

可穿戴的极低成本压阻式传感器

尹拓¹ 王路标¹ 朱泉水² 张巍巍¹

(¹ 南昌航空大学光电信息感知技术与仪器江西省重点实验室, 江西 南昌 330063;

² 大学物理实验国家级实验教学示范中心(南昌航空大学), 江西 南昌 330063)

摘要 本文基于纸上手绘的石墨电阻设计制作了可穿戴的手指姿态传感器。用 2B 铅笔在绘图纸上绘制石墨电阻, 受温敏电阻特性的启发, 将电阻设计为波浪线形状以实现环境参量传感的增敏; 用惠斯通电桥将环境敏感电阻值的变化转换为电压输出, 数字电压表头直接读值; 用 3D 打印的手部可穿戴组合式机械结构安装固定纸基石墨电阻传感器。该可穿戴传感器的角分辨率为 2.3° , 可以通过手指屈伸的观测直观有效地演示影响电阻值的环境因素, 既能用于物理的创新性实验教学, 又有健康与运动监测的实用价值。

关键词 手绘石墨电阻; 环境参量; 非平衡电桥; 可穿戴传感器

A LOW-COST WEARABLE SENSOR WITH A PIEZORESISTIVE MECHANISM

YIN Tuo¹ WANG Lubiao¹ ZHU Quanshui² ZHANG Weiwei¹

(¹ Key Laboratory for Optoelectronic Information Perception and Instrumentation of Jiangxi Province, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063;

² National Demonstration Center for Experimental College Physics Education (NCHU), Nanchang, Jiangxi 330063)

Abstract This paper presents a wearable finger posture sensor designed and fabricated based on hand-drawn graphite resistors on paper. Graphite resistors were drawn on drawing paper using a 2B pencil. Inspired by the characteristics of thermistors, the resistors were designed in a wavy shape to enhance the sensitivity to environmental parameters. A Wheatstone bridge was used to convert the changes in the environmentally sensitive resistance values into voltage outputs, which were directly read by a digital voltmeter. The paper-based graphite resistor sensors were installed and fixed in a 3D-printed wearable hand assembly structure. The wearable sensor has an angular resolution of 2.3° and can intuitively and effectively demonstrate the environmental factors affecting the resistance value through the observation of finger flexion and extension. It is suitable not only for innovative experimental teaching in physics but also has practical value for health and motion monitoring.

Key words hand-drawn graphite resistor; environmental stimulus; Wheatstone bridge; wearable sensor

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(62265012); 江西省主要学科学术与技术带头人培养计划——领军人才项目(20204BCJL22041)。

通信作者: 张巍巍, zdw@ustc.edu。

引文格式: 尹拓, 王路标, 朱泉水, 等. 可穿戴的极低成本压阻式传感器[J]. 物理与工程, 2025, 35(3): 252-258.

Cite this article: YIN T, WANG L B, ZHU Q S, et al. A low-cost wearable sensor with a piezoresistive mechanism[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(3): 252-258. (in Chinese)

电阻是最基本的一种电学元器件,它影响着电路的电流、电压、频率等各项特性,可变电阻则可以调节、控制这些电路特性^[1],例如,消费类电子产品中常用于调谐和电压控制的碳膜电位器就是一个滑动变阻器,它的主体构造是一个碳膜电阻和可以在电阻上滑动的电刷;一些材料的电阻受环境影响而变化,利用电阻的环境敏感性可以制成热敏电阻、光敏电阻、压敏电阻等敏感元件。

近十余年,对环境敏感电阻的应用研究大量出现在运动、医疗、健康用途的可穿戴器件领域^[2,3],其中,对压敏电阻的研究最为普遍-基于压敏电阻可以实现惯性传感、弯曲传感、拉力/压力传感,在可穿戴的人体运动监测装置中十分常见^[2-6]。可穿戴电子设备往往需要与人体紧密接触,考虑到舒适性、安全性要求,使用的传感器必须轻质、柔韧、小尺寸^[2,7],因此敏感材料的形态以薄膜、纤维、颗粒填充复合材料为主,实践中碳纳米管及氧化石墨烯等新型材料^[8]、金属粉末或纤维、多孔导电材料、人工设计微纳结构材料等^[9-12]均可以作为柔性压阻传感器的力敏材料。与此同时,制造工艺成本与效率、标准化与个性化需求等矛盾形成了柔性压阻器件结构设计与制作上的重重挑战^[13,14]。

