光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021020601

基于聚偏氟乙烯的触力传感器结构优化分析

陈 婷[1]，袁严辉[2*]，顾晓勤[2]

（1. 电子科技大学 机械与电气工程学院，成都 611731；2. 电子科技大学 中山学院 机电工程学院，广东 中山 528402）

摘 要： 以聚偏氟乙烯(PVDF)作为触力传感器的敏感元件，通过控制变量的方法探究了PVDF触力传感器的上下衬底材料的类型和厚度对传感器灵敏度的影响。通过对压电材料的压电方程的理论计算，得到触力输入与电压输出的关系。有限元分析结果表明，上下衬底材料的厚度和弹性模量对触力传感器的灵敏度影响较大。当采用0.025 mm的PDMS作为上下衬底材料时，触力传感器的灵敏度达到0.527 mV/N。

关键词： 聚偏氟乙烯；触力传感器；有限元分析；材料体系；控制变量

中图分类号： TB33 **文章编号：** 1001－5868(2021)06－0834－05

Structure Optimization Analysis of Contact Force Sensor Based on PVDF

CHEN Ting[1], YUAN Yanhui[2], GU Xiaoqin[2]

（1. School of Mechanical and Electrical Engin., University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, CHN; 2. Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan 528402, CHN）

Abstract: Using polyvinylidene fluoride (PVDF) as the sensing element of the contact force sensor, the influence of the types and thickness of the upper and lower substrate materials on the sensitivity of the sensor was explored by controlling variables. Through theoretical calculation of piezoelectric equation of piezoelectric material, the relationship between contact force input and voltage output was obtained. The results of finite element analysis show that the thickness and elastic modulus of the upper and lower substrate materials has great influence on the sensitivity of the contact force sensor. When 0.025 mm PDMS is used as the upper and lower substrate material, the sensitivity of the contact force sensor can reach 0.527 mV/N.

Key words: PVDF; contact force sensor; finite element analysis; material system; control variable

0 引言

触力传感器作为压力传感器中的一种，主要是针对较小压力的一种压力信号的检测装置，通常由其中的敏感单元感知其压力信号，并通过后续的转换元件将传感器的数据转换成电信号或者其他形式的输出信号。根据敏感单元的材料不同，压力传感器主要分为压电式、电阻式和电容式三大类[1]。压电式压力传感器具有结构简单、灵敏度高、频带宽、动态特性好等特点；电阻式压力传感器具有灵敏度高、温度影响小、空间分辨率高、信号易检测等特点；电容式压力传感器具有响应速度快、精度高、分辨率高、迟滞小等特点。聚偏氟乙烯(PVDF)作为压电材料的一种，因其薄膜具有较高的柔性，所以应用场合相对其他压电材料更广[2]。1995年，Kolesar等[3]将PVDF薄膜粘贴在带有电极阵列的硅基集成电路上，制备了8×8布置的动态触力传感器阵列，力的响应范围在0.008～1.35 N。唐火红等[4]利用PVDF的压电特性研究了一种用于采摘果实的机械手，通过正压电效应，即当PVDF受到应力而发生一定的形变时，PVDF的两个表面会产生等

收稿日期：2021－02－06.

基金项目：国家自然科学基金项目(61771118).

* 通信作者：袁严辉

量的异性电荷，会有一定的电位差，从而产生电压，通过电压的变化可以知道采摘时应力的变化。Zou 等通过 PVDF 的传感器箔，测量摩擦焊机中摩擦聚合物片在结合面间产生的剪切应力和温度变化[5]。

本文研究了以聚偏氟乙烯（PVDF）作为敏感单元材料的压力传感器的上下衬底材料对传感器灵敏度的影响。首先利用压电材料的本构方程，推导出了 50 mm 的 PVDF 薄膜的输出电压和压力的关系式，然后在有限元分析软件 ANSYS 中改变压力传感器上下衬底的材料类型和厚度，观察电压输出情况，得到了上下衬底材料的类型和厚度与压力传感器的压力输出的关系图。

