

新材料与新技术

基于PVDF压电薄膜的新型电子皮肤研究

肖占胜

(山西工程职业技术学院电气系,太原 030009)

摘要 电子皮肤具有和人体皮肤相似的功能,可以对机械、温度、化学、生物和光学等刺激做出应激反应。聚偏氟乙烯(PVDF)薄膜不仅具有压电性、热电性和铁电性,而且还具有生物兼容性、柔韧性、高稳定性和抗腐蚀性,是制作电子皮肤的最佳材料。本研究以仿生学为基础,以厚度 $20\mu\text{m}$ (与人体皮肤的厚度近似)的PVDF薄膜作为电子皮肤的智能敏感元件,设计了具有压电性能和热电性能的新型电子皮肤。利用ANSYS软件建立仿真模型,验证了电子皮肤的热电性和压电性,确定了电子皮肤的最佳内径为4mm,正常的工作温度在 $0\sim 80^{\circ}\text{C}$ 。

关键词 电子皮肤,聚偏氟乙烯,仿生,热电性,压电性

Study on a novel electronic skin based on PVDF piezoelectric film

Xiao Zhansheng

(Department of Electrical Engineering, Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan 030009)

Abstract Electronic skin has the same function as human skin, which can response to mechanical, temperature, chemical, biological and optical stimuli and so on. A polyvinylidene fluoride(PVDF) film as a smart sensitive element for bionic skin with the thickness of $20\mu\text{m}$ (approximately the thickness of human skin) was presented. PVDF was not only piezoelectric, thermoelectric and ferroelectricity, but also had biocompatibility, flexibility, high stability and corrosion resistance. So it was one of the best materials for making bionic skin. Based on bionics, a novel electronic skin with piezoelectric and thermoelectric properties was designed. Using ANSYS software to establish the simulation model to determine the best internal high of electronic skin was 4mm. The thermoelectricity and piezoelectricity of electronic skin were verified by ANSYS, and the temperature range for the normal operation of electronic skin was determined to be $0\sim 80^{\circ}\text{C}$. The beneficial scientific support for the development of bionic skin in the field of medicine and intelligent robot was provided.

Key words electronic skin, polyvinylidene fluoride, bionic, thermoelectricity, piezoelectricity

近年来,人体皮肤的感知功能在很多领域已经得到了初步研究,具有模仿人体皮肤触觉感知功能的传感器在机器人研究领域中也崭露头角^[1-4]。另外仿生皮肤在医学领域的应用也引起关注,比如,人造皮肤移植等。聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜具有实用性好、价格低廉、柔韧性强的特点,因此以PVDF压电薄膜作为敏感元件的仿生皮肤在疾病治疗的过程中可以代替人体皮肤。Kahp-Yang Shu

等研发的类电子皮肤应变仪只能感受外界压力信号^[5-6],相比之下,人们对能同时感受外界多种刺激(同时感受机械应变力和温度)的装置研究较少,这是一个很大的挑战,因为多功能的设备包含的元件种类比较复杂,组装成本较高^[7-8]。此外,电子皮肤功能的完善和仿人性的提升离不开传感器的发展,因此,当前亟待研发一种能同时精确地测量多种信息的电子皮肤装置,使电子皮肤同时具有感受多

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51303062)—准1-3型陶瓷-PVDF复合纳米纤维有序阵列的制备及压电性能研究;山西省青年科技研究基金(201701D221104)—基于多功能传感器的单臂机器人智能控制技术研究;山西省重点研发计划项目(201703D121002)—智能抓取在机器人柔性生产线中的研究与应用;山西省软科学研究一般项目(2017041014-2)—工匠精神引领高职创新人才培养的探索与研究

作者简介:肖占胜(1969-),男,讲师,主要从事电子皮肤和多功能传感器方面的研究。

种信号的能力。

科学家对多功能传感器中的PVDF材料进行了研究和分析。利用该材料的正压电效应在受力和受热的情况下会产生电信号以及在受到电信号作用时会产生机械形变的特性^[9], Lee等^[10]使用PVDF材料制作扬声器的传感材料。此外, PVDF材料还具有高柔韧性、频带宽、弹性好、质量轻和价格低廉的优势^[11]。

近年来, 电子皮肤的发展遇到技术瓶颈, 真正实现精确识别物体物理结构(粗糙度、平滑度等信息)的电子皮肤还在研发中, 因此如何提升电子皮肤的多功能性和灵敏度成为研究的热点。本研究设计了一种基于PVDF压电薄膜的电子皮肤, 通过实验验证了电子皮肤可以感应外界多种刺激(力和温度)的性能。

