

基于助力结构纳米发电机的通信系统研究^{*}

梁新武 邵燕航 袁明

(南京邮电大学自动化学院、人工智能学院 南京 210023)

摘要: 本研究针对人体机械能频率较低、传统按压纳米发电机所需驱动力较大的问题进行了改进,设计了一种助力结构纳米发电机并将其应用于自驱动通信系统。助力结构有效地传递和增强激励力,使得接触分离式摩擦纳米发电机在进行自驱动力电转换时,所需的激励力较无助力结构小了8.6倍。为实现自驱动通信,编码信息后,利用含助力结构的纳米发电机调制人体机械能产生电信号,实现信息发送。在采集电压信号的过程中设计了一种半波整流电路,减少了TENG输出电压波形正负半轴波形不对称带来的影响,并对助力结构纳米发电机对应产生的模拟电压信号进行采集,通过解调和解码即可恢复出原始信息。实验成功传输了字符串“NJUST”。

关键词: 力电转换;助力结构;摩擦纳米发电机;自驱动;通信系统

中图分类号: TN384 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

Research on communication system based on assisted-structure nanogenerator

Liang Xinwu Tai Yanhang Yuan Ming

(School of Automation and Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: This article addresses the issue of low-frequency mechanical energy in the human body and the relatively low energy harvesting efficiency of traditional contact-separation nanogenerator. A novel assisted-structure nanogenerator designed for self-powered communication systems is proposed to tackle this problem. The assisted-structure can effectively transmit and enhance forces, which can reduce the excitation required by the triboelectric nanogenerator for energy collection by 8.6 times with similar output performance. With the aim of self-powered communication, after encoding information, the human body's mechanical energy acting on the assisted-structure nanogenerator is utilized to modulate and transmit the signals. In the voltage signal, a half-wave rectification circuit is designed to reduce the influence of positive and negative half-axis waveform asymmetry of the voltage waveform of the TENG. The analog voltage signal corresponding to the power assisted structure nanogenerator is collected and after corresponding demodulation and decoding, the original information can be recovered. The experiment successfully transmitted the string "NJUST".

Keywords: energy harvesting; assisted-structure; triboelectric nanogenerator; self-drive; communication system

0 引言

人体机械能是一种广泛存在的高熵能量^[1]。随着人类社会进入物联网时代及可持续发展对低碳环保的要求不断提高,通过对人体机械能量进行俘获,并通过机械能量转换,有望实现对小功率器件的供电并实现信息的传递^[2]。

关于人体机械能能量的采集,常见的采集方式有压电式、电磁式、静电式、摩擦电式,其中压电式采集装置应用的最为广泛^[3]。Manjarre 等^[4]提出了腕式压电能量收集装置,在手臂运动的5 min的情况下,可为电池提供额外的

3.6 s 到 6.2 s 的持续时间。Khrissi 等^[5]提出了一种基于压电陶瓷的人体手臂能量采集器,该装置的最佳工作频率与人类活动的典型频率相匹配,最大可产生 2.86 mW 的输出功率。可以看到,常见的人体机械能量收集装置,一般为单功能的、可穿戴的能量收集装置,需要能量收集转置与人体运动部位的匹配度较高,且一般的压电、电磁等能量采集方式在实际应用中需要外部输入和电源系统来进行信息控制和能量供应^[6]。

由此,与传统压电、电磁等能量采集方式相比,摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)在低频人体

机械能量俘获上具有显著优势,具有取材广泛、成本低等优点^[7-8]。TENG 是由王中林院士团队于 2012 年提出的一种新型能量采集装置,与传统压电、电磁等能量采集方式相比,TENG 可以实现自供电,工作时无需外部电源^[9]。基于 TENG 的器件可实现装置小型化、多功能化,在人体机械能收集领域具有广阔的应用前景。

