

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306687

# 柔性混合电路的柔性优化方法研究及应用\*

陈兆润 黄显

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300000)

**摘要:** 柔性混合电路(FHC)是将刚性电子元件集成到有印刷电子的柔性基板上形成的一种复合电路。为了满足日趋复杂的应用场景,FHC上需要集成更多刚性功能电子元件,而这会导致其柔性急剧下降。为了缓解FHC在高集成度与高柔性之间的矛盾,本文从结构改进的角度出发,借助镂空蛇形导线岛-桥结构(HS-SWI-BS)对FHC进行柔性优化设计。通过三维有限元仿真实验开展了对该方法在有效性和可行性方面的验证,其结果表明,镂空蛇形导线岛-桥结构能够实现FHC柔性的提升,且对模型的柔性的提升幅度可达260%。在柔性经皮电刺激电路上的应用与测试则证明了该方法具有良好的实用性。研究对提高FHC的柔性具有参考作用。

**关键词:** 柔性混合电路;柔性优化方法;镂空结构;蛇形导线岛-桥结构;有限元仿真;柔性经皮电刺激电路

**中图分类号:** TH789;R318.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 310.61

## Investigation of the optimization approach to improve flexibility of flexible hybrid circuit and its application

Chen Zhaorun Huang Xian

(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** Flexible hybrid circuit (FHC) is a composite circuit formed by integrating rigid electronic components onto a flexible substrate with printed electronics. In order to meet the increasingly complex application scenarios, FHC needs to integrate more rigid functional electronic components, which will lead to a sharp decrease in its flexibility. In order to alleviate the contradiction between high integration and high flexibility of FHC, this article starts from the perspective of structural improvement, which uses a hollow snake-shaped wire island-bridge structure (HS-SWI-BS) to carry out the optimization approach of FHC. The effectiveness and feasibility of this method are verified by three-dimensional finite element simulation experiments. The results show that the hollow snake-shaped wire island-bridge structure can improve the flexibility of FHC, and the increase of the flexibility of the model can reach 260%. The application and testing of flexible percutaneous electrical stimulation circuit have proved that this method has good practicality. The research has a reference role in improving the flexibility of FHC.

**Keywords:** flexible hybrid circuit; optimization approach to improve flexibility; hollowed-out structure; snake-shaped wire island-bridge structure; finite element simulation; flexible percutaneous electrical stimulation circuit

## 0 引言

柔性混合电路(flexible hybrid circuit, FHC)是将刚性电子元件集成到有印刷电子的柔性基板上形成的一种复合电路<sup>[1-3]</sup>,在生物电监测与刺激、光学监测与处理、声学模拟与监测以及仿生触摸技术等生物医学领域<sup>[4-9]</sup>具

有极大的潜力,它的出现一定程度上解决了柔性电子性能低下的局限性<sup>[10-11]</sup>。然而,随着柔性电子产品应用场景的日趋复杂,功能简单的FHC已经满足不了实际需求<sup>[12-13]</sup>,多功能与高集成度的FHC亟待研究与开发。功能的增多和集成度的提高意味着柔性电路需要集成更多刚性元件,这会导致电路的柔性急剧下降,极端情况下甚至会导致电路的柔性完全丧失。因此,缓解柔性混合电

收稿日期:2023-07-03 Received Date: 2023-07-03

\* 基金项目:北京市自然科学基金(Z220015)、浙江省重点研发计划项目(2021C05005, 2021C05007-2)资助

路在高柔性与其高集成度之间的矛盾对于其未来的发展至关重要。

为了实现这一目标,有些研究已经做出。Gupta 等<sup>[14]</sup>提出了一种最大限度减小系统柔性损失的刚性元件放置方法,并且将柔性基板的挠度作为柔性的量化标准。Bhat 等<sup>[1]</sup>提出了一种柔性混合系统的多目标优化设计算法,该算法利用组件库(包括刚性组件和柔性组件)来实现给定的应用程序,以优化每次操作的柔性、面积和功耗,可用于在给定的库中找到可能的最佳设计以及探索最能优化组件库的柔性组件的属性。以上研究分别是从小电路组件的选取和放置两方面入手实现了 FHC 的柔性提升,而从结构设计方面入手去提升 FHC 柔性的研究至今还未出现。

