

# 液态金属导电织物在柔性天线中的应用

董淑棠<sup>1</sup> 王俊盛<sup>2</sup>

- 江苏格罗瑞节能科技有限公司, 江苏 无锡 214000;
- 武汉纺织大学 纺织科学与工程学院, 湖北 武汉 351100

**摘要:** 基于模板印刷技术, 在针织物基底表面刮涂液态金属电路, 制备液态金属导电织物, 用作柔性天线。探究液态金属电路断开后导电性能的修复性, 拉伸对液态金属导电织物导电性能的影响, 以及液态金属电路可回收性能。结果发现: 液态金属电路可以通过按压或加热修复其导电性能; 液态金属导电织物具有较好的延展性, 能适应一定伸长率范围内的拉伸, 且不影响导电性能; 可利用氢氧化钠溶液对液态金属电路进行回收再利用。最后, 介绍了这种液态金属导电织物作为柔性天线在近场通信 (NFC) 标签 (如校园卡和儿童防走失标签) 中的应用。

**关键词:** 液态金属; 导电织物; 模板印刷技术; 柔性天线; 近场通信 (NFC) 标签; 修复性; 导电性能; 可回收性能  
**中图分类号:** TN 82; TS 186.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7093(2025)01-0001-06

## Application of liquid metal conductive fabrics in flexible antennas

Dong Shutang<sup>1</sup>, Wang Junsheng<sup>2</sup>

- Jiangsu Glory Energy Saving Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, Jiangsu, China;
- School of Textile Science and Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 351100, Hubei, China

**Abstract:** Based on template printing technology, liquid metal circuits were scraped on the substrate surface of knitted fabrics to prepare liquid metal conductive fabrics which were used as flexible antennas. The reparability of conductivity after disconnection of liquid metal circuits, influence of tension on conductivity of liquid metal conductive fabrics, and recyclability of liquid metal circuits, were studied. The results showed that, the liquid metal circuits could be repaired by pressing or heating. The fabrics had good ductility, and could adapt to a certain elongation range of tensile without affecting the conductivity. The circuits could be recycled by using sodium hydroxide solution. Finally, liquid metal conductive fabrics used as flexible antennas in near field communication (NFC) labels, such as school cards and children's anti-lost labels were introduced.

**Keywords:** liquid metal; conductive fabric; template printing technology; flexible antenna; near field communication (NFC) label; reparability; conductivity; recyclability

智能可穿戴电子设备作为采用无线通信技术的新型信息采集工具, 已成为网络通信领域研究的热

收稿日期: 2024-06-26

作者简介: 董淑棠, 男, 1974 年生, 工学硕士, 工程师, 主要从事纺织专用设备智能制造的研究工作, dshutang@163.com

通信作者: 王俊盛, 博士, 主要研究方向为智能纺织品, wangjunsheng1997@163.com

点,该种设备在医疗、军事、娱乐及体育等领域具有巨大的应用潜力<sup>[1-3]</sup>。传统天线大多基于印刷电路板进行数据传输,但其中的刚性基板不适用于曲面场合,且应用时易受到机械应力的破坏。柔性天线可以通过缝制集成到服装中,既能充分满足日常生活对穿着舒适性和轻量性的要求,又能承受因运动而引发的变形<sup>[4]</sup>。因此,柔性天线在可穿戴领域应用潜力巨大,设计开发此类产品对推动可穿戴技术的发展具有重要意义。

当前,广泛应用的柔性天线有织物天线<sup>[5]</sup>、聚合物天线<sup>[6]</sup>、喷墨打印天线<sup>[7]</sup>和微流体天线<sup>[8]</sup>等。其中,织物天线表面采用导电纱线或银丝缝制出所需的形状,其成本低、制造工艺简单且集成性好,但实际应用时也存在不足。导电纱线表面的导电材料或导电涂层易因反复运动产生的应力而脱落,导电纱线导电性能显著下降,进而导致织物天线失灵;银丝方面,其弯曲刚度较大,多次的应力作用易造成银丝断裂,导致织物天线功能丧失。聚合物天线存在工作频率不能连续可重构的缺陷。喷墨打印天线会因喷涂或印刷等技术原因而在表面导电油墨不均匀的状况,进而影响产品性能。微流体天线复杂的结构不利于集成及微型化。因此,急需寻找一种稳定且耐用的新型导电材料用于可穿戴柔性天线。

