

文章编号 1004-924X(2019)09-2062-08

新型高柔弹性导电薄膜电极层的制备与性能研究

周建辉^{1,2,3}, 曹建国^{1,3,4*}, 程春福^{1,3,4}, 范 阳^{1,3,4}, 余 宁¹, 缪存孝^{1,3,4}

- (1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083;
2. 华北理工大学 迁安学院, 河北 唐山 064400;
3. 北京科技大学 智能机器人创新研究院, 北京 100083;
4. 北京科技大学 人工智能研究院, 北京 100083)

摘要:为了解决用于机器人等复杂三维载体表面或活动关节部位的触觉传感器实现高柔弹性的难题,提出了基于纳米材料,并结合马蹄形的形状布置与预拉伸工艺制作新型高柔弹性导电薄膜电极层的方法。将银纳米线以马蹄形的形状布置植入到已经过预拉伸处理的 PDMS 薄膜表面,形成具有高伸缩性能的导电复合材料。将其应用于机器人手腕及手指部位,验证了良好的拉伸-导电特性,且拉伸试验结果表明:这种新型高柔弹性导电薄膜电极层随着拉伸率的增加,电阻值呈现先减小再缓慢增大的趋势,在第 50 次拉伸 30%后,电极相对初始值的电阻增量仅为 93%。这种新型电极制作工艺简单,具有良好的柔弹性、导电性及稳定性,透明度也很高,可应用于拉伸、弯曲、扭转等多种复杂的应用场合。

关键词:高柔弹性;银纳米线;聚二甲基硅氧烷;导电性;预拉伸

中图分类号:TP212 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192709.2062

Preparation and properties of novel highly flexible and stretchable conductive film electrode

ZHOU Jian-hui^{1,2,3}, CAO Jian-guo^{1,3,4*}, CHENG Chun-fu^{1,3,4},
FAN Yang^{1,3,4}, YU Ning¹, MIAO Cun-xiao^{1,3,4}

- (1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Qian'an College, North China University of Science and Technology, Tangshan 064400, China;
3. Intelligent Robot Innovation Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
4. Artificial Intelligence Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

* Corresponding author, E-mail: geocao@ustb.edu.cn

Abstract: In order to solve the problem that the tactile sensors for complex three-dimensional carrier surfaces or moving joint parts of robot are difficult to achieve high flexibility and flexibility, a new

收稿日期:2019-06-27;修订日期:2019-07-30.

基金项目:科技部创新方法工作专项资助项目(No. 2016IM010300);中央高校基本科研业务费专项资助项目(No. FRF-GF-18-010B)

method based on nano-materials combined with horseshoe shape and pre-stretching process was proposed. Silver nanowires were implanted with a horseshoe shape into the surface of the pre-stretching-treated PDMS film. Then, a type of conductive composite material with high flexibility and stretchability was obtained. The tensile test results show that the resistance of the new type of electrode first decreased and then increased with the increase in stretching rate. After the 50th stretch of 30%, the resistance increase of the electrode relative to the initial value is only 93%. The electrode has a simple manufacturing process, good flexibility, stability, and high transparency. These can meet the requirements of different application conditions and are suitable for many complex applications such as stretching, bending, and torsion.

Key words: high flexibility and stretchability; silver nanowires; Polydimethylsiloxane(PDMS); conductivity; pre-stretch

1 引言

随着社会发展的需要和机器人应用领域的不断扩大,人们对机器人智能化的要求也越来越高。机器人所处的工作环境往往是未知的、难以预测的,可通过在机器人内、外安装一系列传感器^[1-2],用来感知周围环境的各种信息,比如视觉、听觉、触觉、嗅觉等,其中,触觉信息的感知尤为重要。触觉是机器人实现与环境直接作用的必需媒介,可直接测量对象和环境的多种性质。由于机器人三维表面比较复杂,且具有灵活的关节部位,因此,应用于机器人载体的触觉传感器,应具有较高的柔性及弹性。而高柔弹性电极是触觉传感器实现高柔性及高弹性的基础^[3-7]。如何使触觉传感器的电极在复杂受力情况下实现高柔弹性,同时保证良好的稳定性与透明度,且易于加工制造,已成为当今国际学术研究的热点问题之一,受到了各国研究人员的高度重视。

