

# 电子纺织品用纺织信号传输线的研究进展

张湿涵<sup>a,b</sup> 赵佳文<sup>a,b</sup> 胡吉永<sup>a,b</sup>

东华大学 a. 纺织学院, b. 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620

**摘要:** 归纳现有纺织信号传输线的研究现状, 介绍不同信号用纺织传输线及其制备方法, 概述现阶段有关传输线在不同环境条件中的性能研究, 总结其未来发展趋势, 以期为今后研发可穿戴设备用纺织信号传输线提供方向。

**关键词:** 纺织信号传输线; 可穿戴; 模拟信号; 数字信号; 电子纺织品; 性能测试

中图分类号: TS 106

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)05-0010-11

## Research progress on textile signal transmission lines for electronic textiles

Zhang Shihan<sup>a,b</sup>, Zhao Jiawen<sup>a,b</sup>, Hu Jiyong<sup>a,b</sup>

a. College of Textiles, b. Key Laboratory of Textile Science and Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China

**Abstract:** The research status of existing textile signal transmission lines were summarized, and the textile transmission lines for different signals and their preparation methods were introduced. And the performance researches of transmission lines under different environmental conditions as well as their future development trends were summarized, so as to provide directions for the future research and development of textile signal transmission lines applied to wearable devices.

**Keywords:** textile signal transmission line; wearable; analog signal; digital signal; electronic textile; performance test

电子织物的基本设计理念是, 在实现电子功能的同时, 保持服装的柔性和弹性, 确保服装穿着舒适。智能可穿戴技术的发展加速了电子元件与纺织品的融合。传统的集成方式如使用铜线等连接电子模块等, 缺点主要是自身的高刚度增加了用户的感知度<sup>[1]</sup>。而纺织信号传输线具有良好的柔性、可洗性和可穿戴性, 现已被开发用于电子纺织品中, 以实

现电子元件之间的连接, 为可穿戴设备提供电能或传输信号。

本文将以太纺织信号传输线为研究对象, 梳理不同信号特征用纺织传输线及其制备方法, 以及这些传输线在不同使用环境中的性能, 总结电子纺织品用纺织信号传输线的发展现状, 旨在为可穿戴柔性电子系统用纺织信号传输线的进一步研发提供参考。

基金项目: 上海市自然科学基金项目(22ZR1400800)

收稿日期: 2023-12-21

作者简介: 张湿涵, 女, 2000年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电子纺织品用纺织信号传输线

通信作者: 胡吉永, 教授, hujy@dh.u.edu.cn

## 1 纺织信号传输线的类别

纺织信号传输线作为电子元件之间连接的重要元件,类型多种多样,有微带<sup>[2]</sup>、共面传输线<sup>[3]</sup>、带

状线<sup>[4]</sup>、纺织电缆<sup>[5-6]</sup> [图 1a)] 和织物基传输线<sup>[7-8]</sup> [图 1b)] 等。

信号传输的方式主要有有线传输和无线传输 2 种。其中,无线传输支持无线供电和高速率数据传输,其令服装中的纺织传感器连续监测人体生理

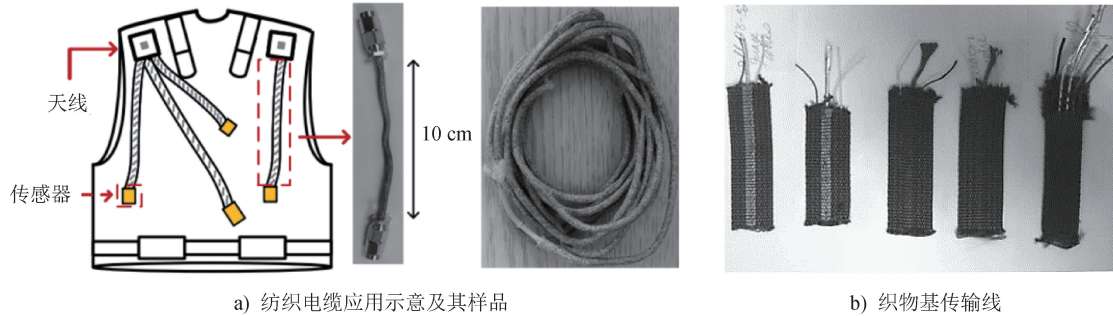


图 1 纺织信号传输线实例  
Fig. 1 Examples of textile signal transmission lines

数据成为可能<sup>[9-10]</sup>。当传感器和处理单元之间的距离较小时,采用有线传输较多。图 2 为 2 种信号传输方式的医疗保健用电子纺织品的原理示意<sup>[11-13]</sup>。有线和无线的传输方式均可用于传输不同类型的信号。其中,信号按照性质可分为模拟信号(包括高