本文立足改进电路结构以提升 FHC 的柔性,将镂空蛇形导线岛-桥结构(hollow snake-shaped wire island-bridge structure, HS-SWI-BS)应用到电路改进中,通过有限元仿真验证了其可行性与有效性。实际应用则展示了该柔性优化方法的可靠性和实用性,真正实现了不改变 FHC 性能的同时还能提升其柔性。

## 1 镂空蛇形导线岛-桥结构

在柔性电子领域,岛-桥结构大多数情况下是被应用在可拉伸电子器件中,通过构成非共面网格结构<sup>[15]</sup>,使其既具有极大的可拉伸性,又保持了良好的电子性能。这种设计是将半导体元器件(例如硅基元器件)放置到“岛状”结构上,“岛”与“岛”之间通过“桥状”导线连接。目前,常用的岛-桥结构有两种:一种是直导线岛-桥结构,经过预拉伸后,它能使电子器件实现 50% 左右延展性提升<sup>[16-18]</sup>,但它需要较大的岛间间距,这会导致整个器件中功能组件的覆盖率下降;另一种是无需预拉伸的蛇形导线岛-桥结构,在相同的岛间距内,蛇形导线的长度比直导线更大,所以其对器件延展性提升的帮助会更大。

本文选择了用延展性更出色的蛇形导线岛-桥结构来改进 FHC 的结构。考虑到电路布线的复杂性,很难做到整个电路都采用蛇形导线来实现“岛”与“岛”之间的互联,因此本文改进了可延展器件中整体互联都采用蛇形导线的结构,将蛇形导线作为岛与柔性基板的局部互联媒介,形成了一种局部的镂空蛇形导线岛-桥结构,如图 1(a)所示。在电路发生弯折时,如图 1(b)所示,通过蛇形导线自身的变形以及其对岛结构产生的牵引,使镂空的岛结构发生三维空间内的凸起或者凹陷(形变方向取决于电路的受力方向),从而释放岛结构周围由于刚性元件的存在产生的应力,使原本不会发生弯折的区域实现等效弯折,进而达到提高整个柔性电路的柔性的目的。

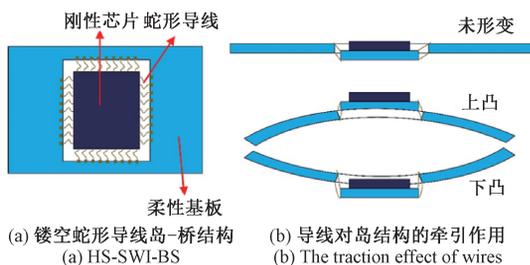


图 1 镂空蛇形导线岛-桥结构及其受力形变示意图

Fig. 1 Schematic diagram of HS-SWI-BS and its force deformation

## 2 三维有限元仿真实验

### 2.1 建立有限元仿真模型

柔性基板的三维模型的建立借助了 3D 造型软件 Rhino,后将基板模型导入到有限元仿真软件 Comsol 中并添加刚性元件的模型。图 2(a)是含有 HS-SWI-BS 的三维模型,其中基板的大小为  $15 \times 15 \times 0.13 \text{ mm}^3$ ,由蛇形导线牵引的“岛”位于模型中间,其上放置了一块大小为  $3.65 \times 3.65 \times 0.2 \text{ mm}^3$  的刚性模块,用于模拟刚性元件,同时将两者设置为联合体。为了贴近实际应用,除了模型尺寸的选择与实际接近外,基板材料选择的是柔性电路常用的聚酰亚胺,其杨氏模量为 3.1 Gpa,泊松比为 0.34;刚性元件的材料选择的是电子元器件封装常用的陶瓷材料,杨氏模量为 76.5 Gpa,泊松比为 0.32。为了更好地凸显柔性优化设计的有效性,还建立了用于对比的三维模型,如图 2(b)所示。它除了不含 HS-SWI-BS 外,其他参数都与含 HS-SWI-BS 的三维模型保持一致。

