

介电型电活性聚合物传感单元设计

王化明¹ 陈峰洪¹ 李鹭扬² 汪洋¹ 朱银龙³

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 扬州大学机械工程学院, 扬州 225000;
3. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

摘要: 基于介电型电活性聚合物(DEAP)变形时的电容变化原理,设计并实现一种传感单元,其内框可在平面内移动,用于检测平面位移。建立该传感单元的几何模型,得出其电容变化和内框位移的关系。采用差动测量法测量敏感单元电容变化,建立了面对面敏感单元的电容差值和内框平移量的关系。利用该传感单元设计了一个二自由度角度传感器用来测量关节转角,同样采用差动测量法建立了电容差值和转角的关系。实验测得其沿 X 轴和 Y 轴平移灵敏度为 -57.2 pF/mm 和 -58.0 pF/mm ,绕 X 轴和 Y 轴旋转灵敏度为 $-139.4\text{ pF}/(^{\circ})$ 和 $141.6\text{ pF}/(^{\circ})$ 。测试结果与分析结果较为吻合,验证了DEAP应用于位移传感器和角度传感器的可行性。

关键词: 介电型电活性聚合物; 传感单元; 差动测量; 关节转角测量

中图分类号: TP21; TB381 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)03-0383-07

Design of Dielectric Electroactive Polymer Sensing Cell

WANG Huaming¹ CHEN Fenghong¹ LI Luyang² WANG Yang¹ ZHU Yinlong³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: As a new smart material, dielectric electroactive polymers (DEAP) have shown great promise in the fields of sensing and actuation owing to their excellent overall performance, including large deformation, high efficiency and energy density. Based on the capacitance change principle of the polymer when deformed, a sensing cell composed of an outer frame, an inner frame and a sheet of DEAP film that was divided into four partitions coated with flexible electrode was designed and implemented. When the DEAP film was stretched or shrunk by the mobile inner frame, the flexible electrodes on both sides of the film come closer together or away each other, respectively, leading to changes in capacitance. A geometrical model of the proposed sensing cell was developed and the relationship between the capacitance of the sensing cell and the displacement of the inner frame was deduced. A differential approach was used to measure the variation of the capacitance of the parts face to face, and the capacitance difference of two opposite parts in function of the inner frame in-plane displacement was developed. Moreover, 2-DOF angular sensor by the sensing cell was designed and applied to angle measurement, and similarly, a differential approach was used to obtain the curve of the capacitance difference with the joint's rotational angle. The experimental sensitivities of X -translation, Y -translation, X -rotation and Y -rotation were respectively -57.2 pF/mm , -58.0 pF/mm , $-139.4\text{ pF}/(^{\circ})$ and $141.6\text{ pF}/(^{\circ})$, which were agreed well with the theoretical results. The research result verifies the feasibility of the application of DEAP in displacement sensor and angle sensor.

Key words: dielectric electroactive polymer (DEAP); sensing cell; differential measurement; joint angle measurement

收稿日期: 2016-07-10 修回日期: 2016-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305209)、江苏省自然科学基金项目(BK20130979)、江苏省“六大人才高峰”项目(2014-ZBZZ-004)、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20150516)和江苏省科技型企业技术创新项目(BC2015180)

作者简介: 王化明(1973—),男,教授,博士,主要从事介电型EAP驱动与传感技术研究,E-mail: hmwang@nuaa.edu.cn

引言

软体机器人模仿自然界中的软体动物,由可承受大应变的柔性材料制成,可在大范围内任意改变自身形状和尺寸^[1],故软体机器人的末端执行器往往有多个自由度,因此需要相应的多自由度软材料传感单元来检测关节转角和末端执行器位置^[2]。目前软材料传感单元研究主要基于压阻效应^[3]和压容效应^[4]。美国宾夕法尼亚州匹兹堡卡内基梅隆大学机器人研究所设计了一种由共晶镓铟合金电极和高分子弹性体电介质组成的软材料传感单元,该传感单元利用压容效应来测量手掌表面张力^[5],研究发现该种传感单元还可用于弯曲度^[6]、压力^[7-8]和拉力^[9-10]的测量。韩国先进科技学院利用碳纳米管电极和多孔弹性体电介质制作一种电容式压力传感单元^[11],该传感单元具有超高的灵敏度和稳定性,其测量范围可达0~130 kPa。进一步研究发现软材料传感单元在电子皮肤^[12-13]、触摸式可弯曲显示屏^[14]、能量收集技术^[15-16]和软体机器人^[17]方面有各种应用。

