

新型智能材料微小型光学镜头致动器的设计与性能研究

王延杰, 王永泉, 陈花玲, 朱子才, 罗斌
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了使微小型光学镜头驱动系统满足低能耗、高稳定性以及结构简单要求, 采用新型智能材料 IPMC 设计了一种微小型的光学镜头致动器, 并对其输出力、位移及响应速度等性能进行了研究. 根据直线驱动要求确定了瓣形和环形结构; 通过化学还原方法制备了 IPMC 材料, 采用激光切割技术分别制作出 5 种形状的环形和瓣形致动器, 并对其性能进行了测试. 利用有限元软件, 通过等效热模型分析了致动器的基本性能, 结果表明: 实验测试与理论分析结果一致, 误差率在 10% 以内; 瓣形致动器的总体位移性能比环形致动器的好; 在 3 V 驱动电压下两者的位移均大于 200 μm ; 当内圆半径为 2 mm、瓣数为 8 时, 致动器的最大位移与响应速度均最佳.

关键词: 离子交换聚合物金属复合材料; 致动器; 光学镜头; 等效热模型

中图分类号: TB381; TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0079-06

Design and Performance Investigation for Miniature Optical Lens IPMC Actuators

WANG Yanjie, WANG Yongquan, CHEN Hualing, ZHU Zicai, LUO Bin
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To meet the requirements of low consumption, high stability and simplicity for the optical lens driving system, ionic polymer-metal composite (IPMC), a new kind of intelligent material is adopted to design a miniature optical lens actuator, and its output force, displacement, and response speed are investigated respectively. For the purpose of linear driving, two kinds of actuating structures, the petal-shaped and annular structures are determined. Then, IPMC is prepared by chemical reduction method and five kinds of petal-shaped and annular actuators are manufactured by laser cutting and their performances are tested. The performances of the actuators with different structure parameters are analyzed using an equivalent thermal model via software FEA. The analytical results coincide well with the experimental ones with error less than 10%, and the displacement performance of petal-shaped actuator is better than that of the annular one. Under actuation voltage of 3 V, both actuators can get displacement over 200 μm . The annular actuator with an inner radius of 2 mm and the petal-shaped actuator with 8 petals achieve better performances in both displacement and response speed.

Keywords: ionic polymer-metal composite (IPMC); actuator; optical lens; equivalent thermal model

作直线运动的微小型致动器的驱动元件在光学镜头驱动系统中发挥着重要作用^[1]. 目前,相机的调焦方式因光学系统的不同而各有差异^[2],实际应用于手机相机光学镜头驱动系统中的调焦元件主要有音圈电机(VCM)、步进电机和超声波电机等. 在驱动过程中,VCM的行程受电流控制,功耗较大且容易发热,影响器件的寿命,而步进电机与超声波电机在机械结构或控制回路等方面存在着缺陷.

为了克服这些不足,近年来,国外一些企业及研究机构将以离子交换聚合物金属复合材料(IPMC)为基础的微小型致动器应用于光学镜头驱动器,并进行了初步的研究^[3-7]. IPMC是一种新型的柔性智能材料,在1~3 V电压下可以产生厘米级的弯曲变形,且在致动过程中响应速度快、耗能低,因此,将IPMC作为光学镜头致动器能够克服传统驱动方式所带来的不足. 日本EAMEX公司开发了一种用于手机镜头聚焦控制的IPMC微小型致动器,韩国电子通讯研究院研制出了具有自动聚焦功能的手机镜头成像装置. 此外,韩国延世大学的Kim等人利用离子溶液作为溶剂,改善了IPMC的性能,并在此基础上研制了一套用于自动聚焦系统的IPMC驱动装置. 然而,这些研究工作均侧重于实现装置的聚焦功能,而较少涉及致动器的结构优化问题.

在驱动光学镜头的自聚焦结构中,需要将IPMC材料典型的弯曲运动转化为直线运动,然而传统的悬臂梁结构无法满足此要求. 本文结合现有的结构形式,设计了瓣形和环形结构的IPMC致动器. 实验测试表明,通过改变瓣形致动器的瓣数和环形致动器的内径,IPMC可以表现出不同的驱动性能. 对于光学镜头来说,驱动器行程越长,系统的调焦能力就越强. 因此,以驱动器的最大位移为优化目标、通过选择不同的参数对其性能进行优化具有重要的应用价值.