液态金属具有高导电性、良好的环境稳定性、安全无毒性 and 优异的变形性<sup>[9]</sup>,故成为了纺织类可穿戴电子产品开发的理想候选材料。本文将基于模板

印刷技术,探究在弹力针织物基布表面刮涂液态金属电路,制备液态金属导电织物,研究液态金属电路断开后导电性能的修复性,拉伸对液态金属导电织物导电性能的影响,以及液态金属电路可回收性能,并介绍液态金属导电织物作为柔性天线在近场通信(NFC)标签中的应用,以期能为开发可穿戴智能纺织品提供参考。

## 1 试验原料

基布:棉/莱卡弹力针织物(其中,棉纤维质量分数占97%,莱卡纤维质量分数占3%),绍兴耐宇纺织有限公司提供。

液态金属:共晶镓铟(EGaIn)(其中,Ga质量分数占75.5%,In质量分数占24.5%),鼎冠金属科技有限公司(中国东莞)提供。

其他化学试剂由上海阿拉丁生化科技股份有限公司提供。

## 2 液态金属导电织物的制备

液态金属导电织物的制备流程如图1所示,即将制作好的掩膜版先固定在基布表面,然后将液态金属倒于掩膜版上,刮刀刮涂后去除掩膜版,即得到表面带有液态金属电路的液态金属导电织物。本文将基于该工艺在弹力针织物基布表面刮涂出不同的液态金属电路,用于后续各项研究测试。

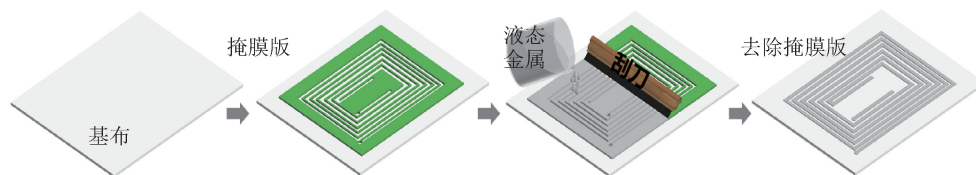


图1 液态金属导电织物的制备

Fig. 1 Preparation of liquid metal conductive fabrics

## 3 性能测试及表征

### 3.1 微观形态

使用JSM-5600LV型扫描电子显微镜(SEM,日本JEOL),观察液态金属导电织物表面和截面的微观形态。

### 3.2 液态金属电路断开后导电性能的修复性

对液态金属导电织物表面的液态金属电路两端施加5V直流电压,用美工刀切断液态金属电路,观察按压后和置于80℃的数显恒温加热台加热后,电路导电性能的修复状况,并利用奥林巴斯显微镜观察其表面形貌。

### 3.3 拉伸对液态金属导电织物导电性能的影响

液态金属导电织物沿液态金属电路长度方向分别拉伸 30%、50%、80% 和 100% 后,利用 H31 型万用表(德力西电气)测量液态金属导电织物拉伸前后的电阻。

### 3.4 液态金属电路可回收性能

将液态金属导电织物缓慢浸入装有浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液的烧杯中,1 h 后取出织物,称取烧杯中液态金属的质量,计算液态金属电路的回收率。

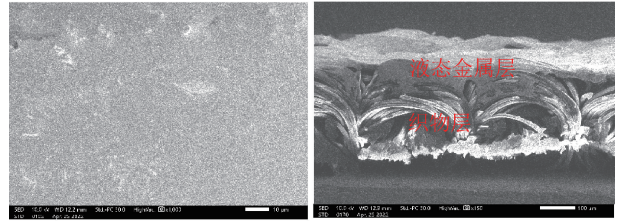
## 4 测试结果与讨论

### 4.1 微观形态表征

液态金属导电织物表面微观形态如图 2a) 所示,液态金属层表面光滑且覆盖均匀,液态金属电路连续;横截面 SEM 照片如图 2b) 所示,其上层为连续光滑的液态金属层,下层为织物基布层,整个液态金属导电织物呈典型的双层结构。