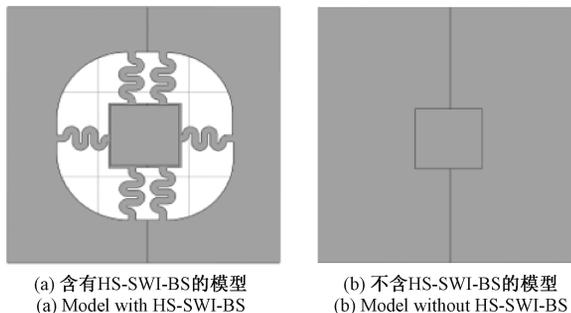


图 2 有限元模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dimensional finite element model

### 2.2 仿真结果分析

#### 1) 同等边界载荷下的仿真

该有限元仿真实验模拟了柔性电路受力时弯曲工作的场景,边界载荷与固定约束的施加位置如图 3 所示,其中边界载荷的大小为 0.1 N。

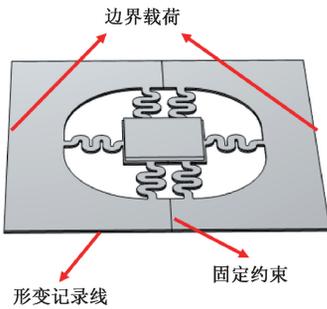


图 3 仿真参数的设定

Fig. 3 Setting of simulation parameters

分别对含有 HS-SWI-BS 的模型和不含 HS-SWI-BS 的模型在 0.1 N 的边界载荷下的稳定状态进行了有限元仿真,并且将模型在各个方向的最大挠度之和量化为柔性的衡量标准。

对比图 4(a)和(d)可以很看出,含有 HS-SWI-BS 的模型受力弯曲时的挠度显然更大。为了看清两者之间的具体差别,分别计算了两个模型在图 3 中形变记录直线上的形变大小,计算结果如图 4(b)和(d)所示。其中,含有 HS-SWI-BS 模型的左右两侧的最大形变之和大约为 3.5 mm,而不含 HS-SWI-BS 的模型在左右两侧的最大形变之和仅仅约为 0.97 mm,前者是后者的 3.6 倍,优化后的柔性提升幅度高达 260%。显然,镂空蛇形导线岛-桥结构对电路的柔性提升效果很显著。

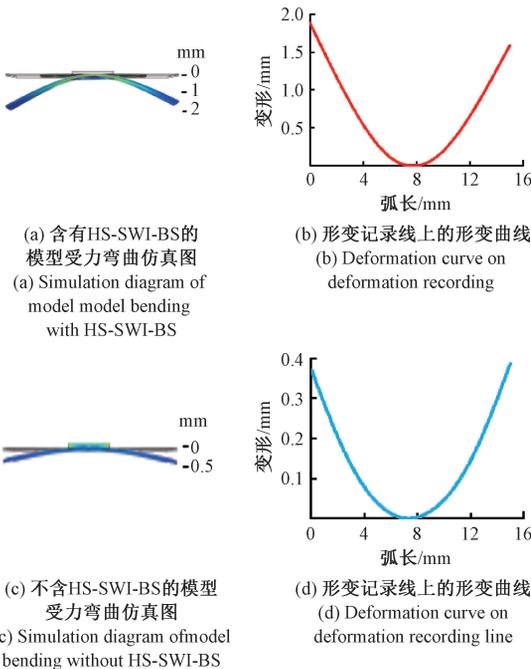


图 4 两个模型在同等边界载荷下的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of two models under the same boundary load

### 2) 同等位移下的仿真

为了进一步说明 HS-SWI-BS 在提升电路柔性以及保护电子元器件方面的作用,本文还对图 2(a)和(b)的两个模型进行了在左右两侧同时施加 0.5 mm 固定位移的三维有限元仿真实验,且分别记录了两个模型在图 5(a)和(d)中标注的 6 条线上的应变情况。

