

PVC 凝胶驱动及 CNT/PDMS 传感一体化柔性抓手的研究

罗斌^{1,2}, 李小兰¹, 徐雪杰², 陈花玲², 朱子才²

(1. 邵阳学院机械与能源工程学院, 422000, 湖南邵阳; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 鉴于目前关于软体机器人的研究大多仅致力于软活性材料的驱动功能, 忽视了传感功能, 研究一款集驱动与传感一体化的柔性抓手机器人。首先研究 PVC 凝胶驱动器结构设计及制备工艺, 然后研究 CNT/PDMS 柔性传感结构的制造工艺, 在此基础上, 以 PVC 凝胶驱动器作为柔性抓手的驱动单元, 以 CNT/PDMS 立体结构作为柔性抓手的传感单元, 设计出一款具有驱动与传感一体化的功能结构, 并对该功能结构进行测试。研究表明: 在施加 800 V 直流电压下单根手指的弯曲角度可达 32.5°; 在 400 V 直流电压驱动下, 由两根柔性手指构成的抓手能够抓取直径为 15 mm、邵氏硬度分别为 10~20、30~50 的易变形的硅橡胶圆柱体; 在抓取不同硬度的圆柱体时, CNT/PDMS 的电阻变化率亦不同, 表明 CNT/PDMS 柔性传感结构可以感知抓取物体的软硬度, 证明了本研究关于驱动及传感一体化结构设计的可行性。该研究可为后续软体机器人的设计及制造提供参考。

关键词: 软活性材料; PVC 凝胶材料; 柔性传感材料; 驱动与传感一体化; 软体机器人

中图分类号: TP24; TP331 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202012004 **文章编号:** 0253-987X(2020)12-0030-07



OSID 码

Integrated Polyvinyl Chloride (PVC) Gel Actuating and CNT/PDMS Sensing Structure for Flexible Gripper

LUO Bin^{1,2}, LI Xiaolan¹, XU Xuejie², CHEN Hualing², ZHU Zicai²

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In view of the research status that most of the current studies in the field of soft robots only focus on the actuating function of soft active materials but ignore the sensing function, an actuating/sensing integrated flexible gripper robot is developed. Exploring the structural design and fabrication process of polyvinyl chloride gel actuator, a manufacturing process of CNT/PDMS flexible sensing structure is then investigated. An actuating/sensing integrated functional structure is designed and manufactured, where the PVC gel actuators are taken as the actuating units and the CNT/PDMS 3D structures as the sensing units. The results show that the bending angle of single finger can reach 32.5 degrees under 800 V DC voltage. Driven by 400 V DC voltage, the gripper consisting of two flexible fingers can grasp deformable silicone rubber cylinders with a diameter of 15 mm and shore hardness of 10-20, 30-50 respectively. As grasping

收稿日期: 2020-04-25。 作者简介: 罗斌(1987—), 男, 博士, 副教授; 陈花玲(通信作者), 女, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91648110); 湖南省教育厅优秀青年科学资助项目(19B515); 湖南省自然科学基金青年资助项目(2020jj5520)。

网络出版时间: 2020-07-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200727.0936.002.html>

the cylinders with different hardness, the resistance change rates of CNT/PDMS demonstrate differently, indicating that the CNT/PDMS flexible sensing structure can sense the softness and hardness of the grasped object, thus verifying the feasibility of the design of actuating/sensing integrated structure proposed in this approach. The results may offer reference for following design and fabrication of the soft robots.

Keywords: soft active materials; polyvinyl chloride gel; flexible sensing materials; actuating/sensing integration; soft robots

