

基于 LC 谐振的柔性无源无线压力传感器系统设计

闫金礼, 聂宝清, 刘杰, 陈新建
(苏州大学电子信息学院, 江苏苏州 215006)

摘要: 为了能够增强 LC 传感器测量的实时性, 提出了一种无源无线压力传感器系统的设计方法。系统包括 LC 柔性无线压力传感器、信号读取电路和数据接收上位机。LC 无线压力传感器由天线、织物和铁氧体膜构成, 具备高柔性。当受到外界压力信号时, 无线信号读取电路将传感器谐振频率的变化量转换成电压的输出量, 并通过蓝牙传输到上位机进行实时数据处理和显示。实验验证了传感器系统在 0~15 kPa 的压强范围内具有 $1.97 \times 10^{-2} \text{ kPa}^{-1}$ 的高灵敏度, 且在实时监测人体生理活动信号方面具有良好的稳定性和适用性。

关键词: LC 谐振; 无线压力传感器; 铁氧体; 电磁耦合; 信号读取电路; 实时处理

中图分类号: TP212 文献标识码: A 文章编号: 1002-1841(2023)01-0027-04

Design of Flexible Passive Wireless Pressure Sensor System Based on LC Resonator

YAN Jin-li, NIE Bao-qing, LIU Jie, CHEN Xin-jian

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: In order to enhance the real-time measurement of LC sensors, a design of a passive wireless pressure sensor system was proposed. The system included an LC flexible wireless pressure sensor, a signal-reading circuit, and an upper computer for data receiving. The LC wireless pressure sensor was composed of antenna, fabric, and ferrite film with high flexibility. When receiving the external pressure signal, the wireless signal-reading circuit converted the change of the resonant frequency of the sensor into the output voltage, and then transmitted it to the upper computer through bluetooth for real-time data processing and display. Experiments show that the sensor system has a high sensitivity of $1.97 \times 10^{-2} \text{ kPa}^{-1}$ in the pressure range of 0~15 kPa. It also displays good stability and applicability in real-time monitoring of human physiological activity signals.

Keywords: LC resonator; wireless pressure sensor; ferrite; electromagnetic coupling; signal-reading circuit; real-time processing

0 引言

近些年来, 柔性传感器在各领域不断发展, 科研人员的研究朝着高柔性^[1]、高灵敏度^[2]、集成化^[3]、微型化^[4]等方向不断深入。其中, 柔性无线传感器系统高度集成了信息传感^[5]、数据采集^[6]、处理分析和无线传输^[7]等功能, 可灵活应用于多种场合, 备受科研人员的关注^[8]。而无线柔性压力传感器由于其在触觉感知和健康监测等方面的广泛应用逐渐走进人们的生活^[9]。

在运用无线压力传感器系统的柔性可穿戴设备中, 基于 LC 谐振的方法由于不需要复杂的电路设计, 并且可以无源使用等优点^[10-11], 常被用在足底压力检

测^[12]、眼压监测^[13]和其他一些需要无创监测的特殊应用场景中。但是, 它们通常需要网络分析仪等大型实验设备获取谐振频率的变化以评估外界压力值的变化, 这种方法不能实时地处理与显示数据, 限制了 LC 传感器的应用场景^[14]。为此, 本文提出了一种基于电磁感应耦合原理的柔性无线传感器系统, 用于无源无线柔性压力检测。该系统由无线压力传感器、信号读取电路和数据接收上位机组成, 可以实时、准确地进行数据测量和活动监测。例如, 感知手臂的弯曲幅度和步伐的频率快慢。

1 传感器的结构与系统传感原理

1.1 传感器结构与制备方法

本文提出的无线压力传感器具有 3 层结构, 如图 1 所示。顶部的 LC 天线由 2 层平面螺旋电感线圈叠放构成。2 个线圈的自感与互感决定了天线的电感值。同时, 它们之间的寄生电容和线圈缝隙里的寄生

基金项目: 国家自然科学基金项目(61601317); 江苏省高等学校自然科学基金项目(20KJB510001); 江苏省自然科学基金项目(BK20211308)