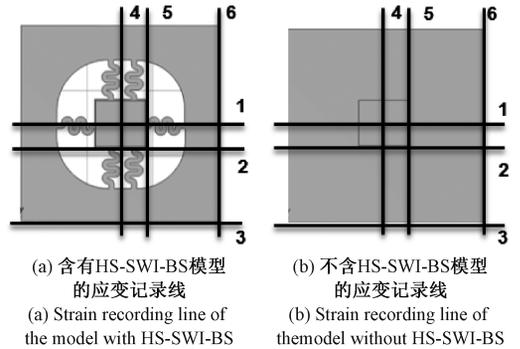


图 5 两个模型的应变记录线

Fig. 5 Strain recording lines of two models

在同等位移条件下记录了两个模型在图 5(a)和(b)中对位置的应变变化,有限元仿真的结果如图 6 所示。

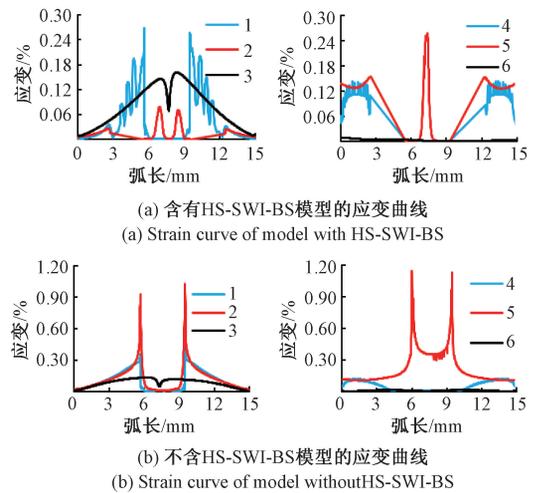


图 6 两个模型的应变曲线

Fig. 6 Strain curves of two models

## 3 应用与测试

为了证明 HS-SWI-BS 在改善 FHC 柔性上的可靠性和实用性,本文将其应用在了一个经皮电刺激电路的柔性优化设计上,如图 7 所示。

### 3.1 电路的柔性优化设计

如图 8(a)所示,以电路的功能模块为单位,对其上的电子元件进行了刚性域的划分。以刚性域为单位,对

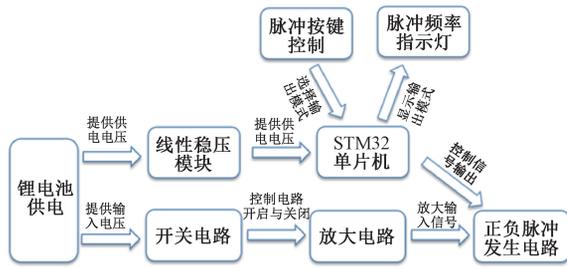


图 7 电路框图

Fig. 7 The framework of the circuit

电路进行了 HS-SWI-BS 设计的改进,其中每个刚性域周围的蛇形导线的数量是根据每个刚性域向外连接的走线数量以及结构的对称性确定的。图 8(b)展示了其中一个刚性域的蛇形导线设计,该刚性域与外界有 4 条互联导线,因此在其四周间隔 90° 设计了 4 条蛇形导线。图 8(c)展示了每条蛇形导线的几何构型,其中两条直线的间距  $l_1$  为 10 mil,长度  $l_2$  为 10 mil,导线的宽度  $\omega$  有两种,分别为 10 和 4 mil,其中 10 mil 为电源线的宽度。图 5(d)展示了电路所含的所有刚性域的 HS-SWI-BS 设计以及电路的整体形状示意图,其中,优化后的电路的尺寸为  $48.6 \times 52 \times 0.13 \text{ mm}^3$ 。