PVC 凝胶作为一种电场型电活性聚合物(EAP)材料,在电场作用下具有应变大、响应速度快、工作频带宽、质量轻、工作电压适中等特点,在柔性光学、软体机器人、航天航空、生物医疗等领域具有重要的应用前景^[1-3],因而近年来不少研究者逐渐开始研究 PVC 凝胶驱动器在不同领域的应用。Li 等研究了 PVC 凝胶伸缩型驱动器,结合使用者背负的控制器、电源等,制作了一个髋关节康复机器人,并根据人体步态特点设计算法,将其应用于因中风而偏瘫的患者身上,获得了较好的助力效果^[4-5]。Hashimoto 采用多根 PVC 凝胶条状驱动器编织成网,可实现大幅度伸缩变形,并提出可以将这类结构制备出多样化的机器人^[6]。Takasakil 利用 PVC 凝胶的同侧吸附变形,制备出了仿足的效果^[7]。Kim 等将 PVC 凝胶驱动器用于变焦透镜的制造^[8]。从目前的研究分析可知,不同的 PVC 凝胶驱动器结构具有不同的驱动特性,针对不同的应用目的需要设计及制备不同的 PVC 凝胶驱动器结构。此外,目前大多研究者主要将精力放在对 PVC 凝胶驱动器的设计及制造上,将其应用于软体机器人时缺少传感功能,因而制备的软体机器人缺少“智能”功能,离实际应用还存在一定的距离。

众所周知,碳纳米管(CNT)和硅橡胶(PDMS)结合能够制备出导电性高、柔韧性好、可拉伸的柔性传感材料,可用于温度、压力、弯曲等传感器的制备^[9-10]。如 Jung 等制作了一种基于 CNT/PDMS 复合材料的可穿戴传感器,该传感器能够抵抗运动干扰,易于连接到普通心电图设备上^[11]。Liu 等制作了一种能够测量机械变形的 CNT/PDMS 传感器^[12],Zhang 采用 CNT/PDMS 材料测量建筑裂纹等^[13]。但是,目前报道的大多数 CNT/PDMS 传感结构在制备过程中依赖于模板或铸造方法,工序比较复杂。Liu 采用丝网印刷的方式将 CNT/PDMS 嵌入到 PDMS 中,制备出的应变传感器可以测量应变大于 45% 的变形^[14]。Xu 将 CNT/PDMS 以图案形式刻在柔性聚合物基板上,制备出应变大于 40%

的高变形的应变传感器^[15]。从已有文献来看,现有的工艺很难制备出具有高灵敏度 CNT/PDMS 材料^[16]。因此,研究具有高灵敏度的 CNT/PDMS 传感结构是一个重要的研究方向。

根据软体机器人对“智能”化的需求,本文以一款智能软体抓手为研究目标,首先研究基于 PVC 凝胶的驱动器结构及其制备工艺,然后研究具有高灵敏度的 CNT/PDMS 传感结构及其制备工艺。在此基础上,将 PVC 凝胶驱动结构与 CNT/PDMS 柔性传感结构结合起来,设计制造一款驱动与传感一体化的软体抓手,从而为智能化软体机器人的开发提供借鉴。

1 PVC 凝胶驱动器结构设计及制备工艺

1.1 PVC 凝胶驱动器的变形原理

本文 PVC 凝胶驱动器基于平面 PVC 凝胶的扩展与伸缩变形(用 e 表示)设计的。平面 PVC 凝胶驱动器的结构如图 1 所示,由网状阳极、平面 PVC 凝胶、平面阴极依次叠加组成^[17]。当向电极施加电压后,平面 PVC 凝胶向阳极网孔内填充、发生压缩变形,整体上表现为驱动器在厚度方向上压缩,去除电压后,平面 PVC 凝胶凭借本身的弹性恢复原状。

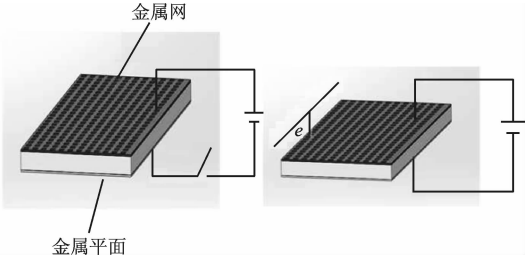


图 1 平面 PVC 凝胶驱动器结构形式及变形原理

1.2 PVC-gel 材料的制备工艺

PVC 凝胶材料是由高分子聚氯乙烯(PVC)和塑化剂己二酸丁二酯(DBA)按照不同的配比在四氢呋喃(THF)溶液中混合,然后挥发 THF 固化成型的。DBA 材料一方面使得高分子 PVC 材料变