1 原理分析

PVDF的分子结构是 $-\text{CF}_2-\text{CH}_2-$ 分子链, 它是一种高分子的压电聚合物, 具有结构稳定、耐腐蚀强、稳定性高、柔韧性好、声阻抗低等优点。该材料在受到机械外力或者与接触物体存在温差时, 会在表面产生电位差, 呈现出典型的正压电性和热电性; 受到电信号作用时, 会产生机械变形, 称逆压电效应^[12-13]。本研究设计的电子皮肤主要是利用PVDF压电材料的正压电性和热电性。PVDF材料中的驻极体受动态变化的温度影响时, 能够释放原来“冻结”的极化电荷, 这是PVDF材料热电性作用的结果。材料表面受到外力时, 会在受力方向的表面聚集电荷, 电荷量相同但极性相反, 这时它相当于一个以压电材料为介质的电容器, 其电容量计算方法见式(1):

$$C_a = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{\delta} \quad (1)$$

式中, C_a 为电容量, F ; ϵ_0 为真空介质常数; ϵ_r 为压电材料的相对介质常数; δ 为压电元件的厚度, μm ; S 为压电材料的极板面积, m^2 ^[14-15]。

PVDF材料在受温度影响时, 电极上产生的电荷量大小可以反映材料发生热传递时产生的电荷大小, 其热释电系数 $P_i = \frac{dP}{dT}$, P_i 为PVDF材料的自发极化强度, $\frac{dP}{dT}$ 是随温度变化率。

2 电子皮肤结构和设计流程

电子皮肤是一种可以让人产生触觉的系统, 其

结构简单, 可以被加工成各种形状, 能像衣服一样附着在设备表面, 能够感知物体的地点、方位以及硬度甚至温度热量信息。电子皮肤既可以应用在假肢上充当人体的皮肤, 又可以用于机器人, 目的是使机器人能够像人一样操作物体, 识别与物体接触时的接触力和滑动力, 还可以感受所接触物体的温度变化情况。

2.1 电子皮肤的基本结构

本次实验电子皮肤使用的敏感材料是 $20\mu\text{m}$ 厚的PVDF压电薄膜(锦州科信电子材料有限公司生产)。电子皮肤的整体结构设计基于仿生学原理, 与人体手指结构类似, 电子皮肤与人体手指的结构对比见图1。图1(a)为人手指的切面图, 图1(b)为电子皮肤切面图(γ 为电子皮肤的内径)。从图1可以看出, 电子皮肤的结构分3个部分: 上下两层橡胶绝缘胶带、PVDF压电薄膜和指纹型铜箔。上下两层橡胶绝缘胶带类似于人的手指表皮, 起到保护的作用, 而且橡胶的弹性和力传递性好, 可以减小力传递过程中能量的消耗; PVDF压电薄膜是电子皮肤的传感元件, 相当于人体皮肤下的帕氏小体; 指纹型铜箔将敏感元近似地分割成宽度与帕氏小体宽度相等的敏感元($d_1 \approx d_2$), 这样保证了电子皮肤的分辨率可以达到手指的分辨率。此外, 指纹型铜箔还增大了电子皮肤的摩擦系数, 可以提高电子皮肤在抓取物体时的灵敏度^[16]。

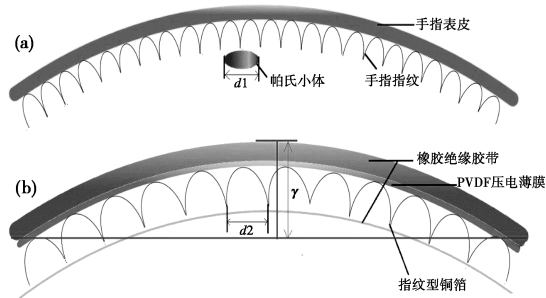


图1 人手指的切面图和电子皮肤切面图
[(a) 人手指的切面图; (b) 电子皮肤切面图]

实验设计的电子皮肤是与手指相似的圆顶状结构, 底面椭圆结构尺寸约为 $1.9\text{cm} \times 1.6\text{cm}$, 易于固定到机器人手指末端, 固定后相当于底边固定的悬臂梁结构^[12]。图2为电子皮肤的实物以及安装在机器人手指模型的示意图。从图2可以看出, 电子皮肤具有一定的黏弹性和柔韧性, 可以直接固定在机器人手指上, 类似于人的手指, 使得机器人能够自主感受外界刺激(触觉、滑觉和热觉), 具有高度仿人性。