此外,本文通过与压电双晶片模型比较,推出了一种等效热模型,并以此对环形和瓣形致动器的位移性能进行了仿真分析,所得结果与实验测试结果基本一致,为今后利用等效热模型分析IPMC材料的复杂结构变形提供了借鉴.

1 IPMC材料制备与致动器制作

1.1 材料制备

以Dupont公司的Nafion-117离子交换膜作为基体膜,选用Pd作为金属电极,制备了IPMC材料,具体工艺如下^[8].

(1)预处理,对基体膜进行去杂质和溶胀处理:基体膜的尺寸为6 cm×6 cm,用1200#砂纸分别打磨膜的上、下表面各5 min,使表面充分糙化,再分别用2 mol/L的HCl溶液和去离子水煮洗30 min,保持100 ℃恒温,以去除杂质离子,并使基体膜吸水膨胀.

(2)浸泡还原镀,使电极颗粒充分渗入基体膜:将处理后的基体膜浸入0.01 mol/L的Pd(NH₃)₄Cl₂溶液中浸泡2 h,使Pd⁺充分进入基体膜中,然后放入30 ℃、0.85 g/L的NaBH₄溶液中水浴并进行超声振荡,还原出Pd,重复进行3次.

(3)化学镀,有效增加表层电极厚度:将样片放入一定配比的Pd(NH₃)₄Cl₂和水合肼的混合液中,于40 ℃水浴并进行磁力搅拌,然后逐步升温至60 ℃,期间每隔0.5 h添加适量水合肼,3 h后取出,重复进行2次.

(4)后处理,进行离子交换:用0.1 mol/L的HCl溶液浸泡处理以去除杂质,再放入0.1 mol/L的NaOH溶液中进行阳离子交换,得到实验用Pd基IPMC材料.

1.2 IPMC的变形机理

IPMC材料由1层基体膜和附着于其上、下表面的2层薄膜金属组成,其变形特征类似于生物肌肉,材料内部的电致动效应类似于压电效应,即在材料上、下表面施加1~3 V直流电压时,基体膜内可自由移动的水合阳离子会向阴极移动,而膜内的阴离子被固定在高分子链上无法产生位移,阳离子持续地聚集在阴极附近便会在膜内产生浓度差,使膜的末端(自由端)向阳极弯曲,整体表现为IPMC材料的弯曲变形,如图1所示.

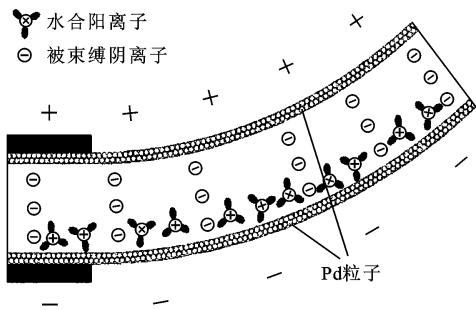


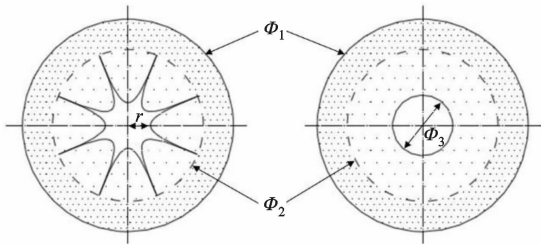
图1 IPMC变形机理示意图

1.3 致动器设计及制作

IPMC作为一种柔性致动材料,可以根据不同的驱动要求方便地制作成各种形状. 为了实现由弯曲运动转变为直线运动的目的,本文设计了环形和

瓣形 2 种形式的 IPMC 致动器,如图 2 所示。

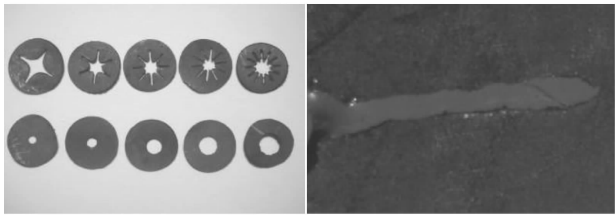
改变致动器形状、瓣数、内圆半径等结构参数能够影响其位移性能。为了比较这些参数对最大变形性能的影响,将测试实验分为瓣形和环形 2 组,瓣形组的瓣数依次定为 4、6、8、10 和 12,相应地环形组的环形致动器内圆半径分别定为 1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 mm。



