

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.03.002

一种高灵敏电阻式柔性压力传感器研制及应用

滕飞¹, 刘平², 郭欣欣¹, 葛春雨¹, 刘健¹, 黄厚柱¹

(1. 国网安徽省电力有限公司 滁州供电公司, 安徽 滁州 239000; 2. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:针对智能机器人抓取物体需要精准压力控制的需求,文章采用改性多壁碳纳米管(MWCNTs)、硅橡胶(silicone rubber, SR)材料,结合丝网印刷工艺,制备一种具有双层裂纹结构的高灵敏电阻式柔性压力传感器。首先介绍该传感器制作流程,并表征改性碳纳米管的化学特性;然后分析并优化传感器上、下层导电填料的配比及丝网印刷工艺参数,测试传感器静态和动态特性;最后将传感器应用于机器人智能抓取。结果表明,文章所研制的基于双层裂纹结构的柔性压力传感器具有超高灵敏度(应变系数GF约为2451)和快速响应时间(42 ms)。将该传感器安装到机械夹爪上,通过微控制单元(microcontroller unit, MCU)芯片、模数转换芯片、分压电路以及LabVIEW上位机可以实现对机械夹爪抓取过程中压力的实时检测,为智能机器人实现精准抓取提供了一种新方案。

关键词:应变传感器;电阻式;裂纹;微结构;高灵敏

中图分类号:TP212.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)03-0297-06

Development and application of an ultra-sensitive resistive flexible strain sensor

TENG Fei¹, LIU Ping², GUO Xinxin¹, GE Chunyu¹, LIU Jian¹, HUANG Houzhu¹

(1. Chuzhou Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Chuzhou 239000, China; 2. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: In response to the requirement of precise pressure control of the grasping process of intelligent robots, this paper adopted modified multi-walled carbon nanotubes(MWCNTs) and silicone rubber(SR) as materials, combined with the screen-printing process, to prepare an ultra-sensitive resistive flexible strain sensor with a double-layer crack structure. The fabrication process of the sensor was firstly described, and the chemical properties of the modified carbon nanotubes were characterized. The ratio of conductive fillers of the upper and lower layers of the sensor and the screen-printing process parameters were analyzed and optimized, and the static and dynamic characteristics of the sensor were tested. Finally, the sensor was applied to intelligent robot grasping control. The results show that the flexible strain sensor based on the double-layer crack structure fabricated by the above process has ultra-high sensitivity(GF is about 2451) and fast response time(42 ms). The sensor was installed on the mechanical gripper, and microcontroller unit(MCU) chip, A/D conversion chip, voltage divider circuit and LabVIEW upper computer were used to realize the real-time detection of the pressure in the grasping process of the mechanical gripper, which provides a new solution for the precise grasping of intelligent robots.

Key words: strain sensor; resistive; crack; microstructure; high sensitivity

近年来,柔性压力传感器因其良好的柔韧性、舒适性及生物相容性在智能机器人^[1-2]、可穿戴设

备^[3-4]等领域中得到广泛应用。柔性压力传感器按其工作原理可分为电阻式^[5-6]、电容式^[7-8]、压电

收稿日期:2022-11-08;修回日期:2022-12-05

基金项目:浙江省“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C03052);国网安徽省电力有限公司滁州供电公司科技资助项目(B312M023000R)

作者简介:滕飞(1979—),男,安徽滁州人,国网安徽省电力有限公司高级工程师;

刘平(1983—),男,湖南娄底人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: liuping@hfut.edu.cn.