介电型电活性聚合物(DEAP)是近年来出现的一种应变大、质量轻^[18-21]的材料,利用其压容效应可制作软材料电容传感单元。一种典型的传感单元结构类似三明治^[22],中间层是DEAP膜,上下层是柔性电极,当薄膜受到外力变形时会引起其电容变化,建立电容-变形关系就可测得变形量。利用该原理还可建立电容-位移关系实现位移测量,可用于MRI导杆位置检测^[2]。

本文旨在利用DEAP设计一种软材料传感单元,用于平面内位移测量。在此基础上,设计一种二自由度转动关节,并利用该传感单元测量转动关节的转角。在几何建模分析基础上,建立电容差值-平移、电容差值-转角的关系并进行测量和误差分析。通过对比理论和试验结果,以期验证模型的合理性及DEAP用于传感单元的可行性。

1 传感单元设计和制作

1.1 结构设计

传感单元结构如图1所示。传感单元主要由外框、DEAP膜、内框和柔性电极组成,其中外框固定,内框可带着DEAP膜在平面内移动。薄膜等分为4个梯形单元,在其两侧分别涂上柔性电极,从而形成4个敏感单元A、B、C、D。单元A和C用来测量内框在Y轴的位移,单元B和D用来测量内框在X轴的位移。

1.2 传感单元制作

本试验以3M公司的VHB4910丙烯酸薄膜(厚

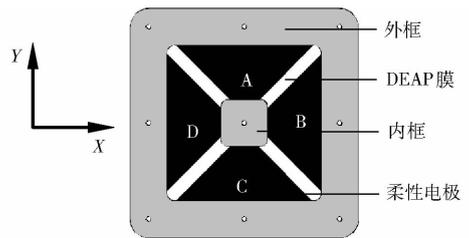


图1 传感单元结构

Fig. 1 Structure of sensing cell

度为1 mm)、预拉伸率为 3×3 的单层膜作为传感单元的制作材料。内外框均采用亚克力板,柔性电极由石墨、硅油和正庚烷按一定比例混合制得,电极引线由锡箔纸和铜丝制作。图2所示为传感单元的制作过程。主要分为:薄膜预拉伸(图2b)、内外框安装(图2c)和电极涂刷(图2d)。图3和表1所示分别为传感单元样机和几何参数^[23]。

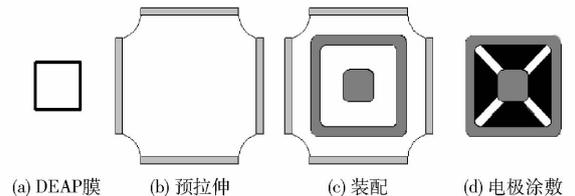


图2 传感单元的制作过程

Fig. 2 Manufacturing process of sensing cell

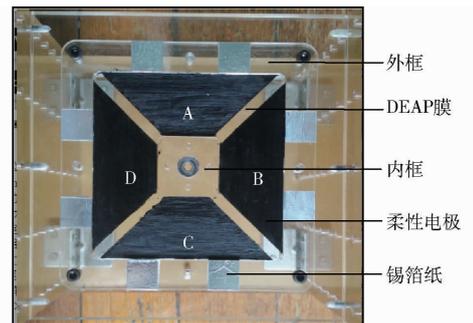


图3 传感单元样机

Fig. 3 Prototype of sensing cell

表1 传感单元几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of sensing cell mm

参数	数值
梯形电极上底长 b_1	30
梯形电极下底长 b_2	110
梯形电极初始高度 h_0	40
DEAP 薄膜初始厚度 t_0	0.11
内框边长 c_i	40
外框边长 c_o	120

2 传感单元的工作原理

DEAP本质上是一种超弹性绝缘材料,在外力作用下发生变形。在DEAP膜的两侧均匀地涂上柔性电极,其可等效成一个电容可变的平行板电容。薄膜两侧柔性电极是电容的2个极板,DEAP膜是