1　PVDF 压力传感器原理

PVDF 作为一种半结晶聚合物，具有晶体的物理特性，晶体的压电方程对 PVDF 压电薄膜也同样适用。在不考虑温度、湿度影响并且变形比较小的情况下，晶体的压电性可用压电方程来描述[6]：

$$D_i=\sum_{j=1}^{6}\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{\mathrm{T}}E_j+\sum_{u=1}^{6}\boldsymbol{d}_{iw}T_y,\quad i=1,2,3$$
$$S_\lambda=\sum_{i=1}^{3}\boldsymbol{d}_{j\lambda}E_j+\sum_{u=1}^{6}\boldsymbol{s}_{\lambda u}^{E}T_u,\quad \lambda=1,2,\cdots,6 \tag{1}$$

式中，D_i 表示电位移分量，S_λ 表示应变张量的分量，E_j 表示电场分量，T_u 表示应力张量的分量，$\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}$ 是恒定压力下的介电常数矩阵，$\boldsymbol{d}$ 是压电常数矩阵，$\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}$ 是恒定电场中的弹性柔顺系数矩阵，i 代表了电场方向，λ 代表力轴方向。其机械轴和坐标轴的关系如图 1 所示。

在所设置的环境中，没有外加的电场即 $E=0$，所以式(1)可以简化为

$$D_i=\sum_{u=1}^{6}d_{iw}T_y,\quad i=1,2,3$$
$$S_\lambda=\sum_{u=1}^{6}s_{\lambda u}^{E}T_u,\quad \lambda=1,2,\cdots,6 \tag{2}$$

由于没有外加电场，所以电极板上的电荷密度可以认为等于电极板上的电位移 D_i。可以知道 PVDF 的压电常数矩阵为[7]

$$\boldsymbol{d}=\begin{bmatrix}0&0&0&0&d_{15}&0\\0&0&0&d_{24}&0&0\\d_{31}&d_{32}&d_{33}&0&0&0\end{bmatrix} \tag{3}$$

简化可以得到电位移：

$$D_3=d_{31}T_1+d_{32}T_2+d_{33}T_3 \tag{4}$$

由于在压力的测量中，首先考虑的是 3 轴方向的压力，所以在计算中，也只考虑 3 轴方向的压力，式(4)可以再简化为

$$D_3=d_{33}T_3 \tag{5}$$

所以在电极板上的电荷量可以表示为

$$Q_3=\int_{S_3}D_3\mathrm{d}_{S_3}=\int_{S_3}d_{33}T_3\mathrm{d}_{S_3} \tag{6}$$

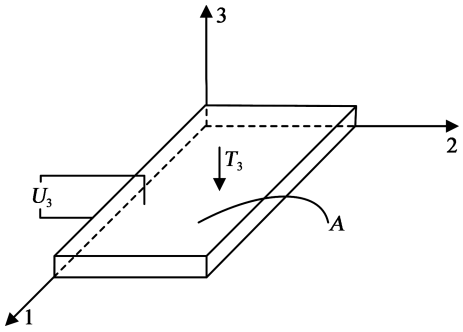


图 1　机械轴与坐标轴示意图

作为压力传感器的敏感元件，PVDF 受到外力的作用后会在其两侧出现异性电荷，此时可以将 PVDF 压电薄膜看做一个电荷源。由于 PVDF 是高分子聚合物材料，属于绝缘体，当它的两极表面聚集电荷时，可以视为一个电容器[8]，其等效电路如图 2。