### 4.2 液态金属电路断开后导电性能的修复性

液态金属呈流体状,其具有高导电性和对缺陷或微损伤的自我修复能力<sup>[10]</sup>。本文为探究液态金属电路断开后导电性能的修复性,制备了如图 3 所示的液态金属导电织物,并将发光二极管(LED)嵌



a) 表面 b) 横截面

图 2 液态金属导电织物 SEM 照片

Fig. 2 SEM photos of liquid metal conductive fabrics

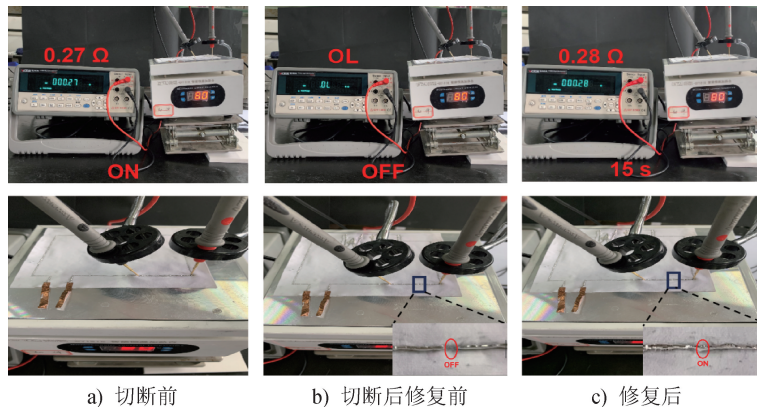
入电路中。具体测试过程:

(1)接通电源,LED 立即点亮;断开电源,LED 立即熄灭。通过奥林巴斯显微镜观察发现,液态金属电路结构致密且表面光滑。

(2)使用美工刀切断电路,LED 立即熄灭。通过奥林巴斯显微镜可清晰观察到液态金属电路的断开。

(3)分别采用按压法和加热法展开测试,即分别用手指按压电路切断区域,以及将切断电路的液态金属导电织物整体放置到倾斜的 80 °C 的数显恒温加热台上加热一段时间。发现,2 种情况下 LED 都被再次点亮。通过奥林巴斯显微镜观察发现,电路断开的区域又被填充了不同厚度的液态金属。

可见,液态金属电路断开后,由于液态金属具有较好的流动性,其导电性能能通过按压或加热修复。



a) 切断前 b) 切断后修复前 c) 修复后

图 3 液态金属电路导电性能的修复性测试

Fig. 3 Repairability tests of conductivity of liquid metal circuits

### 4.3 拉伸对液态金属导电织物导电性能的影响

弹性是针织物的重要物理性能之一,其主要体现在伸缩性和柔软性等方面。针织物能随着人体活动而发生形变,故能提供更好的穿着舒适性。本文

为探究拉伸对液态金属导电织物导电性能的影响,制备了如图 4 所示的液态金属导电织物,并利用万用表测量液态金属导电织物拉伸前后液态金属电路两端的电阻,结果如下:

(1)测得原始电路即液态金属电路伸长率为0时的电阻为 $0.21\ \Omega$ ,说明液态金属导电织物具有较好的导电性。

(2)沿液态金属电路长度方向分别拉伸30%、50%和80%后,测得该电路的电阻分别为 $0.35\ \Omega$ 、 $0.44\ \Omega$ 和 $0.49\ \Omega$ ,可见在此伸长率范围内拉伸液态金属导电织物,液态金属电路导电性能变化不大。