(a)瓣形致动器俯视图 (b)环形致动器俯视图
点阵密集处为约束部分,点阵稀疏处为自由变形部分,内部材料均被切除; $\Phi_1=14\text{ mm}$, $\Phi_2=10\text{ mm}$, $\Phi_3=4\text{ mm}$, $r=2\text{ mm}$;
瓣数为 8,花瓣边界为 NURBS 样条曲线

图 2 致动器结构形状设计图

由于 IPMC 具有柔性,用常规方法切割比较困难,尤其是对于复杂形状。本文采用激光切割技术,激光切割机型号为博业 HSLC-1206。多次切割测试表明,切割能级控制在 30%~80%、切割速度为 5 m/min 时,切缝宽度在 180~220 μm 之间,切割效果较好。切割后得到的微型致动器的外观及切缝形貌如图 3 所示。由于材料受热失水易发生变形,切缝形貌并不柔顺,需要做进一步分析研究。



(a)致动器外观 (b)切缝形貌
图 3 采用激光切割技术得到的微型致动器及切缝形貌

2 采用等效热模型进行结构优化

为了评估致动器的几何参数变化对其位移性能的影响,利用等效热模型结合有限元软件 ANSYS,分别对瓣数及内圆半径进行了优化分析,并进行了模拟仿真。

2.1 IPMC 材料等效热模型的推导

由于对 IPMC 材料的变形机理认识不足,现阶段并未形成统一的理论模型来描述这种材料的致动机制。目前,在具体应用器件设计方面比较流行的理

论模型主要是韩国 Konkuk 大学和美国 Nevada 大学的 Lee、Kim 等人^[9-10]提出的等效压电双晶片模型,国内清华大学的李龙土等人^[11]也对该模型进行了理论分析与实验验证。但是,这种方法比较烦琐,且不适合分析复杂形状。本文利用等效热模型,通过有限元软件 ANSYS 中的等效热分析模块对 IPMC 材料进行数值仿真分析。

在材料力学中,线(热)膨胀系数定义为单位温度变化下物体线性尺寸的变化率。在压电模型中,横向压电系数的物理意义是:在 z 向施加单位电场强度时,压电材料沿 x 方向的应变(如图 4 所示)。由此可见,材料的线膨胀系数 α_1 (脚标 1 指沿 x 方向)和横向压电系数 d_{31} 的定义很相似,均指材料受外界因素影响而改变尺寸,区别在于前者是在温度下变形,而后者是在电压下变形。因此,IPMC 材料在电压下的变形完全可以用相应材料在温度下的变形来等效表示。

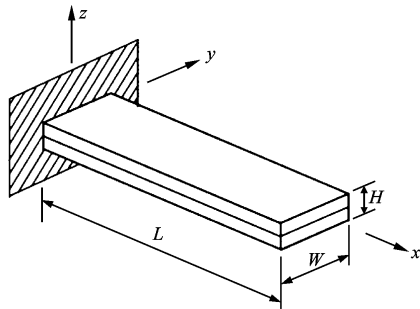


图 4 压电材料悬臂梁结构示意图

为了建立电压、横向压电系数、温度、线膨胀系数 4 个参数之间的有效关系,不考虑其他参数的影响,仅考虑横向压电系数 d_{31} 和等效线膨胀系数 α_1 ,使压电材料 z 向受单位电场强度变化所产生的变形等同于等效热膨胀材料受单位温度变化所产生的变形,用公式可表达为

$$d_{31}^* \Delta V_3 / t = \alpha_1 \Delta T \tag{1}$$

式中: d_{31}^* 为 IPMC 的等效横向压电系数; ΔV_3 为 IPMC 等效压电双晶片的 z 向电压; t 为 IPMC 等效压电材料的 z 向尺寸; α_1 为 IPMC 的等效线膨胀系数; ΔT 为 IPMC 等效热膨胀材料体上所受的温差。设定等效压电双晶片上的 1 V 电压对应于等效热膨胀材料上的 1 $^{\circ}\text{C}$ 温差,式(1)可简化为

$$d_{31}^* / t = \alpha_1$$

在压电双晶片材料 z 向施加 2 V 电压时,由于该电压贯穿了上、下 2 层压电晶片材料,而由式(1)计算的等效压电系数 d_{31}^* 是针对单层压电片的,因此

式中 $t=H/2$.