近年来,柔弹性电极的研究在材料的选取、形状结构的优化及制作工艺的改进等方面都取得了重要进展^[8-9]。首先,在材料方面,将金属粉末、石墨、纳米管/纳米线等导电材料与弹性体混合得到的导电复合材料最受研究人员青睐。SEKITANI等^[10]利用某离子溶液,单壁碳纳米管和某共聚物混合形成了复合导电材料,使其拉伸率达到了134%。ARAKI等^[11]将微小金属片混合于液态聚氨酯树脂之中,依靠金属片互联形成导电通路,得到弹性复合导电材料,由于金属片数量非常多,因此拉伸后依然能够保持良好的导电性,但是这种导体在拉伸率较大时,导电通路容易被破坏。

GE等^[12]选择聚氨酯海绵、聚二甲基硅氧烷等材料制作了弹性导体。这种导体稳定性好、导电性高并能承受50%拉伸应变。但其透明度差,且厚度方面受三维结构影响不宜做的很薄,适用场合受到限制。XU^[13]、WANG^[5]等将银纳米线形成的导电网埋于PDMS表面,制作了超薄弹性导电复合材料。这种导电复合材料虽然具有较高的柔弹性,但其电阻值偏大的问题会限制其在高精度测量场合的应用。另外,在形状方面,研究人员发现,曲线形状的电极^[14-16]比传统的长条形状的电极具有更好的拉伸性能。例如,JABLONSKI等^[7]将弯曲的铜导线埋于弹性基底制作成了性能稳定、价格低廉的可拉伸导线,可承受单向拉伸。这种将无机金属导线以曲线形式嵌于弹性基底方法的缺点是拉伸过程中容易产生应力集中的问题。此外,在制作工艺方面,主要集中在预拉伸法、磁控溅射技术、电子束蒸镀、真空过滤、滴涂、旋涂、喷涂等方法。在弹性电极的制作过程中,有时需要多种工艺方法相结合。LEE^[18]等利用真空过滤技术将超长银纳米线收集到弹性基底上制作了具有高弹性及高导电率的导电薄膜。但是真空过滤是不可测量的,并且银纳米线很难从过滤器转移到所用的基底上。NAM^[19]等利用旋涂的方法制作了银纳米线导电薄膜,但是制作时要控制好旋涂的速度,如果旋涂速度太快,会导致银纳米线密度的偏差以及薄膜厚度的不均匀。

本文在前人研究工作的基础上,将马蹄形的形状布置与预拉伸法相结合,选用银纳米线作为导电材料,聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane,PDMS)作为基底材料,制作了可应用于仿生机器人触觉传感的高柔弹性导电薄膜电极层。通

过拉伸试验测试可知,这种方法制作的弹性电极电阻值较小,可进一步改善导电薄膜电极层的拉伸-导电特性,并且具有较高的柔弹性,制造工艺简单,易于生产,成本低,透明度及导电稳定性良好,大大拓宽了弹性电极的应用场合。

2 实 验

2.1 材 料

2.1.1 银纳米线

银是导电性能最好的金属,而银纳米线保持了金属银优良的导电性。此外,银纳米线还具有优良的柔性和透光性,近几年已经大量应用于触摸屏、液晶显示器、电脑板、传感器及薄膜太阳能电池等领域,正逐步取代传统氧化铟锡(ITO)透明电极。此外,大长径比效应使银纳米线还可大量应用于导电胶、导热胶等方面。利用银纳米线制作的弹性导体,具有制造工艺简单,可扩展,导电性能优良,透明度好,耐腐蚀性能高的特点。

近年来,银纳米线与弹性高分子材料复合形成的弹性导电材料越来越多地应用于柔弹性电子元件上。本研究所用的银纳米线由山东利特纳米有限公司提供,保存于水溶剂中防止被氧化。

2.1.2 PDMS

PDMS是一种高分子有机硅化合物,其化学稳定性高,绝缘性好,粘附性优良,材料成本低,制作、使用简单,透光性好,生物相容性佳,已广泛应用于生物工程、微电子等领域。

液态时的PDMS被称做硅油,是一种有机硅氧烷混合物,其无色、无味、无毒、不易挥发。将主剂与固化剂按照一定配比进行充分混合,经固化后就形成了固态的PDMS。固态PDMS无毒、不易燃、疏水性强、透光性好、柔弹性高。此外,PDMS蒸发温度低,固化前可在真空环境下简单地排除气泡。PDMS的化学构成决定其易于进行表面改性,经氧等离子体处理可改善其粘附性。