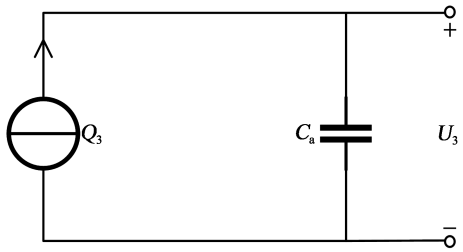


图 2　等效电路模型

图 2 中的 C_a 可以为

$$C_a=\frac{\varepsilon\varepsilon_0A}{d} \tag{7}$$

所以理论上，在一定压力下 PVDF 能得到的压力值计算公式为

$$U=\frac{Q}{C_a}=\frac{d_{33}}{\varepsilon\varepsilon_0}T_3d \tag{8}$$

其中，ε 和 ε_0 分别为 PVDF 的介电常数和相对介电常数，d 为 PVDF 薄膜的厚度，A 为 PVDF 薄膜上表面的面积。在这里将 PVDF 的厚度设置为 50 mm，PVDF 的主要参数如表 1 所示。

根据计算可得到输出电压和输入压力的关系

$$U=1.3\times10^{-5}\times T_3 \tag{9}$$

为了满足大面积的需求，将传感器的大小设计为 160 mm×160 mm。根据文献[9]，可以得到人体

触力需求在 0.1～10 N 之间，通过理论计算可以得到传感器的电压值范围是 0.052 7～5.27 mV，所以可以得到整个压力传感器的灵敏度在理论上可达 0.527 mV/N。

表 1 PVDF 的物理参数

材料参数	符号	数值
密度/(kg·m^{-3})	ρ	1.78×10^{3}
压电应变常数/(C·N^{-1})	d_{33}	-33×10^{-12}
压电应力常数/(V·N^{-1})	g_{33}	-330×10^{-3}
机电耦合系数/%	K	12～14
杨氏模量/(N·m^{-2})	Y	$2\sim4\times10^{9}$
相对介电常数	$\varepsilon/\varepsilon_0$	12

2 不同材料体系对传感器性能的影响

为了能够准确描述上下衬底材料属性和上下衬底厚度对压力传感器灵敏度的影响，在 ANSYS 中进行有限元分析时，主要采用控制变量的方法。在 ANSYS 中建模时，统一采用 50 mm 的 PVDF 薄膜以及同样一个柔性基底。为了让压力传感器更能适应柔软基底面，基底的参数可以参照人体皮肤的参数，将基底的弹性模量设置为 35 kPa，密度设置为 1.02 g/cm^{-3}。在 ANSYS 中设置边界条件时，将基底进行固定，施加压力时，对上衬底面施加压力，得到如图 3 所示的电压图。可以看到 PVDF 薄膜有明显的电压输出。

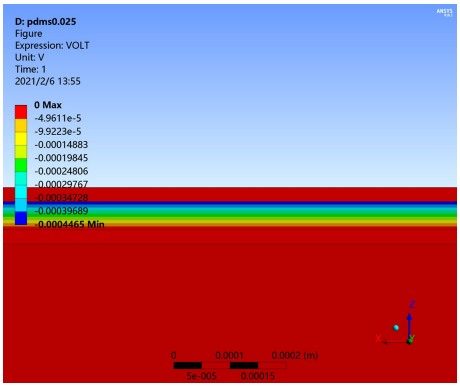


图 3 ANSYS 仿真结果图

2.1 不同衬底厚度对传感器性能的影响

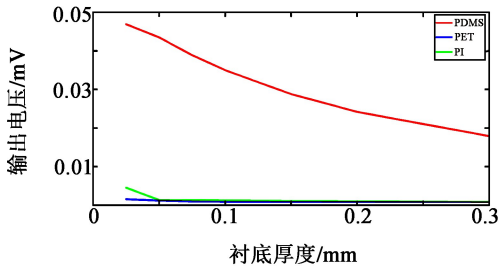
采用了三款目前使用较多的衬底材料作为比较对象，分别是聚酰亚胺(Polyimide，PI)、聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane，PDMS)以及聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene Terephthalate，PET)。三种衬底材料的物理参数如表 2 所示。

