

文章编号 1004-924X(2012)12-2728-09

电活性聚合物薄膜柔性结构的 动态特性分析与实验

张冬至^{1*}, 崔天宏²

(1. 中国石油大学(华东) 信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 明尼苏达大学 机械工程系, 美国 明尼阿波利斯 55455)

摘要:针对用电活性聚合物(EAP)薄膜制造柔性智能器件提出的理论模型和性能要求,采用一种铁电高分子聚合物薄膜制作了柔性结构器件,建立了它的动力学方程、振动行为模型及其机电性能描述。研究了预张力-抗弯刚度、驱动电压、器件几何参数对柔性薄膜器件性能的影响。提出了柔性薄膜器件在预张力和抗弯刚度共同作用下的振动行为模型及其特征化描述,用数值模拟和有限元仿真研究了杨氏模量及预张力-刚度比对柔性薄膜结构振动行为的影响,基于有限元模型与激光多普勒技术模拟和实测了 EAP 薄膜柔性结构的模态振型。此外,基于压电激励-激光拾振方法研究了驱动电压及器件几何尺寸对 EAP 薄膜柔性结构动态响应特性的影响。实验结果验证了激光多普勒技术用于 EAP 薄膜智能器件测试的有效性,揭示了 EAP 薄膜柔性结构器件的工作机理及动态性能,1 V 驱动电压可产生精密位移 21.6 nm。本文为研究 EAP 薄膜器件提供了理论基础和实验依据。

关键词:电活性聚合物;薄膜器件;动态特性;柔性结构;激光多普勒技术

中图分类号:TP211.4;TB43 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122012.2728

Dynamic characteristic analysis and experiments of flexible structure based on electroactive polymer film

ZHANG Dong-zhi^{1*}, CUI Tian-hong²

(1. College of Information and Control Engineering,

China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Mimeoapolis, MN 55455, U. S. A)

* Corresponding author, E-mail: dzzhang@upc.edu.cn

Abstract: According to the theory model and property requirements proposed by Electroactive Polymer (EAP) film-based flexible and intelligent devices, a flexible structure device was fabricated using a ferroelectric polymeric film, the corresponding kinetic equation, vibration behavior model, and electro-mechanical property description for the flexible device were established, and the influence of pretension-bending rigidity, driving voltage and geometric parameters on the properties of the flexible device was investigated. The vibration behavior model and characteristic description for the flexible film device under the coupling effects of pretension-bending rigidity were presented, the influence of Young'

收稿日期:2012-08-24;**修订日期:**2012-09-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51205414);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(No. BS2012DX044);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 12CX04065A)

s modulus and pretension-rigidity ratio on the vibration behavior of flexible film device was illustrated through combing numerical analysis with finite element simulation, and then the mode shape of the EAP film-based flexible structure was simulated and measured by using the Finite Element Model (FEM) and laser Doppler technique. Furthermore, dynamic response characteristics of EAP film-based flexible structure versus the driving voltage and geometric parameters were indicated by a combined approach of piezoelectric excitation and laser vibrometer measurement. The research results demonstrate the validity of laser Doppler technique employed in the property test on the EAP film-based flexible and intelligent film devices, illustrate its the working mechanism and dynamic properties. and show the precision displacement to be 21.6 nm under a driving voltage of 1 V. This work can provide theoretic foundation and experimental supports for EAP-based flexible devices.

Key words: electroactive polymer; film device; dynamic characteristic; flexible structure; laser Doppler technique

1 引言

电活性聚合物 (Electro-Active Polymer, EAP) 作为一种新型高分子智能材料,因其独特的电学及机械性能而崭露锋芒^[1-2]。EAP 在施加电压后会产生弯曲、收缩、膨胀等形式的力学响应,可用于实现驱动、传感等功能。该类材料具有非常卓越的柔韧性和较高的机电转换效率,易于成型且不易疲劳损坏,可取代传统材料而应用于微机电系统 (MEMS)、柔性装置、仿生机器人等领域^[3-6]。另外, EAP 以高分子聚合物为主要结构材料,不仅重量轻、能耗低,制造成本低,而且生物相容性优于半导体材料。因此 EAP 材料是新一代柔性驱动器、传感器未来发展的一个重要方向^[7-8]。近几年,基于 EAP 的微型机械致动器和传感器的研究有了长足发展,电活性聚合物智能器件的潜在应用范围也不断扩展。如瑞士 Kovacs G 等研制的堆叠式伸缩驱动器^[9],新西兰 Anderson Iain A 等制造的旋转马达^[10],意大利 Carpi F 等研发的流体静力耦合驱动器^[11],德国 Flittner K 等制作的 EAP 气阀^[12], Lotz P 等实现的 EAP 薄膜驱动蠕动泵^[13]。此外,国内西安交通大学庞宣明等^[14-15]采用 EAP 材料制作了微泵致动器并将其应用于微流体系统,中山大学祁新梅等^[16]也将其应用于机器人领域。

