_s 和 F_R 之间存在交互作用。由图 10(b) 响应曲面可知, 堆叠式 PZT 驱动器伸长弯曲变形的 Von Miss 应力随 B_s 的增大线性增大, 随着 F_R 的增大呈非线性增大。从曲面的陡峭程度可知, F_R 对堆叠式 PZT 驱动器伸长弯曲变形 Von Miss 应力的影响显著于 B_s 。

由响应曲面法所确定的回归方程模型 (15) 式对最佳 B_s 进行预测优化结果表明, 在 500 V 的驱动电压工况下, 当 PZT 驱动器顶部柔性铰链的等效抗弯刚度为 $5 N \cdot m^2$, 堆叠式 PZT 驱动器伸长弯曲 Von Miss 应力为 24.497 MPa, 小于 24.5 MPa 的条件下, 获得 PFSM 的最大工作频率为 170.10 Hz。为了验证 RSM 回归模型良好的预测效果, 在最优参数条件下进行基于压电耦合理论的 Von

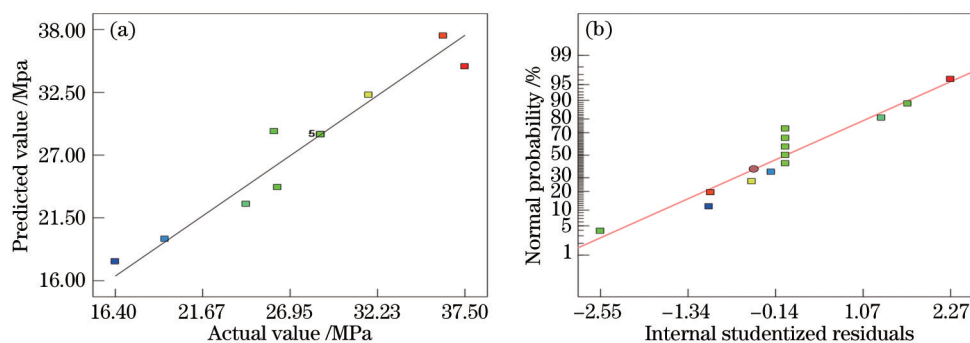


图9 CCD设计实际值-预测值分布和学生化内残差概率分布。(a) CCD设计实际计算值与回归模型预测值关系；
(b) Von Miss应力的学生化内残差的概率分布

Fig. 9 Distribution of actual value-predicted value and the probability distribution of internal studentized residuals. (a) Distribution of actual value-predicted value for CCD design; (b) probability distribution of internal studentized residuals for Von Miss stress

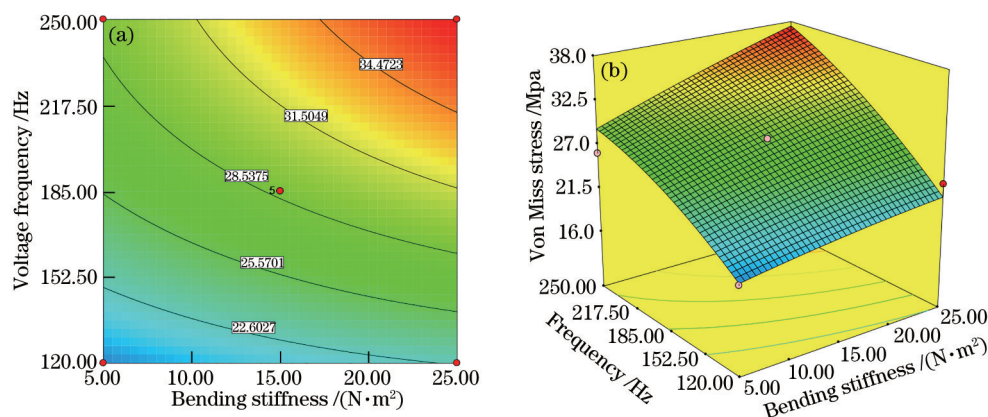


图 10 B_s 和 F_R 与 Von Miss 应力的(a)等高线图和(b) 3D 响应曲面

Fig. 10 (a) Contour map and (b) 3D response surface of Von Miss stress with B_s and F_R

Miss 应力计算, FE 分析结果为 Von Miss 应力为 24.49 Mpa。

4 结 论

本文针对堆叠式 PZT 驱动器在驱动 PFSM 反射镜动态偏摆过程中, PZT 驱动器伸长和弯曲变形的应力集中问题, 首先根据堆叠式 PZT 驱动器的结构组成和工作原理, 基于 Timoshenko 模型, 分析了堆叠式 PZT 驱动器在 PFSM 系统中的伸长和弯曲变形模型。然后, 提出了基于压电耦合理论的堆叠式 PZT 驱动器动态应力的 FE 分析方法, 建立了 300 mm 口径的 PFSM 物理模型。通过 FE 分析表明, 堆叠式 PZT 驱动器动态应力与驱动电压幅值、驱动电压频率和 PZT 驱动器顶部柔性铰链等效抗弯刚度显著相关, 动态应力的最大值分布在驱动器底部和顶部外侧边缘。在以 24.5 MPa 为 PZT 陶瓷材料的抗拉强度上限时, 为防止堆叠式 PZT 驱动器发生断裂损坏, 需综合平衡 PFSM 角行程、谐振频

率和 PZT 顶部柔性铰链抗弯刚度。针对 300 mm 口径 PFSM 模型的 RSM 优化分析表明, 在以 PFSM 偏摆角行程最大值和堆叠式 PZT 动态应力最大值上限为优化目标时, PFSM 的最大工作频率为 170.10 Hz, 谐振频率为 354.14 Hz。本文的研究方法和分析结果可以为 PFSM 优化关键元件参数, 降低堆叠式 PZT 驱动器应力集中, 防止堆叠式 PZT 驱动器发生断裂损坏, 提高 PFSM 的耐久性和可靠性提供参考和借鉴。