电容的电介质。在外力作用下如拉伸作用, 薄膜厚度变小, 则其面积变大(薄膜不可压缩), 故其电容变大。根据平行板电容公式, 其电容为

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{t} \quad (1)$$

式中 ε_0 ——真空中绝对介电常数, 约为 8.85×10^{-12} F/m

ε_r ——DEAP 膜的相对介电常数, 为 3.42^[24]

A ——柔性电极面积 t ——DEAP 膜厚度

任取单个传感单元分析(这里取单元 C, 图 4), 梯形上底和下底分别固定在内框和外框上, 因此薄膜变形时长度保持不变, 故梯形面积只和高 h 有关, 而 h 变化只和内框沿 Y 轴位移有关。因此单元 C 的电容 C 可以单独表示成关于梯形高度 h 的函数

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{b_1 + b_2}{2t} h \quad (2)$$

式中 h ——单元 C 的高度

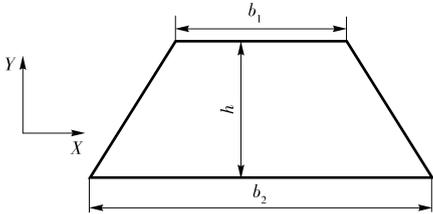


图 4 梯形电极的几何变量

Fig. 4 Geometric variables of trapezoid electrode shape

根据 DEAP 薄膜不可压缩特性, 可得

$$V = bht \quad (3)$$

其中 $b = (b_1 + b_2)/2$

式中 V ——薄膜体积, 为常数

b ——梯形平均底长

因此单元 C 的电容 C 可以单独表示成关于梯形高度 h 的函数, 即

$$C = kh^2 \quad (4)$$

其中 $k = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{b}{h_0 t_0}$

式中 k 为常数。

3 XOY 平面内位移测量

3.1 测量原理

由式(4)可知单元 C 的电容 C 与梯形高度 h 的平方成正比, 而梯形高度 h 的变化只与内框沿 Y 轴位移有关, 如图 5a 所示。当内框沿 X 轴平移, 引起单元 C 的形状变化如图 5b 所示, 由图看出剪切变形不会引起该单元的面积变化, 故其电容不会发生变化。因此当内框沿 X 轴移动, 传感单元 A 和 C 的电容不变, 传感单元 B 和 D 的电容发生变化; 当内框沿 Y 轴移动, 传感单元 A 和 C 的电容发生变化,