一直以来,PDMS凭借其良好的物化性质,受到研究人员的青睐,成为制作柔弹性电子设备的首选基底材料。本研究选用的PDMS是道康宁公司的Dow Corning Sylgard184。

2.2 方 法

在已有的研究中,柔弹性电极大多是长条形状,本文将金属纳米线以曲线形状布置于弹性基

底中,以改善电极的柔弹性,再结合预拉伸法,可大大提高电极的拉伸-导电特性,并保证良好的稳定性。

马蹄形曲线^[15 16]是各类曲线中可伸缩性较好的,其形状及参数如下图1所示,其中, θ 通常取 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 等,角度值越大,可伸缩性越好,但是如果 θ 取值太大,相邻导线容易粘连在一起,尤其是在导线尺寸较小的情况下,因此本文这里取 $\theta=0^\circ$,这是马蹄形曲线的极限情况-半圆形,如图2所示。 W 和 R 的取值依据电极的使用场合确定,柔弹性电极应用于机器人触觉传感时需要具备超高的柔性与弹性,以覆盖复杂的三维表面,尤其像机器人手指这样的小尺寸载体表面,要求柔弹性电极的尺寸非常小。因此, W 和 R 应尽量小,但是 W 过小,导线容易断裂, R 过小,易引起信号的串扰,甚至导线的粘连。综合各因素,本文选取 $W=1\text{ mm}, R=1\text{ mm}$ 。

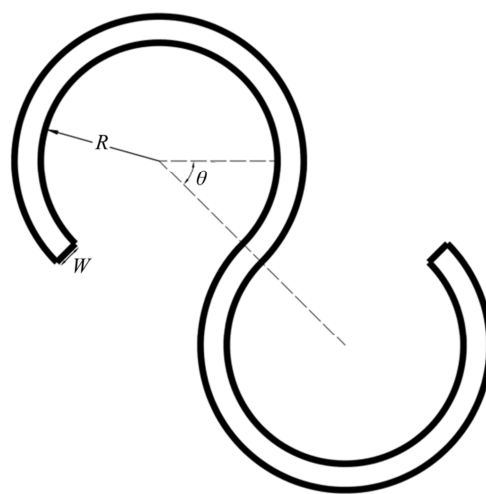


图1 马蹄形曲线

Fig. 1 Horseshoe curve



图2 $\theta=0^\circ$ 时的马蹄形曲线

Fig. 2 Horseshoe curve at $\theta=0^\circ$

新型高柔弹性导电薄膜电极层的制备方法如图3所示。

(1) 马蹄形柔弹性导线模具的制作

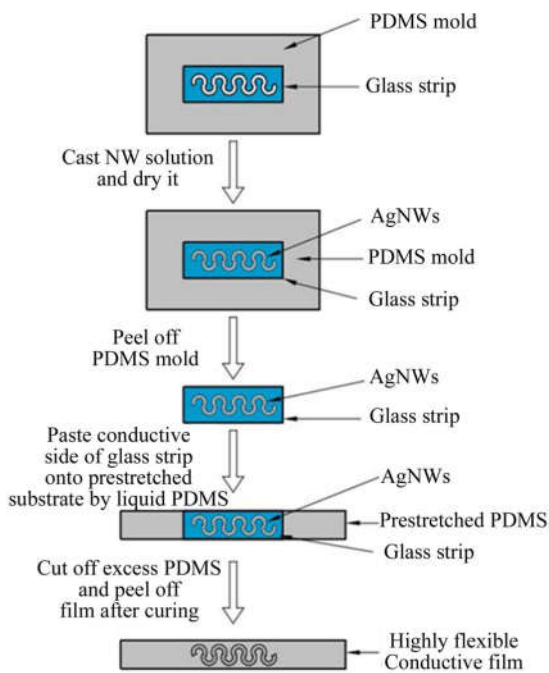


图 3 新型高柔弹性导电薄膜电极层的制作流程图
Fig. 3 Flow chart for manufacturing novel highly flexible conductive film electrode