在平衡低成本与高效率、标准化与个性化的努力中,纸基石墨电阻可穿戴传感器受到广泛的关注^[15-18]。石墨是一种低成本、环境友好、来源广泛的电阻材料;纸张是一种低成本、生物兼容性好、可回收的柔性载体;成熟的喷墨打印工艺非常适合多品种、小批量的纸基石墨电阻高效益生产。第33届国际青年物理学家竞赛(International Young Physicists' Tournament, IYPT)将纸上手绘石墨电阻的性质研究作为竞赛内容的第十题^①,继而又引发了国际、国内研究者对低成本纸基石墨器件的再次瞩目^[18-21]。

2023年第九届全国大学生物理实验竞赛(创新)命题类题目3“导电性”要求“研究某种物质的导电特性,并利用该物质制作一个实际应用装置”,手绘纸基石墨电阻可穿戴传感器完美地满足题目要求,不仅仅能具体直观地展示抽象的物理概念和原理,同时具有实用性、可推广性。本文介绍了以竞赛一等奖作品“可穿戴的石墨压阻器件”为主的设计与研究,包括设计制作以纸张为基底的

石墨可变电阻器件,用于物理教学中演示石墨电阻的温度敏感性和应力敏感性,进而作为极低成本的可穿戴器件实际用于温度及手部动作姿态的检测。

1 实验原理

根据电阻定律,影响电阻的因素一是电阻的几何尺寸,具体是长度和横截面积;二是导电材料的电阻率。当讨论电阻的环境敏感特性时,可以是环境因素改变了电阻的几何尺寸,例如温度变化引起电阻材料的热胀冷缩、应力作用导致材料应变,也可能是材料电阻率发生变化,而後者的影响往往较前者大得多,此时一般可以忽略材料几何尺寸变化的影响。

固体的电阻率 ρ 表示为

$$1/\rho = \sigma = nq\mu \quad (1)$$

其中, σ 是电导率, n 是载流子浓度, q 是单位电荷电量, μ 是载流子在材料中的迁移率。可见,电阻率的变化有可能由载流子浓度变化或迁移率变化引起。

作为导电材料的石墨由碳原子层层堆叠而成,两层之间有弱的范德华力相互作用,同层的内部原子则由强共价键结合。在石墨基复合材料中,石墨片(或称为颗粒)分散在其他组分中,彼此搭接形成导电的网络,接触位置会形成 meV 级别的较低的势垒^[16],电子在通过这些势垒时,存在两种传输机制:量子隧穿和经典传输。对于低能量电子,由于其能量不足以直接越过势垒,它们需要依赖量子隧穿效应来实现传输。量子隧穿是一种量子力学现象,允许电子以一定概率穿越高于其能量的势垒。而对于具有较高能量的热电子,它们的能量足以直接克服势垒,或者说,电子越过势垒的概率是 100% 而不是隧穿概率,这种情况下可以忽略势垒的存在,用经典的物理图像来描述电子的直接传输行为。

石墨的电阻率受到温度的显著影响。在室温附近,当温度升高时,石墨中生成大量的热电子,即载流子浓度上升,这是影响电阻率变化的主要因素^[16]。对于具体的电阻元件,温度敏感性的经验式为

① <https://www.iypt.org/problems/iypt-2020-problems/>

$$R = R_0(1 + \alpha T) \quad (2)$$

其中, R 是环境温度为 T 时元件的电阻, R_0 是 0°C 时元件的电阻, α 是电阻的温度系数, 反映电阻材料的特性。那么在室温附近, 石墨电阻的温度系数应为负值。