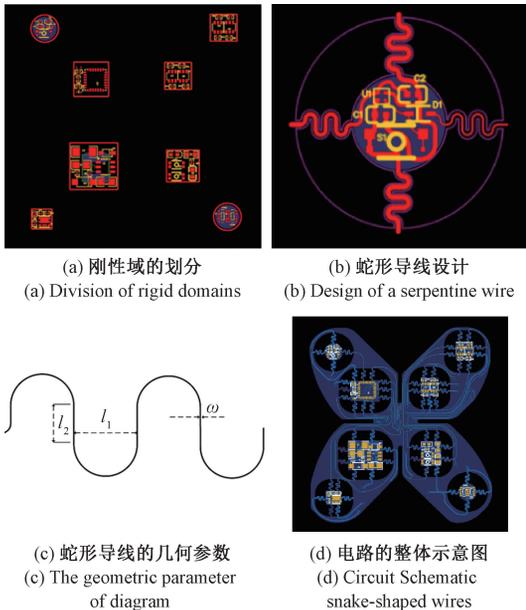


图 8 电路的柔性优化设计

Fig. 8 Flexible optimization design of the circuit

### 3.2 电路的机械性能测试

为了验证该设计方案的可靠性,接下来对经过柔性优化设计后的电路进行了机械稳定性与机械耐久性的测试。为了避免重复以及更好地展示不同状态下的信号差异,将选取 60 Hz 频率下 2 ms 脉宽的正脉冲信号为例进

行展示。

图 9(a)展示了平放状态下电路的输出信号,信号幅值基本达到了设计要求。图 9(b)展示的是电路在曲率半径最大为 6.8 cm 的弯曲状态下输出信号。与图 9(a)对比可以看出,脉冲波形的顶部脉宽受到了压迫,但其底部脉宽基本与原来一致;但信号的幅值与频率并未发生变化,因此信号几乎不受影响,说明该电路在人体绝大多数部位都可适用。图 9(c)则展示了电路经过 1 500 次弯折疲劳测试后的输出信号,可以发现,信号几乎没有变化,经过 1 500 次疲劳弯折测试的后的电路依然能够稳定工作。上述实验结果很好地证明了经过柔性优化设计后的电路具有良好的机械稳定性和工作耐久性。

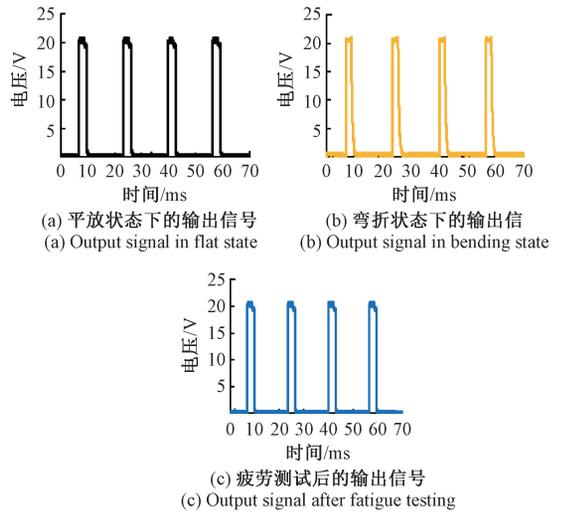


图 9 不同状态下的输出信号展示

Fig. 9 Display of output signals in different states

### 3.3 电路的在体测试

为了完善研究过程,并证明改进后的电路依然能够实现诱导肌电信号的功能,本文还进行了在体测试。载体实验的实验平台搭建如图 10 所示,选取 25 周岁以上的成年男性,将柔性经皮电刺激电路与肌电信号采集的电路分别放其手臂如图所示的位置。

在体实验分别采集了无电刺激诱导下的肌电信号和 60 Hz 频率、2 ms 脉宽的正脉冲信号的诱导下产生的肌电信号,并对采集到的信号进行了处理<sup>[19-20]</sup>。