软,另一方面可提升整个材料体系的介电常数,使得PVC凝胶具有电活性性能^[18]。显然,PVC凝胶驱动器制备的第一步是制备PVC凝胶膜。以制备0.5 mm的PVC凝胶膜为例,如图2所示,在室温下,量取150 g四氢呋喃液体(阿拉丁,质量分数为99%)与40 g己二酸二丁酯液体(阿拉丁,质量分数为99%),加入烧杯中,通过磁力搅拌混合均匀。然后再称取10 g聚氯乙烯粉末(聚合度4 000,Scientific Polymer Products公司),缓慢加入正在搅拌的溶液中,形成聚氯乙烯颗粒的悬浊液。将烧杯口密封,防止四氢呋喃挥发,继续在磁力搅拌机上搅拌24 h(转速为800 r/min,恒温为20℃),使聚氯乙烯颗粒充分溶解,即可得到无色透明的溶质质量分数为25%的PVC凝胶混合溶液。将PVC凝胶溶液浇筑在玻璃器皿中,在通风橱中抽风72 h,然后再抽真空,完全除去其中的THF,即可得到0.5 mm的PVC凝胶膜。

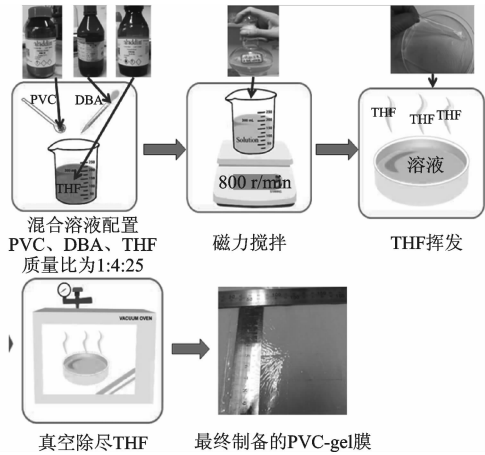


图2 PVC-gel材料的制备工艺

1.3 PVC凝胶驱动器的制备工艺

单层PVC薄膜在电场作用下压缩变形很小,难以直接作为驱动器,因此实用中常采用叠层结构。本文将5层PVC凝胶膜作为一个基本驱动器,即铜箔、PVC凝胶膜、钢丝网组成一个三明治驱动层,5个三明治层叠层在一起构成一个PVC凝胶驱动器,组装成的叠层驱动单元如图3所示。根据文献^[18],0.5 mm的凝胶膜耐击穿效果好,变形线性度高。因此,本文选择的PVC凝胶薄膜厚度为0.5 mm,尺寸为17 mm×42 mm,共10层;铜箔厚度为0.02 mm,尺寸为15 mm×40 mm,共6层;钢丝网目数为60,厚度为0.3 mm,尺寸为15 mm×40 mm共5层。样件总高度6.6 mm,PVC凝胶薄膜有效变形驱动部分面积为6 cm²。



图3 组装的5层PVC-gel叠层驱动单元

如图4所示,采用实验室自主搭建的测试平台,对上述PVC凝胶驱动单元进行了性能测试,测试步骤与方法为:利用信号发生器(DG4062,RIGOL)与高压放大器(MODEL 20/20C,TREK)施加幅值为400~800 V、频率为1 Hz、占空比为50%的方波信号;同时,给驱动器通电2 min;驱动器运动稳定后,使用激光位移传感器(LK-G500,KEYENCE)测量其位移变化,再使用数据采集卡采集传感器测量的数据,传输到计算机中观察、处理。此外,使用螺旋测微仪分别测量各组驱动器的厚度,以便计算总应变。

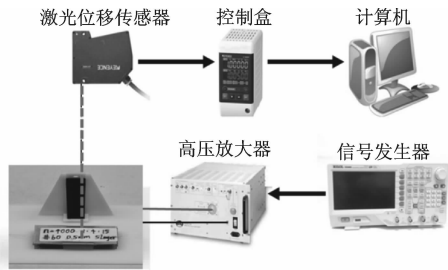


图4 PVC凝胶驱动性能测试装置

通过测量该驱动单元在给定载荷下的应变来表征其驱动能力。实验中,在PVC凝胶驱动单元上表面逐步添加砝码,测量该驱动器给定负载下的不同驱动电压下的应变,结果如图5所示。从图中可见,在给定负载下,驱动单元的收缩应变随电压增加而增加,在0~400 V范围内,应变随电压的增加增幅较为明显;在400~800 V范围内,应变随电压的增加增幅逐渐变缓。此外,在给定电压情况下,驱动单