(3)沿液态金属电路长度方向拉伸100%后,测得该电路的电阻超出测量范围,这与较大的拉伸使得液态金属电路断开,部分电路与织物基布分离有关。

可见,基于针织物的液态金属电路具备一定的拉伸性能,且一定伸长率范围内的拉伸对其导电性能影响较小。

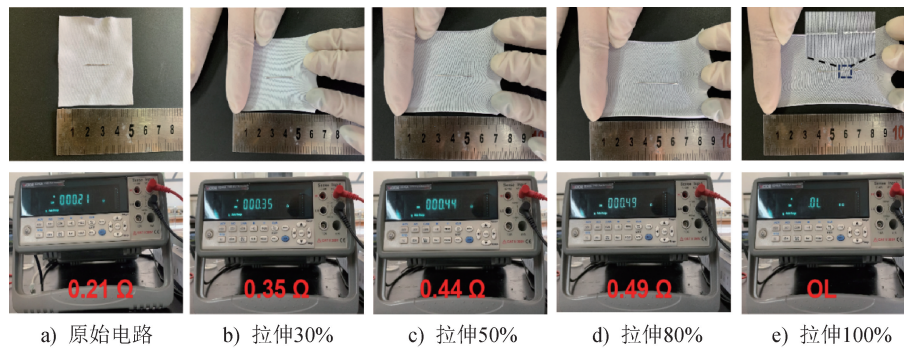


图4 拉伸对液态金属导电织物导电性能的影响

Fig. 4 Effect of tension on conductivity of liquid metal conductive fabrics

#### 4.4 液态金属电路的可回收性能

液态金属作为一种新型材料,具有良好的可回收性能。制备的液态金属导电织物试样的溶解与回收试验过程如图5所示。随着带有并联液态金属电路的液态金属导电织物慢慢浸入装有NaOH溶液的烧杯中,液态金属电路开始溶解,LED在29、49和58 s时逐个熄灭,最后溶液中留下明亮的液态金属小球。经计算发现,液态金属电路的回收率高达95%。可见,液态金属电路可以回收再利用,这为减少电子废弃物对环境的影响提供了新思路。

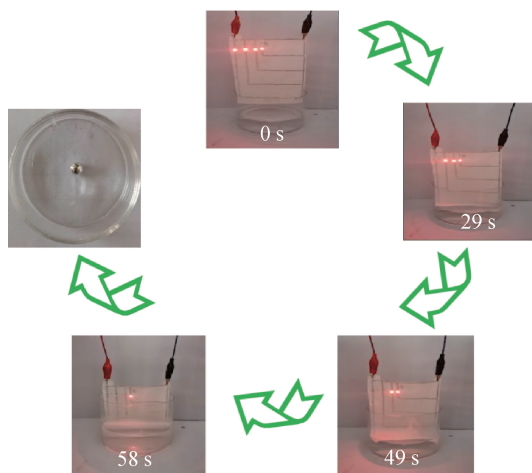


图5 液态金属电路的可回收性能

Fig. 5 Recyclability of liquid metal circuits

## 5 柔性天线

### 5.1 原理

NFC标签是在非接触式射频识别(RFID)技术基础之上,结合NFC技术研制而成的,其具有成本低、安全性高、直接数据交换能力强和能耗低等优点,已被广泛应用于多个领域<sup>[11]</sup>。NFC标签进行数据传输的工作模式有3种,即点对点通信模式、读写器模式和NFC卡模拟模式<sup>[12-13]</sup>。NFC标签的内部通常由1组天线和1个芯片组成。其中,芯片主要由射频接口、逻辑控制单元、带电可擦除可编程只读存储器(EEPROM)和只读存储器(ROM)等组成(图6)<sup>[14-15]</sup>。NFC标签的工作原理如图7所示:基于电感耦合原理,电流通过读取器设备中的线圈时会产生交变磁场;当带有特定线圈的NFC标签靠近读取器时,交变磁场会在NFC标签内感应出交变电流;内部芯片将感应的交变电流转变为直流电,为芯片供电,并将NFC标签内存储的数据无线传输给读取器。