EAP 材料的诸多优越性能使其在多功能和微纳智能器件开发等领域具有重要的研究价值,然而,对柔性薄膜谐振器、微流体驱动器及其机电耦合特性等方面的研究尚处于起步阶段。

EAP 柔性结构动力学行为和驱动特性受其刚度和预拉伸张力的影响,经典理论模型将不适用。当前, EAP 材料性能数据库尚不完善,器件模型的建立及设计优化需要大量深入的研究,而且其机电耦合机理和响应模型也缺乏系统的理论分析和实验测试。基于此,本文采用 EAP 材料中的一种铁电高分子聚合物——聚偏氟乙烯 (PVDF) 为基体被覆银墨电极制备了柔性圆膜结构,提出了柔性圆膜结构在抗弯刚度和预张力共同作用下的振动行为模型及其特征化描述,研究了杨氏模量及预张力-抗弯刚度比对柔性圆膜结构振动行为的影响关系,采用有限元方法验证了 EAP 薄膜柔性结构谐振频率理论分析的正确性。采用有限元理论模型与激光多普勒技术,对 EAP 薄膜柔性结构的模态振型进行了模拟和实测研究,验证了采用激光多普勒技术测定 EAP 薄膜柔性结构动态性能的可行性。此外,利用压电激励-激光拾振测试系统研究了驱动电压及器件几何尺寸对 EAP 薄膜柔性结构驱动性能的影响,揭示了 EAP 薄膜柔性结构器件的工作机理及动态性能。

2 薄膜柔性结构制作与理论分析

为实现 EAP 薄膜柔性结构的制作与测试,采用具有优良逆压电特性的铁电聚合物 PVDF 制备圆形自立式薄膜柔性结构器件。首先取平片状聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 作为支撑材料,并用甲醇溶液清洗其表面;其次,采用激光切割方法在其上制作具有特定几何尺寸的圆形孔;而后,在 PMMA 平片状支撑材料表面旋涂环氧胶,将双面

镀有金属电极的电活性薄膜胶合于 PMMA 平片状支撑材料上,形成圆形自立式薄膜衬底结构。最后,制作电极引线以便施加激励信号并完成测试。制作的电活性聚合物薄膜柔性结构截面与俯视示意图如图 1。

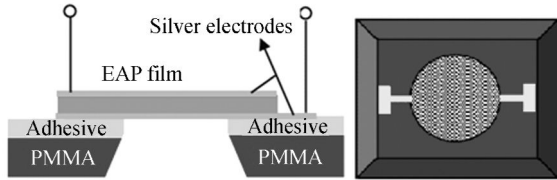


图 1 电活性聚合物薄膜柔性结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of EAP film flexible device

EAP 薄膜柔性结构在制作过程引入的残余应力为膜片提供了均匀的径向平面预张力。柔性薄膜器件在抗弯刚度 D 和张力 T 共同作用下的自由振动行为的本构方程可用四阶微分方程描述如下^[17]:

$$D \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right]^2 \omega - T \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] \omega + \rho h \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = 0. \quad (1)$$

其中 $D = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$ 为抗弯刚度, T 为平面预张力, E, ν, h, ρ 分别为 EAP 薄膜的杨氏模量、泊松比、厚度和密度, t 为时间, (r, θ) 为极坐标系。对于镀有金属电极的 EAP 膜片,采用等效刚度和等效密度(镀膜层影响较小,主体 EAP 膜片占支配地位)。

考虑到四周固支的圆膜结构,设方程(1)的解为:

$$\omega(r, \theta, t) = W(r) \Theta(\theta) e^{i\omega t}. \quad (2)$$

将式(2)代入方程(1)得

$$\left[D \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right]^2 - T \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] + \rho h \omega^2 \right] W \Theta = 0, \quad (3)$$

令拉普拉斯算子 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$, 则方程(3)可因式分解为:

$$(\nabla^2 + \alpha^2)(\nabla^2 - \beta^2)W\Theta = 0, \quad (4)$$

其中特征参数

$$\alpha^2 = \frac{T}{2D} \left[\sqrt{1 + \frac{4D\rho h\omega^2}{T^2}} - 1 \right], \quad (5)$$

$$\beta^2 = \frac{T}{2D} \left[\sqrt{1 + \frac{4D\rho h\omega^2}{T^2}} + 1 \right]. \quad (6)$$