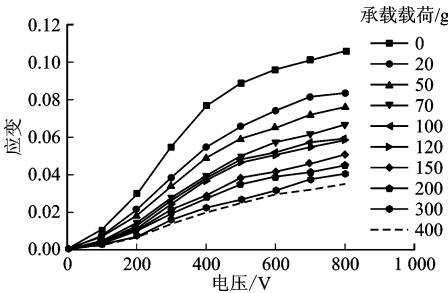


图5 不同负载、不同电压下PVC凝胶驱动单元的应变

元的变形随负载的增加而逐步减小,减小速度由快逐步变慢。在空载 800 V 电压作用下,该驱动器的最大应变可达 10.6%,说明本文设计制备的 PVC 凝胶驱动器具有一定的承载能力与驱动性能。

上述 PVC 凝胶驱动单元的变形形式是上下收缩的直线运动,鉴于本文研究的目标是智能软体抓手,因此需要将 PVC 驱动单元的直线运动转换为抓手的弯曲运动。为此,本文设计了一个如图 6a 所示的驱动器外框,它的两个垂直边长具有一个长一个短(开口边长)的特征,外框结构为柔性 TPU 材料,采用 3D 打印制造而成。将 PVC 凝胶驱动单元(图 6b 所示)装入外框时,由于驱动单元的初始高度大于外框短边的高度,装进 PVC 凝胶驱动单元时,会使驱动器外框发生弹性变形而导致外框短边产生一定的扩张变形。当对 PVC 凝胶施加电压时,驱动单元产生收缩变形使其厚度减小,从而使外框的短边向初始状态恢复,由于外框长边高度不变,从而可使整个驱动器产生弯曲变形。图 6c 所示是装配完成的驱动器,在这个驱动器外框中放入了 3 个 PVC 凝胶驱动单元。

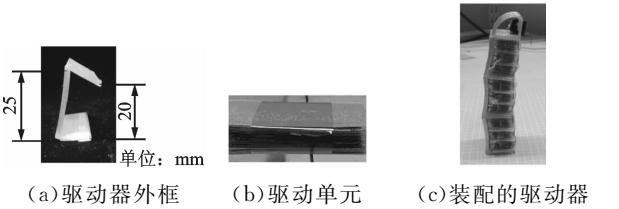


图 6 驱动器结构及装配示意图

2 CNT/PDMS 柔性传感结构的设计及制造工艺

CNT/PDMS 材料的传感原理是在外界压力作用下,结构变形导致内部的导电网络发生变化,从而导致材料的电导率发生变化,因此可将其作为压力传感器。为提高 CNT/PDMS 柔性传感结构的灵敏度,本文采用 3D 打印工艺来制备具有立体网格的设计结构,总体宏观尺寸如图 7 所示。这种结构具

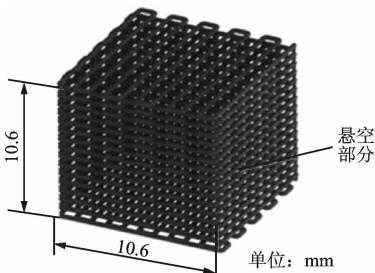


图 7 立体网格结构的单层以及立体模型

有悬空部分,结构刚度低,易变形,因此对外界压力较为灵敏^[19]。

利用 3D 打印工艺实现这种悬空结构的制造关键技术是配制具有一定黏度的打印墨水,本文开发的打印墨水的配制工序如图 8 所示。首先将碳纳米管在异丙醇中进行分散,超声振荡 30 min 打散碳纳米管的团聚;然后分别加入 PDMS(Ecoflex)的 A、B 组分超声振荡 30 min,分散完成后在搅拌台上搅拌加热,使异丙醇完全挥发;最后将两部分机械搅拌混合在一起并加入气相二氧化硅调节黏度。这样打印墨水在配过程中不会固化,保证了最长的有效打印时间。本研究采用的配制比例为:碳纳米管在打印墨水中的质量分数为 5%,气相二氧化硅的质量分数为 4%。采用本实验室自主研发的 3D 打印机进行打印^[20],制备出的立体悬空结构的传感器结构如图 9 所示。