传感单元 B 和 D 的电容不变; 因此可采用差动测量法(AC 和 BD 差分单元分别测量沿 Y 轴和 X 轴位移)来测得内框在平面内位移。

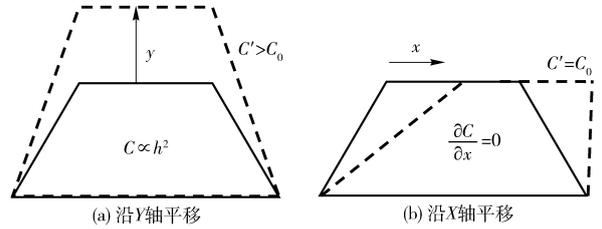


图 5 电容随内框平移变化

Fig. 5 Capacitance changing with inner frame translations

任取一个方向(这里取沿 Y 轴方向)分析, 如图 6 所示。

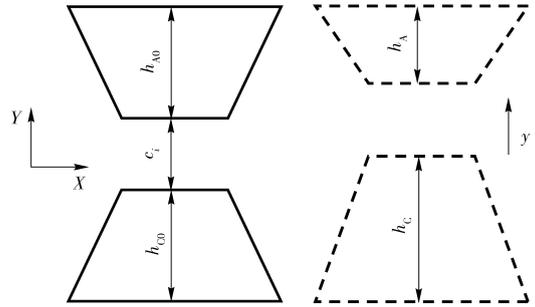


图 6 用于差动测量的面对面 2 个单元

Fig. 6 Two cells face to face for differential measurements

每个单元高度 h_i 可由它的初始高度 h_0 和内框沿 Y 轴平移距离 y 表示

$$h_A = h_{A0} + y \quad (5)$$

$$h_C = h_{C0} - y \quad (6)$$

式中 h_A ——单元 A 的高度

h_C ——单元 C 的高度

h_{A0} ——单元 A 的初始高度

h_{C0} ——单元 C 的初始高度

将式(5)和式(6)分别代入式(4)得到 2 个单元电容差值 ΔC 为

$$\Delta C = C_A - C_C =$$

$$2(k_A h_{A0} + k_C h_{C0})y + (k_A - k_C)y^2 + \Delta C_0 \quad (7)$$

其中

$$\Delta C_0 = C_{A0} - C_{C0}$$

式中 C_0 ——单元 A 和 C 的初始电容差值

k_A ——单元 A 的系数

k_C ——单元 C 的系数

假设这 2 个单元结构参数相同, 那么 $k_A = k_C = k$; $h_{A0} = h_{C0} = h_0$, 则其电容差值 ΔC 为

$$\Delta C = \frac{4b\varepsilon_r \varepsilon_0}{t_0} y \quad (8)$$

由式(8)可知, 当面对面 2 个单元参数相同时, 其电容差值与内框沿 Y 轴的位移 y 呈线性关系。

3.2 位移测量

图 7 所示为测量传感单元内框位移的装置, 该

装置利用 XY 滑台带动内框在平面内平移并锁定来模拟该传感单元的具体位置。为了使弹性膜能充分舒张,内框锁定一定时间后再用 LCR 数字电桥先后测量各敏感单元的电容。

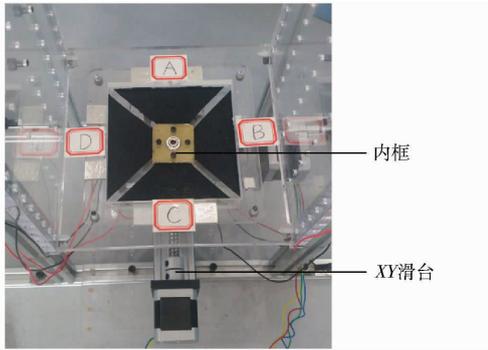


图7 传感单元测量装置

Fig.7 Measuring device for sensing cell

图8所示为单元A、C的测量结果,所有的点几乎在一个平面上,这与式(9)较为吻合。由图9可看出电容差值与内框沿Y轴的位移y呈线性关系。

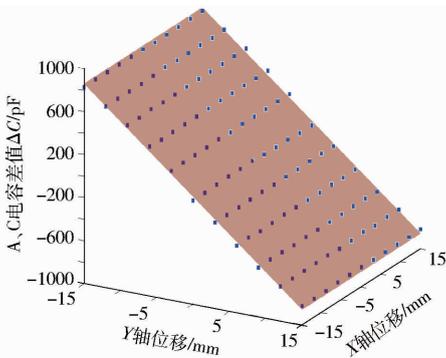


图8 单元A、C的电容差值和内框位移的关系

Fig.8 Relationship between capacitance difference of cells A and C and inner frame displacement

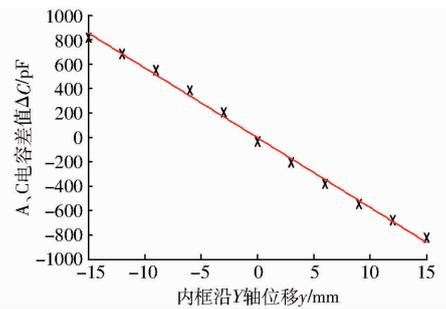


图9 单元A、C的电容差值和内框沿Y轴位移的关系

Fig.9 Relationship between capacitance difference of cells A and C and inner frame displacement along Y-axis

3.3 标定

利用最小二乘法拟合平面上有效点来标定

$$\Delta C(x, y) = \omega x + \mu y + \eta \quad (9)$$

式中 ω ——传感单元沿 X 轴平移灵敏度

μ ——传感单元沿 Y 轴平移灵敏度

η ——差动单元的初始电容差值

表2和表3所示分别为AC和BD差动单元的标定结果与理论结果。从表中可以看出BD差动单元的 ω 和AC差动单元的 μ 与理论计算的结果非常接近。BD的 μ 和AC的 ω 几乎为零,接近理论值。