石墨电阻元件的电阻值还受到外力的影响。温度不变, 当向石墨电阻施加作用力, 如压力或拉力, 元件会发生形变, 导致材料局部密度发生变化。以石墨元件被拉伸为例, 单位体积内的石墨含量降低, 石墨层间的接触面积减小, 这使得电子的有效传导路径变长、散射几率增大, 从而降低了电子的迁移率。结果是, 石墨电阻的导电性变差, 电阻值相应增大。因为核心机制是电阻率的变化而不是导电材料几何尺寸的改变, 这种现象被称为石墨电阻的压阻效应。

可以看到, 石墨电阻的温度效应和压阻效应都主要反映电阻率受环境的影响。本研究制作的可穿戴器件可以展现石墨电阻的环境敏感性, 因为物料常见、器件结构简单, 物理机制的呈现比较直观, 作实际应用则有稳定可靠、成本低廉的优点。

2 实验设计

2.1 实验器材

准备 2B 铅笔(笔芯标准宽度 1.807mm)、机械制图专用绘图纸、铜箔胶带, 用于石墨电阻的绘制; 使用尺子、垫板、水平仪、砝码等工具辅助绘制; 使用不同型号的色环电阻、杜邦线若干、数字电压表表头(测量范围 $-5 \sim +5\text{V}$) 构建电桥测量电路; 使用小型恒温加热台控制实验样品的温度、弹簧拉力计于样品上加载拉力, 数字万用表作过程检测。

2.2 原理验证

已经为人熟知的是, 在同一位置多次重复画线后, 只要所绘电阻的长度、宽度不变, 石墨在纸面的附着与摩擦脱落最终会达到平衡, 从而石墨电阻的厚度趋于定值, 阻值也就趋于稳定^[19]。本文的预实验更证明, 即使画线力度、角度等实验条件不同, 只要所绘电阻的长度、宽度一致, 纸上绘制的石墨电阻在一定画线次数后将达到统一的稳定阻值, 典型现象如图 1 所示。

本实验中用 2B 铅笔在绘图纸上绘制石墨电

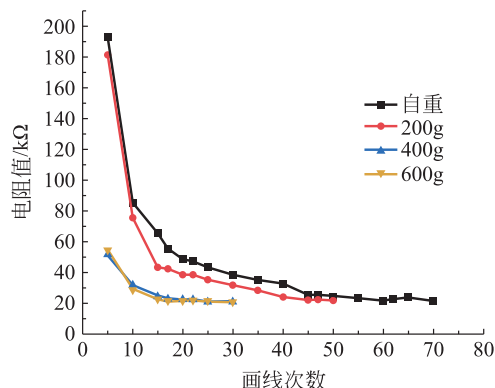


图 1 铅笔负重不同, 绘制电阻的阻值与画线次数的关系

阻, 每个电阻样品均画线 30 次以上直至电阻值不变。然后在电阻两端粘贴铜箔胶带作为电极, 制得敏感元件如图 2(a)。

温度敏感测试中, 将笔绘电阻样品固定在加热板上, 在 $40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 温度范围内测量样品电阻。

应力应变敏感测试中, 3D 打印制作不同半径的圆筒如图 2(b), 使绘制有石墨电阻的纸带贴合圆筒内壁, 测量弯曲程度对石墨电阻的影响。或使用拉力计牵引绘制有石墨电阻的纸带(纸带的拉伸段长 10cm、宽 1.8cm、厚 0.175mm), 纸带另一端固定, 测量、记录电阻值与拉力值。