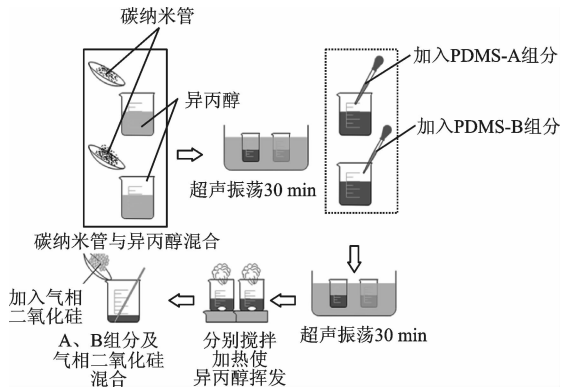
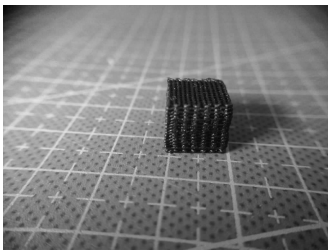
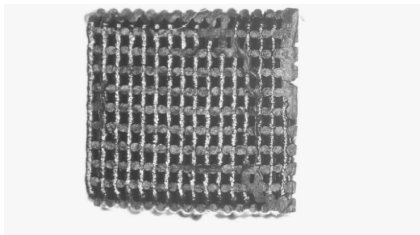


图 8 CNT/PDMS 打印墨水配制流程图



(a)实物图



(b)中间截面光镜图

图 9 立体网格结构图

本文利用压力传感测试平台对上述工艺制备出

的立体悬空结构传感器进行了性能测试。压力传感测试平台主要由激振器(SL-0505)、商用压力传感器(ZNL BM-1KG)、源表(Keithley 2450)、数据采集卡(NI USB-6341)及计算机组成。如图 10 所示,计算机通过功率放大器控制激振器按规定方式运动,商用压力传感器连接到激振器的激振杆上,对柔性传感器施加外力;数据采集卡采集商用压力传感器的输出电压传输到计算机进行处理,获得所施加的压力;源表实时采集柔性传感器的电阻变化,测试环境温度为 25 ℃,在空气中进行。

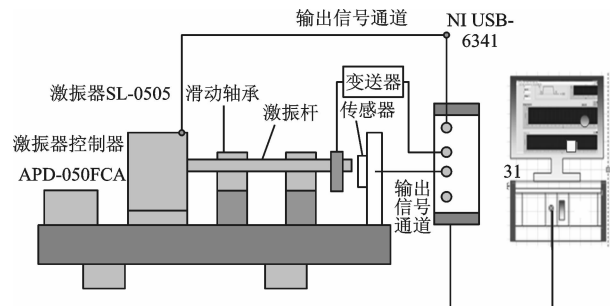


图 10 压力传感测试平台

定义 CNT/PDMS 的压力传感灵敏度为

$$S = (\Delta R/R_0)/\Delta P$$

式中: ΔR 为电阻的变化; ΔP 为压力的变化; R_0 为材料的初始电阻。

测试中,通过激振器给立体网格 CNT/PDMS 结构施加压力,通过电阻测量采集板进行 CNT/PDMS 电阻变化数据采集,不同压强下记录压阻传感器不同的电阻值,如图 11 所示。从图中可以看出:随着施加压力的增加,立体网格 CNT/PDMS 结构的电阻变化率基本成线性增加,灵敏度 $(R/R_0)/\Delta P$ 达到 10 kPa。说明打印出来的 CNT/PDMS 立体网格结构传感性能明显,可用于感知外界压力,后续将该结构应用于智能软体抓手的传感单元。