将 PDMS 以主剂 : 固化剂 = 10 : 1 的质量比混合, 并搅拌均匀, 浇在玻璃板上, 放入真空炉中除气泡, 保持 100 °C 恒温加热 1 h。待 PDMS 薄膜完全固化后, 将其揭下。用激光切割机按照图 4 形状对 PDMS 薄膜进行切割, 得到马蹄形 PDMS 模具, 如图 5 所示, 曲线部分的线性长度为 61 mm。



图 4 马蹄形 PDMS 模具的 CAD 图
Fig. 4 CAD drawing of horseshoe shaped PDMS mold



图 5 切割后的马蹄形 PDMS 模具
Fig. 5 Horseshoe PDMS mold after cutting

(2) 预拉伸 PDMS 弹性基底的制作

PDMS 薄膜的厚度不同, 对薄膜的拉伸性能有影响, 进而会影响预拉伸处理并释放后导电复合材料的表面特征和整片导电薄膜电极的柔弹性和导电稳定性。因此, 这里对 PDMS 薄膜厚度均匀性要求较高, 采用旋涂仪 (Spin Coater) 制作基底, 并置于恒温炉中, 保持 60 °C 加热固化 12 h。这里得到的 PDMS 薄膜的厚度约为 250 μm, 误差小于 ±25 nm, 将制作好的 PDMS 弹性基底裁成设计所需要的尺寸。这里将 PDMS 弹性薄膜剪裁成长条形状, 要保证拉伸后的宽度尺寸大于马蹄形导线的宽度。然后将长条形 PDMS 弹性薄膜的长度拉伸 30% 后, 用胶条将弹性薄膜的两端固定于平板玻璃上, 这样就完成了预拉伸 PDMS 弹性基底的制作。

(3) 柔弹性导线的制作

将步骤(1)中制作好的模具置于长条形玻璃片上, 尽量使 PDMS 模具紧贴于玻璃片上。将银纳米线溶液缓慢、均匀地滴在模具内, 待水溶剂蒸发, 银纳米线干燥后继续滴液, 直至需要的厚度, 如图 6 所示。小心地揭下 PDMS 模具, 即在玻璃片上形成了马蹄形银纳米线薄膜。用旋涂仪在步骤(2)中拉伸后的 PDMS 弹性基底表面涂覆一层约 50 μm 厚的液态 PDMS, 并将玻璃片上覆盖有银纳米线导电层的一侧, 小心粘贴于预拉伸的 PDMS 弹性基底上面, 放入真空炉 30 min, 排除液态 PDMS 内的气泡。将制作的样品置于恒温炉中, 保持 60 °C 加热固化 12 h。待固化完全后, 切掉玻璃条两侧多余的部分, 再将玻璃条小心揭下, 得到新型高柔弹性导线, 如图 7 所示, 由于预拉伸工艺, 这里得到的导线实际长度大约为 53 mm, 厚度约为 300 μm。



图 6 模具内滴入银纳米线溶液
Fig. 6 Silver nanowire solution dropped into the mold

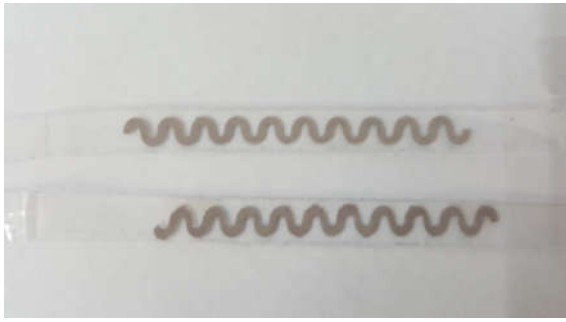


图 7 高柔性导电薄膜电极层

Fig. 7 Highly flexible conductive film electrode

3 结果与分析

3.1 高柔性导电薄膜电极的拉伸-导电特性测试与分析

为了研究高柔性电极的拉伸-导电特性,设计了拉伸试验,对导线进行 0~10%~20%~30%~0 循环拉伸,记录下每个阶段的电阻值。试验所用的拉伸设备是由上海华龙测试仪器股份有限公司提供的 WDW-2C 型微机控制电子万能试验机。工作时,如图 8 所示,底部夹具保持不动,上面夹具沿导轨作往复直线运动以拉伸导线。拉伸速度会影响导线的导电特性,因此在试验中使速度一直保持 10 mm/min,经 50 次拉伸循环后,分别绘制电阻值与拉伸率及电阻值与拉伸循环次数的关系特性曲线,如图 9、图 10 所示。图中所测导线的初始长度大约为 53 mm。