根据线性微分方程理论,方程(4)的全解可表示为如下两线性微分方程的解的和:

$$(\nabla^2 + \alpha^2)W_1\Theta = 0, \quad (7)$$

$$(\nabla^2 - \beta^2)W_2\Theta = 0. \quad (8)$$

令 $\Theta = \cos(n\theta - \theta_n)$ 为简谐振子的运动方程,其中 $n=0, 1, 2, 3, \dots, \theta_n$ 为初始相位,则方程(7)和(8)为:

$$\frac{d^2 W_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW_1}{dr} + (\alpha^2 - \frac{n^2}{r^2})W_1 = 0, \quad (9)$$

$$\frac{d^2 W_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW_2}{dr} + (\beta^2 + \frac{n^2}{r^2})W_2 = 0, \quad (10)$$

式(9)和式(10)即为经典贝塞尔方程,其解为:

$$W_1 = A_n J_n(\alpha r) + B_n Y_n(\alpha r), \quad (11)$$

$$W_2 = C_n I_n(\beta r) + D_n K_n(\beta r), \quad (12)$$

其中 A_n, B_n, C_n, D_n 为待定系数, J_n 和 Y_n 分别为 n 阶第一类和第二类贝塞尔函数, I_n 和 K_n 分别为 n 阶第一类和第二类虚宗量贝塞尔函数。考虑到圆膜中心位移为有限值,式(11)和式(12)中的 $Y_n(\alpha r)$ 和 $K_n(\beta r)$ 项可去除,故方程(4)的通解即为:

$$W = W_1 + W_2 = A_n J_n(\alpha r) + C_n I_n(\beta r). \quad (13)$$

式(13)表明,圆膜振动模态为 n 阶第一类实宗量和虚宗量贝塞尔函数的线性组合。因此,本构方程(1)的通解可推导为:

$$\omega = W(r)\Theta(\theta)e^{i\omega t} = [A_n J_n(\alpha r) + C_n I_n(\beta r)]\cos(n\theta)e^{i\omega t}, \quad (14)$$

且存在

$$\beta^2 - \alpha^2 = T/D, \quad (15)$$

$$\alpha\beta = \omega \sqrt{\rho h/D}. \quad (16)$$

考虑圆膜周边固支,则边界条件为:

$$\begin{cases} \omega(r, \theta) |_{r=R} = 0 \\ \frac{\partial \omega(r, \theta)}{\partial r} |_{r=R} = 0 \end{cases}. \quad (17)$$

将式(14)代入边界条件(17)中,得到

$$\begin{cases} A_n J_n(\alpha R) + C_n I_n(\beta R) = 0 \\ -A_n \alpha J_{n+1}(\alpha R) + C_n \beta I_{n+1}(\beta R) = 0 \end{cases}. \quad (18)$$

求解上述齐次方程的待定系数,可得特征方程:

$$\alpha R \frac{J_{n+1}(\alpha R)}{J_n(\alpha R)} + \beta R \frac{I_{n+1}(\beta R)}{I_n(\beta R)} = 0, \quad (19)$$

该方程的解即为特征参数 αR 和 βR 的本征值。为衡量预张力与抗弯刚度 D 对圆膜振动特性的影响,定义无量纲参数:

T-D 比:

$$\lambda = \frac{(\beta R)^2 - (\alpha R)^2}{[\min(\alpha R)]^2} = \frac{R^2}{14.68 D} T. \quad (20)$$

频率参数:

$$\kappa = \alpha\beta R^2 = \alpha R \sqrt{(\alpha R)^2 + 14.68\lambda}. \quad (21)$$

λ 作为判定圆膜动力学行为的度量,是膜片的几何尺寸、材料性质及平面力的函数。当 $\lambda > 0$ 时,表示圆膜径向拉伸;当 $\lambda < 0$ 时,表示圆膜径向压缩。在预张力-抗弯刚度耦合作用下圆膜固有频率即为:

$$\omega = \frac{\alpha}{R} \sqrt{\frac{D}{\rho h} \left[(\alpha R)^2 + \frac{TR^2}{D} \right]} = \frac{\kappa}{R^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)}}. \quad (22)$$

由此可判断膜片行为并计算柔性圆膜结构在抗弯刚度-张力作用下的固有频率。电话活性薄膜柔性结构由 EAP 膜型芯层材料与均匀覆盖于其上下表面导电性良好的银墨柔顺电极共同构成,在柔顺电极上施加激励电压,聚合物薄膜将在静电力作用下,在厚度方向产生收缩,在面积上扩展延伸,即“电致伸缩”特性。依据麦克斯韦应力,薄膜在电压施加方向上承受的电致应力为^[18-19]:

$$p = \epsilon_0 \epsilon_r E_0^2 = \epsilon_0 \epsilon_r (V/\delta)^2, \quad (23)$$