### 5.2 应用

基于手机与NFC标签的互感作用,液态金属导电织物可作为柔性天线用于NFC标签中,并可再加

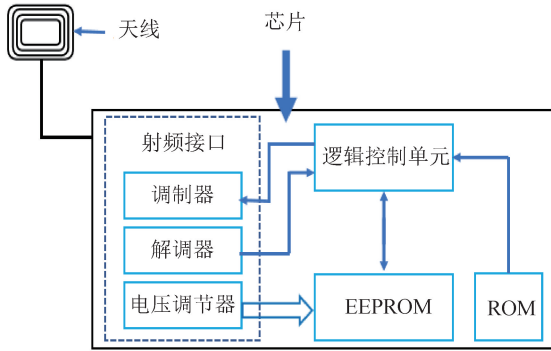


图 6 NFC 标签芯片结构  
Fig. 6 Chip structure of NFC labels

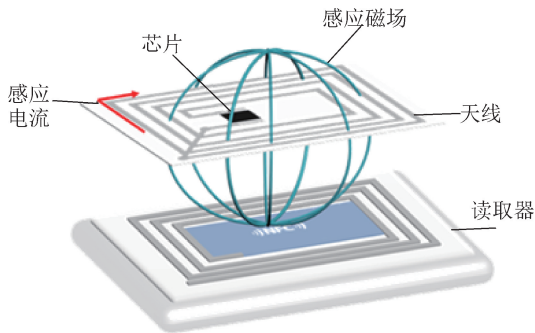


图 7 NFC 标签工作原理  
Fig. 7 Working principle of NFC labels

工成可穿戴电子设备集成到服装中,为人们提供一种更为舒适、安全、便捷、高效的生活方式。

基于液态金属导电织物的 NFC 标签具有灵活性高、携带方便、尺寸小、嵌入简单等优点。图 8 显示的是一个靠近校园卡读取器的基于液态金属导电织物的 NFC 标签。从图 8 可以看出, NFC 标签与读取器之间进行了数据传输, LED 点亮, 读取器显示剩余金额。此外, 还可基于集成到 NFC 标签中的 LED 的状态, 判定标签内部芯片有无损坏。如有损坏, 则 NFC 标签与读取器接触时 LED 发生频闪, 这与其感应出的交变电流无法被电路整流, 导致没有

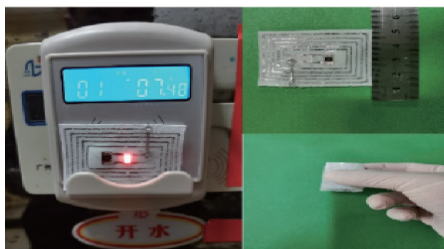


图 8 基于液态金属导电织物的 NFC 标签用于校园卡  
Fig. 8 NFC labels based on liquid metal conductive fabrics used for campus cards

稳定的直流电供应有关。

图 9 显示的是缝合在儿童书包上的基于液态金属导电织物的 NFC 标签, 可用于儿童防走失。NFC 标签芯片内收集有父母的姓名、地址和电话号码等信息。当儿童不慎走失时, 救援人员可以将手机贴近儿童书包上的 NFC 标签, 获知儿童家庭的相关信息。

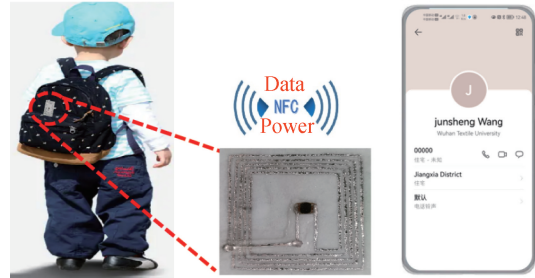


图 9 基于液态金属导电织物的 NFC 标签用于儿童防走失  
Fig. 9 NFC labels based on liquid metal conductive fabrics used to prevent children from getting lost

## 6 结论

基于模板印刷技术, 在弹性针织物表面成功涂可修复、可重构、可回收的液态金属电路, 得到具有优异延展性的、能在一定伸长率范围内保持稳定导电性能的液态金属导电织物。该织物可作为柔性天线应用于 NFC 标签(如柔性校园卡和儿童防走失标签)中, 具有高度的灵活性、敏感性, 以及良好的嵌入性。液态金属与纺织品的结合为可穿戴电子产品的开发提供了新策略。



期刊采编平台

中国知网下载

## 参考文献

- [ 1 ] 庞潍, 刘通, 李娅萍, 等. 纺织结构传感器的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2012, 30(6): 1-7.
- [ 2 ] 杜紫嫣, 白紫千, 董爱华, 等. 智能发光生理监测服装系统设计[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 519-525.
- [ 3 ] 时香凝, 周步光, 白志青, 等. 基于微凝胶的温敏透湿棉织物制备及其性能表征[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 48-54.