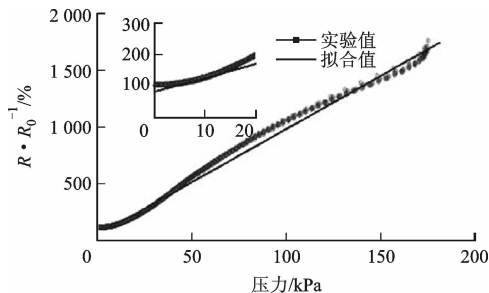


图 11 压力传感特性

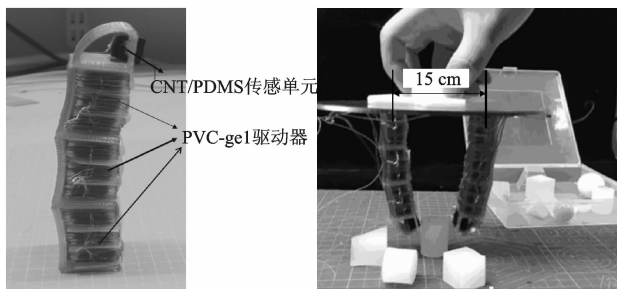
3 驱动与传感一体化结构及其性能

3.1 驱动与传感一体化结构

本节致力于设计并制造一款驱动与传感一体化

的软体抓手,使其不仅能够抓取不同形状结构的物体,而且能对所抓取物体的软硬度进行识别,以便应用于后续智能控制的研究。

在前面研究基础上,本文以 PVC 凝胶驱动器作为驱动单元,CNT/PDMS 传感器作为传感单元,利用 3D 打印机打印了模拟人体手指的连续驱动器框架,将 CNT/PDMS 传感结构,PVC 凝胶驱动单元结构依次装入框架中,从而构成了具有驱动及传感功能的单指结构,如图 12a 所示。将两个单指结构对称布置于一个基座上,就得到了具有驱动与传感一体化功能的柔性抓手,如图 12b 所示。



(a) 柔性单指结构

(b) 柔性抓手结构

图 12 驱动与传感一体化功能抓手结构

3.2 单指结构驱动性能测试

为了验证该结构的驱动性能,本文对该柔性单指结构进行了弯曲性能测试,即在施加 0~800 V 直流电压下测试柔性结构的弯曲角度,实验结果如图 13 所示。由图可见,随着驱动电压(0~600 V)的增加,柔性单指的弯曲变形角度逐步增加,当施加电压超过 600 V 后,角度变化逐步变缓;在 800 V 电压作用下,单指弯曲变形幅度可达 33.5°,该性能的重复性较好,驱动性能偏差在 5% 以内。

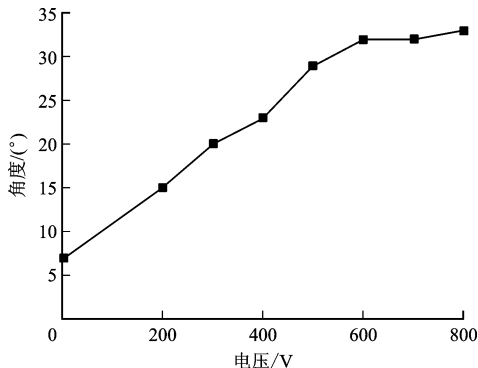
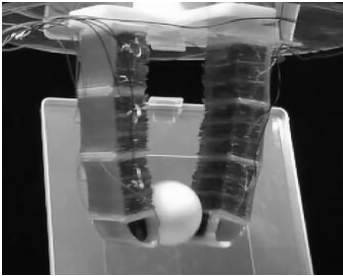