收稿日期: 2022-06-28

电容共同组成了 LC 结构的等效电容。传感器的中间层是一层弹性织物材料,它具有极高的柔性和回弹性。传感器的底层是具有超高磁导率和辐射吸收性的铁氧体膜。

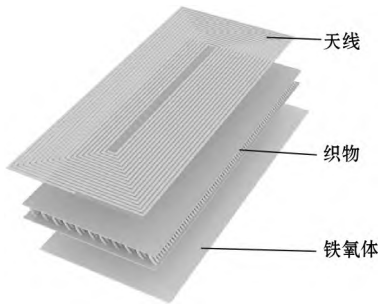


图1 无线柔性压力传感器结构

首先使用 AutoCAD 软件绘制双层平面螺旋电感的线圈,绘制好模型后,使用标准丝网印刷和蚀刻技术对聚酰亚胺膜(25 μm)的两侧进行图案化处理,并且在两侧覆上结构相同的电感线圈(12 μm),最后对预留通孔灌铜以连接两侧线圈相关端口,得到 LC 天线。使用准备好的双面胶(50 μm)将 LC 天线、织物和铁氧体膜进行粘连,即完成了柔性压力传感器的制备,最终制备的传感器长 25 mm,宽 10 mm,厚 2.1 mm。本传感器制作简单,易于大批量生产。

1.2 系统传感原理

传感器系统的简易等效电路如图 2 所示,电路工作频率设置为 13.56 MHz,在 V_{out} 处对信号进行检波处理以得到系统最终的输出电压。

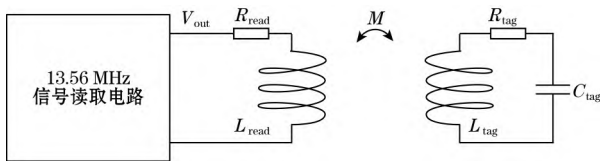


图2 传感系统等效电路

根据图 2,可以求得读出端等效输入阻抗 Z_{read} :

$$Z_{read} = R_{read} + j2\pi f L_{read} + \frac{(2\pi f)^2 M^2}{R_{tag} + j(2\pi f L_{tag} - \frac{1}{2\pi f C_{tag}})} \quad (1)$$

式中: L_{read} 和 L_{tag} 分别为两端电路线圈电感; R_{read} 和 R_{tag} 分别为两端线圈内阻; C_{tag} 为传感器标签端的等效电容; M 为两线圈之间的互感; f 为系统的工作频率。

两线圈的互感 M 又可以表示为

$$M = k \sqrt{L_{read} L_{tag}} \quad (2)$$

式中 k 为耦合系数,表示两线圈间耦合的松紧程度。

传感器的品质因数 Q_t 和谐振频率 f_t 分别为

$$Q_t = \frac{1}{R_{tag}} \sqrt{\frac{L_{tag}}{C_{tag}}} \quad (3)$$

$$f_t = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{tag} C_{tag}}} \quad (4)$$

由式(1)~式(4),重新计算得到 Z_{read} :

$$Z_{read} = R_{read} + j2\pi f L_{read} \left[1 + \frac{k^2 \left(\frac{f}{f_t}\right)^2}{1 + j \frac{f}{Q_t f_t} - \left(\frac{f}{f_t}\right)^2} \right] \quad (5)$$

显然, V_{out} 处电压与 Z_{read} 相关,根据式(5),在本系统中 R_{read} 和 L_{read} 为定值, f 设定为 13.56 MHz。所以影响 V_{out} 处电压最重要的变量就是 k 、 Q_t 和 f_t 。

从理论上讲,耦合系数 k 取决于线圈的几何形状、间距和相对位置^[15],且传感器在受压范围内具备高达约 29 的品质因数。当保证接收线圈和传感器的检测距离一定时,外界施加压力会使织物产生机械形变,铁氧体膜和天线之间的距离减小,传感器上的磁场发生变化,导致传感器谐振频率 f_t 发生变化。如图 3 所示,传感器初始的谐振频率为 12.7 MHz,当受到 15 kPa 压力时,谐振频率偏移至约为 12.3 MHz^[16]。最终,硬件采集电路将谐振频率的偏移转换成连续变化的电压信号。