频和低频)和数字信号(涵盖高速和低速)。微带和共面传输线常用于传输高频模拟信号,带状线可用于传输微波,而织物基传输线可作为稳定的信号传输路径用于智能服装中。后文将详细介绍电子纺织品用纺织信号传输线。

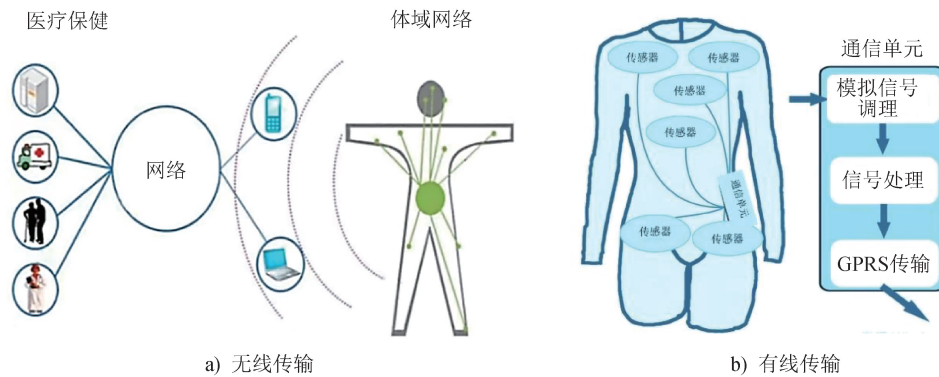


图 2 医疗保健用电子纺织品信号传输原理示意  
Fig. 2 Signal transmission principle of electronic textiles for medical care

### 1.1 模拟信号用纺织传输线

模拟信号是电子纺织品传输的主要信号类型之一,其在监测生理参数、采集和处理传感器数据、监控电力系统<sup>[14-15]</sup>过程中广泛涉及。模拟信号是一种连续的波形信号,可通过连续变化的物理量表达不同的信息。常见的纺织信号传输线传输的模拟信号包括生理电信号、传感器信号、电力信号等,其分类及特点见表 1。

#### 1.1.1 生理电信号

生理电信号是可穿戴设备常涉及的一种模拟信

号,主要由人体内部的生物电活动产生,如心电信号、脑电信号、肌电信号等<sup>[16]</sup>,其特征列于表 2。这些信号可利用电极贴片或传感器采集,经放大、滤波和模数转换等处理后,由电子设备处理和分析,所得结果对医学诊断和监护具有重要意义。如早期美国 Vivo Metrics 公司研发的生命衫和智慧衫。前者利用埋藏在织物中的传感器进行心电、肌电等生理信号的动态记录<sup>[17]</sup>,后者则可用于心率、呼吸频率、体温等生理参数的监测<sup>[18]</sup>。两者均基于金属基纱线进行信号传输,如图 3 所示。

表 1 模拟信号分类、特点及常见纺织信号传输线特征

**Tab. 1 Classification, characteristics of analog signals and characteristics of common textile signal transmission lines**

信号类型	信号来源	信号特点	信号传输线特征
生理电信号	人体内部生物电活动产生的信号	10 $\mu\text{V}$ ~4 mV, 频率范围为 0.05~200.00 Hz	具有良好的导电导热性及柔性, 常采用金属基导电纱线制备
传感器信号	外部环境或自身感应产生的信号	0~5 mV, 频率范围为 0.05~1.00 kHz	具有良好的屏蔽性、稳定性及高频特性
电力信号	储能或能量采集系统	频率在 50 Hz 以内	电阻低、能量损耗小、绝缘性能良好

表 2 生理电信号的分类及特征

**Tab. 2 Classification and characteristics of physiological electrical signals**

信号类型	信号特点	信号幅度	信号频率
心电信号	微弱性、低频性、近场性、干扰性、随机性和非平稳性	10 $\mu\text{V}$ ~4 mV	0.05~100.00 Hz
脑电信号	微弱性、低频性、随机性、非平稳性和非线性	$\leq 100 \mu\text{V}$	0~100 Hz, 有效信号频率位于 0.5~30.0 Hz
肌电信号	微弱性、低频性、随机性和非平稳性	0~5 mV	0.05 Hz~1 kHz, 有效信号频率位于 10~500 Hz, 能量集中在 10~250 Hz