式^[9-10]等多种类型。其中电阻式柔性压力传感器因制备方式简便、信号采集简单以及响应时间快速等特点,在机器人抓取方面受到广泛关注。

灵敏度是传感器的重要指标之一,而在传感器中引入微结构是提高灵敏度最有效的方法。文献[11]以石墨烯纳米板和硅橡胶(silicone rubber, SR)为基础,设计了一种具有截断椎体结构的高灵敏柔性压力传感器,其在 15%应变时的应变系数(gauge factor, GF)达到 150;文献[12]以热塑性聚氨酯为基底,碳纳米管和石墨烯为导电填料,通过湿法纺丝工艺制备出一种具有多孔结构的柔性电阻式纤维传感器,其 GF 在 70%~150%应变下达到 326.6。上述文献设计的微结构为三维微结构,虽然提升了传感器的灵敏度,但是制作工艺复杂,因此更多研究者致力于开发出简单有效的二维微结构^[13-18]。文献[19]借助热响应聚苯乙烯(PS)收缩膜制备了皱纹结构的应变传感器,在 84%应变下得到大于 1 000 的 GF;文献[20]基于金(Au)与聚二甲基硅氧烷制作了可控裂纹密度的超灵敏应变传感器,可以在小于 2%的应变下达到超 10 000 的 GF。可见,二维微结构中,裂纹结构对灵敏度的提升效果较好,但是单应变层裂纹结构的应变范围过小,难以在实际应用中保持较宽的工作应变范围,因此在维持裂纹结构优异灵敏度的同时提升传感器的工作应变范围是一个关键问题。

本文使用 3-氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)改性多壁碳纳米管(MWCNTs),并与不同比例的 SR 混合得到具有分散良好的 KH550-MWCNTs/SR 导电油墨,同时通过具有高可控性的丝网印刷工艺制作出双应变层传感器,并通过预拉伸的方式使传感器的上层产生裂纹。制备的传感器具有超高灵敏度(GF 约为 2 451)、快速响应(42 ms)和优异重复性(1 000 次循环)等优点。将该传感器封装到 3D 打印的手指末节并安装到机械夹爪上,能够实现机械爪抓取过程中压力的实时精准测量,为智能机器人实现精准抓取过程中的压力控制提供了一种新思路。

1 电阻式传感单元研制

1.1 传感器制备流程

电阻式压力传感器的制备流程如图 1 所示。将 1 g MWCNTs 和 5 g KH550 依次加入 50 mL 去离子水中并超声分散 30 min,然后将溶液转移到三颈烧瓶中,在 88 °C 下恒温加热搅拌 24 h 后

烘干得到 KH550-MWCNTs。将 0.3 g/0.1 g KH550-MWCNTs 和 0.7 g/0.9 g SR 在二甲苯分散液中混合,分别得到上、下层印刷油墨;先将下层油墨印刷到聚酰亚胺(PI)膜上,室温固化 4 h,再将上层油墨印刷到固化好的下层上,室温固化 4 h,得到双应变层结构传感器;对双应变层传感器重复进行 2 次 30%应变的预拉伸,使传感器上层产生裂纹。通过丝网印刷得到的传感器尺寸为 5 mm×20 mm,厚度为 300 μm。在传感器两端粘贴导电织物作为电极,使用硅橡胶进行封装,得到电阻式柔性压力传感器。

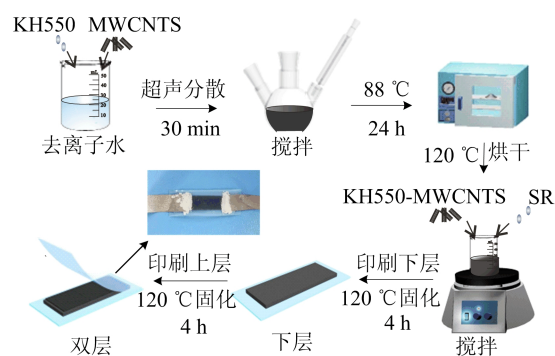


图 1 传感器制备流程

1.2 材料化学特性表征

本文选用具有较高纵横比的 MWCNTs 作为导电填料,使用 KH550 对 MWCNTs 进行改性,以 SR 为基底制作复合油墨。KH550 对 MWCNTs 的改性降低了填料间的范德华力作用,减小了 MWCNTs 之间的团聚,且 KH550 与 SR 固化剂中的偶联剂具有相同的化学结构,改性后接枝的 KH550 可以与 SR 相互作用,提高填料在基底中的分散性。

为了验证 KH550 对 MWCNTs 的改性,分别取 MWCNTs 与 KH550-MWCNTs 进行化学特性表征。MWCNTs 与 KH550-MWCNTs 的傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)图如图 2a 所示。