式中 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m 和 ϵ_r 分别为真空介电常数和薄膜材料的相对介电常数, E_0 为施加的电场强度, V 为驱动电压, δ 为薄膜厚度。在电致应力作用下,薄膜材料在厚度方向上产生可调谐的机械形变和力学响应。

3 数值模拟与仿真研究

3.1 数值模拟研究

对于几何结构和尺寸确定的 EAP 薄膜柔性结构,抗弯刚度大小主要表现为材料的杨氏模量满足 $D = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$,反映结构构件抵抗变形的能力。因此,为明确抗弯刚度和预张力对 EAP 薄膜结构固有频率的贡献,以杨氏模量 E 和 T-D 比 λ 作为二因素,以半径为 5 mm,厚度为 64 μm 的 EAP 圆膜结构为研究对象,对其基频(第一阶固有频率)做一系列的数值模拟研究。对于 EAP 结构,当杨氏模量 E 在 2.5~4.5 GPa, T-D 比 λ 为 -1~2 时,根据式(22)对其振动基频进行二维数值模拟,模拟结果如图 2 所示。研究了二因素对结构基频的交叉影响,图 3 为 EAP 圆膜结构在杨氏模量 E 和 T-D 比 λ 共同作用下相应基频的三维数值模拟结果。由图 2 和图 3 可见, EAP 圆膜结构的基频随杨氏模量和 T-D 比的增

加而增大。在结构几何尺寸确定的情况下,如果通过实验确定出杨氏模量 E 或 T-D 比二者之一,即可根据其基频来确定另一参数。

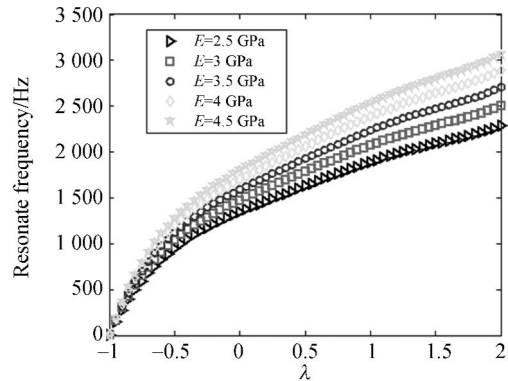


图 2 EAP 柔性结构基频与杨氏模量和 T-D 比 λ 之间的数值模拟

Fig. 2 Numerical simulation of 1st frequency vs. Young's modulus and T-D ratio λ for EAP flexible structure

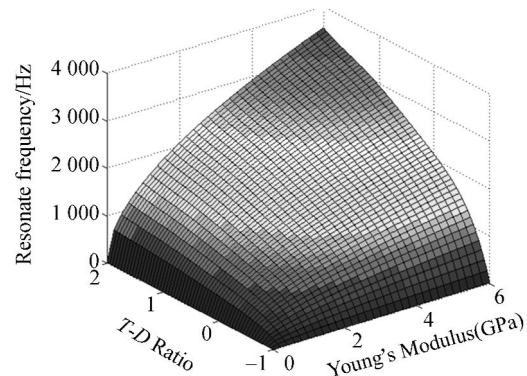


图 3 EAP 柔性结构基频的三维数值模拟

Fig. 3 3-D numerical simulation of 1st frequency for EAP flexible structure

3.2 有限元仿真研究

EAP 薄膜柔性结构由聚偏氟乙烯芯层材料和被覆银墨电极构成三明治结构,聚偏氟乙烯薄膜在厚度方向上极化,薄膜双表面被覆银墨电极层,周边固定。采用 ANSYS 平台单元库中八结点 SOLID5 对 EAP 薄膜进行有限元建模分析,采用关键点生成面单元,面单元生成体单元的方法,最后生成三维圆盘实体模型。将生成的电话活性聚合物圆盘体与银墨层圆盘体胶合在一起,并对圆盘体分别进行网格划分,将三维圆盘实体模型周边固支约束,设置其边界条件。在圆盘体表面加

载 0~0.8 MPa 的应力载荷。

在静态状态下进行加载求解,定义分析类型为模态分析,并求取 EAP 圆盘体的耦合模态与振动频率。在模态分析中,设置子步数目和频率范围,采用分块 Lanczos 方法进行模态提取,即用一组特征向量来实现 Lanczos 的迭代计算,并采用稀疏矩阵直接求解器求解。基于 ANSYS 有限元模型(Finite Element Model, FEM)计算了 EAP 薄膜结构的前四阶固有谐振频率及相应模态云图。EAP 薄膜柔性结构在不同压力下的前四阶谐振频率 ANSYS 仿真结果如表 1 所示,可见其谐振频率随压力的增加而增大。