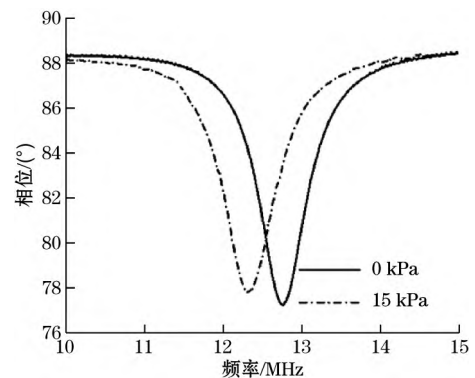


图3 传感器受压时谐振频率偏移

2 硬件电路与上位机软件设计

2.1 信号读取电路设计

传感器信号读取电路系统框图如图 4 所示,主要由电源、稳压器模块、振荡器模块、匹配模块、检波模块和控制模块组成。稳压器将电源提供的电压分别稳压到 3.3 V 和 5 V,3.3 V 供给控制模块和蓝牙,5 V 供给振荡器模块。振荡器模块工作产生 13.56 MHz 频率的方波,通过 LC 滤波电路将高次谐波滤除,最后生成 13.56 MHz 的正弦波。匹配模块用来提高电路的传输效率。检波模块将电磁感应耦合后电路输出的信号转化为直流电压信号。

接着使用控制器(STM32F103C8T6)内置的模数转换器对得到的直流信号进行数据采集,并将采集的

信号做相关编码处理, 使得其通过蓝牙无线传输到数据接收上位机进行数据的实时显示。

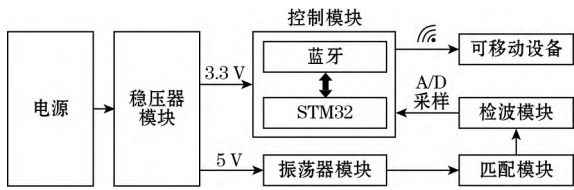


图 4 传感器信号读取电路结构

2.2 上位机软件设计

为了能够实时地显示电路采集的数据, 本文设计了一款基于蓝牙串口通信技术的上位机软件。软件界面如图 5 所示。该上位机软件使用 C# 语言开发, 主体包括数据输入通道配置、数据接收与保存、监测开关控制和数据波形可视化显示 4 个功能窗口, 实现的主要功能如下:

(1) 基于蓝牙技术建立传感器系统和接收设备的通信。将信号读取电路最终转化得到的电压数据实时打印输出, 并绘制连续的波形信号以可视化显示。

(2) 传感器系统自定义启动设置。用户可以根据不同的应用场景, 个性化设定传感器系统的工作时间。软件会最终输出在这段时间内被监测部位的活动次数。



图 5 上位机软件界面

系统数据处理流程如图 6 所示, 开启硬件电源开关后, 在软件选择对应监测的串口号, 并进行参数配置。当接收的数据检验正确时, 软件将其打印在屏幕上显示。通过选择, 用户可以实现实时波形绘制和定时监测等功能。接收到结束信号后, 关闭硬件电源, 系统停止工作。

3 实验验证

3.1 性能实验

最终设计并制备的无源无线压力传感器和信号读取电路如图 7 所示, 图中包括 3 个无线压力传感器标签、1 个信号读取电路和 1 个接收线圈。

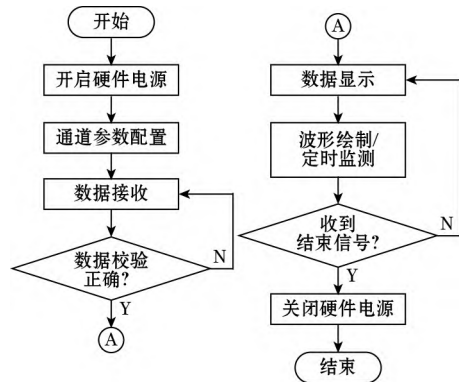


图 6 系统数据处理流程

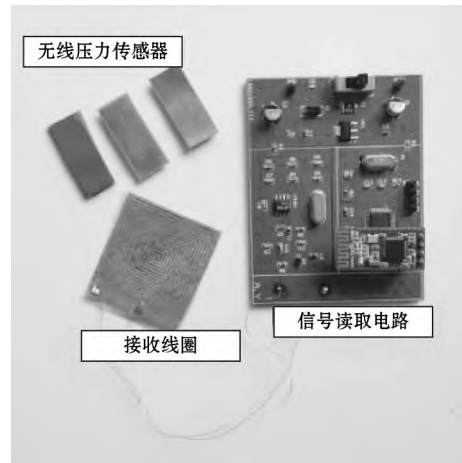


图 7 传感器与信号读取电路实物

将无线压力传感器标签与信号读取电路的接收线圈间隔 2 mm 进行传感器灵敏度测量实验, 系统测量装置如图 8 所示。通过控制线性位移平台和测力计的位移给无线压力传感器施加机械负载, 测力计示数为传感器受到的压力值。信号读取电路将最终转化得到的电压值通过蓝牙传输给上位机系统显示并记录。