从图 2a 可以看出:对于 MWCNTs,表面 O—H 的拉伸振动吸收峰在 3 436 cm^{-1} 处, C—O—H 的内、外弯曲振动吸收峰分别在 1 384 cm^{-1} 处和 673 cm^{-1} 处, C—OH 的拉伸振动吸收峰在 985 cm^{-1} 处, MWCNTs 中碳环的骨架振动吸收峰在 1 645 cm^{-1} 处;对于 KH550-MWCNTs,在 2 921 cm^{-1} 和 2 867 cm^{-1} 处分别是 C—H 的反对称和对称拉伸振动吸收峰,出现在 1 117 cm^{-1} 和 1 034 cm^{-1} 处的新峰对应于 C—O—Si 和 Si—

O—Si 的拉伸振动吸收峰,上述新出现的峰表明 KH550 已经接枝到 MWCNTs 上。

MWCNTs、KH550 和 KH550-MWCNTs 的热重分析 (thermogravimetric analysis, TGA) 如图 2b 所示。

由图 2b 可知,在 800 °C 时, MWCNTs 和 KH550 的质量损失分别为 98.0% 和 60.1%, 而 KH550-MWCNTs 的质量损失为 84.7%, 因此 800 °C 时 KH550-MWCNTs 中的残余物主要来自接枝的 KH550, 说明 KH550 成功接枝到 MWCNTs 上, 计算得到 KH550 的接枝率为 35.1%。

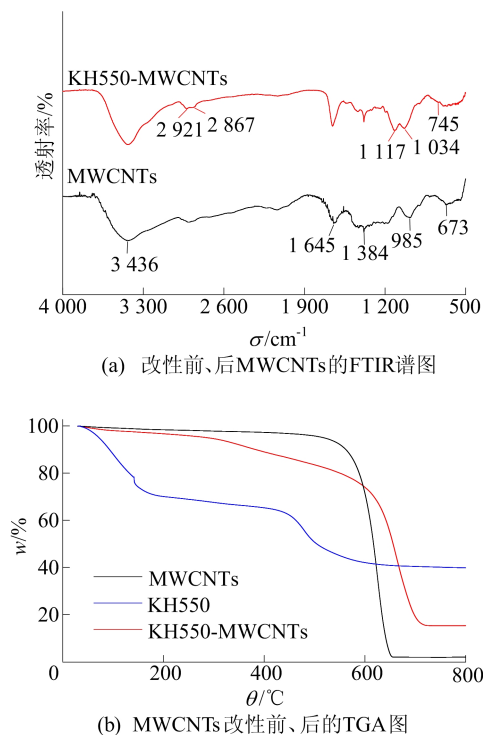


图 2 复合材料化学特性表征

2 传感器结构设计及特性分析

2.1 传感器结构设计及分析

引入裂纹结构可以极大提升传感器的灵敏度,但是具有单应变层裂纹结构传感器的传感应变范围过低,难以在实际应用中维持传感能力。为了提高传感器的工作应变范围,本文受裂纹结构的启发,设计一种具有裂纹的双应变层结构,使得传感器不仅可以保持单层裂纹结构的高灵敏度,同时还具有较宽的工作应变范围。

单层无裂纹传感器的传感机理如图 3a 所示。单层无裂纹传感器的 GF 较低,在拉伸时电流只会因传感器内导电填料的分布而变化,根据渗流

理论,它可以控制渗流区导电填料的体积分数,提高传感器的 GF。

单层裂纹传感器的传感机理如图 3b 所示。当传感器仅被拉伸到约 5% 应变时,电阻就会变为无穷大,因此传感器具有高 GF 但工作应变范围较窄。

双层裂纹传感器的传感机理如图 3c 所示。当传感器未被拉伸时,由于下层的电阻率比上层大得多,电流主要通过低电阻的上层流动;当传感器被拉伸,电流传导至裂纹位置时会流向下层,然后在通过裂纹位置后返回上层,在此过程中,裂纹扩展增加了电阻并保持了导电路径,因此具有较高的 GF 和工作应变范围。