TENG 的 4 种工作模式中垂直接触分离模式是比较常见的模式^[10]。人体动作中,按压动作是很常见的动作,人的走路、手指的操作都会产生按压的生物力学能量。按压动作和垂直接触分离模式具有相通性,可以采用垂直接触分离模式的 TENG 完成对人体按压动作机械能的采集^[11]。Tao 等^[12]提出了一种基于蜂窝结构的、按压-接触式的摩擦纳米发电机,可放置于足底等部位,用于生物力学的能量采集。Li 等^[13]提出了一种基于弹性材料的接触分离模式的摩擦纳米发电机键盘,其外观和按压模式与传统键盘相似,可将人体打字的能量进行采集和存储,但该器件仅是对传统按压器件的仿照,且未对按键按压输出信号与上位机之间的通信进行研究。Zhang 等^[14]提出了一种杠杆式触点分离的 TENG,该器件将金属弹簧与树脂材料连接组成了杠杆式的器件,可用来检测脉搏等生物压力,为生物力学的能量采集提供了很好的范式,但该器件体积相对较大且不同材料的组装结构易损坏。常见的基于 TENG 的生物按压机械能采集大多是仿照自然界或者现有的结构,在设计时很少考虑结构的省力性,对于收集的能量也多用作小型设备供电使用,未进行额外的应用拓展。

此外,针对人体运动的低频性,为了提高纳米发电机对低频弱激励的性能,常见的方式是提升接触起电层的表面电荷密度^[15],对接触起电层表面进行微纳结构加工,增大其比表面积或者增大输入力的幅值及改变接触层刚度,实现更充分接触分离^[16]。然而,在人体能量俘获中,直接增大力的幅值将极大降低使用者的体验。如何使用较小输入有效提升纳米发电机的输出性能也成为一个亟待解决的问题。

针对上述问题,本文提出了一种新型带助力结构的纳米发电机,实现弱激励条件下接触起电层的大面积接触分离,实现人体按压动作机械能的收集。进一步,作者基于此器件开展了绿色通信^[17]应用研究,通过对该器件进行信号调理及二进制编码,实现自驱动的信息产生,并对信息实现了有效解码。通过 PXI 模块化测试系统^[18]对器件性能进行表征,验证了助力结构的有效性及绿色通信的可行性。

1 助力结构纳米发电机器件设计

本文设计了一种可用于自驱动通信的助力结构纳米发电机,为了便于后续应用,该结构需要具有结构紧凑、操作简便和灵敏度高的特点。所设计的助力结构纳米发电机如图 1 所示,该器件包括中间镂空的方形底座、平面弹簧、硬质中空圆柱、以及一个 T 形结构组成。

通过固定 T 形结构的横边,并把 T 形结构中间与硬质

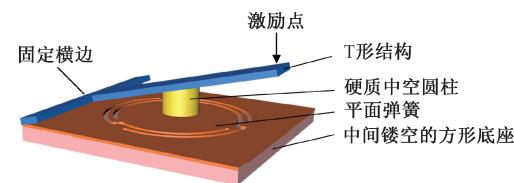


图 1 助力结构纳米发电机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the assisted-structure of the nanogenerator

中空圆柱相连,形成了一种类同向杠杆的助力结构,通过该助力结构可以更有效地传递和增强力。在该助力结构中,当激励点有向下的力的作用时,硬质中空圆柱也会受到向下的力,并且由于力矩的长度不一样,根据同向杠杆原理,杠杆同侧两点的力的大小与它们的力臂的长短成反比,即当力臂较长时,所需施加的力就较小;而力臂较短时,所需施加的力则较大,所以在激励点处激励比在平面弹簧处激励更为省力。

在结构设计中将平面弹簧贴于方形底座(边长 55 mm,高度为 3.5 mm,镂空深度为 1 mm)上方,硬质中空圆柱固定在平面弹簧的中心位置,T 形结构的横边固定在平面弹簧的边上,竖边固定在硬质中空圆柱上,使得平面弹簧、硬质中空的圆柱和 T 形结构三者形成类似按钮的助力结构。通过该助力结构可以实现 T 形结构竖直边上的点位移到平面弹簧中心圆形区域的面位移转换。

在有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 中完成几何建模,选择固体力学物理场,对平面弹簧结构的形变进行了有限元仿真,可以验证当平面弹簧受到按压时,产生的最大位移会位于平面弹簧的中心圆面(直径 30 mm)上,如图 2 所示。根据摩擦纳米发电机理论,产生的电压大小与摩擦层接触面积成正比,因此平面弹簧、硬质中空的圆柱和 T 形结构三者形成的类按钮结构不但实现了位移的传递,还有效增强了摩擦纳米发电机的接触起电面积。