在 ANSYS 中对上衬底面分别施加 0.1，1.0，10 N 的压力，观察 PVDF 薄膜的电压输出情况，如图 4。

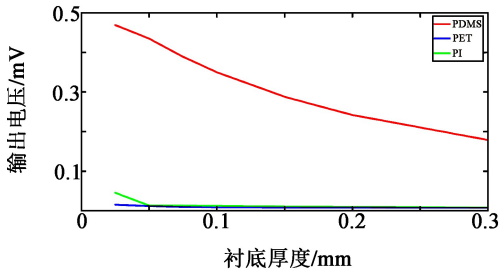
表 2 衬底材料物理参数

材料名称	泊松比	弹性模量/MPa	密度/(kg·m^{-3})
PI	0.34	3 000	1.4×10^{3}
PDMS	0.48	7	0.965×10^{3}
PET	0.3	2 250	1.38×10^{3}

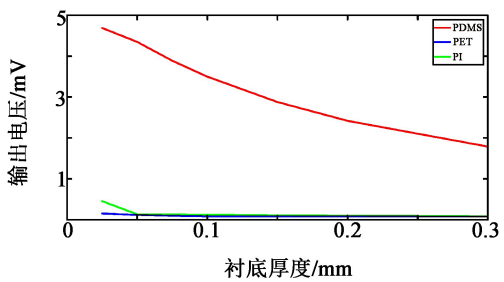
从图 4 可以看出，对上衬底施加不同大小的压力，三种衬底材料得到的输出电压值与理论值的差距情况是类似的，当以 PDMS 作为衬底材料时，随着衬底厚度的增加，输出电压值与理论值的差距增大，当以 PET 和 PI 作为衬底材料时，随着衬底厚度的增加，输出电压与理论值的差距也在增大，但是增大的幅度较小。



(a) 施加 0.1 N 压力



(b) 施加 1.0 N 压力



(c) 施加 10 N 压力

图 4 对上衬底面分别施加 0.1，1.0 和 10 N 压力时的电压输出

为了进一步说明上衬底厚度和下衬底厚度对传感器输出电压的影响，分别改变上下衬底的厚度进行分析。从图 4 可以看出，当 PDMS 作为衬底材料时，输出电压值的变化比较明显，所以在比较时，先

采用 0.05 mm 的 PDMS 下衬底，改变上衬底的厚度；再用 0.05 的 PDMS 上衬底，改变下衬底的厚度。设置输入压力为 0.1 N，结果如图 5 所示。

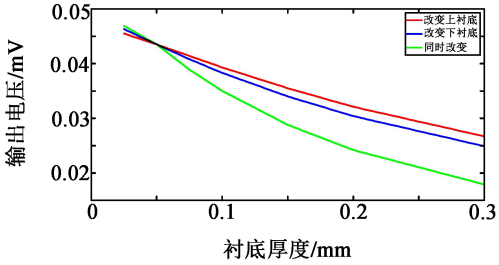


图 5　改变上/下衬底厚度时的电压输出

从图 5 的折线图可以看出，只有上衬底厚度改变或者只有下衬底厚度改变，均会导致输出得到的电压值变小，但是这种减小的幅度和上下衬底材料厚度同时增大时的幅度相比，并不明显。可以得到，只改变上衬底的厚度和只改变下衬底的厚度对输出电压的影响差距不大，但是和上下衬底厚度同时改变时电压的输出相比，差距比较明显。

2.2　衬底材料影响电压输出的原因

由图 4 的折线图可以看出，当衬底材料不同时，输出电压值与理论值的差距大小不一样。为了进一步说明衬底材料的不同对输出电压影响不同的具体原因，观察这三种衬底材料的物理参数，具体表现为三种材料的泊松比、弹性模量和密度的不同。采用控制变量的方法，在以 PDMS 材料的物理参数为基础的情况下，分别改变上下衬底材料的泊松比、弹性模量和密度。输入压力设置为 0.1 N，衬底材料厚度均设置为 0.05 mm。