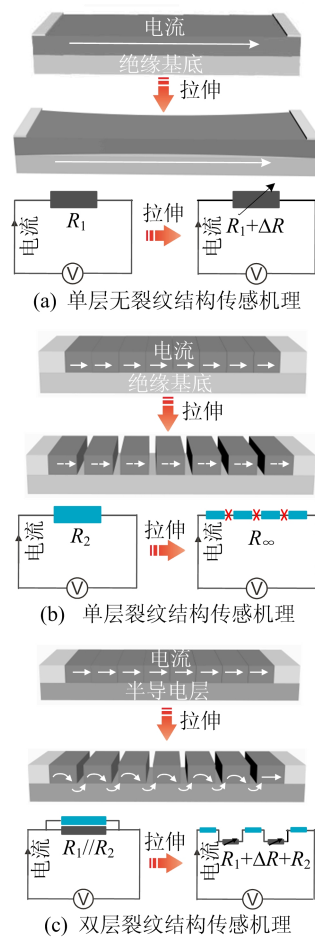


图 3 不同结构传感器的传感机理

本文利用 COMSOL Multiphysics 软件建立具有裂纹的双应变层结构传感器模型,并进行相关的力学和电学模拟,结果如图 4 所示。其中:模拟模型的上层厚度设置为 100 μm,下层厚度设置为 400 μm;同时根据实际测试结果,上层材料的电导率设置为 0.95×10^{-5} S/m,下层材料的电导率设为 0.47×10^{-7} S/m。

从力学模拟结果来看,应力主要集中在裂纹结构位置,因此传感器在拉伸时,裂纹位置能够充分展开。根据电气模拟结果,传感器被拉伸后,电流从上层流动到裂纹处时向下层传递,在通过裂纹位置后回到上层继续传输,这与图 3c 中所述的双层裂纹结构机理推理一致,说明具有双层裂纹结构的传感器在拉伸后既能得到足够的电阻变化获得高 GF,也能在较大拉伸应变下保持传感能力。

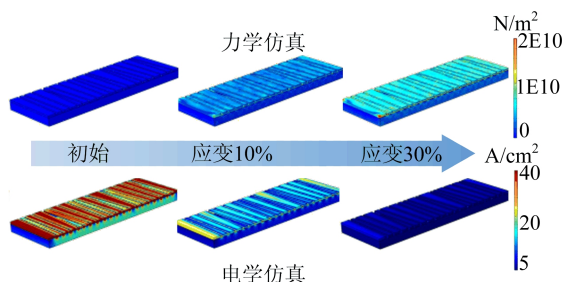


图 4 双层裂纹结构的力学与电学仿真

2.2 传感器静态特性测试

本文使用 ZQ-990B 拉压力机和 TH2515 电阻仪对应变传感器进行相关的静态和动态特性测试。传感器在直流电下的 $I-V$ 特性曲线如图 5a 所示,可以看出,不同应变下的电流随电压均呈线

性变化,表明传感器具有良好的欧姆特性。

3 个不同批次以相同流程、相同填料比例制备出的传感器相对电阻变化与应变之间的关系如图 5b 所示,可以看出,不同传感器的相对电阻变化随应变的变化差距较小,并且每个传感器都具有高 GF(传感器 1 在 0~30% 应变范围下 GF 为 2 451),这说明使用丝网印刷工艺制作出的传感器具有良好的 consistency。

传感器的迟滞回差如图 5c 所示,可以看出,传感器的迟滞小于 8%,并且在重复循环拉伸 100 次后传感器的迟滞与第 1 次拉伸时差距不大,说明传感器具有良好的稳定性。

在 1%~30% 的应变下重复拉伸 5 次的相对电阻变化以及相应的应力如图 5d 所示,可以看出该传感器具有 0.01 N 的高分辨率,并能在不同应变下均保持良好的稳定性。