表2 AC差动单元标定结果与理论结果

Tab.2 Calibrated and theoretical results of cells AC

参数	标定结果	理论结果
沿 X 轴平移灵敏度 $\omega / (\text{pF} \cdot \text{mm}^{-1})$	-0.05	0
沿 Y 轴平移灵敏度 $\mu / (\text{pF} \cdot \text{mm}^{-1})$	-57.2	-76.3
初始电容差值 η / pF	-23	0

表3 BD差动单元标定结果与理论结果

Tab.3 Calibrated and theoretical results of cells BD

参数	标定结果	理论结果
沿 X 轴平移灵敏度 $\omega / (\text{pF} \cdot \text{mm}^{-1})$	-58.0	-76.3
沿 Y 轴平移灵敏度 $\mu / (\text{pF} \cdot \text{mm}^{-1})$	0.12	0
初始电容差值 η / pF	-11	0

4 转动关节转角测量

该传感单元具有平面内平移2个自由度,利用该传感单元可以测量关节绕2个方向上转角。

4.1 二自由度转动关节实现

为了实现二自由度转动关节转角测量,设计的机构如图10所示,在一根导杆两端各固定一个关节球轴承,其中一个轴承安装在传感单元内框中且导杆可沿该轴承内圈滑动,另一个轴承固定在底座上。底座固定,传感单元内框可在XOY平面内移动。

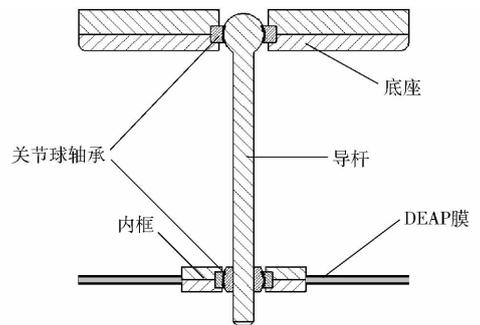


图10 二自由度转动关节结构

Fig.10 Structure of 2-DOF rotary joint

4.2 测量原理

绕X轴旋角测量分析,如图11所示,当轴承内圈旋转角为 α ,则内框沿着Y方向平移距离y与 α 关系为

$$\tan \alpha = \frac{y}{l} \quad (10)$$

式中 l ——导杆长度

由于 y/l 较小,则 α 的值较小,根据等价无穷小的原则,当 $\alpha \rightarrow 0$,则

$$\alpha \sim \tan \alpha \quad (11)$$

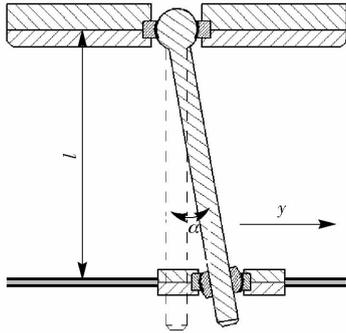


图 11 导杆绕 X 轴转动

Fig. 11 X-rotation of guide bar

联立式(8)、(10)和式(11)可得

$$\Delta C_y = m\alpha \quad (12)$$

其中

$$m = \frac{4bl\epsilon_r\epsilon_0}{t_0}$$

式中 ΔC_y ——Y 方向上电容差值
当传感单元参数确定后, m 为常数。

4.3 转角测量

本次试验导杆长度 l 取 140 mm, 关节球轴承型号选取 GE5C (内圈 5 mm, 外圈 14 mm), 考虑到安装方便和经济, XY 滑台选取 2 个丝杠滑台叠加而成, 图 12 所示为二自由度关节转角测量的装置, 该装置主要由滑台固定架、XY 滑台、传感单元固定架、导杆和关节球轴承组成。滑台带动传感单元内框在 XOY 平面内平移从而带动导杆绕着底端旋转, 通过分别测量 BD 和 AC 两对差动单元的电容差值得出导杆末端在 XOY 平面内沿 X 和 Y 方向上的位移, 从而测出导杆分别绕着 X 和 Y 轴的旋转角度。图 13 所示为 Y 方向上的电容差值 ΔC_y 与绕 X 轴旋转角 α 的关系。由该图可看出 ΔC_y 与 α 也几乎呈线性关系。