表 1 EAP 薄膜柔性结构在不同压力下的前 4 阶谐振频率
Tab.1 The first four order resonate frequencies of EAP film flexible structure under different pressures

压力 /MPa	第一阶频率/Hz	第二阶频率/Hz	第三阶频率/Hz	第四阶频率/Hz
0	1 588.9	3 285.1	5 429.1	6 230.8
0.2	1 756.9	3 484.1	5 636.4	6 430.1
0.4	1 886.4	3 634.1	5 785.3	6 561.5
0.6	1 981.0	3 735.5	5 874.3	6 622.4
0.8	2 037.6	3 781.7	5 894.6	6 602.2

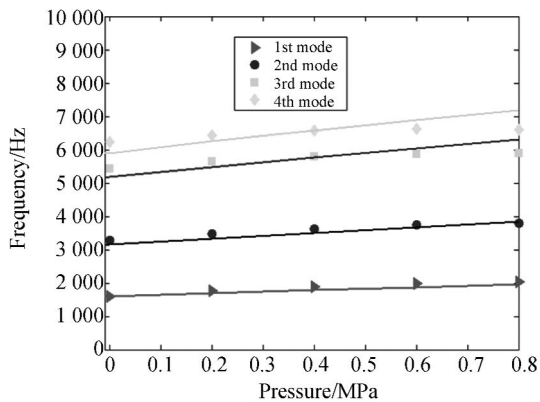
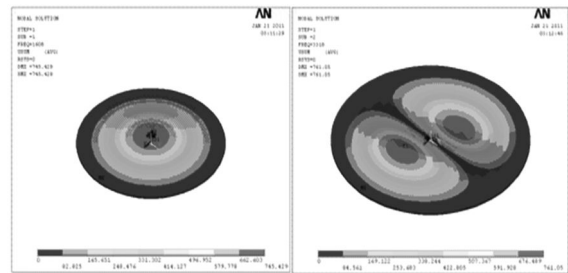


图 4 EAP 柔性结构谐振频率的理论分析与 ANSYS 仿真

Fig.4 Theoretical analysis and ANSYS simulation of resonate frequency for EAP flexible structure

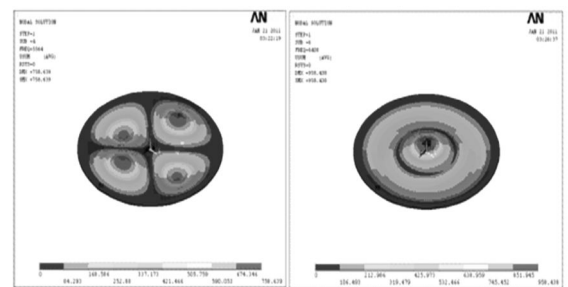
ANSYS FEM 的谐振频率与理论解析结果如图 4 所示,其中散点为 ANSYS FEM 的不同阶下的谐振频率仿真值,实线表示不同阶谐振频率的理论值,横坐标为加载压力,纵坐标为频率响应值。由图 4 可见,FEM 仿真结果与理论计算结果

基本吻合,验证了 EAP 薄膜柔性结构有限元仿真的有效性。基于 ANSYS 有限元模型,对 EAP 薄膜结构的前四阶共振模态振型进行了模拟研究,分别如图 5 所示。在第一阶模态下,薄膜的振动呈上下起伏状;在第二阶模态下,薄膜呈左右两侧对称上下起伏状;在第三阶模态下,薄膜振动呈对角性褶皱状;在第四阶模态下,薄膜呈翘曲状复合振动。



(a) 一阶模态
(a) First mode

(b) 二阶模态
(b) Second mode



(c) 三阶模态
(c) Third mode

(d) 四阶模态
(d) Fourth mode

图 5 基于有限元模型的 EAP 薄膜柔性结构模态仿真

Fig.5 Mode simulation of EAP film flexible structure based on ANSYS FEM

4 EAP 薄膜柔性结构实验研究

采用 DSM VF-500 线性压电放大器和德国 Polytec PSV-400 扫描式激光测振仪搭建压电激励-激光拾振测试平台,该平台具有非接触测量、精度高、频带范围广等优势。该测试系统是由压电发生器、高精度激光头(内置扫描单元)、控制器、连接箱、信号处理单元和数据管理系统等组成的一套可视化快速扫频测振系统,如图 6 所示。连接箱为系统各部分组成及外围器件提供接口和