加、卸载曲线如图 5e 所示,可以看出该传感器的加载时间为 42 ms,卸载时间为 48 ms,传感器具有快速的响应时间。

传感器在 0~30% 的应变下反复拉伸 1 000 次的相对电阻变化如图 5f 所示,可以看出该传感器有良好的重复性。

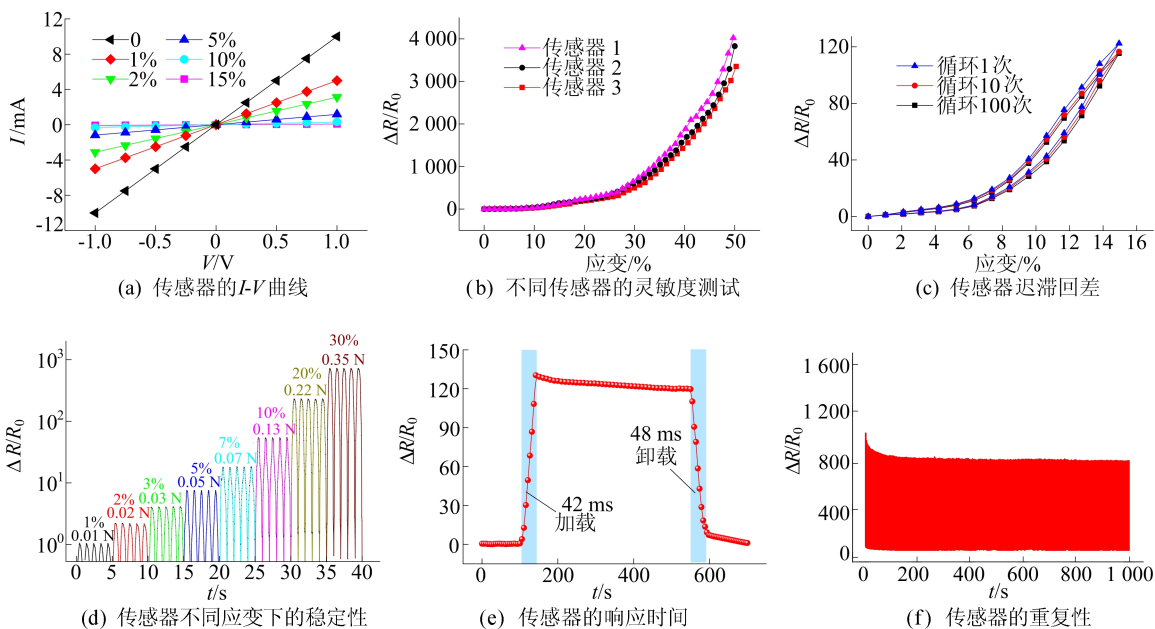


图 5 传感器的静态及动态特性测试

3 传感器应用

将具有双层裂纹结构的电阻式柔性压力传感器安装到 3D 打印的手指关节的机械夹爪上,测量夹爪抓取物体的压力。机械夹爪压力测量系统

如图 6 所示。

为了使夹取时的压力能够让传感器的裂纹充分展开,本文设计了一种密闭气囊,模型如图 6a 所示。在夹取时,压力作用在气囊的受力面,受到压力作用的气囊会使另一面发生膨胀,将传感器

装配到气囊的膨胀面,在气囊受力时其膨胀面能够带动传感器发生弯曲级拉伸,如图6b所示。传感器的应变气囊所受压力具有对应关系,通过测量传感器的相对电阻变化获取应变,并通过应变与压力的对应关系最终得到夹爪的压力大小。

压力测量系统包括MCU芯片、模数转换芯片、分压电路以及LabVIEW上位机,整套装置如图6c所示。通过机械臂驱动的机械夹爪夹取网球,并不断改变夹取网球时夹爪间的距离。

压力测量系统所获得的压力数据如图6d所示。从图6d可以看出:随着夹爪距离不断变小,气囊压缩程度不断增加,测量的数据中夹爪施加的压力不断变大;当夹爪距离增大时,压力则不断减小。这说明本文制作的传感器能够良好地测量出夹爪施加的压力,在智能机器人领域具有良好的应用前景。