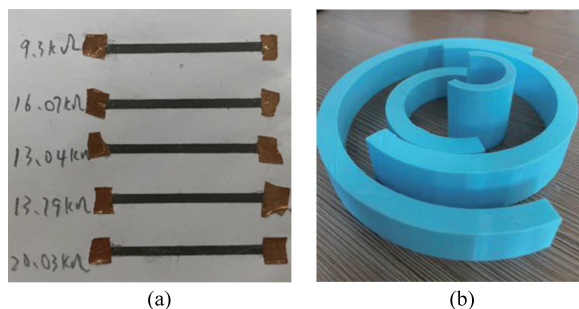


图 2 石墨电阻特性实验材料

(a) 绘制的石墨电阻样品; (b) 不同曲率的圆筒

2.3 器件设计

可穿戴装置通过 3D 打印方式制作。完整的设计制作流程如图 3, 将绘制好的石墨电阻表面涂上一层防水硅胶并用透明塑料片作外壳进行简易封装, 通过卡槽固定安装到可穿戴装置上就构造出了可穿戴传感器。实验人员手指的运动变形传递到石墨电阻上, 应变被转化为电阻变化, 而非平衡电桥再将电阻变化转化为电压输出, 通过毫伏

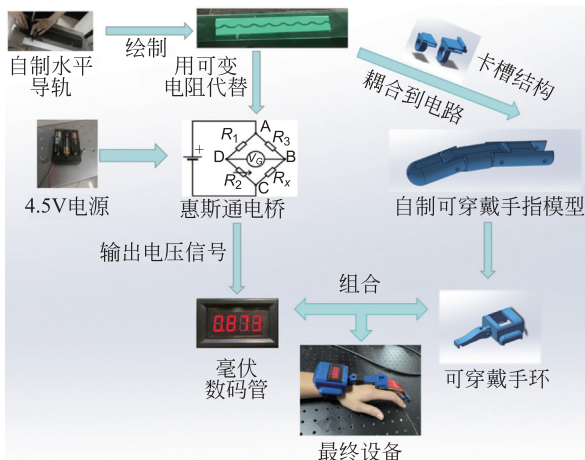


图3 器件设计流程图

数码管示数来显示手指关节的弯曲程度。

手指弯曲程度与传感器示数关系的标定治具如图4(a)所示,它也是图4(b)石墨电阻穿戴装置的一部分。标定时,将完成的可穿戴器件戴在手上,平放手掌,中指背部贴合在标定装置上,改变标定装置中近指骨关节(即指尖到指根的第二骨节处)的弯曲角度 θ ,以 9° 为间隔递增至 90° ,记录角度 θ 和表头示数进行拟合分析;或同时改变标定装置中指尖到指根的第一、第二骨节两个关节的角度 θ 和 φ ,约化角 $\alpha=180^\circ-\theta-\varphi$ 。使弯曲程度增大(α 减小),为方便计算,使两个关节改变的