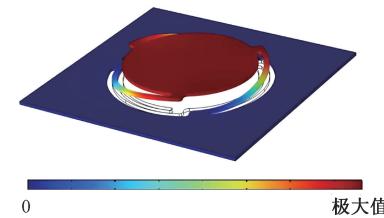


图 2 平面弹簧中心圆面位移分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the displacement distribution of the central circle of the planar spring

本研究采用被固定在平面弹簧背部的氟化乙烯丙烯共聚物(fluorinated ethylene propylene, FEP)膜作为摩擦纳米发电机的负电性材料。其表面一侧配置有铝电极。作为引出电极。多壁碳纳米管作为正电层材料,涂覆在镂空方形底座。纳米发电机的主体结构制造过程中采用了 3D 打印技术来制造其主要组件。选择了聚乳酸(polylactic acid,

PLA) 作为制造材料, 该材料具有良好的机械性能和环保特性, 符合绿色制造要求。

通过按压和释放 T 形结构, T 形结构会带动硬质中空圆柱和平面弹簧的运动。当平面弹簧的中心圆面上下运动, 带动固定在平面弹簧背部的电负性膜与涂覆导电正电性材料的方形底座发生接触与分离时, 正电性材料和负电性材料电极间会形成传导电流。根据接触起电和静电感应原理, 这种往复的相互作用会在电极之间产生交流电, 从而实现机械能到电能的转换, 如图 3 所示。

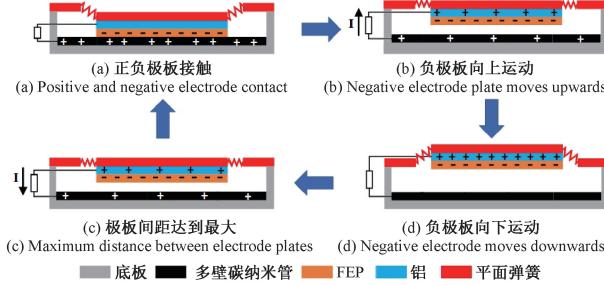


图 3 摩擦纳米发电机工作原理图

Fig. 3 Working principle of triboelectric nanogenerator

2 力电转换特性研究

2.1 测试系统搭建

为了着重研究助力结构对纳米发电机输出特性的影响, 搭建了测试系统, 如图 4 所示。测试使用的上位机平台为 LabVIEW。通过力锤激励纳米发电机, 分别测得激励力、纳米发电机两端的电压和电流。测试过程中使用的力锤型号为 CTL-01, 灵敏度为 2.5 mV/N, 力锤信号 PXI-4461 模块采集。器件电压输出采用 PXI-4070 和高阻探头测量, 器件输出电流采用 PXI-4071 完成测量。

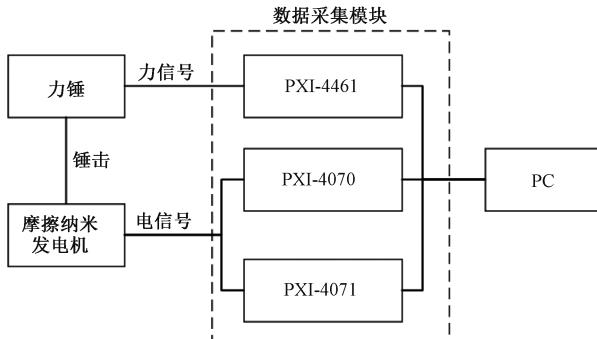


图 4 助力结构摩擦纳米发电机发电效果测试系统框架

Fig. 4 Flow chart of the power generation effect test system of the power-assisted structural triboelectric nanogenerator

为了测试自驱动通信装置, 搭建了如图 5 所示的实物装置。该自驱动通信装置由助力结构纳米发电机、二极管、100X 衰减探头组成。在信号发送端通过按压和释放的动作来激活纳米发电机, 进而实现二进制信息的有效键入, 波

形经过二极管整流滤除负向波形信号, 后经 100 倍衰减探头后传输给 PXI-4461, 经过 PXI-4461 对电压信号进行采集, 对采集到的电压信号进行解调和解码, 最终恢复出原始信息, 达到通信目的。