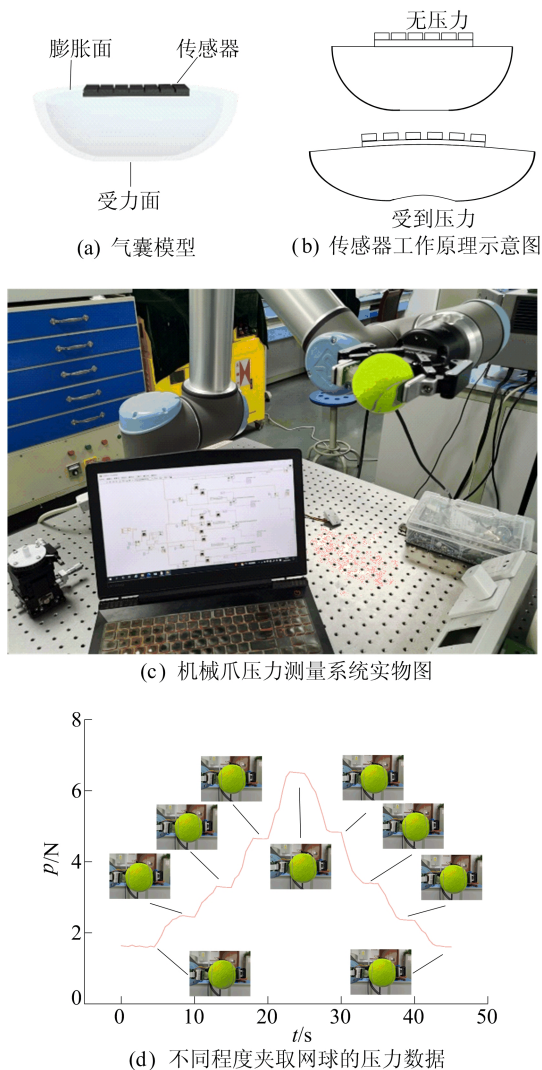


图6 机械夹爪压力测量系统

4 结 论

本文使用KH550改性MWCNTs与SR得到的复合材料,通过丝网印刷工艺制备了一种具有双层裂纹结构的高灵敏电阻式柔性压力传感器。首先对复合材料进行化学分析,表征了MWCNTs的成功改性;分析了不同结构的传感机理并进行仿真,得到双层裂纹结构的工作原理;测量并分析传感器的动、静态特性,结果证明了制备的传感器具有高达2451的GF(0~30%应变)、小于8%的迟滞、42ms的快速响应以及大于1000次的良好重复性。

将该传感器封装到机械夹爪上,通过压力测量系统可以得到夹爪在夹取过程中实时的电阻大小,从而获取实时压力。本文传感器能够用于机器人夹取过程中压力的实时精准控制,为智能机器人实现精准抓取提供了一种新方案。

[参 考 文 献]

- [1] CHEN T, SHI Q, ZHU M, et al. Triboelectric self-powered wearable flexible patch as 3D motion control interface for robotic manipulator [J]. ACS Nano, 2018, 12 (11): 11561-11571.
- [2] ZHANG S, WANG S, ZHENG Y, et al. Coaxial 3D-printed and kirigami-inspired deployable wearable electronics for complex body surfaces [J]. Composites Science and Technology, 2021, 216: 109041.
- [3] KIM S, OH J, JEONG D, et al. Direct wiring of eutectic gallium-indium to a metal electrode for soft sensor systems [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2019, 11 (22): 20557-20565.
- [4] CHEN J, ZHU G, WANG F, et al. Design of flexible strain sensor with both ultralow detection limit and wide sensing range via the multiple sensing mechanisms [J]. Composites Science and Technology, 2021, 213: 108932.
- [5] ZHOU Y, ZHAN P, REN M, et al. Significant stretchability enhancement of a crack-based strain sensor combined with high sensitivity and superior durability for motion monitoring [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2019, 11 (7): 7405-7414.
- [6] WANG B, THUKRAL A, XIE Z, et al. Flexible and stretchable metal oxide nanofiber networks for multimodal and monolithically integrated wearable electronics [J]. Nature Communication, 2020, 11 (1): 2405.
- [7] MISHRA R B, EL-ATAB N, HUSSAIN A M, et al. Recent progress on flexible capacitive pressure sensors: from design and materials to applications [J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6 (4): 2001023.

(下转第342页)