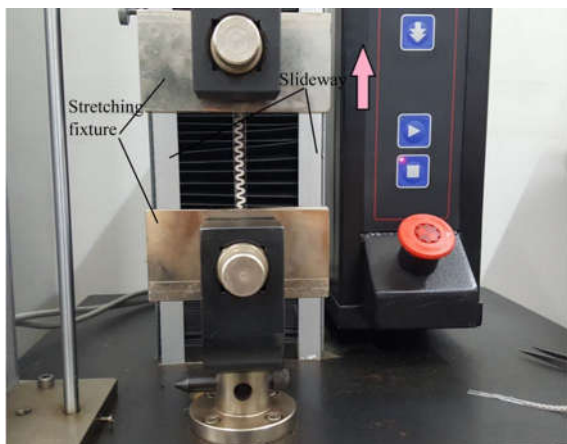


图 8 拉伸测试

Fig. 8 Stretching test

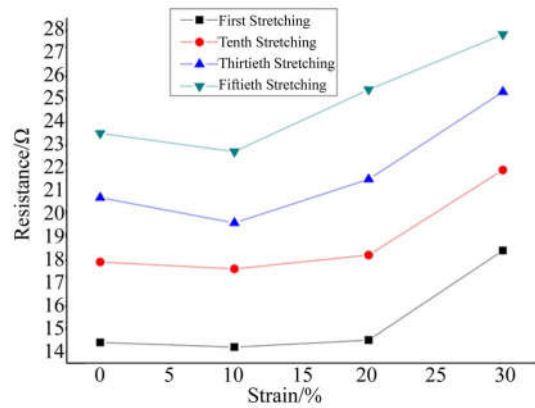


图 9 电阻与拉伸率关系特性曲线

Fig. 9 Relationship between resistance and tensile rate

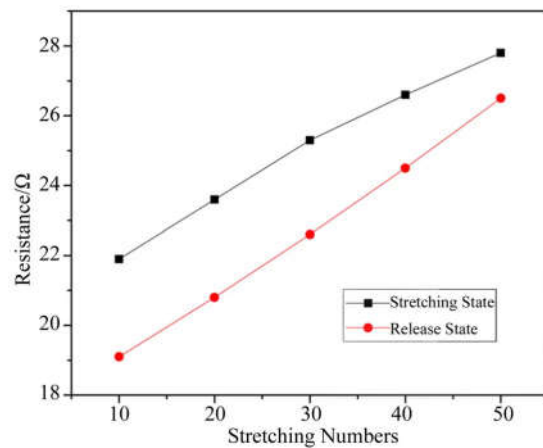


图 10 电阻与拉伸循环次数关系特性曲线

Fig. 10 Relationship between resistance and stretching cycles

图 9 绘制的是导线在第 1 次、第 10 次、第 30 次和第 50 次拉伸过程中电阻值与拉伸率的关系特性曲线。导线的初始电阻为 14.4Ω , 拉伸 10% 后, 电阻值有小幅的减小, 变为 14.2Ω 。此后随着导线被拉伸, 电阻值逐渐增大, 拉伸 30% 后, 导线电阻增大至 18.4Ω 。保持匀速释放后, 电阻值减小, 再次拉伸后, 电阻值又一次先小幅度减小再逐渐增大。如图 9 所示, 电阻值在每次拉伸循环时的变化趋势大体相同, 在拉伸率较小时, 弹性导线的电阻值有所降低。分析产生这一结果的原因, 这是由于在拉伸的最初阶段, 屈曲的银纳米线/PDMS 复合材料导电层开始逐步“舒展”, 拉伸初期受力很小, 复合导电层内部的银纳米线相互间的接触更为有利, 表现为电阻值降低; 而当拉伸

率增大复合导电层受力随之增大,使得内部银纳米线的接触变得不利,表现为电阻值逐渐上升。第 50 次拉伸 30%后,导线电阻增大至 27.8Ω ,较初始值的电阻增量为 93%。经过形状优化的高柔弹性导线在拉伸发生时,银纳米线/PDMS 复合材料导电层的变形由两部分组成:由马蹄形所产生的曲线的伸展;以及复合材料导电层自身所产生的弹性变形。因此,相对于长条形弹性电极,马蹄形弹性电极形变时由于复合材料导电层曲线的舒展,使这一部分产生的弹性变形较小,对复合材料导电层导电特性的影响也较小,电阻值变化不大,最终表现出了更好的导电特性。因此,弹性导线采用马蹄形的形状布置可以改善弹性导线的拉伸-导电特性,对弹性导线进行形状的优化设计可满足其在不同环境、载体等条件下的应用需求。