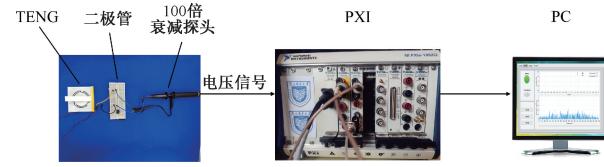


图 5 自驱动通信测试装置图

Fig. 5 Experimental system of the self-powered communication system

2.2 力电转换效果对比

在对比实验中, 对不包含助力结构和包含助力结构的器件进行测试。力锤测得的值为 30 N, 不含助力结构器件输出电压值为 124.55 V, 电流值为 1.56 μ A; 而包含助力结构的器件, 仅需约 3.5 N, 即可获得相近的输出性能(电压为 114.88 V, 电流为 1.24 μ A)。

如图 6 所示, 在输出性能相近的情况下, 有助力结构的摩擦纳米发电机结构所需的激励比无助力结构的摩擦纳米发电机结构小了 8.6 倍。由此可见, 有助力结构的纳米发电机在电压信号和电流信号上均能显著提高机械能向电能的转化效率, 因此具有助力结构的纳米发电机更便于力电转换。

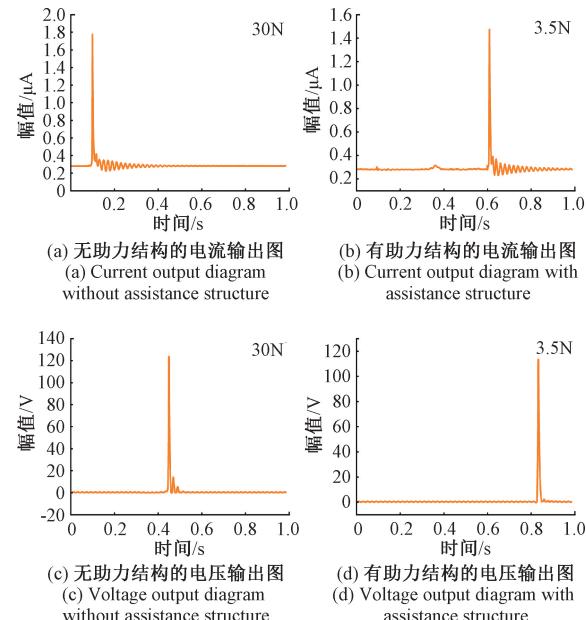


图 6 有无助力结构的摩擦纳米发电机的输出对比图

Fig. 6 Comparison diagram of output of TENG with and without assistance structure

3 自驱动通信特性研究

3.1 原理实现

由于助力结构纳米发电机可以有效地将人体按压机械

能转化为电能,所以在通信过程中可以将编码后的数字信号通过机械能调制成模拟信号信息,即把编码后的信息通过人体机械能经过助力结构纳米发电机后得到模拟电信号,完成信息的发送。接收端通过采集助力结构纳米发电机的电信号,通过对信号的解调和解码实现信息的恢复。由于纳米发电机产生信号中同时包含正电压信号和负电压信号,这对于后续的信号处理工作造成了不便。因此,本研究在纳米发电机后加入二极管,利用其单向导通性,仅保留正电压。该步骤不仅提高了信号质量,还为后续信息传输和解调奠定了基础。通信系统原理图如图 7 所示。

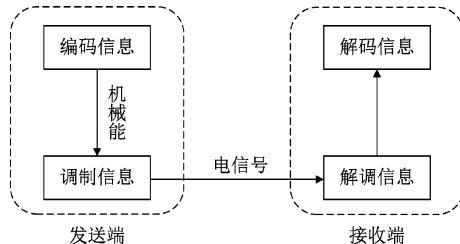


图 7 通信系统原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the communication system

3.2 自驱动通信原理

1) 信息编码

通过该程序将输入的待传输信息转换为对应的 ASCII 码,实现了对字符的有效编码。为确保编码的精确性,特别选择使用 8 位二进制来代表每一个字符。当完整的字符串被输入后,依据预设的映射关系,自动将字符串转化为相应的二进制编码信息。在发送信息过程中,对于已经转化为二进制编码的信息,当二进制数为“0”的时候,在当前的时刻不需要对纳米发电机进行操作即可完成信息发送,当二进制数字为“1”的时候,在当前时刻需要按压助力结构纳米发电机完成信息的发送。