图 13 单指弯曲角度与驱动电压示意图

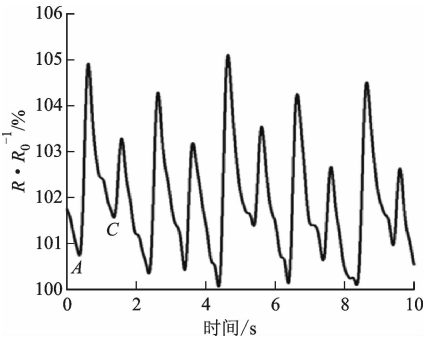
3.3 柔性抓手的驱动与传感性能测试

为了验证该结构的传感性能,本文对柔性抓手结构进行了抓取功能测试。在恒定 400 V 电压驱动下,让柔性抓手分别抓取不同形状的物体,实验表

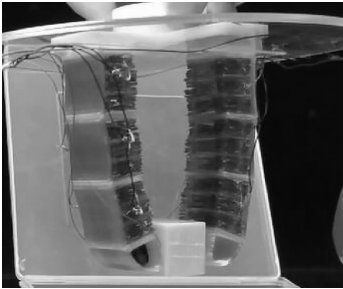
明,该柔性抓手能够轻易地抓取不同形状的物体,传感单元产生不同的电阻变化信号。如图 14b 所示,其中 AB 段为抓手与圆形物体表面接触时段,B 点为柔性抓手驱动力达到最大的时刻,BC 段为抓手与方形物体逐步脱离时段。在抓取方形形状时,传感单元产生不同的电阻变化信号如图 14d 所示。其中 AB 为抓手与方形物体表面接触时段,在这个时



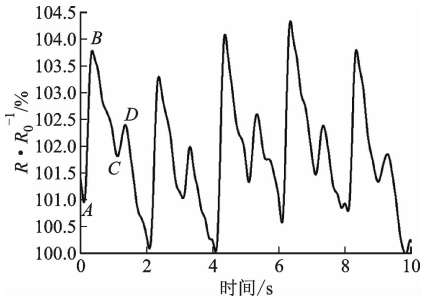
(a) 抓取圆形物体



(b) 抓取圆形物体传感器输出



(c) 抓取方形物体



(d) 抓取方形物体传感器输出

图 14 抓取不同物体时的传感器输出响应

段,柔性抓手驱动力逐步增大,BC 段亦为抓手与方形物体的逐步脱离时段。由于抓取物体的形状不同,导致对传感单元产生的应力差别,最终导致了传感单元电阻变化的差异。

通过对柔性抓手抓取相同形状但是不同软硬度的物体的传感性能测试发现:柔性抓手在抓取不同硬度的圆形物体时,会输出不同的电阻。图 15 为抓手抓取直径为 15 mm、邵氏硬度分别为 10~20 和 30~50 的易变形的硅橡胶圆柱体以及表面不可变形的硬塑圆柱体时电阻传感器的输出响应。

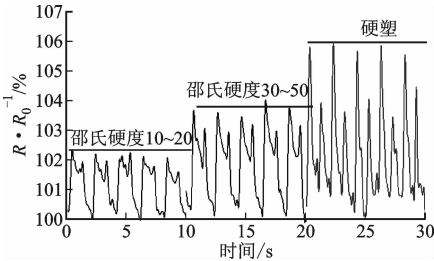


图 15 抓取不同硬度物体时的传感器输出响应

从图 15 可以看出,该柔性抓手在抓取邵氏硬度为 10~20 的比较柔软易变形的圆柱时,传感器电阻变化率约为 2%;当抓取邵氏硬度 30~50 左右的圆柱体时,传感器电阻变化率约为 4%;当抓取表面不易变形的硬壳塑料圆柱体时,电阻传感器的输出响应达到最大约为 6%。这说明在抓取不同软硬度的物体时,柔性抓手能够对其表面软硬度进行识别。这种功能为以后进一步智能化应用奠定了基础。

4 结 论

本文在电话性聚合物 PVC 凝胶驱动结构及其制备工艺、柔性 CNT/PDMS 传感结构及其制备工艺研究的基础上,以智能柔性抓手为目标,通过结构设计,开发了一款以电话性聚合物 PVC 凝胶材料作为抓手的驱动单元,以 CNT/PDMS 传感结构作为传感单元,具有抓取功能的驱动与传感一体化结构,并对该结构进行了驱动与传感性能测试,研究结论如下。

- (1)采用铸膜制造工艺制备了 PVC 凝胶膜,基于 PVC 凝胶薄膜材料制备出了叠层驱动单元,在 800 V 直流电压作用下,该驱动单元的驱动应变高达 10.6%。基于该驱动单元,设计并制造了一个可将直线位移转化为弯曲变形的驱动器。
- (2)通过合理调制 CNT/PDMS 打印墨水,并采用 3D 打印技术制备了具有悬空立体网格的 CNT/PDMS 结构,该结构具有良好的压力传感性能,可用