核心连接。激光头包括扫描干涉仪、激光束扫描测量镜、可视化视频获取测量装置,是激光测量核心部件。数据管理系统实时记录测量数据,PSV 软件控制数据获取过程,并具有对测量数据进行评价的功能。该系统的工作原理基于激光多普勒频移效应。激光器发出的激光经聚光透镜后被分光镜分为参考光束和测量光束,从待测器件表面返回的激光产生的频移变化正比于器件表面的运动速度,其实验测量原理及光路如图 7 所示。采用 VF-500 压电发生器在 EAP 薄膜结构两电极之间施加电压激励,采用激光扫描测振仪测定其动态幅频特性,进而研究 EAP 薄膜柔性结构的振动性能。

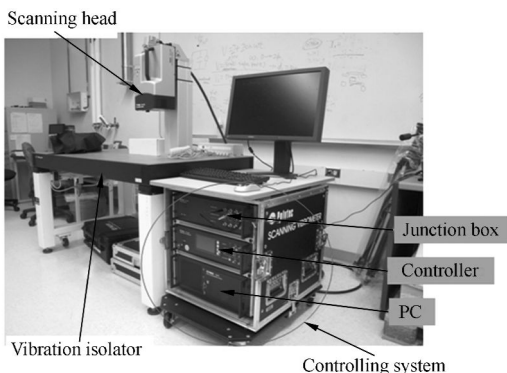


图 6 压电激励-激光拾振测量系统及实验平台
Fig. 6 Testing platform of piezoelectrical excitation and laser measurement

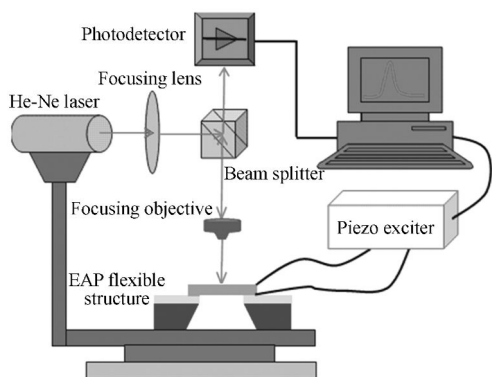


图 7 实验测量原理及光路
Fig. 7 Experiment principle & optical circuit

实验采用半径为 5 mm 的薄膜结构为待测器件,其厚度为 64 μm 。在一组不同幅值的交流电压激励下,实验测得的一组振动幅值-频率之间的

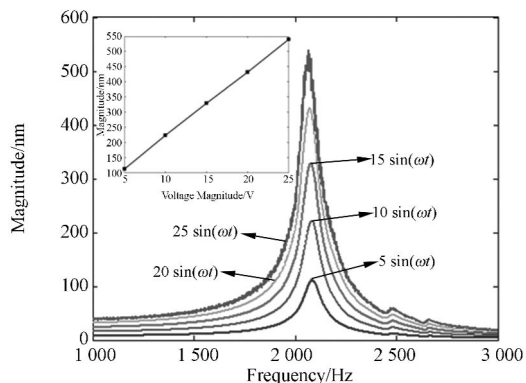


图 8 不同驱动电压下的 EAP 薄膜结构的振动位移-频率曲线(嵌入图为其振动幅值与驱动电压幅值之间的线性关系)
Fig. 8 Curves of vibration displacement-frequency of EAP film structure under different voltages (Insert plots indicate the linear relationship between vibration amplitudes and voltages)

关系如图 8 所示。由图 8 可知,振动位移量随驱动电压的增加而增大,在谐振频率处得到的振动位移量最大。扫频测试结果表明不同幅值的电信号不改变其谐振频率,当激励频率与由 EAP 材料类型及其几何结构所决定的固有频率接近时发生谐振。图 8 中的嵌入图为 EAP 薄膜结构的振幅与驱动电压的关系,充分表明了 EAP 薄膜振动位移量相对于驱动电压的变化呈良好的线性关系,25 V 驱动电压对应的位移量约为 540 nm,所以每 1 V 电压变化量对应的位移为 21.6 nm。通过改变所施加电场的特性可控制 EAP 薄膜结构的运动性能,驱动位移精度高,在纳米精度马达及驱动器等研究领域具有潜在应用。

为明确并验证 EAP 薄膜柔性结构几何尺寸对其谐振频率的影响,对不同半径的 EAP 圆膜结构进行压电激励和激光拾振实验。制备的 EAP 圆膜结构半径分别为 5, 2.5, 2, 1.5 mm, 实验得到其幅频曲线分别如图 9 所示。由图 9 可见,随着薄膜柔性结构器件半径的减小,相应的谐振频率增大。谐振频率与半径的对应关系如图 10 所示,谐振频率与半径倒数平方呈正比关系,即 $f \propto 1/R^2$ 。

采用激光多普勒测振仪对 EAP 薄膜结构的振动模态进行实验测试,如图 11 所示,分别给出了前 4 阶模态在 1/2 周期和 3/4 周期时的振型图。由此可见,实验测得的共振模态的振型与