图 10 绘制的是电阻值与循环拉伸次数的关系特性曲线。其中,“拉伸”的测量曲线是导电薄膜电极层在 30% 拉伸状态下进行在线电阻值测试而得到的,而“释放”的测量曲线是导电薄膜电极层在拉伸释放后恢复原长状态进行电阻值测试得到的。随着拉伸次数的增加,导线在 130% 拉伸状态的电阻值缓慢地逐渐增大,每十次拉伸的电阻增长率分别为 7.8%, 7.2%, 5.1% 和 4.5%。拉伸释放后导线恢复原长状态的电阻值会减小,但随着拉伸次数增加,释放至原长状态时导线的电阻值也缓慢地逐渐增大,每十次拉伸释放后的电阻增长率分别为 8.9%, 8.6%, 8.4% 和 8.1%。可见,导线的导电稳定性比较好,这得益于马蹄形的形状布置与预拉伸制作方法的双重作用。

3.2 透明度分析

基于银纳米线导电材料及 PDMS 基底材料,并结合马蹄形的形状布置与预拉伸方法制作的高柔弹性导电薄膜电极层可以实现较高的透明度。当电极部分为了得到更好的导电性时,会在制作时增加银纳米线的厚度,这样就牺牲了一定的透明度,但是整体上依然保持良好的透明性。良好的透明性意味着设备可以很好的吸收太阳光能,目前银纳米线已应用于太阳能薄膜电池的制作。未来,这一特性会帮助电子皮肤触觉传感器自供电功能的实现,这是电子皮肤触觉传感器的重要发展方向之一。

3.3 扫描电镜分析

图 11 为新型高柔弹性导线的 SEM 图像,拉

伸后导线表面产生了一些裂痕,不如拉伸前光滑,因此导线的电阻值呈增大的趋势,但大量的银纳米线连接致密,仍然使拉伸后的导线保持良好的导电性,并且由于形状优化及预拉伸方法的共同作用,导线的导电性和稳定性都得到了改善。

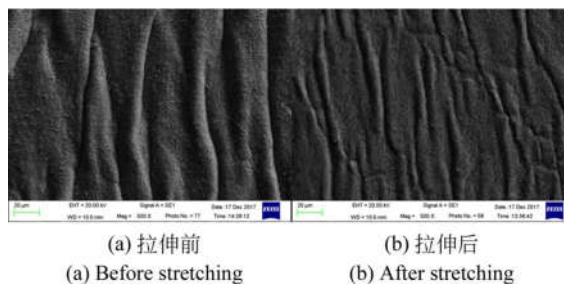


图 11 新型高柔弹性导电薄膜电极层的 SEM 图像
Fig. 11 SEM image of highly flexible conductive film electrode

3.4 通电性能展示

由于高柔弹性导线复合导电层产生的是屈曲的舒展,其银纳米线间的接触并没有被破坏,因此弹性导线在大角度弯曲、扭转中依然保持良好的导电性,证明由马蹄形的形状布置及预拉伸方法相结合制作的弹性导线具有非常好的拉伸-导电特性。将弹性导线作为回路导线设计制作 LED 灯,如图 12 所示,弹性导线在扭转、弯曲、拉伸三种不同状态下均保持正常工作。说明这种制作方法简单的高柔弹性导电薄膜确实具有良好的柔弹性及导电稳定性。

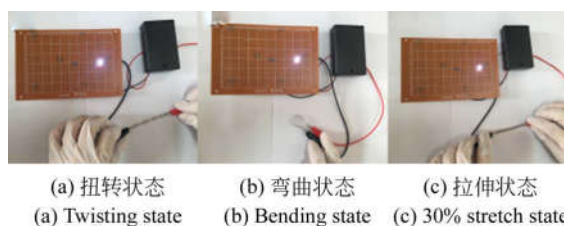


图 12 通电性能展示
Fig. 12 Highly flexible conductive film electrode work in different states