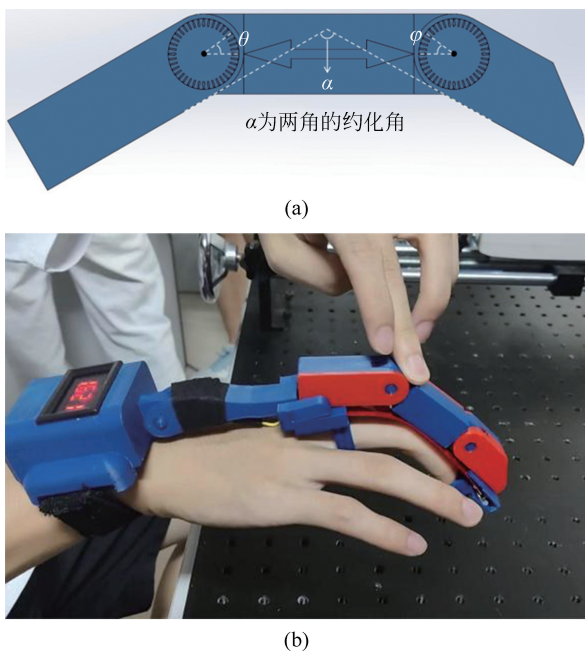


图4 石墨电阻的穿戴测试方式

(a) 手指弯曲角度标定治具; (b) 石墨电阻穿戴方式示意图

角度 θ 和 φ 相等,记录角度 θ 和表头示数进行分析。

3 结果与分析

3.1 温度对电阻的影响

如图5所示是三个不同石墨电阻的阻值随温度的变化。实验观察到的规律很好地符合式(2)给出的电阻温度依赖关系:线性拟合优度从线条1到3分别为0.9969、0.9990、0.9998,均在0.99以上,表明线性关系是可信的;图中拟合曲线的斜率从线条1到3分别为 $-0.3295(65)$ 、 $-0.5248(59)$ 、 $-0.7153(37)$,均为负的温度系数。温度系数的绝对值就是热敏电阻传感器的灵敏度。对比图中的曲线又可见,与石墨电阻的初始阻值正相关,传感曲线随初始阻值增大而变得陡峭,即灵敏度增大。这是因为,如“实验原理”中所述,石墨电阻的环境敏感性主要源于导电材料电阻率的变化,而不是热胀冷缩或其他作用引起的电阻元件的几何尺寸变化。忽略电阻元件尺寸的变化,根据电阻定律可以得到

$$\Delta R/R = \Delta \rho / \rho \quad (3)$$

可见,当检测(环境因素引起的)电阻变化值 ΔR 时,它受环境敏感因素 ρ 的支配,同时正比于元件电阻 R 。为了使石墨电阻元件具有更大的环境灵敏度,就有必要使绘制的石墨电阻具有更大的电阻值 R 。

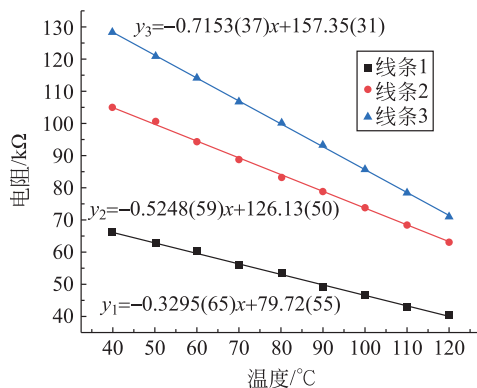


图5 温度对石墨电阻阻值的影响

基于以上实验证据及分析结论,在后续制作实际使用的可穿戴石墨电阻元件时,在纸上绘制波浪线代替原理验证时使用的直线段。波浪线是折叠的形状,单位长度的波浪线展开后厚度、宽度

等参数与直线电阻相同,但轨迹长度远大于单位长度,从而同一长度范围内波浪线电阻的电阻值显著大于直线电阻,能实现增敏效果。这个增敏方案的思想也是丝栅结构的金属应变片、叉指结构的可变电容等成熟的常见器件的设计思想。波浪线电阻实测结果如图 6 所示,证实了波浪线电阻的阻值远大于同等端-端长度的直线电阻,波浪线电阻的实验数据仍然与电阻公式吻合得非常好,其端-端长度与电阻值关系式的线性拟合优度(R^2)达到 0.999 以上。

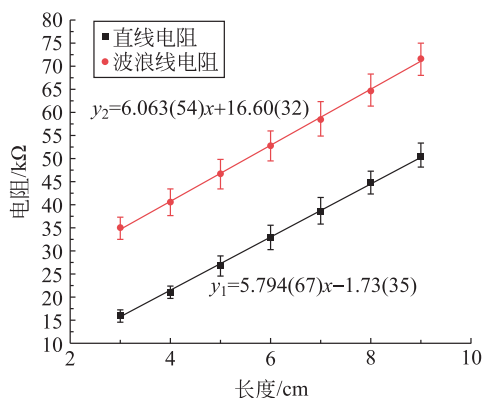


图 6 相同条件下绘制的波浪线电阻与直线电阻对比数据

3.2 应力应变对电阻的影响

探究弯曲应变对石墨电阻的影响,目的是用理想可控条件模拟实际应用中可穿戴电阻的变形及响应。记录并分析了电阻值随弯曲程度(弯曲半径或曲率)的变化,如图 7 所示。结果表明,随着弯曲半径的减小、石墨电阻的曲率增大,电阻值单调增大。此现象的物理机制在于,纸带的弯曲会施加张应力在表面的石墨电阻上,继而导致石墨电阻的微应变,具体地,石墨电阻材料的堆积密