- [ 4 ] HYYSALO J, DASANAYAKE S, HANNU J, et al. Smart mask-wearable IoT solution for improved protection and personal health[J]. *Internet of Things*, 2022, 18: 100511.
- [ 5 ] 白欢, 彭飞, 张凯, 等. 织物基 UHF-RFID 标签天线的制备及封装工艺初探[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(2): 220-225.
- [ 6 ] JEON H, JIN S, SHIN K Y. Highly flexible, high-performance radio-frequency antenna based on free-standing graphene/polymer nanocomposite film [ J ]. *Applied Surface Science*, 2022, 582: 152455.
- [ 7 ] ZHAO P B, HUANG J, NAN J Z, et al. Laser sintering process optimization of microstrip antenna fabricated by inkjet printing with silver-based MOD ink[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 275: 116347.
- [ 8 ] HE T T, MA M S, LI H G, et al. Integrated wireless microfluidic liquid sensors based on low temperature co-fired ceramic (LTCC) technology [ J ]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 346: 113840.
- [ 9 ] TIAN M W, QI X J, QU L J. Recent progress for gallium-based liquid metal in smart wearable textiles [J]. *Journal of Donghua University (English Edition)*, 2020, 37(3): 181-190.
- [ 10 ] GUO R, ZHEN Y, HUANG X, et al. Spatially selective adhesion enabled transfer printing of liquid metal for 3D electronic circuits[J]. *Applied Materials Today*, 2021, 25: 101236.
- [ 11 ] STEINBERG M D, SLOTTVED KIMBRIEL C, D'HONT L S. Autonomous near-field communication (NFC) sensors for long-term preventive care of fine art objects[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 285: 456-467.
- [ 12 ] FIDDES L K, YAN N. RFID tags for wireless electrochemical detection of volatile chemicals[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 186: 817-823.
- [ 13 ] DRUML N, SCHILLING J, PACHLER W, et al. Secured miniaturized system-in-package contactless and passive authentication devices featuring NFC [ J ]. *Microprocessors and Microsystems*, 2017, 53: 120-129.
- [ 14 ] CHENG C, LI X, XU G, et al. Battery-free, wireless, and flexible electrochemical patch for *in situ* analysis of sweat cortisol *via* near field communication [ J ]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2021, 172: 112782.
- [ 15 ] XU G, LI X, CHENG C, et al. Fully integrated battery-free and flexible electrochemical tag for on-demand wireless *in situ* monitoring of heavy metals[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 310: 127809.

## 《产业用纺织品》征稿启事

《产业用纺织品》创刊于1983年,由教育部主管,东华大学、全国产业用纺织品科技情报站主办,中国产业用纺织品行业协会协办,东华大学期刊中心编辑出版;是全国产业用纺织品领域具有权威性的期刊之一;为《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊,已入编中国学术期刊(网络版)、万方数据-数字化期刊群、中文科技期刊数据库、长江文库、超星期刊域出版平台等;多次入选北大版中文核心期刊。

《产业用纺织品》秉承“创新、严谨、求实”的办刊作风,致力于建设成为高质量高水平国际一流学术期刊。期刊以“产业用纺织品”为特色,主要刊登国内外有关产业用纺织品的综述文章,科研、生产技术报告,报道纺织领域的新产品、新材料、新技术及新设备,介绍相关的专利、标准、测试方法,以及相关领域的行业动态、市场信息等。

热忱欢迎国内外产业用纺织品领域相关高等院校师生、科研人员及企业工程技术人员等,将优秀研究论文首发在《产业用纺织品》上。

### 投稿须知

#### 一、学术要求

投稿内容须为产业用纺织品某一领域或专题的综合述评、研究性或技术性文章,可读性强,学术参

考及引用价值高,技术方法实用,研究思路及内容能给读者启迪和借鉴。

#### 二、重点选题方向

电子织物与智能服饰;医疗健康用纺织品;高品质非织造材料;纤维改性与防护功能纺织品;安全防护与应急救援用纺织品;航空航天用高性能纺织品;海洋产业与渔业用纺织品;交通运输用纺织品;土工建筑用纺织品;过滤用纺织品;等等。

#### 三、投稿注意事项

1) 本刊只刊登首发稿,请勿一稿多投;来稿须符合期刊定位,文责自负。

2) 本刊全部采用线上投稿方式,投稿网址为 <https://cyyf.cbpt.cnki.net> (谨防虚假网站),注册后点击“作者投稿系统”。投稿二维码:



3) 本刊联系邮箱 [techtex@dhu.edu.cn](mailto:techtex@dhu.edu.cn)。

4) 本刊暂不收取审稿费和版面费,切勿向任何冒用本刊名义的单位及个人汇款。稿件刊发后,编辑部向作者支付稿酬,且优稿优酬,并赠送当期期刊。