2) 二进制机械幅度调制

机械幅度调制作为一种信息编码手段,其核心在于通过调整幅度的变化或利用纳米发电机输出的开关状态来达成信息的有效传递。在实际操作中,当位于摩擦纳米发电机上的按钮未被按下时,助力结构纳米发电机没有输出波形,本研究中利用这一状态波形来代表二进制数字中的“0”,如图 8(a)所示。相反,当按钮处于被按下的状态时,其内部机制会触发产生一个明确的输出电压,其输出波形则被视为“1”,如图 8(b)所示。

3) 二进制机械幅度解调与解码

在本研究中采用如下判别机制:首先对每秒内的电压信号进行采集,然后判断采集到的信号中是否高幅值的正电压信号。若在某秒内未检测到有效正电压信号的存在,则认定该秒接收到了代表数字“0”的信号;反之,若检测到正电压信号,则该秒被视为接收到了代表数字“1”的信号。将这些数字信号每 8 位进行组合,对应于信息编码的过程,完成 ASCII 码的恢复与字符的还原。

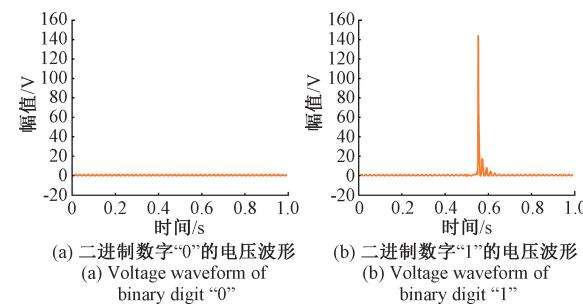


图 8 二进制机械幅度调制“0”状态与“1”状态波形

Fig. 8 Binary mechanical amplitude modulation "0" and "1" state waveforms

3.3 实验过程及结果

通过摩擦纳米发电机键入 NJUPT 对应的 ASCII 码值:01001110 01001010 01010101 01010000 01010100,按照上文描述的实验方法完成实验。最终,摩擦纳米发电机两端的正电压和恢复出的原始信息如图 9 所示,与理论输出结果吻合。

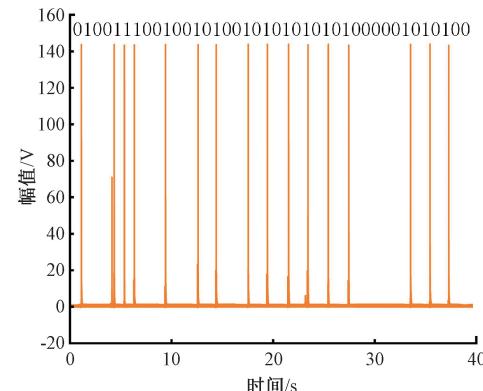


图 9 “NNUPT”通信结果图

Fig. 9 Communication result of “NNUPT”

4 结 论

本研究提出了一种新型高性能助力结构纳米发电机,并在此基础上构建了基于该器件的自驱动通信系统。实验结果表明,有助力结构的纳米发电机与无助力结构的纳米发电机相比,在相近的输出性能情况下,所需的激励可以缩小 8.6 倍。经过编码和二进制机械幅度调制,实现了信息从数字信号到模拟信号的自驱动生成。通过半波整流调控自驱动电信号,完成解调与解码后,实现对原始信息的有效恢复。该系统今后有望在人机交互与近场通信领域实现更广泛的应用。

参考文献

- [1] 王中林,陈鹏飞.从物联网时代的高熵能源到迈向碳中和的蓝色大能源——接触起电的物理机理与摩擦纳米发电机的科学构架[J].物理,2021,50(10):649-662.
WANG ZH L, CHEN P F. From high entropy energy