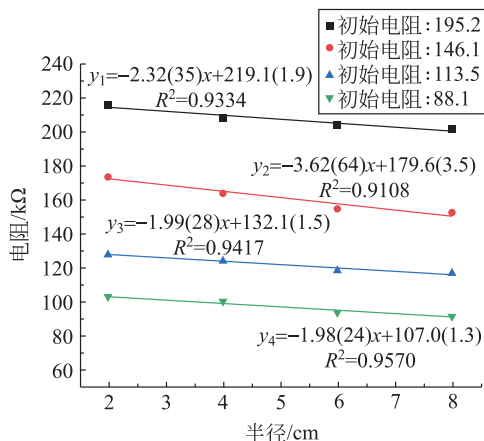


图 7 弯曲应变对石墨电阻的影响

度变化、石墨导电网络的电子传导通道伸长、石墨微片之间的搭接面积减小,从而电阻率增大,电阻值增大。电阻元件长度变化对应的电阻应变效应也对阻值的增大有所贡献,但显然不足以制造出实验观测到的如此明显的较大电阻变化,仅是一个次要因素。

直接拉伸绘有石墨电阻的纸带,测量电阻值随拉力的变化,结果如图 8 所示。实验数据表明,石墨电阻的阻值与拉力之间呈现出正相关的线性关系,拉力导致伸长由胡克定律描述,这反映了在实验中纸带是弹性变形。这个现象与弯曲应变的实验现象有完全一致的物理机制。实验中,目视观察不到纸带的伸长变形,与弯曲实验的分析一样,可以推断,不仅仅有应变效应的作用,同时必然存在电阻率 ρ 的变化,即压阻效应。

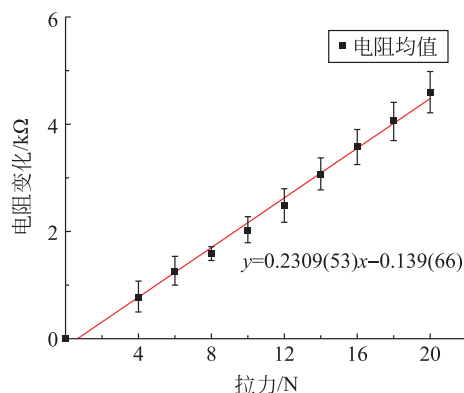


图 8 拉力引起的石墨电阻值变化(图中删除了拉力 2N 的数据点,因为初始纸带未充分伸展,拉力被分载,测量误差较大)

3.3 可穿戴器件性能

最后检测实际安装在可穿戴机构上的石墨电阻,不再测量电阻值,而是直接读取、记录可穿戴传感器的电压表头示数。实验者手指的弯曲与设备示值之间的关系如图 9 所示。当只弯曲一个指关节时,根据拟合曲线表达式可得,器件的灵敏度(拟合曲线斜率的绝对值)较小;同时弯曲两个关节时,变化角度约为所记录的角度值的 2 倍,近似地,器件灵敏度也是前者的约 2 倍。无论哪种屈指方式,可穿戴传感器都实时地从表头上显示了其响应,间接地复现了前述弯曲应变对石墨电阻影响的实验结果,充分、直观地展现了石墨电阻的压阻特性。

基于屈指角度标定数据,得到该可穿戴石墨压

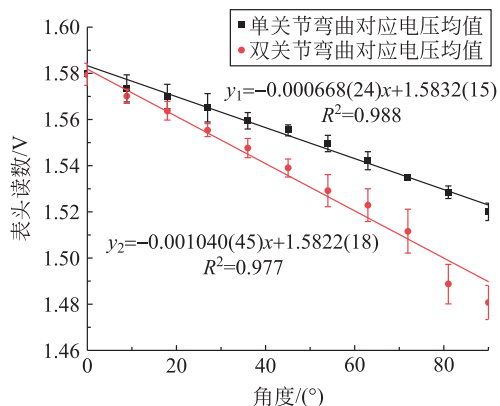


图9 手指单/双关节弯曲检测曲线

阻原型器件的基础性能指标:(1)量程为 90° (测量范围 $0^\circ \sim 90^\circ$);(2)灵敏度为 $0.67 \pm 0.02 \text{ mV/deg}$;(3)角分辨率为 2.3° ;(4)非线性度为全量程 7.1% ;(5)重复度为 5.02% 。这样的功能性和可靠性性能已经足够保证该器件用于监测手指的屈伸姿态甚至手指的颤抖,从而可应用于例如风湿与骨骼病变程度判定、帕金森症状检测、中风前兆筛查、增强现实互动操作等场合。