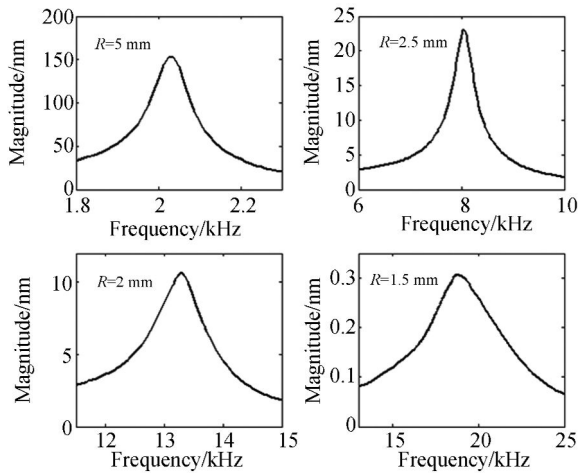


图 9 不同半径 EAP 薄膜结构的幅频曲线

Fig. 9 Curves of magnitude-frequency for EAP film structure with different radii

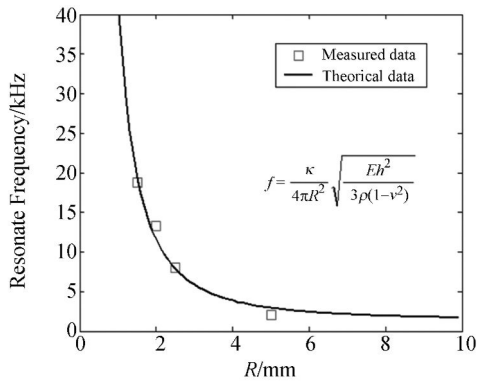


图 10 EAP 薄膜结构的谐振频率与薄膜半径关系

Fig. 10 Curves of resonate frequencies vs. radii for EAP film structure

ANSYS 仿真模态振型吻合, 验证了 ANSYS FEM 对 EAP 薄膜结构模态振型仿真的正确性, 同时表明采用激光多普勒技术测定 EAP 薄膜结构的动态性能是完全可行的。

参考文献:

- [1] 陈明, 林桂娟, 宋德朝. 基于电活性聚合物的微型发电机研究[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2413-2420.
CHEN M, LIN G J, SONG D CH. Micro-power

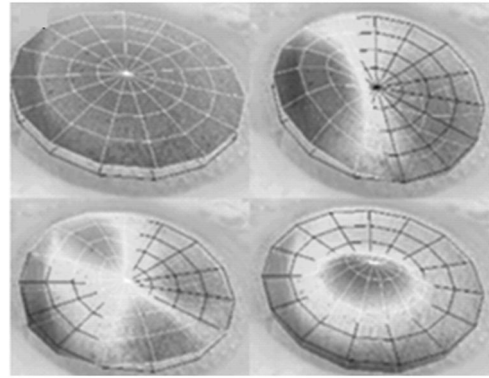


图 11 基于激光多普勒技术的 EAP 薄膜柔性结构模态实测

Fig. 11 Mode shape measurement for EAP film flexible structure using laser Doppler vibrometer

5 结 论

电活性聚合物柔性器件的开发是目前国内外一个十分活跃的研究领域。针对当前柔性智能器件发展提出的理论模型和性能研究要求, 文中制备了一种 EAP 薄膜柔性结构器件, 提出了柔性圆膜结构在抗弯刚度和预张力共同作用下的振动行为模型及其特征化描述, 研究了杨氏模量及张力-刚度比对柔性圆膜结构振动频率的影响关系, 采用有限元方法验证了 EAP 薄膜柔性结构谐振频率分析的正确性。然后, 基于激光多普勒技术对 EAP 薄膜柔性结构的模态振型和动态性能进行了实验测试, 并研究了驱动电压及器件几何尺寸对 EAP 薄膜柔性结构驱动性能的影响, 揭示了 EAP 薄膜柔性结构器件的工作机理及动态性能。实验显示 1 V 驱动电压可产生 21.6 nm 的精密位移, 验证了该器件在纳米精度马达及驱动器等研究领域具有潜在应用。

- generator on dielectric electro active polymer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2413-2420. (in Chinese)
[2] 林桂娟, 宋德朝, 陈明, 等. 电活性聚合物的力学性能及发电应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 908-913.
LIN G J, SONG D CH, CHEN M, et al.. Me-