通过图 6～8 对比可以看出，采用 ANSYS 有限元分析可以得到衬底的弹性模量对 PVDF 压力传感器的电压输出影响比较大。改变泊松比，电压值虽然有变化，但是在所取的范围内电压变化很小。改变密度时，输出电压值几乎没有变化。在具体进行优化设计时，泊松比和密度的影响可以忽略不计。

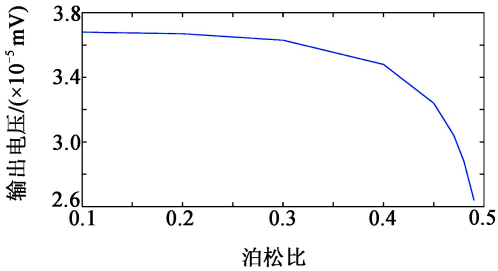


图 6　衬底材料的泊松比对电压输出的影响

为了进一步说明上、下衬底弹性模量的变化对电压值的影响差异，分别对上、下衬底采用不同的材料，观察在 ANSYS 中的电压输出情况。

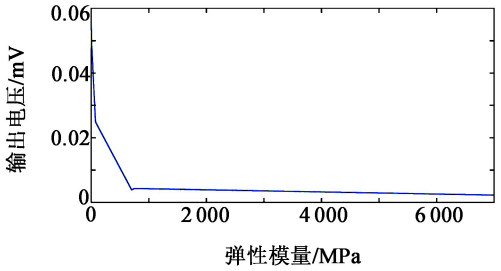


图 7　衬底材料的弹性模量对电压输出的影响

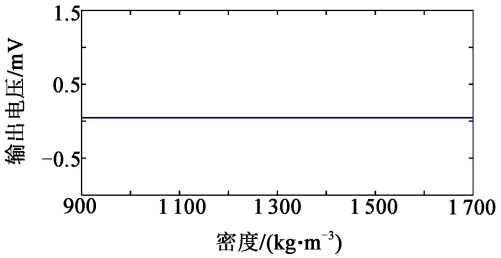


图 8　衬底材料的密度对电压输出的影响

从图 9 可以看出，当上下衬底均采用 PDMS 时所能获得的电压值最接近理论计算值，当上衬底或下衬底有一个采用 PDMS 时，能得到的电压值相较上下衬底均没有采用 PDMS 的电压值更小，更加远离理论值。这个结论进一步印证了上下衬底材料的弹性模量对压力传感器输出电压值的影响是明显的。

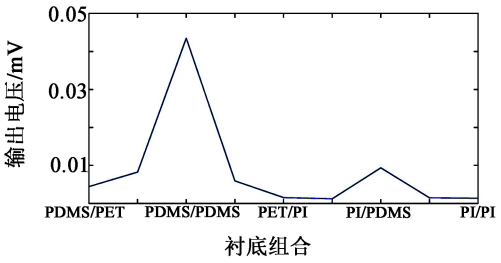


图 9　不同上下衬底组合时的电压输出

3　结束语

本文针对衬底材料的厚度以及材料属性对 PVDF 压力传感器的电压输出影响做了具体分析。可以看到，上下衬底材料的厚度对传感器电压输出的影响比较明显，上下衬底材料越薄，传感器的电压输出就越接近理论电压值；上下衬底材料的弹性模量越小，即材料越软，传感器的电压输出就越接近理论值。这为 PVDF 压力传感器的实际应用与制作提供了一定的理论基础。

参考文献：

[1] Dahiya R S, Metta G, Valle M, et al. Tactile sensing-from humans to humanoids[J]. IEEE Trans. on Robotics, 2010, 26(1): 1-20.

[2] 陈宝成，覃 双，张 旭，等. 基于PVDF的高压电性薄膜制备工艺研究[J]. 传感器与微系统，2019，38(10)：33-35，43.
Chen Baocheng, Qin Shuang, Zhang Xu, et al. Study on preparation process of high-voltage electrothinfilm based on PVDF[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(10): 33-35, 43.

