

受蜘蛛缝感受器启发的高灵敏度压力传感器

李艳 张宗政 薛奇恩 靳彪 杨福铃

(中国矿业大学(北京) 北京 100083)

摘要: 受蜘蛛启发基于裂缝的超灵敏传感器拥有高效的机电能量转换机制,能满足极其微小的人类活动监测。然而对传感器传感机理的完整解释及裂缝结构优化的理论研究仍是当前面对的一个挑战。在这里,我们将仿生传感层简化为平行等长裂缝结构,利用复变函数法对其进行力学分析,并总结出受力前后裂缝面重叠、过渡和隧穿三个阶段,解释了每一阶段相应的传感特性,建立了压力-电阻模型。通过仿真计算确定了裂缝长度和横向间距对传感器灵敏度及量程的影响规律。最后,通过金离子溅射成功制备了弹性基底,使用光刻辅助法精确控制了金属裂缝的形态。制作的压力传感器在 0.15-0.35kPa 范围内显示出 1.6×10^6 kPa⁻¹ 的超高灵敏度,以及在 1000 次循环中的良好再现性。仿生裂纹压力传感器灵敏度优于最近报道的压力传感器,加上良好的稳定性和制造可靠,使其在超精密领域中具有吸引力,例如人机界面和生物健康监测。

关键词: 仿生压力传感器; 金属裂纹; 蜘蛛缝感受器; 超灵敏

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

1 传感器设计背景和应用价值

近几十年来,随着电子技术的迅速发展,对超高灵敏压力传感器的需求越来越大,例如智能机器人^[1],电子皮肤^[2],人机交互^[3],医疗保健^[4]等领域。因此,提高压力传感器的灵敏度也成为当前的研究热点。经过创新性探索和长足的发展,传统的压力传感器已经具备良好的性能^[5]。但受到压力传感机理限制,其很难检测到微弱信号引起的极小变形,微小应变的敏感监测要求传感材料的微观结构能够在小变形下发生显著变化。因此,压力传感器超敏性对敏感机理的和新型材料的探索提出了新的要求和挑战。

由于自然选择和竞争,生物系统拥有独特且丰富的微纳结构如微球、微金字塔^[6]、微褶皱^[7]等,这些微纳米结构赋予了生物系统感知和适应复杂环境条件的能力,师法自然,这也为高灵敏度压力传感器的结构设计提供了有价值的借鉴^[8-10]。

蜘蛛和蝎子等节肢动物,其腿部在漫长的自然选择过程中进化出了超灵敏的缝感受器,可以感知外界微小的振动信号。一些生物学家^[11,12]研究发现蜘蛛利用腿部复杂的狭缝感受器检测微弱振动。尤其是由 30 多条平行狭缝组成的琴形器官,嵌入在其腿关节附近外骨骼中,能利用其高效的机械-电能转换来实现微弱信号的放大。受蜘蛛体表的超灵敏缝感知器启发,提出将仿生蜘蛛缝感受器引入电阻式压力传感结构优化设计,提高了其灵敏度,加上良好的稳定性和制造可靠,使其在超精密测量领域中表现出广阔前景。

2 创新点与优势

受蜘蛛腿部缝感受器的启发,基于对缝感受器结构的仿生设计,通过力学建模和对敏感机理的理论分析,深入分析了加载外界压力对狭缝感受器的受力规律,揭示了受力规律与电学信号的转换关系,解释了仿生裂缝传感器超高灵敏度的传感机制。此外,通过理论模型与仿真分析了裂缝的长度和密度对传感器灵敏度的影响。在此基础上,优化设计并制作一种仿生蜘蛛裂缝的压力传感器,通过在聚二甲基硅氧烷(PDMS)上沉积金(Au)薄膜,再使用光刻辅助法来制造通道裂缝。并对所设计的仿生裂缝压力传感器进行一系列实验,验证了所提出的压力传感系统是高度敏感,稳健的,且易于制作。