传感器系统的灵敏度 S 定义为

$$S = \frac{d(\Delta V/V_0)}{dp} \quad (6)$$

式中: V_0 为传感器系统的初始输出电压; ΔV 为输出电压的增量; p 为传感器受到的压强, 定义为传感器所受压力与受力面积之比。

图 9 为传感器的压强-电压曲线。从图 9 可知, 在 15 kPa 之前, 传感器的灵敏度为 $1.97 \times 10^{-2} \text{ kPa}^{-1}$, 在 15 kPa 之后, 灵敏度下降到 $2.3 \times 10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$, 这主要是由于中间层的机械特性决定的。当外界压强达到 15 kPa 时, 由于位于中间层的织物被压缩到一定程度, 杨氏模量增大, 由低抗压状态转换成高抗压状态。

为了进一步验证传感器的性能, 使用水笔作为对传感器的施力工具进行实验^[17]。如图 10 所示, 首先



图 8 传感器系统测量装置

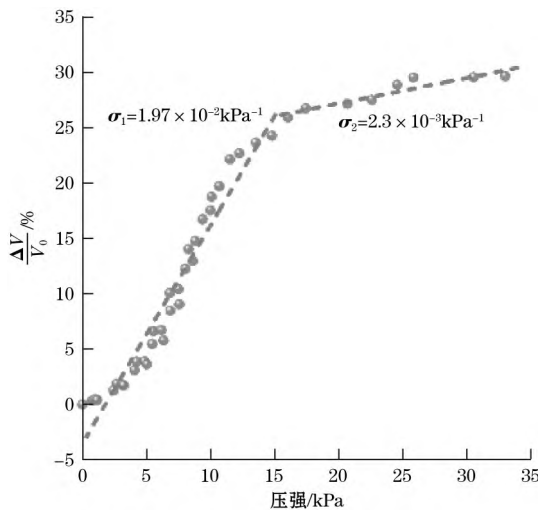


图 9 传感器灵敏度曲线

使用笔尖连续对传感器进行 5 次重力按压,并快速释放,接着连续对传感器进行 2 次长时间施力,最后连续对传感器进行 6 次轻力按压,并快速释放。传感器都产生了预期的响应,且表现出良好的稳定性。

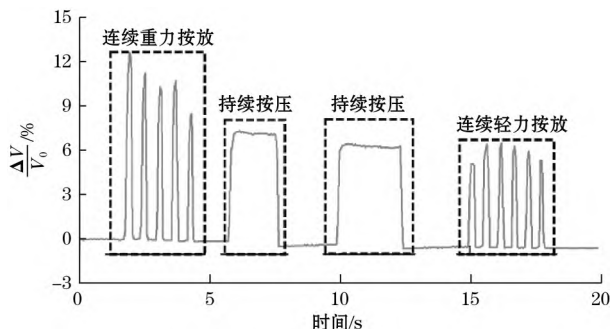


图 10 使用笔尖对传感器施力的系统输出

3.2 实用场景验证

本文将传感器系统用于人体活动监测实验,以验证传感器系统在实际应用中的表现。首先将传感器

系统用于肘部运动的监测。将传感器使用绑带固定在肘部关节处,由于手肘弯曲时产生的力会使绑带产生弹性形变,进而对传感器标签产生压力。如图 11 所示,当大臂和小臂的夹角变小时(如 180°、135°和 90°),传感器标签受到来自绑带的压力增加,导致输出的电压变大。这展现了传感器系统在判断人体不同姿势上的应用前景。