- [3] PÉREZ I, VALLEJO E, MORETO M. BST: a bookSim-based toolset to simulate NoCs with single-and multi-hop bypass[C]//2020 IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS). [S. l.]: IEEE, 2020: 47-57.
- [4] RAO A, KERNS K. An artificial case to evaluate the scalability bottleneck of a simulator[C]//2022 IEEE 16th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT). [S. l.]: IEEE, 2022: 1-3.
- [5] WAIDYSOORIYA H M, OHMA Y, HARIYAMA M. FPGA-based prototype of a quantum annealing simulator for sparse ising model[C]//2022 IEEE 15th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc). [S. l.]: IEEE, 2022: 195-199.
- [6] COMPTON K, HAUCK S. Reconfigurable computing: a survey of systems and software[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2002, 34(2): 171-210.
- [7] MINAMI D, NAKAMOTO Y, KOGA Y. Simulation environment of embedded control system for multi-core processor with faster CPU simulator [C]//2020 International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics). [S. l.]: IEEE, 2020: 405-410.
- [8] LEFOUL J B, DUGO A T A, MAGALHAES F. Simulator-based framework towards improved cache predictability for multi-core avionic systems [C]//2020 Spring Simulation Conference (SpringSim). [S. l.]: IEEE, 2020: 1-12.
- [9] NAKAMOTO Y, MINAMI D, SHIBA S. A simulation environment of embedded control systems for multi-core processors (WiP report) [C]//2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). [S. l.]: IEEE, 2018: 178-182.
- [10] 刘家华, 陈靖宇. 多核并行脉冲神经网络模拟器的设计[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(22): 244-250.
- [11] 牛云鹏, 张多利, 唐旭, 等. 一种可重构多核系统的仿真加速方案[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(2): 19-24.
- [12] 姚宇, 孙晓霞, 张多利, 等. 一种系统级异构多核模拟器的实现[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(7): 921-927.
- [13] 王正茂. 面向高密度计算应用的异构多核处理器优化设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 301 页)

- [8] CHHETRY A, SHARMA S, YOON H, et al. Enhanced sensitivity of capacitive pressure and strain sensor based on $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ wrapped hybrid sponge for wearable applications [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(31): 1910020.
- [9] SU Y, LI W, CHENG X, et al. High-performance piezoelectric composites via beta phase programming [J]. Nature Communication, 2022, 13(1): 4867.
- [10] KHAN H, MAHMOOD N, ZAVABETI A, et al. Liquid metal-based synthesis of high performance monolayer SnS piezoelectric nanogenerators [J]. Nature Communication, 2020, 11(1): 3449.
- [11] WANG Y, CHEN Z, MEI D, et al. Highly sensitive and flexible tactile sensor with truncated pyramid-shaped porous graphene/silicone rubber composites for human motion detection [J]. Composites Science and Technology, 2022, 217: 109078.
- [12] SHENG N, JI P, ZHANG M, et al. High sensitivity polyurethane-based fiber strain sensor with porous structure via incorporation of bacterial cellulose nanofibers [J]. Advanced Electronic Materials, 2021, 7(4): 2001235.
- [13] WU C, WANG H, LI Y, et al. Sensitivity improvement of stretchable strain sensors by the internal and external structural designs for strain redistribution [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2020, 12(45): 50803-50811.
- [14] ZHAO W, LIU Y, ZHAO C, et al. A fast self-healable and stretchable conductor based on hierarchical wrinkled structure for flexible electronics [J]. Composites Science and Technology, 2021, 211: 108834.
- [15] HAN Z, LIU L, ZHANG J, et al. High-performance flexible strain sensor with bio-inspired crack arrays [J]. Nanoscale, 2018, 10(32): 15178-15186.
- [16] ZHANG Q, SHEN L, LIU P, et al. Highly sensitive resistance-type flexible pressure sensor for cuffless blood-pressure monitoring by using neural network techniques [J]. Composites Part B (Engineering), 2021, 226: 109365.
- [17] XIA P, LIU P, WU S, et al. Highly stretchable and sensitive flexible resistive strain sensor based on waterborne polyurethane polymer for wearable electronics [J]. Composites Science and Technology, 2022, 221: 109355.
- [18] WU S, LIU P, TONG W, et al. An ultra-sensitive core-sheath fiber strain sensor based on double strain layered structure with cracks and modified MWCNTs/silicone rubber for wearable medical electronics [J]. Composites Science and Technology, 2023, 231: 109816.
- [19] YANG H, LI J, XIAO X, et al. Topographic design in wearable MXene sensors with in-sensor machine learning for full-body avatar reconstruction [J]. Nature Communication, 2022, 13(1): 5311.
- [20] ZHU J, WU X, JAN J, et al. Tuning strain sensor performance via programmed thin-film crack evolution [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2021, 13(32): 38105-38113.

(责任编辑 胡亚敏)