4 结语

本研究用铅笔在纸上绘制了石墨电阻;探讨了温度、应力应变对电阻值的影响;通过将敏感元件绘制成波浪线形状,实现环境敏感电阻的增敏;用增敏的石墨压阻元件构建了一个可穿戴传感器,实现了手指屈伸状态的检测。

与其他同样用途的可穿戴传感器相比,本文设计的纸基石墨电阻传感器物料成本极低,一套实验装置的物料成本总价不超过 20 元;制作工艺极简,用尺子即可辅助完成电阻制作,同时还能保有满足实用需求的灵敏度和精度。石墨、纸张等耗材具备良好的生物兼容性和环境友好性,导致该器件也适合大规模应用。这项设计可以作为设计性实验在大学物理、传感器原理等教学课程中开设,替换传统实验教学枯燥乏味的“改变条件—记录数据”流程,在展示、验证知识点的同时有较好的趣味性,能帮助学生更好地理解物理规律,并多方面锻炼学生机、电、信息处理等方面的设计与操作技能。利于在大学实验室乃至中学课堂大规模推广。该器件作为个人消费电子产品的表现也相当出色,其弯曲应变检测的灵敏度、非线性度和

重复性等指标满足健康监测、游戏娱乐等应用的实用需求。

参考文献

- [1] FLOYD T L, BUCHLA D. Electronics fundamentals: circuits, devices & applications[M]. Hoboken, NJ: Prentice Hall Press, 2009.
- [2] De PASQUALE G, RUGGERI V. Sensing strategies in wearable bio-mechanical systems for medicine and sport: a review[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2019, 29(10): 103001.
- [3] HOMAYOUNFAR S Z, ANDREW T L. Wearable Sensors for Monitoring Human Motion: A Review on Mechanisms, Materials, and Challenges[J]. SLAS Technology, 2020, 25(1):9-24.
- [4] GAO W, OTA H, KIRIYA D, et al. Flexible Electronics toward Wearable Sensing[J]. Accounts of Chemical Research, 2019, 52(3):523-533.
- [5] WALMSLEY C P, WILLIAMS S A, GRISBROOK T, et al. Measurement of Upper Limb Range of Motion Using Wearable Sensors: A Systematic Review[J]. Sports Medicine-Open, 2018, 4(1):53.
- [6] XUE Y, JU Z, XIANG K, et al. Multimodal human hand motion sensing and analysis—A review[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2018, 11(2): 162-175.
- [7] WANG L, FU X, HE J, et al. Application Challenges in Fiber and Textile Electronics [J]. Advanced Materials, 2020, 32(5):1901971.
- [8] ZHENG Q, LEE J-H, SHEN X, et al. Graphene-based wearable piezoresistive physical sensors[J]. Materials Today, 2020, 36:158-179.
- [9] GAO Q, ZHANG J, XIE Z, et al. Highly stretchable sensors for wearable biomedical applications[J]. Journal of Materials Science, 2018, 54(7):5187-5223.
- [10] LI J, FANG L, SUN B, et al. Review—Recent Progress in Flexible and Stretchable Piezoresistive Sensors and Their Applications[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2020, 167(3):7561.
- [11] WU W. Stretchable electronics: functional materials, fabrication strategies and applications[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2019, 20(1):187-224.
- [12] GE G, HUANG W, SHAO J, et al. Recent progress of flexible and wearable strain sensors for human-motion monitoring[J]. Journal of Semiconductors, 2018, 39(1): 011012.
- [13] MA Y, ZHANG Y, CAI S, et al. Flexible Hybrid Electronics for Digital Healthcare[J]. Advanced Materials, 2019:1902062.
- [14] LOU Z, WANG L, JIANG K, et al. Reviews of wearable