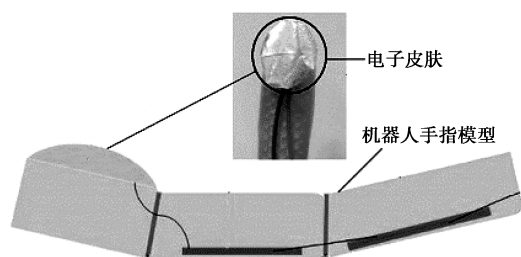


图 2 电子皮肤的实物以及安装在机器人手指模型的示意图

2.2 电子皮肤内径的确定

PVDF 压电薄膜的压电性和热电性表现为当电子皮肤受到动态力和热刺激时,在薄膜表面产生电荷输出开路电压的现象。本研究采用 ANSYS 软件,通过对比传感器内径对传感器输出开路电压的影响,确定电子皮肤的最佳内径。图 3 为不同内径电子皮肤的仿真示意图。电子皮肤 A 点在 1N 负荷条件下,其输出开路电压的变化情况见表 1。从表 1 可以直观地看出,电子皮肤内径为 4mm 时,输出开路电压值最高。由此,确定该电子皮肤的最佳内径为 4mm。

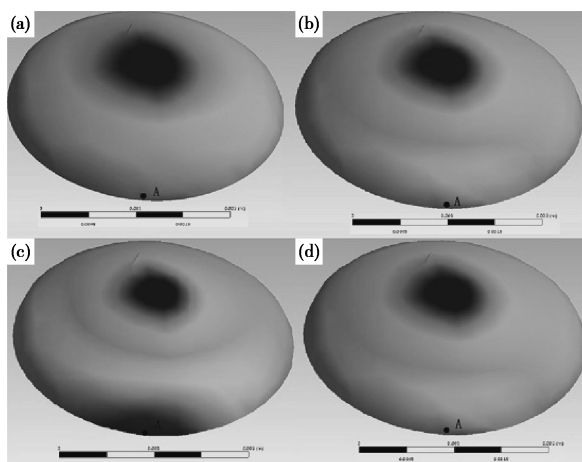


图 3 不同内径电子皮肤的仿真示意图

[(a) 电子皮肤内径为 2mm; (b) 电子皮肤内径为 3.5mm; (c) 电子皮肤内径为 4mm; (d) 电子皮肤内径为 5.0mm]

表 1 电子皮肤在 1N 负荷时的开路输出电压

电子皮肤样品	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
内径/mm	2	3.5	4	5.0
输出开路电压/mV	96.524	198.234	316.982	251.352

3 仿真实验与讨论

电子皮肤的敏感元为 PVDF 压电薄膜,该材料具有压电性和热电性。采用 ANSYS 软件验证电子

皮肤性能。图 4 为利用 ANSYS 软件验证电子皮肤性能的系统框图。在对电子皮肤压电性和热电性进行研究的过程中,将传感材料 PVDF 的主要技术指标和参数特征(压电常数、介电常数、使用温度、泊松比、密度和杨氏模量等)添加赋值,进而建立圆顶型电子皮肤模型,然后利用外力和温度刺激该模型。其中,力和温度分别对应于电子皮肤的压电性和热电性。

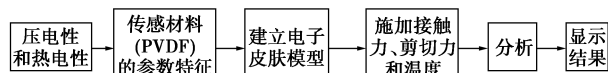


图 4 利用 ANSYS 软件验证电子皮肤性能的系统框图

3.1 电子皮肤压电性

在确定电子皮肤的最佳内径后,使用 ANSYS 软件验证电子皮肤的压电性。当对电子皮肤施加与垂直方向呈 45°角(B 点)的 2N 的点状力(如图 5 所示)时,在电子皮肤表面会形成电荷分布。从图 5 可以看出,在 B 点给电子皮肤施加一定的应力,圆顶型电子皮肤的两边相当于一面受压缩力一面受拉伸力,因此产生电荷的极性也是相反的。

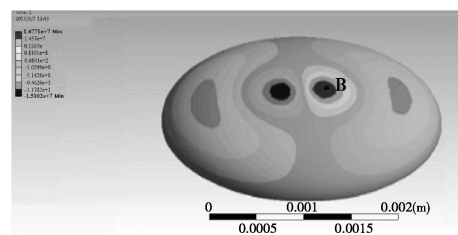


图 5 传感器压电性能仿真图

3.2 电子皮肤热电性

在室温为 20℃ 条件下,将电子皮肤的底边 C 与 22℃ 的恒温加热台接触,图 6 为电子皮肤的表面产生电荷分布的示意图,此时,不同的颜色表示在电子皮肤表面产生的电荷分布。从图 6 可以看出,产生的电荷集中在热传递明显的区域,充分验证了电子皮肤具有热电性能。