4.4 标定

同样利用最小二乘法拟合有效点来标定得到表 4 和表 5 所示的标定结果。可以看出 AC 差动单元的 ω' 和 BD 差动单元的 μ' 与理论计算的结果非常接近。AC 的 μ' 和 BD 的 ω' 几乎为零, 接近理论值。

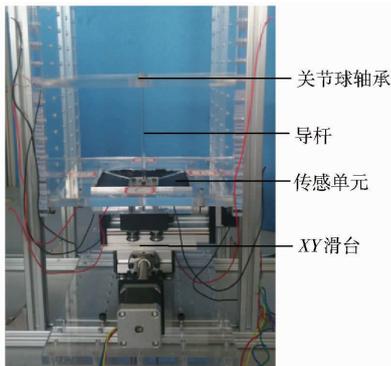


图 12 关节转角测量装置

Fig. 12 Measuring device for joint's rotational angle

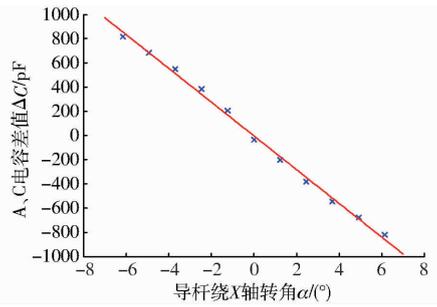


图 13 单元 A、C 的电容差值与导杆绕 X 轴转角的关系

Fig. 13 Relationship between capacitance difference of cells A and C and X-rotation of guide bar

表 4 AC 差动单元标定结果与理论结果

Tab. 4 Calibrated and theoretical results of cells AC

参数	标定结果	理论结果
绕 X 轴旋转灵敏度 $\omega' / (\text{pF} \cdot (\text{°})^{-1})$	-139.4	-186.4
绕 Y 轴旋转灵敏度 $\mu' / (\text{pF} \cdot (\text{°})^{-1})$	0.12	0
初始电容差值 η' / pF	23	0

表 5 BD 差动单元标定结果与理论结果

Tab. 5 Calibrated and theoretical results of cells BD

参数	标定结果	理论结果
绕 X 轴旋转灵敏度 $\omega' / (\text{pF} \cdot (\text{°})^{-1})$	-0.30	0
绕 Y 轴旋转灵敏度 $\mu' / (\text{pF} \cdot (\text{°})^{-1})$	141.6	186.4
初始电容差值 η' / pF	11	0

5 误差分析

5.1 连带运动

对于单个传感单元, 其连带运动主要包括 4 个: 内框沿 Z 轴平移和绕 X、Y 和 Z 轴旋转。

内框沿 Z 轴平移距离为 z , 如图 14 所示, 由于结构对称, 敏感单元都被拉伸, 每个敏感单元高度变化 Δh 为

$$\Delta h = h' - h = \sqrt{h^2 + z^2} - h \quad (13)$$

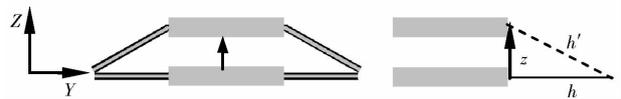


图 14 内框沿 Z 轴平移

Fig. 14 Translation along Z-axis of inner frame

内框绕 X 轴和 Y 轴旋转, 由于结构对称, 可任取一种分析 (这里取绕 X 轴分析如图 15 所示), 4 个梯形单元都被等量地拉伸, 梯形高度变化 Δh 为

$$\Delta h = \sqrt{\left(h + \frac{c_i}{2}\right)^2 + \left(\frac{c_i}{2}\right)^2} - 2\left(h + \frac{c_i}{2}\right)\frac{c_i}{2}\cos\theta - h \quad (14)$$