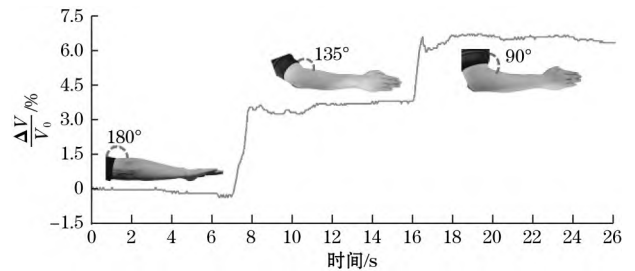


图 11 手肘不同弯曲角度下的系统输出波形

所提出的传感器系统还可以监测使用者的步伐频率。志愿者将传感器系统穿戴于腿部,首先以正常速度行走,接着慢跑,随后再以正常速度行走,整个监测过程持续约 16 s,最后得到系统输出电压波形如图 12 所示。借助传感器系统,可以计算出走路和慢跑时的步频,分别约为 40 步/min 和 86 步/min。

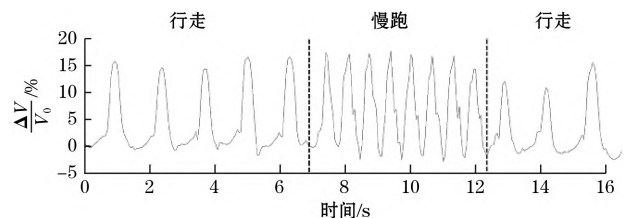


图 12 步伐频率不同时的系统输出波形

4 结束语

本文基于 LC 无源传感方案设计了可以实时、快速进行测量的无线压力传感器系统,包括具有 3 层结构的柔性无线压力传感器、信号读取电路和数据接收上位机。传感器结构简单,成本低廉,易于大规模制备。且与信号读取电路配合使用下,在 0~15 kPa 的压力区间内呈现可达 $1.97 \times 10^{-2} \text{ kPa}^{-1}$ 的高灵敏度。在人体生理活动监测上的实验证明:提出的传感器系统性能良好,可以实时、稳定地进行人体运动的监测。

参考文献:

[1] LEE S, FRANKLIN S, HASSANI F A *et al.* Nanomesh pressure sensor for monitoring finger manipulation without sensory interference [J]. *Science* 2020, 370(6519): 966-970.
 [2] 钟雅琪, 张东光, 张兴芳, 等. 基于微半球结构液态金属弹性体的柔性电容式压力传感器 [J]. *仪表技术与传感器*, 2022(3): 23-28. (下转第 53 页)

5 结束语

本文介绍了基于 FPGA 和 ARM 结构的中子能谱测量系统的软硬件设计,给出了中子探测单元、信号整形、采集、处理电路和系统软件的设计方案。通过实验和仿真测试了探测单元的输出信号特性、整形电路的功能参数以及软件稳定性。结果表明:该探测单元输出信号稳定、信噪比高;整形电路功能可靠,输出信号宽度满足采集要求;系统软件设计合理,能够实现稳定采集和数据存储。为中子能谱测量仪器的集成化、小型化和便携式设计提供了解决方案。

参考文献:

- [1] 堵树宏,李永华,孙涛,等.微型核反应堆技术发展趋势研究[J/OL].核动力工程:1-4[2022-05-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1158.TL.20220509.1646.002.html>.
- [2] 胡庆东,曾志,马豪,等.室内环境中子能谱及剂量率的多球谱仪测量[J].清华大学学报(自然科学版),2015,55(12):1332-1334.
- [3] GOMEZ-ROS J M ,BEDOGNI R ,MORALEDA M ,et al. A multi-detector neutron spectrometer with nearly isotropic response for environmental and workplace monitoring [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research ,2010 , 613(1):127-133.
- [4] GOMEZ-ROS J M ,BEDOGNI R ,PALERMO I ,et al. Design

and validation of a photon insensitive multidetector neutron spectrometer based on Dysprosium activation foils [J]. Radiation Measurements ,2011 ,46(12):1712-1715.