根据等效压电理论进行计算, d_{31}^* 可以表述为

$$d_{31}^* = \frac{2H^2s}{3L^2V} \tag{2}$$

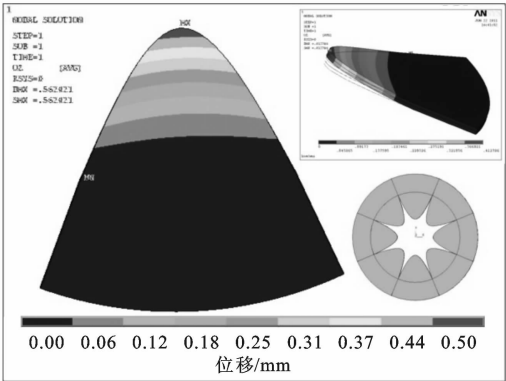
式中: s 为悬臂梁末端的位移; V 为上下表面施加的电压. 实验室制备的 IPMC 悬臂梁的结构尺寸为 $L=30\text{ mm}$, $W=5\text{ mm}$, $H=0.2\text{ mm}$, 当施加 2 V 电压时, 测得悬臂梁末端位移 $s=7\text{ mm}$. 将以上参数代入式(2)中, 可推导出等效横向压电系数 $d_{31}^*=1.037\times 10^{-7}\text{ m/V}$, 等效弹性模量 $E_x^E=280\text{ MPa}$, 由此可以计算出等效线膨胀系数 $\alpha_1=d_{31}^*/t=1.037\times 10^{-7}/(0.1\times 10^{-3})=1.037\times 10^{-3}$, 弹性模量保持不变. 值得注意的是, 温度不同于电压, 电压是施加在面上的, 在相同的电压下, 不同厚度的材料中的电场强度不同, 而温度是施加在体上的, 材料的温度不会因为厚度的变化而变化. 需要指出, 在压电双晶片悬臂梁厚度方向施加的电压值为 2 V , 对应到单层压电片上的电压值应该为 1 V , 所以在等效热模型中, 致动器上施加的温度梯度应该为 $1\text{ }^\circ\text{C}$.

2.2 建模参数

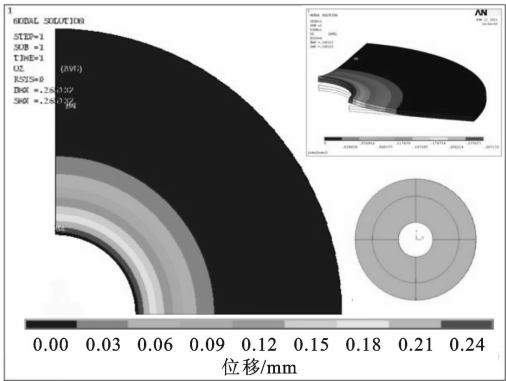
单元类型选择大变形单元 Solid 45. 在实验室测试中, 致动器需驱动 30 mg 的镜头, 为了保证理论分析与实验测试条件一致, 模型中需施加外力. 由于 IPMC 是柔性材料, 在变形过程中先为点接触, 后转化为面接触, 并逐渐扩展, 故为简化起见, 施加大小为 0.3 N 的面力. 瓣形和环形致动器的约束部位固支, 整体施加 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度梯度. 等效热模型的建模参数如下: 线膨胀系数 $\alpha=0.001\text{ }037$; 密度 $\rho=2.390\text{ g/cm}^3$; 弹性模量 $E=280\text{ MPa}$; 泊松比 $\mu=0.346^{[12]}$; 温度梯度 $\Delta T=1\text{ }^\circ\text{C}$.

为便于分析, 模型采用部分建模, 图 5 为八瓣形致动器 1/8 模型和内圆半径为 2 mm 的圆环形致动器 1/4 模型的分析结果.

理论分析表明, 2 种形状致动器的位移性能都存在最优值, 且瓣形致动器的总体位移性能优于环形致动器的, 如图 6 所示. 对于瓣形致动器, 随着瓣数的增加, 位移先是呈现递增趋势, 当瓣数大于 8 时, 位移开始减小, 这可能是因为随着瓣数增加, 单个瓣的面积逐渐减小, 材料刚度在变形过程中占了主导地位. 当内圆半径为 2 mm 时, 环形致动器达到最大位移 0.26 mm , 内径减小或增大都将使位移减小; 内径过小会导致致动器的自由部分相互约束, 使内应力增大; 内径过大会导致致动器自由部分的面积减小, 在施加外载荷时使整体弯曲变形减小.