- chanical property and power generation application research on dielectric electro active polymer [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(6):908-913. (in Chinese)
- [3] KWANGMOK J, KWANG J K, HYOUK R C. A self-sensing dielectric elastomer actuator[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 143(2):343-351.
- [4] KOVACS G, LOCHMATTER P, WISSLER M. An arm wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2):S306-S317.
- [5] BROCHU P, PEI Q. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles [J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2010, 31(1): 10-36.
- [6] BAR-COHEN Y. Electroactive polymer (EAP) actuators for future humanlike robots[C]. *Proc. of the Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 2009, San Diego, 7287:728703-1-6.
- [7] RATHOD V T, MAHAPATRA D R, JAIN A, et al.. Characterization of a large-area PVDF thin film for electro-mechanical and ultrasonic sensing applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 163(1):164-171.
- [8] BENSLIMANE M Y, KIIL H E, TRYSON M J. Dielectric electro-active polymer push actuators: performance and challenges [J]. *Polymer International*, 2010, 59(3):415-421.
- [9] KOVACS G, DÜRING L. Contractive tension force stack actuator based on soft dielectric EAP [C]. *Proc. of the Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* 2009, San Diego, 7287: 72870A1-15.
- [10] ANDERSON I A, CALIUS E P, GISBY T, et al.. A dielectric elastomer actuator thin membrane rotary motor [C]. *Proc. of the Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* 2009, San Diego, 7287:72871H-1-10.
- [11] CARPI F, FREDIANI G., DE R D. Dielectric elastomer actuators with hydrostatic coupling[C]. *Proc. of the Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* 2009, San Diego, 7287: 72870D-1-8.
- [12] FLITTNER K, LOTZ P, MATYSEK M, et al.. Integrated gasvalve array using dielectric elastomer actuators [C]. *Proc. of the Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* 2009, San Diego, 7287:72872C-1-7.
- [13] LOTZ P, MATYSEK M, SCHLAAK H F. Peristaltic pump made of dielectric elastomer actuators [C]. *Proc. of the Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* 2009, San Diego, 7287:72872D-1-8.
- [14] 夏冬梅, 庞宣明, 陈晓南, 等. 电致动聚合物驱动的无阀微泵的设计与制作[J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(7):92-95.
- XIA D M, PANG X M, CHEN X N, et al.. Design and fabrication for valveless micropump driven by dielectric elastomer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(7):92-95. (in Chinese)
- [15] 景素芳, 庞宣明, 陈晓南. 电致动聚合物致动器的动态响应研究[J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(11): 47-50.
- JING S F, PANG X M, CHEN X N. Investigation for dynamic response of electroactive polymer actuator [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(11):47-50. (in Chinese)
- [16] 张一起, 祁新梅, 郑寿森. 智能材料 DE 驱动的两态串并联机器人系统的运动特性[J]. *机器人*, 2010, 32(6):749-753.
- ZHANG Y CH, QI X M, ZHENG SH S. Kinematic characteristics of smart material DE actuated binary serial-parallel robot system [J]. *Robot*, 2010, 32(6):749-753. (in Chinese)
- [17] WAH T. Vibration of circular plates [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, 34(3):275-281.
- [18] PELRINE R, KORNBLUH R, PEI Q, et al..

High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100% [J]. *Science*, 2000, 287 (5454):836-839.

[19] WISSLER M, MAZZA E. Modeling and simulation of dielectric elastomer actuators [J]. *Smart Materials Structures*, 2005(14):1396-1402.

作者简介:



张冬至(1981—),男,山东聊城人,博士,讲师,2004年于山东理工大学获得学士学位,2007年于中国石油大学(华东)获得硕士学位,2011年于华南理工大学获得博士学位,主要从事动态测试技术与仪器、微机电系统(MEMS)与微纳传感器等方面的研究。E-mail: dz Zhang@upc.edu.cn



崔天宏(1969—),男,吉林辽源人,博士,教授,1991年于南京航空航天大学获得学士学位,1995年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事 MEMS、纳米制造技术等方面的研究。E-mail: tcui@umn.edu

●下期预告

太阳光与月光对曙暮光偏振模式的影响

崔 岩,高启升,褚金奎,陈 辰

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

为了研究曙暮光时分的天空偏振模式,分析了太阳光与月光偏振模式对曙暮光时分天空偏振模式形成中所起的作用。首先基于 Rayleigh 散射理论,运用 matlab 对太阳光与月光的偏振模式进行仿真,分析二者的差异性;接着利用成像式全天空测试系统对曙暮光的偏振模式进行测试,获取晴朗天气下曙暮光偏振模式分布图;然后将测试结果与太阳光和月光偏振模式分别进行对比,基于中性点位置、中性点数量和子午线方向,确定了太阳光与月光对曙暮光偏振模式的影响。结果表明:曙暮光偏振模式测试分布图与太阳光偏振模式理论分布图更加接近。结论:太阳光偏振模式在曙暮光时分天空偏振模式的形成中起主要作用。