- healthcare systems: Materials, devices and system integration[J]. *Materials Science & Engineering R*, 2020, 140: 100523.
- [15] LIN C W, ZHAO Z, KIM J, et al. Pencil drawn strain gauges and chemiresistors on paper[J]. *Scientific reports*, 2014, 4(1): 3812.
- [16] DINH T, PHAN H P, DAO D V, et al. Graphite on paper as material for sensitive thermoresistive sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(34): 8776-8779.
- [17] GAO L, ZHU C, LI L, et al. All Paper-Based Flexible and Wearable Piezoresistive Pressure Sensor[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(28): 25034-25042.
- [18] LAI Q T, LIANG H Q, TANG X G, et al. Printing paper-derived ultralight and highly sensitive E-skin for health monitoring and information encryption[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 976: 173411.
- [19] 汪隽琪, 周惠君, 王寅龙. 铅笔画出的电阻—简单纸基柔性电子元件的性质探究[J]. *物理实验*, 2022, 42(8): 28-32, 47.
- WANG J, ZHOU H, WANG Y. Research on the properties of pencil trace—A simple flexible electronic component [J]. *Physics Experimentation*, 2022, 42(8): 28-32, 47. (in Chinese)
- [20] JI C, ZHANG Q, LI Q, et al. A Graphical Pressure Sensor Array with Multilayered Structure Based on Graphene and Paper Substrate[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2022, 307(2): 2100643.
- [21] DONG Y, HU Y, ZHAO Y, et al. Graphene-Impregnated Paper-Based Electronic Skins for Robotic Intelligence and Wireless Health Monitoring[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2024, 6(2): 998-1006.
- (上接第 251 页)
- LI D D, WANG C, YAO Y, et al. Simulation and experimental validation of Michelson interference based on Matlab [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2022, 41(10): 128-131. (in Chinese)
- [4] 邢岩, 和晓晓, 何学敏, 等. 新工科背景下应用导向的迈克尔逊干涉模拟[J]. *大学物理实验*, 2022, 35(6): 156-160.
- XING Y, HE X X, HE X M, et al. Application-oriented Michelson interference simulation for new engineering education [J]. *Physical Experiment of College*, 2022, 35(6): 156-160. (in Chinese)
- [5] 贾小文. Igor Pro 在物理实验数据处理中的应用[J]. *实验室科学*, 2020, 23(2): 88-92, 96.
- JIA X W. Application of Igor Pro in physical experiments data processing[J]. *Laboratory Science*, 2020, 23(2): 88-92, 96. (in Chinese)
- [6] 赵凯华. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 130-136.
- ZHAO K H. Optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 130-136. (in Chinese)
- [7] 邓小燕, 乔跻, 潘永华, 周进. 迈克尔逊干涉仪中补偿板与干涉条纹[J]. *物理与工程*, 2006(2): 29-32.
- DENG X Y, QIAO J, PAN Y H, et al. Analysis and simulation of effect on interference pattern of monochromatic light on Michelson Interferometer without compensator[J]. *Physics and Engineering*, 2006(2): 29-32. (in Chinese)
- [8] 吴本科. 迈克尔逊干涉仪中补偿斜入射光的理论分析[J]. *大学物理实验*, 2000(2): 14-17.
- WU B K. The theoretical analysis of compensating slanting incidence-light in michelson interferometer [J]. *Physical Experiment of College*, 2000(2): 14-17. (in Chinese)
- [9] 宋克威, 王惠棣. 没有补偿板的迈克尔逊干涉仪中干涉条纹形状[J]. *光学技术*, 1995, (2):
- SONG K W, WANG H D. Fringe pattern of Maclson interferometer without compensator [J]. *Optical Technique*, 1995(2): (in Chinese)