不同于传统压力传感机理，该传感器是从蜘蛛腿部的狭缝器官汲取灵感，利用新型敏感机理，建立载荷-应变数学模型，通过有限元对仿生裂纹进行参数分析，总结出载荷-电阻的三阶段理论，在柔性基底上的金属层利用光刻辅助法制造仿生裂纹，可检测到由微弱信号引起的极小形变。该传感器与其他同类产品相比，具备超高的灵敏度（达到 $2.39 \times 10^7 \text{ kPa}^{-1}$ ），可实现对微小压力的超灵敏检测，远高于同类产品；该传感器具备优异的机械稳定性，仅由柔性基底、金属层和传感电路组成，易于组装，经上千次循环测试后，传感器性能几乎保持不变。

3 实现方案简介

3.1 设计原理

受蜘蛛体表的超灵敏缝感受器启发，提出将仿生蜘蛛缝感受器引入电阻式压力传感器的结构优化设计，从而突破传统敏感机理，实现灵敏度的大幅度提高。当压力作用于传感器时，弹性基底发生变形带动金属裂缝张开，金属层的电阻随之发生改变，通过检测电路测量电阻变化即可实现对压力信号的检测。在金属层制作裂缝时弹性基底内会产生应力，当应力被释放之后，弹性基底具有可拉伸性会恢复到拉伸之前的长度，使得裂缝近似闭合，从而恢复导电性。

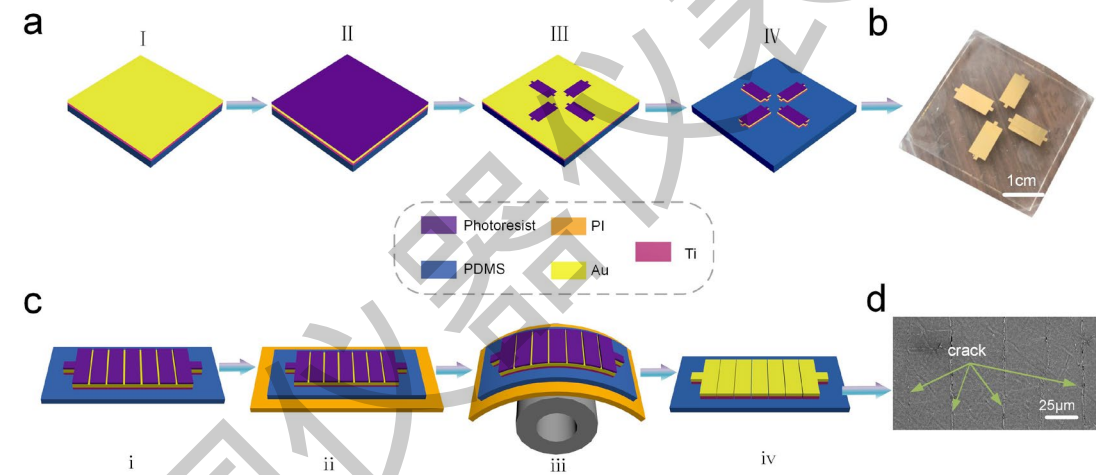


图 1 受蜘蛛缝感受器启发基于仿生裂纹的超灵敏压力传感器的制作步骤示意图 (a) 弹性基底制作流程 (b) 制造的弹性基底照片 (c) 金属层裂缝制作流程 (d) 金属层裂缝的显微扫描电镜图像

3.2 设计方法

通过理论建模，分析仿生蜘蛛缝感受器的敏感机理，建立仿生蜘蛛裂纹传感器载荷-电阻模型。利用有限元仿真研究仿生裂纹结构长度和横向间距等因素对灵敏度的影响规律，并得出最佳的传感器设计参数。在理论模型与仿真结果的基础上，进行传感器样件的制作，选取 PDMS 为弹性基底，溅射 60nm 厚的 Au/Ti 薄膜，使用光刻辅助法制作直裂纹，组装得到了仿生裂纹压力传感器样件。选取光刻辅助法^[13]进行裂缝的制备，可以在不受传感金属层材料的限制的同时，实现对裂缝的形状、位置、长度和密度等参数的精确控制，并且拥有高重复性。借助光刻法精确定义金属层的尺寸和位置，在光刻胶保护下的金属层不发生开裂，暴露的金属层受力开裂。裂缝制作流程如图 1 (c) 所示，(i) 图案化光刻胶以确定裂纹图形，(ii) 将 PDMS 粘附到 PI 表面，(iii) 以固定的曲率半径围绕钢管弯曲样件，在金属膜中生成纳米裂缝，(iv) 去除光刻胶，从 PI 膜上取下样件。为了验证所制作的仿生裂