对比图 11(a)、(b)和(c)、(d)可以看出,电路发出的电刺激诱导肌电信号发生了变化,而且从频谱图中能够明显读出 60 Hz 的脉冲电刺激。图 11(f)和(f)则展示了经过滤波后的、纯粹的电刺激诱导肌电信号,与图 11(a)和(b)比较可以看出,电路释放的电刺激信号诱导人体肌电信号发生了变化,证明了电路可以在人体上正常工作,从而证明了本文提出的柔性优化设计的可行性和实用性。

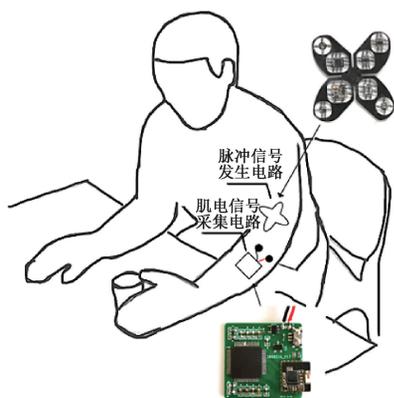


图 10 在体实验平台

Fig. 10 In vivo experimental platform

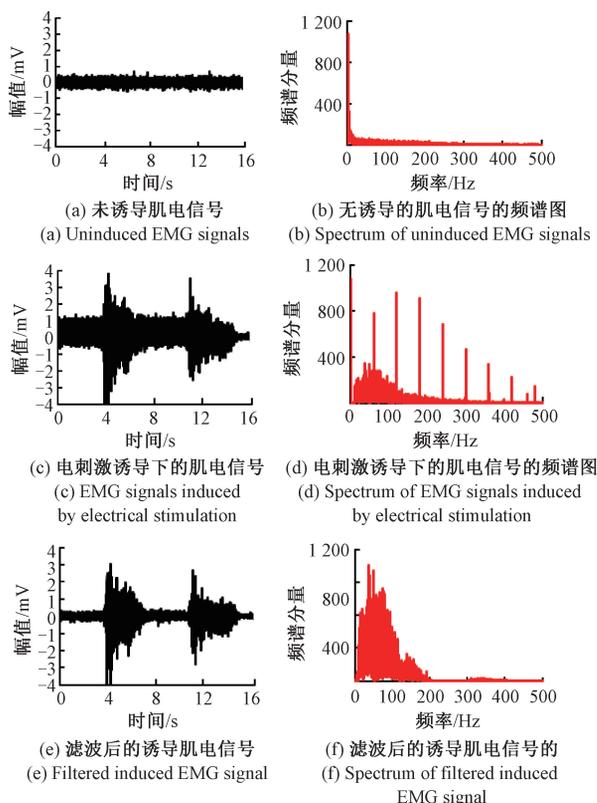


图 11 在体测试的结果展示

Fig. 11 Display of in vivo test results

## 4 结 论

本文提出了一种用于提升柔性混合电路柔性的优化设计方法。通过刚性域的划分以及镂空蛇形导线岛-桥结构的设计的应用,实现了提升 FHC 的柔性的目标。有限元仿真实验的结果表明,该结构可以实现 FHC260% 以上的柔性提升,能够满足大多数 FHC 柔性提升的需求。