参 考 文 献

- [1] Okuda M, Wakita N, Ohya K, et al. A laser scanner using stacked piezoelectric ceramic actuator[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1986, 25(S1): 223.
- [2] Furutani K, Ohta N. Displacement monitoring of stacked piezoelectric actuator by observing induced charge[J]. International Journal of Automation Technology, 2008, 2(1): 12-17.
- [3] Tang J, Liu J, Huang H Q. Optimization of

- preparation process of PZT/PVDF piezoelectric composite doped with graphene[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(5): 85-89.
- 汤健, 刘军, 黄欢琦. 石墨烯掺杂锆钛酸铅/聚偏氟乙烯压电复合材料的制备及性能研究[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(5): 85-89.
- [4] Luo H. Design and application of biological microscope autofocus system based on piezoelectric actuator[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019.
- 罗华. 基于压电驱动器的生物显微镜自动对焦系统的设计与应用[D]. 广州: 暨南大学, 2019.
- [5] 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): 35-40.
- 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): 35-40.
- [6] Loney G C. Design of a small-aperture steering mirror for high bandwidth acquisition and tracking[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(11): 1360-1365.
- [7] Zhou R, Zhang Q, Gan Y D, et al. Transfer function identification method for fast-steering mirror driven by PZT[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1105002.
- 周睿, 张强, 甘永东, 等. 压电倾斜镜传递函数辨识方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1105002.
- [8] Zhang B N, Zhang L, Huang G H, et al. Research on dual-mode hybrid detection technology using laser to point directed by infrared camera[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 0917001.
- 张冰娜, 张亮, 黄庚华, 等. 一种红外引导激光指向双模复合探测技术研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0917001.
- [9] Klochkova V G, Sheldakova Y V, Vlasyuk V V, et al. Improving the efficiency of high-resolution spectroscopy on the 6-m telescope using adaptive optics techniques[J]. *Astrophysical Bulletin*, 2020, 75(4): 468-481.
- [10] Xu S Q, Wei L C, Wu S Y, et al. The research of performance evaluation of adaptive optics for satellite to ground coherent laser communication[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(12): 1498-1503.
- 徐圣奇, 魏龙超, 邬双阳, 等. 自适应光学对星地相干激光通信性能改善研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(12): 1498-1503.
- [11] Ran B, Yang P, Wen L H, et al. Analysis and compensation of reaction force in large-aperture piezoelectric fast steering mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0601007.
- 冉兵, 杨平, 文良华, 等. 大口径压电倾斜镜的反作用力分析及补偿研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0601007.
- [12] Liu T J C. Crack repair performance of piezoelectric actuator estimated by slope continuity and fracture mechanics[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(8): 2566-2574.
- [13] Shivashankar P, Gopalakrishnan S. Design, modeling and testing of d33-mode surface-bondable multilayer piezoelectric actuator[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(4): 045016.
- [14] Luo Q, Tong L. Exact static solutions to piezoelectric smart beams including peel stresses. II. Numerical results, comparison and discussion[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2002, 39(18): 4677-4695.
- [15] Furuta A, Uchino K. Destruction mechanism of multilayer ceramic actuators: case of antiferroelectrics[J]. *Ferroelectrics*, 1994, 160(1): 277-285.
- [16] Furuta A, Uchino K. Dynamic observation of crack propagation in piezoelectric multilayer actuators[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1993, 76(6): 1615-1617.
- [17] Pan Y S, Chen D P. Finite element analysis of nonlinear fracture for piezoelectric ceramics[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2000, 35(5): 451-456.
- 潘亦苏, 陈大鹏. 压电陶瓷非线性断裂的有限元分析[J]. *西南交通大学学报*, 2000, 35(5): 451-456.
- [18] Bi M T, Shi Y Z, Chen J, et al. FEM analysis of residual stress of nano Ag bonding for multilayer piezoelectric ceramic actuators[C]//2006 National Conference on functional materials, July 24, 2006, Gansu, Dunhuang, China. Beijing: China Instrument and Control Society, 2006: 3.
- 毕美田, 史运泽, 陈晋, 等. 多层压电陶瓷驱动器纳米银粘接工艺应力分布的有限元分析[C]//2006年全国功能材料学术年会, 中国甘肃敦煌. 北京: 中国仪器仪表学会, 2006: 3.
- [19] Woo S C, Goo N S. Analysis of the bending fracture process for piezoelectric composite actuators using dominant frequency bands by acoustic emission[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(7/8): 1499-1508.
- [20] Wang L, Bai R X, Chen H R. Analytical modeling of the interface crack between a piezoelectric actuator and an elastic substrate considering shear effects[J].

- International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 66: 141-148.
- [21] Gao X Y, Xin X D, Wu J G, et al. A multilayered-cylindrical piezoelectric shear actuator operating in shear (d15) mode[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(15): 152902.
- [22] IEEE. An American national standard: IEEE standard on piezoelectricity: ANSI/IEEE Std 176—1987[S]. New York: IEEE, 1987.
- [23] Tang Y Z, Gu H B. Analysis of the longitudinal vibration transducer without prestressed screw[C]// Proceedings of 2020 Western China acoustic Symposium, August 20, 2020, Jiuquan, Gansu, China. Shanghai: 《Acoustic Technology》Editorial Department, 2020: 167-170.
- 唐义政, 顾汉炳. 无预应力杆纵振换能器分析[C]// 2020'中国西部声学学术交流会议论文集, 中国甘肃酒泉. 上海: 《声学技术》编辑部, 2020: 167-170.