式中 θ ——旋转角度

由于内框绕 Z 轴小幅度旋转, 梯形薄膜面积几乎不变如图 16 所示, 故其电容几乎不变。

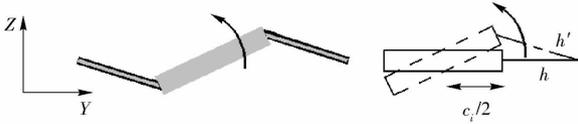


图 15 内框绕 X 轴旋转

Fig. 15 X-rotation of inner frame

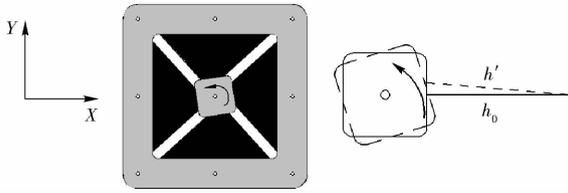


图 16 内框绕 Z 轴旋转

Fig. 16 Z-rotation of inner frame

5.2 传感单元制作误差

进一步分析制作过程中 b_1 、 b_2 和 h_0 对电容差值 ΔC 的影响,式(7)对 y 求偏微分可求得差动单元的灵敏度为

$$\frac{\partial \Delta C}{\partial y} = \frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0}{t_0} \left[b_A + b_C + \left(\frac{b_A}{h_{A0}} - \frac{b_C}{h_{C0}} \right) y \right] \quad (15)$$

由式(15)可看出传感单元的灵敏度并非是一个常数,即相对 2 个敏感单元的电容差值与位移并非呈线性关系,这主要是因为制作工艺等原因造成 4 个敏感单元几何参数各不相同。

5.3 假设带来的误差

该理论分析基于以下假设:①DEAP 膜各处变形完全均匀。②薄膜相对介电常数不变。③电极 100% 覆盖。

实际上,DEAP 膜变形量随着离内框距离的增大而减小,故敏感单元变形后并非严格上的梯形。柔性电极不能完全随着 DEAP 膜的变形而变形,电极之间会出现裂纹,导致其有效正对面积 A 低于理论值,且随着薄膜变形的增大,对 A 的影响会越大。所以实测的电容会比理论值偏小,并且随着变形的增加,两者之间的误差会逐渐增大。此外,DEAP 膜相对介电常数并非常数,会随着薄膜厚度的减小而增大。

5.4 DEAP 薄膜起皱失效

内框在平面内位移过大导致 DEAP 薄膜起皱

(图 17),导致敏感单元实际面积无法变化。

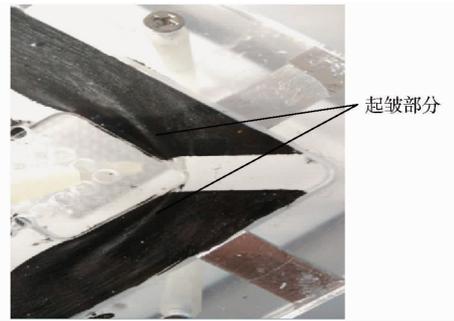


图 17 DEAP 薄膜起皱

Fig. 17 Wrinkling of DEAP membrane

5.5 估算误差

由于 $|\alpha| < \pi/2$,故可将 $\tan \alpha$ 展开成幂级数得

$$\tan \alpha = \alpha + \frac{\alpha^3}{3} + o(\alpha^3) \quad (16)$$

联立式(8)、(10)和式(16)可得

$$\Delta C_y = m\alpha - m \frac{\alpha^3}{3} + o(\alpha^3) \quad (17)$$

估算误差

$$|R| < m \frac{\alpha^3}{3} < m \frac{\alpha_{\max}^3}{3} = 0.07 \text{ pF} \quad (18)$$

由式(18)可知估算误差 R 很小,因此基本可以忽略。

6 结束语

设计了一种基于 DEAP 的传感单元。针对该传感单元,建立其几何模型,分析单个敏感单元的电容和内框位移关系。采用差动测量法得出电容差值和内框位移的关系。搭建了一种二自由度转动关节,并利用该传感单元测量其转角,建立面对面敏感单元的电容差值和转角的关系。测量结果显示其沿 X 轴和 Y 轴平移灵敏度分别为 -57.2 pF/mm 和 -58.0 pF/mm ,绕 X 轴和 Y 轴旋转灵敏度分别为 $-139.4 \text{ pF}/(^{\circ})$ 和 $141.6 \text{ pF}/(^{\circ})$ 。试验结果验证了模型的合理性,表明了 DEAP 应用于传感单元的可行性,同时显示了传感单元在多自由度平面位移测量和转动关节转角测量方面有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- 1 TRIVED D, RAHN C D, KIER W M, et al. Soft robotics: biological inspiration, state of the art, and future research [J]. Applied Bionics & Biomechanics, 2008, 5(3):99-117.
- 2 GIRARD A, BIGUE J P L, O'BRIEN B M, et al. Soft two-degree-of-freedom dielectric elastomer position sensor exhibiting linear behavior [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(1):105-114.
- 3 PARK Y L, CHEN B R, WOOD R J. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(8):2711-2718.
- 4 ULMEN J, CUTKOSKY M. A robust, low-cost and low-noise artificial skin for human-friendly robots [C] // 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010,58(1):4836-4841.