机械性能测试和在经皮电刺激电路上的应用则展示了该柔性优化设计方法的实用性和可推广性,对后续柔性电路的柔性优化设计具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [ 1 ] BHAT G, GUPTA U, TRAN N, et al. Multi-objective design optimization for flexible hybrid electronics [ C ]. 35th IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), 2016: 1-8.
- [ 2 ] GUPTA U, PARK J, JOSHI H, et al. Flexibility-aware system-on-polymer (SoP): Concept to prototype [ J ]. IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems, 2017, 3(1): 36-49.
- [ 3 ] CUI Z. Flexible hybrid electronics: Manufacturing flexible electronics by printing technique [ J ]. Materials Review, 2020, 34(1A): 1009-1013.
- [ 4 ] FARM K, LITT B, TRACEY K J, et al. A jump-start for electroceuticals [ J ]. Nature, 2013, 496 ( 7444 ): 159-161.
- [ 5 ] KACHUEE M, KIANI M M, MOHAMMADZADE H, et al. Cuffless blood pressure estimation algorithms for continuous health-care monitoring [ J ]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2017, 64(4): 859-869.
- [ 6 ] LEE J H, CHO I J, KO K, et al. Flexible piezoelectric micromachined ultrasonic transducer (pMUT) for application in brain stimulation [ J ]. Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems, 2017, 23(7): 2321-2328.
- [ 7 ] LI Y Q, ZHU W B, YU X G, et al. Multifunctional wearable device based on flexible and conductive carbon sponge/polydimethylsiloxane composite [ J ]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(48): 33189-33196.
- [ 8 ] NORTON J J S, LEE D S, LEE J W, et al. Soft, curved electrode systems capable of integration on the auricle as a persistent brain-computer interface [ J ]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(13): 3920-3925.
- [ 9 ] XIAO L, CHEN Z, FENG C, et al. Flexible, stretchable, transparent carbon nanotube thin film loudspeakers [ J ]. Nano Letters, 2008, 8 ( 12 ): 4539-4545.
- [ 10 ] CHANEY R L, LEBER D E, HACKLER D R, et al. Advances in flexible hybrid electronics reliability [ C ]. IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices (WMED), 2017: 5-8.
- [ 11 ] TONG G, JIA Z, CHANG J, et al. Flexible hybrid electronics: Review and challenges [ C ]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems

- (ISCAS), 2018: 1-5.
- [12] HUANG T C, CHENG K T. Design for low power and reliable flexible electronics: Self-tunable cell-library design[J]. Journal of Display Technology, 2009, 5(4-6): 206-215.
- [13] NOH J, JUNG M, JUNG Y, et al. Key issues with printed flexible thin film transistors and their application in disposable RF sensors[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(4): 554-566.
- [14] GUPTA U, JAIN S, OGRAS U Y. Can systems extend to polymer? SoP architecture design and challenges[C]. IEEE International System on Chip Conference (SOCC), 2015: 203-208.
- [15] FU H R, XU S, XU R X, et al. Lateral buckling and mechanical stretchability of fractal interconnects partially bonded onto an elastomeric substrate [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(9): 1-5.
- [16] 吴沛. 柔性电子系统中岛-桥结构的力学行为分析与数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
WU P. Mechanical behavior analysis and numerical simulation of island-bridge structures flexible electronic systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [17] 付浩然. 可延展电子器件中蛇形导线岛桥结构的力学分析及优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
FU H R. Mechanical analysis and optimization of snake shaped wire island bridge structure in scalable electronic devices[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [18] LI R, LI M, SU Y W, et al. An analytical mechanics model for the island-bridge structure of stretchable electronics[J]. Soft Matter, 2013, 9(35): 8476-8482.
- [19] 朱凌建, 陈剑虹, 王裕鑫, 等. 基于 GRU 神经网络的脉搏波波形预测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 242-248.

ZHU L J, CHEN J H, WANG Y X, et al. Research on prediction method of pulse wave waveform based on GRU neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 242-248.

- [20] 李文国, 罗志增, 席旭刚. 改进 S 变换谱估计的动态手势肌电特征处理 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 191-198.

LI W G, LUO ZH Z, XI X G. Dynamic gesture sEMG feature processing based on estimation of the improved S-transform spectral [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 191-198.

## 作者简介



**陈兆润**, 2019 年于吉林大学获得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为柔性电子技术。

**Chen Zhaorun** received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Jilin University of China in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering in Tianjin University. His main research interest includes flexible electronics.



**黄显** (通信作者), 2004 年于天津大学获得学士学位, 2007 年于天津大学获得硕士学位, 2011 年于哥伦比亚大学获得博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为柔性电子技术和生物医学柔性电子系统。

E-mail: huangxian@tju.edu.cn

**Huang Xian** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Tianjin University in 2004 and 2007, respectively. He received his Ph. D. degree in 2011 from Columbia University. He is currently a professor in Tianjin University. His main research interests include flexible electronics and biomedical flexible electronic system.