3.5 机器人应用试验

将高柔弹性导电薄膜电极层粘贴于由北京万创兴达科技有限公司生产的 ARM 系列仿人机器人的手腕及手指部位,测试其在机器人不同工作状态时的导电情况,如图 13 所示,贴于手腕部位

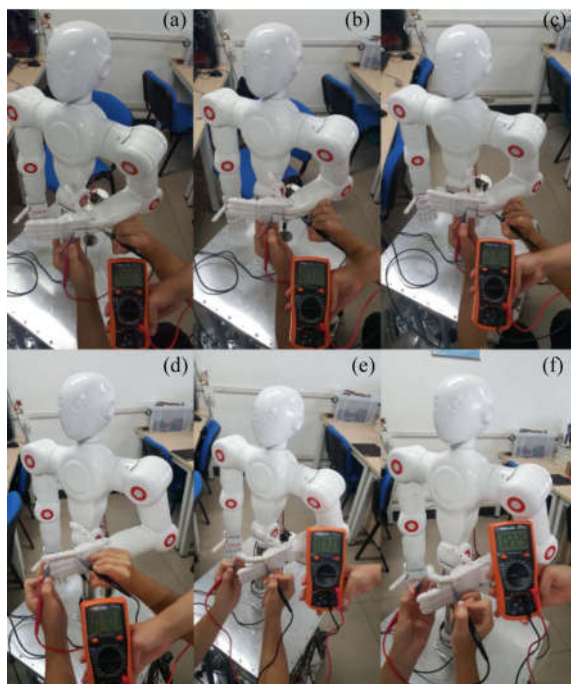


图 13 不同运动状态导电性能展示(a),(b),(c)手腕部位不同运动状态.(d),(e),(f)手指部位不同运动状态

Fig. 13 Conductive performance of different sports states. (a), (b), (c) different movement states of the wrist. (d), (e), (f) different movement states of the finger

的导电薄膜电极层在手腕处于自然水平伸直状态、向内侧弯曲 15° 、向内侧弯曲 45° 3 种不同运动状态时的电阻分别为 8.7Ω , 11.8Ω , 16.6Ω ; 贴于手指部位的导电薄膜电极层与手腕不同, 存在两个关节, 弯曲时受力更加复杂, 此时导电薄膜

在手指处于自然水平伸直状态、远端指尖关节弯曲 15° 且近端指尖关节弯曲 45° 、远端指尖关节弯曲 45° 且近端指尖关节弯曲 60° 3 种不同运动状态时的电阻分别为 10.1Ω , 11.7Ω , 22.5Ω 。由此可见, 高柔弹性导电薄膜电极层在机器人手腕及手指各运动状态均保持了良好的导电性。随着弯曲程度的增大, 电阻值只是略有增加, 这与本文前面的拉伸实验结果相符, 进一步证明采用马蹄形的形状布置及预拉伸方法相结合的导电薄膜柔弹性高、导电性好。

4 结 论

利用马蹄形的形状布置与预拉伸工艺相结合的方法制作高柔弹性导电薄膜电极层, 展现了良好的柔弹性及导电特性。拉伸测试中, 高柔弹性电极的电阻值在拉伸率较小时略有减小, 随着拉伸率继续增加, 电阻值逐渐增大。第 50 次拉伸 30% 后, 高柔弹性电极相对初始值的电阻增量仅为 93%。随着拉伸次数的增加, 弹性导线在拉伸状态及卸载至原长状态的电阻值均呈现缓慢增大的趋势, 但增长率较低。

除了有效电极的柔弹性、导电性与稳定性, 电极还有较高的透明度, 为吸收太阳光能实现自供电提供条件。通过扫描电镜试验、通电展示及机器人应用试验可知, 新型高柔弹性导电薄膜电极层兼有高柔弹性, 高导电率和稳定性, 透明度佳, 制作工艺简单等特点, 可应用于触觉传感、医疗保健、运动健康等诸多领域, 具有良好的发展前景。

参考文献:

- [1] 曹建国, 周建辉, 缪存孝, 等. 电子皮肤触觉传感器研究进展与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(1): 1-13.
CAO J G, ZHOU J H, MIAO C X, *et al.*. Research progress and development strategy on tactile sensors for E-skin[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(1): 1-13. (in Chinese)
- [2] 张森浩, 邱东海, 衣宁, 等. 可穿戴柔性电子的快速制备与医疗应用[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(6): 1362-1369.
ZHANG S H, QIU D H, YI N, *et al.*. Rapid preparation and medical application of wearable
- Flexible electronics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(6): 1362-1369. (in Chinese)
- [3] 吴伟国. 面向作业与人工智能的仿人机器人研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 1-19.
WU W G. Research progress of humanoid robots for mobile operation and artificial intelligence[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(7): 1-19. (in Chinese)
- [4] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 27-44.
WANG G B, CHEN D SH, CHEN K W, *et al.*. The current research status and development strategy on biomimetic robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(13): 27-44. (in Chinese)

- [5] 汪浩鹏. 用于接触压力测量的新型高柔弹性电子皮肤研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015. WANG H P. *Development of a Skin-like Pressure Sensor Array for E-skin Application*[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015. (in Chinese)
- [6] 孟军辉. 基于银纳米线的弹性电极研究[D]. 北京:北京科技大学, 2016. MENG J H. *Stretchable Conductor Based on Silver Nanowires*[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016. (in Chinese)
- [7] 何彦霖, 张旭, 孙广开, 等. 复合基底柔性光纤曲率传感器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(6): 1263-1269. HE Y L, ZHANG X, SUN G K, *et al.*. Flexible curvature sensor based on composite substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(6): 1263-1269. (in Chinese)
- [8] TRUNG T Q, LEE N E. Recent progress on stretchable electronic devices with intrinsically stretchable components[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(3): 1603167.
- [9] XUE J, SONG J Z, DONG Y H, *et al.*. Nanowire-based transparent conductors for flexible electronics and optoelectronics[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(2): 143-156.
- [10] SEKITANI T, NOGUCHI Y, HATA K J, *et al.*. A rubberlike stretchable active matrix using elastic conductors[J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1468-1472.
- [11] ARAKI T, NOGI M, SUGANUMA K, *et al.*. Printable and stretchable conductive wirings comprising silver flakes and elastomers[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2011, 32(10): 1424-1426.
- [12] GE J, YAO H B, WANG X, *et al.*. Stretchable conductors based on silver nanowires: improved performance through a binary network design[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 52(6): 1654-1659.
- [13] XU F, ZHU Y. Highly conductive and stretchable silver nanowire conductors[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(37): 5117-5122. [LinkOut]
- [14] GRAY D, TIEN J, CHEN C. High-conductivity elastomeric electronics[J]. *Advanced Materials*, 2004, 16(5): 393-397.
- [15] CHTIOUI I, BOSSUYT F, DE KOK M, *et al.*. Arbitrarily shaped rigid and smart objects using stretchable interconnections[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2016, 6(4): 533-544.
- [16] VERPLANCKE R, BOSSUYT F, CUYPERS D, *et al.*. Thin-film stretchable electronics technology based on meandering interconnections: fabrication and mechanical performance[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(1): 015002.
- [17] JABLONSKI M, BOSSUYT F, VANFLETEREN J, *et al.*. Reliability of a stretchable interconnect utilizing terminated, in-plane meandered copper conductor[J]. *Microelectronics Reliability*, 2013, 53(7): 956-963.
- [18] LEE P, LEE J, LEE H, *et al.*. Highly stretchable and highly conductive metal electrode by very long metal nanowire percolation network[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(25): 3326-3332.
- [19] NAM S, SONG M, KIM D H, *et al.*. Ultrasmooth, extremely deformable and shape recoverable Ag nanowire embedded transparent electrode[J]. *Scientific Reports*, 2015, 4: 4788.

作者简介:



周建辉(1983—),女,河北唐山人,讲师,博士研究生,2007年于重庆大学获得学士学位,2010年于华北理工大学获得硕士学位,主要从事触觉传感技术、信号检测等的研究。E-mail: zhoujianhui117@163.com

导师简介:



曹建国(1971—),男,湖南衡山人,北京科技大学教授,博士,博士生导师,美国加州大学圣地亚哥分校UCSD高级访问学者,分别于1992年、2000年获得北京科技大学学士、博士学位,主要从事基于工业大数据的智能制造建模与全流程板形质量控制、轧制技术及自动化,精确塑性成形制造及其自动化,机器人仿生电子皮肤触觉传感与多模态感知,复杂机电系统检测与控制等研究。E-mail: geocao@ustb.edu.cn