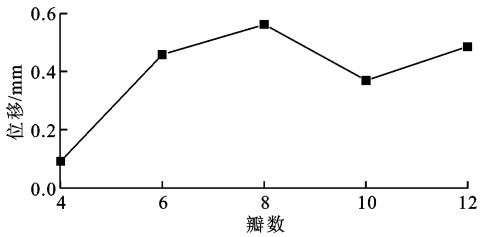


(a) 八瓣形致动器(1/8 模型)

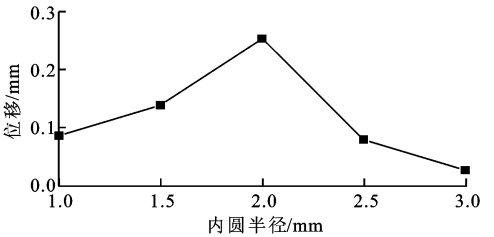


(b) 内圆半径为 2 mm 的环形致动器(1/4 模型)

图 5 ANSYS 仿真分析结果



(a) 瓣形致动器



(b) 环形致动器

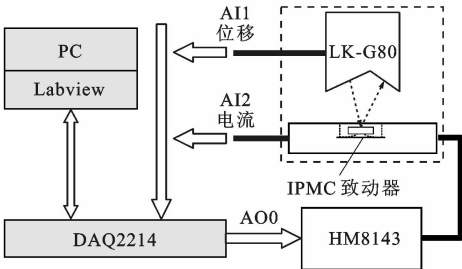
图 6 瓣形、环形致动器位移的理论分析结果

3 实验测试与结果分析

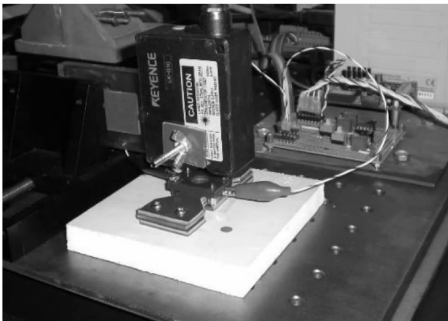
实验证实, 水作为溶剂可使 IPMC 材料发生松弛现象, 这也是限制 IPMC 材料应用的主要瓶颈之一. 降低材料的含水量, 可使松弛现象得到缓解. 鉴于 IPMC 材料的吸水、失水特性, 直接控制材料含水

量较为困难,可以通过调节环境湿度来改变材料的含水量^[13]. 基于此,本实验设计如下.

针对 2.2 节中切割出的不同形状的致动器,首先将其浸泡在去离子水中,浸泡时间不少于 30 min,使材料充分吸水;然后置于特制容器中,控制环境湿度在 60%左右,放置时间不少于 10 h,使致动器内部的含水量与环境湿度达到交换平衡. 在性能测试平台(见图 7)上测量 2 V 直流电压下加载 50 s 的致动器位移响应,为了比较电压变化对位移的影响,对致动器加载 3 V 电压的位移响应也进行了测试,每个样品测量 5 次,取平均值. 采用日本 Keyence 公司生产的 LK-G80 型激光位移传感器对致动器位移进行非接触测量,通过 DAQ2214 采集卡将采集的数据保存在计算机中.



(a) 系统结构示意图



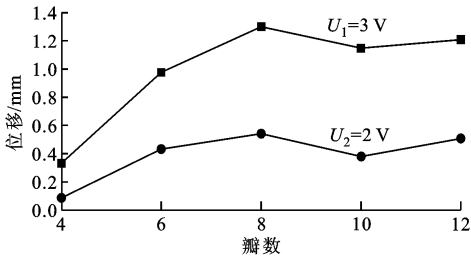
(b) 致动器在性能测试平台上

图 7 IPMC 致动器性能测试平台

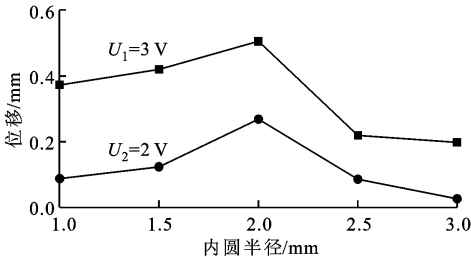
由于在致动器作动过程中无法对其输出力进行动态测量,本文采用等效替代的方法,即用等重物代替实际驱动镜头,在实验过程中致动器驱动该等重物. 拆解型号为 CPM132080612 的手机相机,确定驱动镜头的质量为 30 mg.