于软体机器人传感单元设计。

(3) 基于电活性 PVC 凝胶驱动器和 CNT/PDMS 传感器, 制备了驱动与传感一体化的柔性抓手。对驱动与传感性能测试表明, 该柔性抓手不仅可抓取方形、圆形等物体, 也可以对抓取物体的硬度进行识别, 从而为制造具有驱动与传感一体化的智能机器人提供了参考。

参考文献:

- [1] LI Y, HASHIMOTO M. PVC gel based artificial muscles: characterizations and actuation modular constructions [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2015, 233: 246-258.
- [2] SHIN E J, PARK W H, KIM S Y. Fabrication of a high-performance bending actuator made with a PVC gel [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(8): 1284.
- [3] PARK W, BAE J W, SHIN E, et al. Development of a flexible and bendable vibrotactile actuator based on wave-shaped poly (vinyl chloride)/acetyl tributyl citrate gels for wearable electronic devices [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(11): 115020.
- [4] LI Y, HASHIMOTO M. Design and prototyping of a novel lightweight walking assist wear using PVC gel soft actuators [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2016, 239: 26-44.
- [5] LI Y, HASHIMOTO M. PVC gel soft actuator-based wearable assist wear for hip joint support during walking [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(12): 125003.
- [6] FURUSE A, HASHIMOTO M. Development of novel textile and yarn actuators using plasticized PVC gel [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10163: 1016327.
- [7] HIRAI T, OGIWARA T, FUJII K, et al. Electrically active artificial pupil showing amoeba-like pseudopodial deformation [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(28): 2886-2888.
- [8] KIM S Y, YEO M, SHIN E J, et al. Fabrication and evaluation of variable focus and large deformation plano-convex microlens based on non-ionic poly (vinyl chloride)/dibutyl adipate gels [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(11): 200-209.
- [9] MUTH J T, VOGT D M, TRUBY R L, et al. Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(36): 6307-6312.
- [10] LI Kai, WEI Hong, LIU Wenguang, et al. 3D printed stretchable capacitive sensors for highly sensitive tactile and electrochemical sensing [J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(18): 185501.
- [11] JUNG H C, MOON J H, BAEK D H, et al. CNT/PDMS composite flexible dry electrodes for long-term ECG monitoring [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2012, 59(5): 1472-1479.
- [12] LIU Chaoxuan, CHOI J W. Strain-dependent resistance of PDMS and carbon nanotubes composite microstructures [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2010, 9(5): 590-595.
- [13] 张永泉. CNT/PDMS 柔性传感材料性能及其结构裂缝感知特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 1-137.
- [14] LIU C X, CHOI J W. Analyzing resistance response of embedded PDMS and carbon nanotubes composite under tensile strain [J]. *Microelectronic Engineering*, 2014, 117: 1-7.
- [15] XU W J, ALLEN M G. Deformable strain sensors based on patterned MWCNTs/polydimethylsiloxane composites [J]. *Journal of Polymer Science: Part B Polymer Physics*, 2013, 51(20): 1505-1512.
- [16] LI Kai, WEI Hong, LIU Wenguang, et al. 3D printed stretchable capacitive sensors for highly sensitive tactile and electrochemical sensing [J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(18): 185501.
- [17] 罗斌, 陈花玲, 徐雪杰, 等. 电活性聚合物 PVC 凝胶材料的 3D 直写打印工艺 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(11): 76-82.
- LUO Bin, CHEN Hualing, XU Xuejie, et al. Printing electroactive polymer polyvinyl chloride (PVC) gel via direct writing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(11): 76-82.
- [18] ASAKA K, HASHIMOTO M. Electrical properties and electromechanical modeling of plasticized PVC gel actuators [J]. *Sensors and Actuators: B Chemical*, 2018, 273: 1246-1256.
- [19] LUO Bin, WEI Yu, CHEN Hualing, et al. Printing carbon nanotube-embedded silicone elastomers via direct writing [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10: 44796-44802.
- [20] 罗斌, 夏华翅, 陈花玲, 等. 离子凝胶材料的三维打印工艺 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(17): 157-164.
- LUO Bin, XIA Huachi, CHEN Hualing, et al. Research on 3D printing process of ionic gel [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(17): 157-164.

(编辑 杜秀杰)