- in the era of the internet of things to blue energy moving towards carbon neutrality—the physical mechanism of contact electrification and the scientific framework of frictional nanogenerators[J]. Physics, 2021, 50(10): 649-662.
- [2] DING W B, WU CH SH, ZI Y L, et al. Self-powered wireless optical transmission of mechanical agitation signals[J]. Nano Energy, 2018, 47: 566-572.
- [3] CHEN CH Y, CHEN L J, WU ZH Y, et al. 3D double-faced interlock fabric triboelectric nanogenerator for bio-motion energy harvesting and as self-powered stretching and 3D tactile sensors[J]. Materials Today, 2020, 32: 84-93.
- [4] MANJARRES J, PARDO M. An energy logger for kinetic-powered wrist-wearable systems [J]. Electronics, 2020, 9(3): 487-498.
- [5] KHRISI S, LIFI H, HNAWI S K, et al. Mechanical energy harvesting from human arm using a piezoelectric ceramic [C]. The 6th International Symposium on Dielectric Materials and Applications, 2022: 185-194.
- [6] 杨刚,王超,王丽芳,等.基于TENG的人体运动监测及其在跌倒检测中的应用[J].微纳电子技术,2023,60(9):1464-1472.
- YANG G, WANG CH, WANG L F, et al. Human motion monitoring based on TENG and its application in fall detection[J]. Micronanoelectronic Technology, 2023, 60(9): 1464-1472.
- [7] 张智娟,霍慧文.基于涡激振动的PVDF压电风能采集实验研究[J].电子测量技术,2021,44(20):43-47.
- ZHANG ZH J, HUO H W. Experimental study on PVDF piezoelectric wind energy harvesting based on vortex induced vibration[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(20): 43-47.
- [8] 孙建超,周强,韦甜柳,等.基于垂直运动磁体的高效振动-电磁能量采集器研究与设计[J].国外电子测量技术,2022,41(11):78-87.
- SUN J CH, ZHOU Q, WEI T L, et al. Research and design of efficient vibration electromagnetic energy harvester based on vertical motion magnet [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(11): 78-87.
- [9] FAN F R, TIAN ZH Q, WANG ZH L. Flexible triboelectric generator[J]. Nano Energy, 2012, 1(2): 328-334.
- [10] YIN W L, XIE Y D, LONG J, et al. A self-power-transmission and non-contact-reception keyboard based on a novel resonant triboelectric nanogenerator (R-TENG)[J]. Nano Energy, 2018, 50: 16-24.
- [11] 杜敏星.用于生物运动能量捕获的复合式发电机的结构设计和性能研究[D].南宁:广西大学,2023.
- DU M X. Structural design and performance study of composite generator for biological movement energy capture[D]. Nanning: Guangxi University, 2023.
- [12] TAO K, CHEN ZH SH, YI H P, et al. Hierarchical honeycomb-structured electret/triboelectric nanogenerator for biomechanical and morphing wing energy harvesting[J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13(1): 123-139.
- [13] LI SH M, PENG W B, WANG J, et al. All-elastomer-based triboelectric nanogenerator as a keyboard cover to harvest typing energy [J]. Acs Nano, 2016, 10(8): 7973-7981.
- [14] ZHANG M Y, ZHU W X, ZHANG T T, et al. Lever-inspired triboelectric nanogenerator with ultra-high output for pulse monitoring[J]. Nano Energy, 2022, 97: 107159.
- [15] YUAN M, LI CH H, LIU H M, et al. A 3D-printed acoustic triboelectric nanogenerator for quarter-wavelength acoustic energy harvesting and self-powered edge sensing[J]. Nano Energy, 2021, 85: 1-7.
- [16] QI Y CH, KUANG Y, LIU Y Y, et al. Kirigami-inspired triboelectric nanogenerator as ultra-wide-band vibrational energy harvester and self-powered acceleration sensor[J]. Applied Energy, 2022, 327: 120092.
- [17] WANG Z H, JIN Y CH, LU CH Y, et al. Triboelectric-nanogenerator-enabled mechanical modulation for infrared wireless communications[J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15(7): 2983-2991.
- [18] 高涛,韩梅,郭辉.航空保障装备电学参数通用校准装置设计[J].国外电子测量技术,2022,41(6):134-139.
- GAO T, HAN M, GUO H. Design of general calibration device for electrical parameters of aviation support equipment [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(6): 134-139.

作者简介

梁新武,硕士研究生,主要研究方向为能量采集技术、声超构材料与携能通信技术。

邹燕航,硕士研究生,主要研究方向为能量采集技术、声超构材料与携能通信技术。

袁明(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为环境能量采集技术、声超构材料、智能感知与智能系统。

E-mail: yuanming@njupt.edu.cn