测试结果表明,对于瓣形致动器,当瓣数为 8 时,位移达到最大值,对于环形致动器,当内圆半径为 2 mm 时,位移亦达到最大值,此时两者的位移性能最佳,如图 8 所示.

随着驱动电压的升高,位移呈现增大的趋势:在 2 V 电压下,当瓣数 $n > 4$ 或内圆半径 $R = \Phi_3/2 = 2$



(a) 瓣形致动器

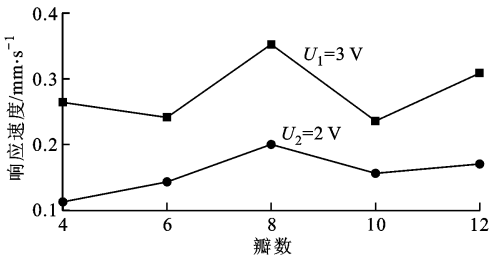


(b) 环形致动器

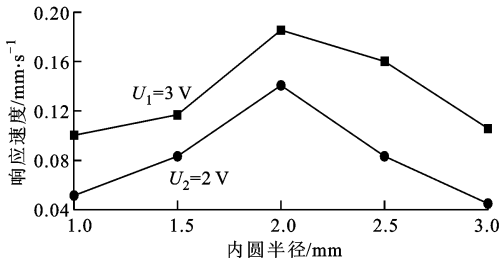
图 8 瓣形、环形致动器位移性能测试结果

mm 时,致动器的位移均大于 200 μm ;在 3 V 电压下,位移均大于 500 μm . 瓣形致动器的位移性能优于环形驱动器的位移性能.

响应速度是衡量致动器性能的重要指标. 实验测试表明,随着瓣数及内圆半径的改变,响应速度并没有呈现明显的变化规律,但随着驱动电压的升高,瓣形和环形驱动器的响应速度均呈现增大的趋势,如图 9 所示. 由于 IPMC 材料的变形是在电场作用下材料内部离子与溶剂迁移的结果,这限制了致动器作动过程中响应速度的提高.



(a) 瓣形致动器



(b) 环形致动器

图 9 瓣形、环形致动器响应速度测试结果

表 1 列出了 2 种类型致动器位移性能的理论分析与实验测试结果,可以看出,理论值与实验值并不严格一致,主要原因是:由于在 IPMC 材料制备过程中浓度、温度等不稳定因素的影响,制备成的 IPMC 薄膜性能存在差异;在致动器制作过程中,由于激光切割技术属于热切割,对材料的表面性能会产生一定的影响;基于压电双晶片原理的等效热模型是一种理想化模型,计算时未考虑非线性大变形的影响,从而导致理论计算值与实际值之间存在一定差异.不过,表中所列的位移分布情况与实际分布情况基本相同,误差率均在 10%以内.

表 1 致动器位移的理论分析与实验结果对比

<i>n</i>	理论位移/mm	实测位移/mm	相对误差/%
4	0.092 0	0.087 9	4.5
6	0.458 9	0.431 6	5.9
8	0.563 2	0.540 8	4.0
10	0.370 6	0.380 6	2.6
12	0.486 3	0.508 6	4.4

<i>R</i> /mm	理论位移/mm	实测位移/mm	相对误差/%
1.0	0.086 3	0.087 9	1.9
1.5	0.137 6	0.125 4	8.9
2.0	0.253 3	0.268 8	6.1
2.5	0.079 3	0.086 1	8.6
3.0	0.026 8	0.026 5	1.0