- 5 ROBERTS P, DAMIAN D D, SHAN W, et al. Soft-matter capacitive sensor for measuring shear and pressure deformation [C] // 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013:3529 – 3534.
- 6 MAJIDI C, KRAMER R, WOOD R J. A non-differential elastomer curvature sensor for softer-than-skin electronics [J]. *Smart Materials & Structures*, 2011, 20(10):1487 – 1490.
- 7 PARK Y L, MAJIDI C, KRAMER R, et al. Hyperelastic pressure sensing with a liquid-embedded elastomer [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2010, 20(12):125029 – 125034.
- 8 WONG R D P, POSNER J D, SANTOS V J. Flexible microfluidic normal force sensor skin for tactile feedback [J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2012, 179(3):62 – 69.
- 9 KIM H J, SON C, ZIAIE B. A multiaxial stretchable interconnect using liquid-alloy-filled elastomeric microchannels [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(92):011904 – 011904 – 3.
- 10 CHENG S, WU Z. A microfluidic, reversibly stretchable, large-area wireless strain sensor [J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(12):2282 – 2290.
- 11 KWON D, LEE T I, KIM M S, et al. Porous dielectric elastomer based ultra-sensitive capacitive pressure sensor and its application to wearable sensing device [C] // Transducers – 2015 18th, International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2015:299 – 302.
- 12 TAKAO S, TSUYOSHI S, SHINGO I, et al. A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(27):9966 – 9970.
- 13 WANG X, YANG G, XIONG Z, et al. Silk-molded flexible, ultrasensitive, and highly stable electronic skin for monitoring human physiological signals. [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(9):1336 – 1342.
- 14 FAN F R, LIN L, ZHU G, et al. Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6):3109 – 3114.
- 15 ZHU G, YANG W Q, ZHANG T, et al. Self-powered, ultrasensitive, flexible tactile sensors based on contact electrification [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(6):3208 – 3213.
- 16 WANG Z L, WU W. Nanotechnology-enabled energy harvesting for self-powered micro-/nanosystems [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51(47):11700 – 21.
- 17 BAUER S, BAUER-GOGONEA S, GRAZ I, et al. 25th anniversary article: a soft future: from robots and sensor skin to energy harvesters [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(1):149 – 161.
- 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 朱银龙, 张鑫焱, 王化明, 等. 介电型电话性聚合物驱动转动关节控制技术研究 [J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 332 – 338. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150747&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.047.
- ZHU Y L, ZHANG X Y, WANG H M, et al. Research on actuation control of dielectric electroactive polymer rotary joint [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 332 – 338. (in Chinese)
- 20 罗华安, 王化明, 游有鹏. 介电弹性体圆柱形驱动器静态特性分析 [J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 202 – 208. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120937&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.037.
- LUO H A, WANG H M, YOU Y P. Static characteristic of dielectric elastomer cylindrical actuator [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(9): 202 – 208. (in Chinese)
- 21 罗华安, 王化明, 朱银龙. 介电型电话性聚合物圆柱形驱动器结构参数分析 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(4):355 – 363. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160447&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.047.
- LUO H A, WANG H M, ZHU Y L. Analysis of structure parameters of dielectric electroactive polymer cylindrical actuators [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4):355 – 363. (in Chinese)
- 22 CRAPI F, ROSSI D D, KOMBLUH R, et al. Dielectric elastomers as electromechanical transducers [M]. Oxford: Elsevier, 2008:3 – 13.
- 23 赵俊. 介电型 EAP 发电能量转换研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
- ZHAO J. Research on energy conversion of electronic polymer generator [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- 24 袁同燕. 介电型 EAP 发电特性研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- YUAN T Y. Research on dielectric EAP generation characteristics [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)