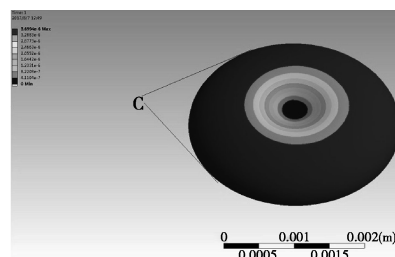


图 6 传感器热电性能仿真图

3.3 电子皮肤正常的工作温度

电子皮肤的热电性能源于 PVDF 压电薄膜与

物体之间的热传递,因此热电能测试属于动态测试。在 20,30,40,50,60,70,80,90,100℃ 条件下,所测电子皮肤的输出电压如图 7 所示。从图 7 可以看出,温度在 0~80℃ 时,系统的输出电压随温度的上升而增大。这是因为当温度达到 45℃ 时,PVDF 压电薄膜的压电系数会发生变化,从而影响电压的输出。当温度达到或高于 80℃ 低于 160℃ 时,电子皮肤输出电压值达到饱和状态,输出电荷量没有明显差异,因此系统输出电压值变化也不大,温度超过 160℃ 则达到 PVDF 膜的熔点。由此可见,电子皮肤正常的工作温度在 0~80℃。

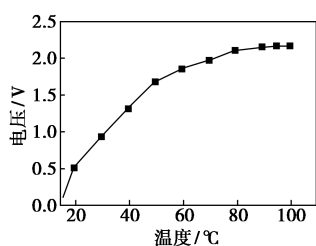


图 7 电子皮肤在不同温度下的输出电压

4 结论

本研究设计了基于 PVDF 压电薄膜的圆顶型电子皮肤,该电子皮肤以仿生学为基础,具有高度仿人性。利用 ANSYS 软件仿真验证了该类型电子皮肤可以像人手一样感应力和温度刺激,具有多功能性。电子皮肤正常的工作温度在 0~80℃,与人体皮肤十分相似。

参考文献

- [1] Dario P, Rossi O D D. Tactile sensors and the gripping challenge[J]. IEEE Spectrum, 1985, 22(8): 46-52.
- [2] Engel J, Chen J, Fan Z, et al. Polymer micro machined multi-modal tactile[J]. Sensors and Actuators A, 2013(117): 50-61.
- [3] Caldwell D G, Gosney C. Multi-modal tactile sensing and feedback (teletaction) for enhanced tele-manipulator control[J]. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1993(3): 26-30.
- [4] 吕晓洲, 卢文科. 用于电子皮肤的界面应力传感器的研究[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 340-345.
- [5] Mukaibo Y, Shirado H, Konyo M, et al. Development of a texture sensor emulating the tissue structure and perceptual mechanism of human fingers[Z]. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 2565-2570.
- [6] Pang C. Flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres[J]. Nature Materials, 2012(11): 795-901.
- [7] Pecora A, Maiolo L, Maita A. On ultra-thin polyimide substrate[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2012(185): 39-43.
- [8] Hammock M L. 25th Anniversary article: the evolution of electronic skin (E-Skin): a brief history, design considerations, and recent progress[J]. Advanced Materials, 2013, 25(42): 5997-6038.
- [9] 辛毅, 田红英, 蒋琪, 等. 基于 Lab VIEW 的 PVDF 压电薄膜触滑觉识别系统[J]. 压电与声光, 2015, 37(5): 793-795.
- [10] Lee J S, Shin K Y, Kim C, et al. Enhanced frequency response of a highly transparent PVDF-graphene based thin film acoustic actuator[J]. Chemical Communications, 2013, 49(94): 11047-11049.
- [11] 千承辉, 李芮林, 李冰洋, 等. 基于多传感器数据融合的仿生机械手研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(4): 1-5.
- [12] 谢娜, 秦岚. 三维柔性触觉/热觉传感器设计与仿真[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(2): 106-108.
- [13] Qasaimeh M A, Sokhanvar S, Dargahi J, et al. PVDF-based microfabricated tactile sensor for minimally invasive surgery[J]. J Microelectromech Syst, 2009, 18(1): 195-207.
- [14] 凌振宝, 齐晓慧, 辛毅. 基于 PVDF 的呼吸信号检测腰带研究[J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 72-75.
- [15] Kim K J, Chang Y M, Sun Y. A novel piezoelectric PVDF film-based physiological sensing belt for a complementary respiration and heartbeat monitoring system[J]. Integ Ferr, 2009(1): 53-68.
- [16] Xin Y, Tian H Y, Guo C, et al. A biomimetic tactile sensing system based on polyvinylidene fluoride film[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(2): 025002.

收稿日期: 2017-10-28

修稿日期: 2018-01-29

欢迎订阅《化工新型材料》, 邮发代号 82-816。

2018 年全年定价 360 元/年, 台港澳 240 美元/年, 国外 240 美元/年