4 结 论

本文通过 Pd 型 IPMC 材料制备、致动器制作、实验分析及基本性能测试,分析了致动器外形尺寸的改变对其性能的影响规律,并利用有限元软件通过等效热模型对实验模型进行了仿真优化.研究表明:瓣数和内圆半径的改变均能够影响致动器的位移性能,瓣形致动器的总体位移性能比环形致动器的好;随着瓣数及内圆半径的改变,致动器的响应速度并没有呈现明显的变化规律,但随着驱动电压的升高,瓣形和环形驱动器的响应速度均呈现递增的趋势;当瓣数为 8 时,致动器的位移达到最大值,2 V、3 V 电压下的最大位移分别为 0.54 和 1.30 mm;当内圆半径为 2 mm 时,致动器的位移达到最大值,2 V、3 V 电压下的最大位移分别为 0.27 和 0.51 mm;2 种致动器的最大位移值均高于技术要求的 0.2 mm,此时响应速度也获得较好效果.采用等效热模型进行了仿真分析,理论计算值与实验测试值具有较好的一致性,证实了采用该模型分析

IPMC 材料复杂形状作动的可行性.

参考文献:

[1] 罗玉元,李朝东,张国贤. 基于离子聚合物金属复合结构(IPMC)柔性致动器的研究[J]. 中国机械工程, 2006, 4(2): 410-413.
LUO Yuyuan, LI Chaodong, ZHANG Guoxian. Study on soft actuators based on ion-exchange polymer metal composites (IPMC) [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 4(2): 410-413.

[2] 宗光华,裴旭,于靖军,等. 一种新型柔性直线导向机构及其运动精度分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 630-636.
ZONG Guanghua, PEI Xu, YU Jingjun et al. Novel compliant linear guiding mechanism and analysis of kinetic precision [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4): 630-636.

[3] EAMEX Co. トピックス[EB/OL]. [2011-05-26]. <http://www.eamex.co.jp>.

[4] LEE H K, CHOIA N J, JUNG S K, et al. Application of ionic polymer-metal composites for auto-focusing compact camera modules [C/OL] // Proceedings of SPIE, 2008, Vol. 6927. [2011-05-13]. http://spiedigitallibrary.org/proceedings/resource/2/psisdg/6927/1/69271N_1.

[5] KIM S J, KIM C J, PARK N C, et al. Design and position control of AF lens actuator for mobile phone using IPMC-EMIM [C/OL] // Proceedings of SPIE, 2008, Vol. 6927. [2011-05-13]. <http://144.206.159.178/FT/CONF/16413491/16413538.pdf>.

[6] KIM S J, KIM C J, PARK N C, et al. Design and control of 2-axis tilting actuator for endoscope using ionic polymer metal composites [C/OL] // Proceedings of SPIE, 2009, Vol. 7290. [2011-05-21]. http://spiedigitallibrary.org/proceedings/resource/2/psisdg/7290/1/729005_1isAuthorized=no.

[7] SHIMIZU I, KIKUCHI K, TSUCHITANI S. Variable-focal length lens using IPMC [C/OL] // ICROS-SICE International Joint Conference, 2009. [2011-05-21]. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=533434.

[8] ZHU Zicai, CHEN Hualing, CHANG Longfei, et al. Influence of fabrication process steps on Pd-IPMC electrode morphologies and mechano-electrical properties [C/OL] // Proceedings of SPIE, 2011, Vol. 7976. [2011-05-13]. <http://link.aip.org/link/?PSISDG/7976/79762T/1>.

[9] PAQUETTE J W, KIM K J, NAM J D, et al. An

- equivalent model for ionic polymer-metal composites and their performance improvement by a clay-based polymer nano-composite technique [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003, 14(10): 633-642.
- [10] LEE S, PARK H C, KIM K J. Equivalent modeling for ionic polymer-metal composite actuators based on beam theories [J]. *Smart Materials & Structures*, 2005, 14(6): 1363-1368.
- [11] 李龙土, 邬军飞, 褚祥诚, 等. 压电双晶片的有限元分析及实验[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2378-2383. LI Longtu, WU Junfei, CHU Xiangcheng, et al. Finite element analysis and experiment on piezoelectric bimorph [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2378-2383.
- [12] 安逸, 熊克, 顾娜. 采用梯度功能方法的 IPMC 弹性模量改进模型[J]. *复合材料学报*, 2009, 26(6): 189-193. AN Yi, XIONG Ke, GU Na. Improved model of IPMC's elastic modulus using functionally gradient method [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(6): 189-193.
- [13] SHOJI E, HIRAYAMA D. Effects of humidity on the performance of ionic polymer-metal composite actuators: experimental study of the back-relaxation of actuators [J]. *Phys Chem: B*, 2007, 111(41): 11915-11920.

(编辑 葛赵青)