缝结构是否满足预期设计，利用 S-3400 扫描电子显微镜观察样件的金属层，如图 1（d）所示可以看到采用光刻辅助法制作的裂缝直线度较好，没有分支，没有其他干扰裂缝，均匀分布在金属层。如图 2（b）所示，在金薄膜两端用银浆连接铜线，可以直接和检测电路连接测量电阻。

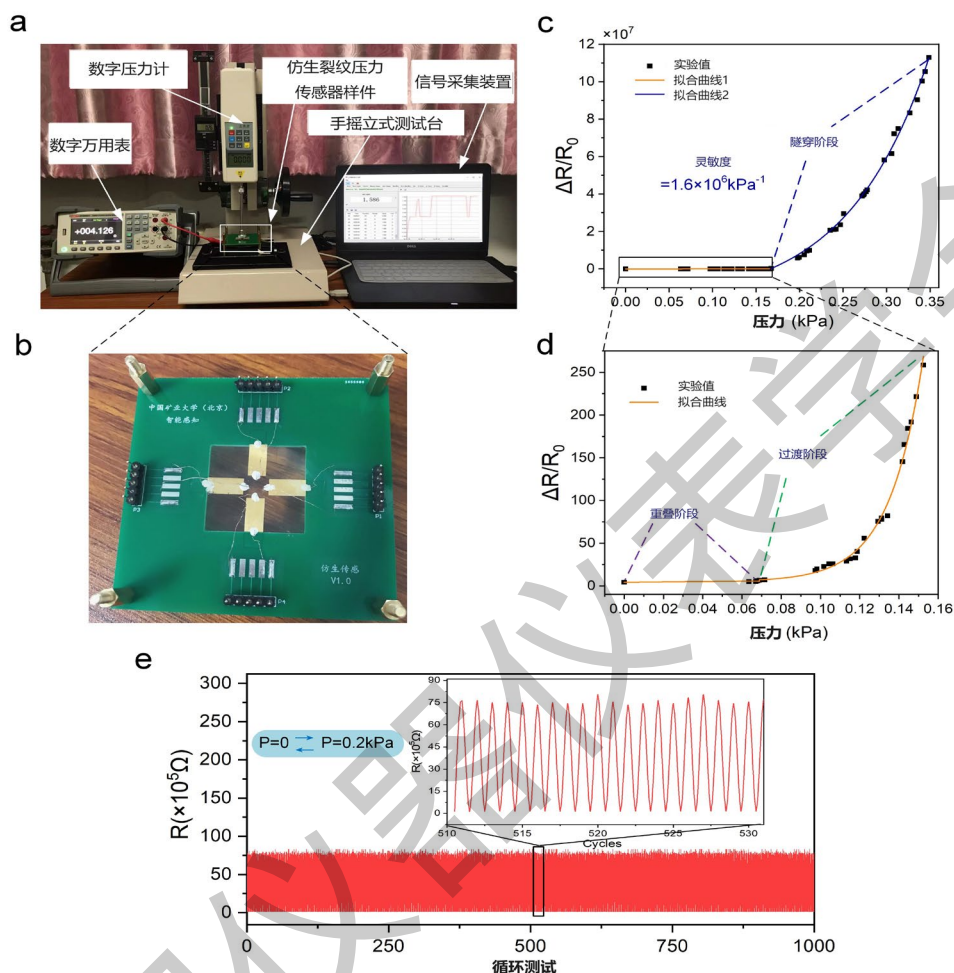


图 2 仿生裂缝压力传感器的性能 (a)实验测试现场照片(b)传感器照片(c)传感器的灵敏度拟合曲线，在 0.2-0.35kPa 区域内表现出 $1.6 \times 10^6 \text{kPa}^{-1}$ 的超高灵敏度(d)传感器在 0 -0.15kPa 区域内低灵敏度拟合曲线 (e)传感器在 0.2kPa 下进行 1000 次循环的稳定性实验