[3] Kolesar E S, Dyson C S. Object imaging with a piezoelectric robotic tactile sensor [J]. J. of Microelectromechanical Systems, 1995, 4(2): 87-96.

[4] 唐火红，栾 铸. 基于PVDF压电传感器的采摘机械手研究[J]. 压电与声光，2019，41(3)：387-391.
Tang Huohong, Luan Zhu. Research on picking manipulator based on PVDF piezoelectric sensor [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(3): 387-391.

[5] Wei Zou, Werner Karl Schomburg. PVDF sensor foils employed to measure shear stress and temperature of friction welding [J]. Sensors, 2020, 20(16): 45-65.

[6] 许煜寰. 铁电与压电材料[M]. 北京：科学出版社，1978：65-68.
Xu Yuhuan. Ferroelectric and Piezoelectric Materials [M]. Beijing: Science Press, 1978: 65-68.

[7] Wang T T, Herbert J M, Glass A M. The Applications of Ferroelectric Polymers[M]. Glasgow: Blackie and Son, 1988: 44-70.

[8] Zhao Jingjing, You Zheng, Jian Linni. Models for 31-mode PVDF energy harvester for wearable applications [J]. The Scientific World J., 2014: 893496.

[9] 张 庭. 仿人型假手指尖三维力触觉传感器及动态抓取研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014：10-11.
Zhang Ting. Research on 3D force-tactile sensor and dynamic grasping of humanoid prosthetic fingertip[D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2014: 10-11.

作者简介：

陈 婷(1996—)，女，硕士，研究方向为PVDF压力传感器；

袁严辉(1974—)，男，副教授，研究方向为微机电系统(MEMS)以及智能材料。

(上接第822页)

[9] 张亚标，肖永川，王 超，等. 一种带温度参量的半导体激光器速率方程及仿真求解[J]. 半导体光电，2020，41(1)：50-53，58.
Zhang Y B, Xiao Y C, Wang C, et al. Semiconductor laser rate-equation with temperature parameter and emulation solving [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1): 50-53, 58.

[10] 林 屹. 可调谐半导体激光器波长检测与控制的研究[D]. 武汉：华中科技大学，2015.
Lin Y. Study on wavelength monitoring and control of monolithic tunable semiconductor lasers [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

[11] 刘 强，荆振国，李 昂，等. 调制光栅Y分支激光器准连续调谐特性[J]. 中国激光，2020，47(12)：263-271.
Liu Q, Jing Zh G, Li A, et al. Quasi-continuous tuning characteristics of modulated grating Y-branch lasers [J]. Chinese J. of Lasers, 2020, 47(12): 263-271.

[12] Finisar Application Note AN-2095 Controlling The S7500 CW Tunable Laser[Z]. 2011.

[13] 刘 佳，祝连庆，何 薇，等. 基于MG-Y型可调谐半导体光源的光纤光栅解调系统研究[J]. 仪器仪表学报，2020，41(3)：87-96.
Liu J, Zhu L Q, He W, et al. Research on optical interrogation system based on MG-Y tunable diode laser[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 87-96.

[14] Yoo S, Lee J K, Kim K. Suppression of thermal wavelength drift in widely tunable DS-DBR laser for fast channel-to-channel switching[J]. Opt. Express, 2017, 25(24): 30406-30417.

[15] Mattingly D. Designing stable compensation networks for single phase voltage mode buck regulators [H]. Intersil Technical Brief, 2003: 1-10.

[16] Heininger H. Longitudinal cavity mode referenced spline tuning for widely tunable MG-Y branch semiconductor laser [J]. Radioengineering, 2014, 23(1): 496-503.

作者简介：

陈振华(1993—)，男，河北省邯郸市人，硕士研究生，主要从事光纤传感技术方面的研究；

祝连庆(1963—)，男，浙江省兰溪市人，博士，教授，博士生导师，主要从事光纤传感技术和光学测量方面的研究。