图 3 生理信号监测用可穿戴设备

Fig. 3 Wearable devices for physiological signal monitoring

心电信号属低频低压信号,其阻抗高,易受外界环境及人体干扰<sup>[19]</sup>。采集心电信号用纺织传输线一般为导电及导热性好的镀银纱线。王慧玲等<sup>[14]</sup>比较了铜丝包芯纱、不锈钢纤维、尼龙掺碳丝和镀银导电缝纫线的电阻,发现镀银导电缝纫线的导电性能变化幅度最小,其表面比电阻在 100~150  $\Omega$ ,具有导电和传输稳定,以及可延展等特性,特别适用于心电信号的采集。林璐等<sup>[20]</sup>将镀银锦纶单丝加捻形成的复丝作为信号传输线,用于心电监测,结果显示其电压幅值变化不超过 0.3 mV,且信号波形在 10 s 内保持稳定,可见该传输线具有较好的传输稳定性。

脑电信号和肌电信号常用的采集方法是,利用

传输线将织物电极连接到服装或皮肤上。如 Etana 等<sup>[21]</sup>将由超细金属丝与聚酰胺长丝制成的导电纱线(线性电阻为 110  $\Omega/\text{m}$ )作为传输线连接刺绣电极,测试不同负载下的肌电信号,发现所记录的信号显示出良好的信噪比(20.93 dB)。脑电信号具有很强的随机性和非平稳性,其在采集过程中极易淹没于人体和外界环境的噪声干扰中,这便对脑电信号传输线的抗干扰能力提出了高要求,即这类传输线需具备高导电性、高信噪比等特性。Goverdovsky 等<sup>[22]</sup>研制出一种可拉伸导电织物电极,适用于耳内脑电图监测装置。该电极的导电材料为不锈钢缝纫线,可获得 1~40 Hz 低频率范围的脑电图。Shu

等<sup>[23]</sup>设计出一种用于额部脑电图测量的柔性织物电极,其是由表面镀有纳米 Ni/Cu 颗粒的聚酯纤维材料交织而成的导电织物,表面电阻率小于  $0.025 \Omega/\text{m}^2$ ,优异的导电性确保了该电极持久且稳定的信号采集效果。

### 1.1.2 传感器信号

传感器的主要工作原理是将外部物理或环境的刺激转换为电子设备可实时获取的电信号,并据此进行必要的调控<sup>[24]</sup>。现有传感器主要类型有电阻式、电容式、光电式及压电式等。

应变材料受到外力作用时,其电阻会发生变化。电阻式传感器利用电路中的运算放大器将电阻信号转换成电压信号,其输出信号频率在 50 Hz 以内,信号响应速度较慢。例如,美国康涅狄格大学 Heo 团队制备的集成手套传感器,其采用运算放大器实现了电阻信号与电压信号的转换。该传感器选择表面电阻率小于  $0.0025 \Omega/\text{m}^2$  的高导电性镀银纱作为连接电源与传感器的传输线,输出电压在 1.80 ~ 2.15 V<sup>[25]</sup>。以光纤为代表的光电式传感器基于光

纤中光强的变化获取待测物理量,具有响应时间短的特点。如 Cheng 等<sup>[26]</sup>报道的光纤传感器,其信号响应时间小于 100 ms。压电式传感器基于材料的压电效应将应变传感信号转换为对应的电信号。Wang 等<sup>[27]</sup>研制的压电纳米纤维基自供电应变传感器,可基于输出电压信号的峰值检测运动,所有传输线皆为高导电性的铜线。Yamashita 等<sup>[28]</sup>使用丝网印刷技术和导电胶将压电应变传感器结合到柔性基底上,并与铜线相连接,所得传感器输出电压高达 40 mV。

### 1.1.3 电力信号

电力信号是指来自电力系统的各种有关电压、电流和功率等参数的信号。电力信号通常需通过模拟电路进行传输和处理。新兴的能量收集和存储设备如纺织基超级电容器、摩擦纳米发电机和电池等相关产品也在积极探索中,旨在为电子纺织品提供持续、稳定的电源。