3.3 实验验证过程

为了验证仿生裂缝载荷-电阻理论模型的正确性，以及结构设计的合理性，测试了仿生裂缝压力传感器样件的灵敏度和稳定性等性能参数。搭建实验平台如图 2（a）所示，实验装置包括数字万用表，数字压力计，立式测试台和信号采集装置。将样件固定在立式测试台上，使数字压力计推杆与传感器中心位置对齐，将传感元件接入数字万用表进行电阻变化实时测量。搭建实验平台，对样件的灵敏度和稳定性等性能参数进行了实验测试。对样件施加压力，在从 0 逐渐增大到 0.35kPa 的过程中，测试样件的电阻变化值，并计算得出电阻相对变值，最终得出传感器的灵敏度值。实验结果表明，在 0.15-0.35kPa 过程中，仿生裂纹压力传感器可以达到 $1.6 \times 10^6 \text{kPa}^{-1}$ 超高灵敏度。在 1000 次循环后仍然保持良好的机械稳定性，进而表明了仿生裂纹压力传感器敏感机理和结构优化设计方法的正确性。

参考文献

- [1] Liu M Y, Hang C Z, Zhao X F, et al. Advance on flexible pressure sensors based on metal and carbonaceous nanomaterial[J]. Nano Energy, 2021, 87.
- [2] Chen J, Zhu Y, Chang X, et al. Recent Progress in Essential Functions of Soft Electronic Skin[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(42).
- [3] Chen W F, Yan X. Progress in achieving high-performance piezoresistive and capacitive flexible pressure sensors: A review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 43: 175-188.
- [4] Kang K, Park J, Kim K, et al. Recent developments of emerging inorganic, metal and carbon-based nanomaterials for pressure sensors and their healthcare monitoring applications[J]. Nano Research, 2021, 14(9): 3096-3111.
- [5] Ruth S R A, Feig V R, Tran H, et al. Microengineering Pressure Sensor Active Layers for Improved Performance[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(39).
- [6] Ruth S R A, Beker L, Tran H, et al. Rational Design of Capacitive Pressure Sensors Based on Pyramidal Microstructures for Specialized Monitoring of Biosignals[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(29).
- [7] Cheng Y F, Ma Y A, Li L Y, et al. Bioinspired Microspines for a High-Performance Spray Ti3C2Tx MXene-Based Piezoresistive Sensor[J]. Acs Nano, 2020, 14(2): 2145-2155.
- [8] Bai N, Wang L, Wang Q, et al. Graded intrafillable architecture-based iontronic pressure sensor with ultra-broad-range high sensitivity[J]. Nature Communications, 2020, 11(1).
- [9] Lee S, Franklin S, Hassani F A, et al. Nanomesh pressure sensor for monitoring finger manipulation without sensory interference[J]. Science, 2020, 370(6519): 966-+.
- [10] Xiong Y, Shen Y, Tian L, et al. A flexible, ultra-highly sensitive and stable capacitive pressure sensor with convex microarrays for motion and health monitoring[J]. Nano Energy, 2020, 70.
- [11] French A S, Torkkeli P H, Seyfarth E A. From stress and strain to spikes: mechanotransduction in spider slit sensilla[J]. Journal of Comparative Physiology a-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology, 2002, 188(10): 739-752.
- [12] Fratzl P, Barth F G. Biomaterial systems for mechanosensing and actuation[J]. Nature, 2009, 462(7272): 442-448.
- [13] Liu J S, Guo H J, Li M, et al. Photolithography-assisted precise patterning of nanocracks for ultrasensitive strain sensors[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(7): 4262-4272.

第一作者信息:

(李艳, 女副教授, 研究方向: 硅微机械谐振式传感理论与实验、多智能体博弈进化与增强的理论与实验研究、光电传感理论与实验研究、微纳仿生传感理论与实验, 邮箱: 201572@cumtb.edu.cn)

通讯作者信息:

(杨福铃, 男, 讲师, 研究方向: 光纤陀螺及器件技术、光纤气体传感技术、光纤光栅传感技术, flyang@cumtb.edu.cn)