- [5] BEDOGNI R ,BORTOT D ,BUONOMO B ,et al. First test of SP2: A novel active neutron spectrometer condensing the functionality of Bonner spheres in a single moderator [J]. Nuclear Inst & Methods in Physics Research A ,2014 ,767(11):159-162.
- [6] 邹益晟.单球中子能谱仪的研制[D].衡阳:南华大学,2019.
- [7] 康红斌.便携式单球中子谱仪系统设计及性能研究[D].衡阳:南华大学,2020.
- [8] 吕宁,过惠平,尚爱国,等.多球中子谱仪的周围剂量当量转换研究[J].核技术,2018,41(12):55-62.
- [9] 谭晓明,蒲忠胜,魏志勇,等.SiPM核辐射探测器电路设计[J].核电子学与探测技术,2016,36(4):371-375.
- [10] 郑蕊,王晓荣,吴棋,等.基于STM32F4大气监测系统微站的软硬件设计[J].仪表技术与传感器,2020(9):98-100.

作者简介:彭征(1998—),硕士研究生,主要研究领域为嵌入式系统与应用、核辐射探测与核电子学系统。

E-mail:1440162209@qq.com

刘延飞(1975—),教授,博士,主要研究领域为嵌入式系统与应用。E-mail:bbmcu@126.com

(上接第30页)

- [3] CHUNG H U ,KIM B H ,LEE J Y ,et al. Binodal wireless epidermal electronic systems with in-sensor analytics for neonatal intensive care [J]. Science ,2019 ,363(6430):doi:10.1126/science.aau0780.
- [4] KWAK J W ,HAN M ,XIE Z ,et al. Wireless sensors for continuous multimodal measurements at the skin interface with lower limb prostheses [J]. Science Translational Medicine ,2020 ,12(574):doi:10.1126/scitranslmed.abc4327.
- [5] SONG Y ,MIN J ,YU Y ,et al. Wireless battery-free wearable sweat sensor powered by human motion [J]. Science Advances ,2020 ,6(40):doi:10.1126/sciadv.aay9842.
- [6] ROSE D P ,RATTERMAN M E ,GRIFFIN D K ,et al. Adhesive RFID sensor patch for monitoring of sweat electrolytes [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering ,2015 ,62(6):1457-1465.
- [7] YU X ,XIE Z ,YU Y ,et al. Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality [J]. Nature ,2019 ,575(7783):473-479.
- [8] 金潇,金宁,于浩然,等.基于柔性混合电子制造技术的蓝牙传感系统[J].仪表技术与传感器,2020(9):73-77.
- [9] 王莎莎,胡特特.可同时识别拉伸与压力的柔性传感器设计与应用[J].仪表技术与传感器,2021(11):1-6.
- [10] 娄文涛,杨林,于仕辉,等.双层结构的无线无源柔性压力传感器设计[J].传感技术学报,2020,33(8):1079-1084.
- [11] 罗涛,谭秋林,魏坦勇,等.无源LC传感器研究现状与发展趋势综述[J].传感器与微系统,2014,33(9):11-14.

[12] WEN H ,CHEN C ,LI S ,et al. Array integration and far-field detection of biocompatible wireless LC pressure sensors [J]. Small Methods ,2021 ,5(3):doi:10.1002/smt.202001055.

[13] KIM J ,KIM M ,LEE M-S ,et al. Wearable smart sensor systems integrated on soft contact lenses for wireless ocular diagnostics [J]. Nature Communications ,2017 ,8(1):doi:10.1038/ncomms14997.

[14] 李美朴,谭秋林.基于LC的无线无源应变传感器的制备与测试[J].仪表技术与传感器,2022(3):29-32.

[15] 王晓龙,纪夏夏,谭秋林,等.无源LC传感器耦合线圈参数优化设计研究[J].科学技术与工程,2014,14(34):199-202.

[16] NIE B ,HUANG R ,YAO T ,et al. Textile-based wireless pressure sensor array for human interactive sensing [J]. Advanced Functional Materials ,2019 ,29(22):doi:10.1002/adfm.201808786.

[17] HAN S ,KIM J ,WON S M ,et al. Battery-free ,wireless sensors for full-body pressure and temperature mapping [J]. Science Translational Medicine ,2018 ,10(435):doi:10.1126/scitranslmed.aan4950.

作者简介:闫金礼(1998—),硕士研究生,研究方向为柔性无线压力传感技术。E-mail:20205228028@stu.suda.edu.cn

通信作者:聂宝清(1987—),博士,副研究员,研究领域为可穿戴电子设备及其在生物医学领域中的应用。

E-mail:qixinbq@suda.edu.cn