表 3 比较了超级电容器和电池的几种关键属性<sup>[29]</sup>。

表 3 超级电容器与电池的关键属性

Tab. 3 Key properties of supercapacitors and batteries

特性	电容器	锂离子电池	超级电容器	燃料电池
储存机制	物理式存储	化学式存储	物理及化学式存储	—
储能状况	有限	高	有限	高
能量密度/(Wh·kg <sup>-1</sup> )	0.01~0.05	8~600	1~10	300~3 000
功率密度/(kW·kg <sup>-1</sup> )	0.25~10 000	0.005~0.4	10~120	0.001~0.1
工作电压/V	6~800	2.5~4.2	1.2~3.3	0.6

超级电容器和电池的电力传输线通常使用低电阻的不锈钢金属丝或金属包覆纤维制成的柔性导电纱。如 Gorlick 等<sup>[30]</sup>将 2 根不锈钢金属丝编织到织带中并作为传输线直接附着到服装上,同时采用 7.2 V、1.3 Ah 的可充电电池作为电源,实现了在普通日常服装中嵌入一个由电池驱动的有线电源总线 and 数据网络,如图 4a) 所示。Rantanen 等<sup>[31]</sup>设计了一款适用于北极环境的智能服装,所用电池总容量为 4 000 mAh、输出电压为 12 V,其中 5 V 供给监测模块。该智能服装采用柔性导电纱作为心率监测模块的信号传输线。Pu 等<sup>[32]</sup>将镍包覆的涤纶纱线作为全固态柔性纱线超级电容器的传输线制备可储存、收集能量的织物,并集成到服装中,满足了超级电容器充放电速度快、功率密度高等要求[图 4b)]。

为了在高效率能源供给的基础上,合理平衡性能与功耗,还可引入自供电设备,将光能、风能、热能、呼吸能及人体运动能等转化为电能,为可穿戴电子设备持续供电<sup>[33]</sup>。如房翔敏等<sup>[34]</sup>制备出织物基摩擦电式自供电压力传感器,其能采集人体运动产生的峰值在 4.5 ~ 15.0 V 的电力信号,所用传输线为镀镍导电织物。

## 1.2 数字信号用纺织传输线

与模拟信号相比,数字信号具有较强的抗干扰能力,可确保系统运行稳定。Valenti 等<sup>[35]</sup>设计了一种低电阻的镀银聚酰胺刺绣导电线,能满足频率高达数十万赫兹信号的传输,可用于取代采用 I<sup>2</sup>C 通信协议的传感器与微控制器之间的传统传输线。Fernández-García 等<sup>[36]</sup>基于 2 种导电纱线和不同的



a) 织带传输线连接电源的应用实例



b) 由传输线集成可储存、收集能量的织物

图 4 电力信号用纺织传输线

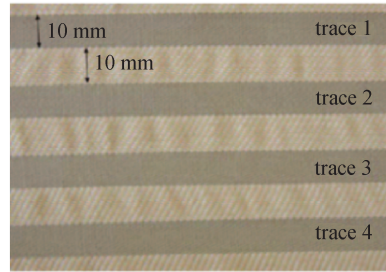
Fig. 4 Textile transmission lines for power signals

纬密织造了一体集成式传输线织物[图 5a)], 可用于传输 3.4 Mbit/s 的 I<sup>2</sup>C 数字信号, 能在可穿戴应用中与微控制器进行传感器通信, 其信号稳定时间没有明显的差异, 均保持在 244 ~ 247 ns, 噪声幅度约为 922 mV, 具备数字信号完整性特征[图 5b)]。

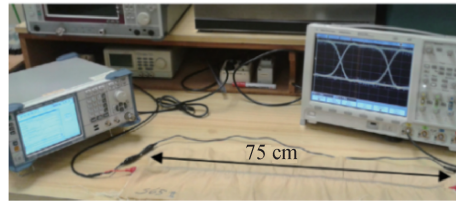
## 2 纺织信号传输线的制备方法

### 2.1 刺绣

导电路径可通过刺绣直接集成到织物基底上, 这为传输线的设计提供了很大的自由度<sup>[37]</sup>。此外, 织物基刺绣传输线还具有柔软、美观, 以及无需黏合剂即可集成到织物表面等特点。如 Moradi 等<sup>[38]</sup> 基于普通织物和超材料 (metamaterials, MTMs), 利用刺绣工艺制备出可穿戴的导电传输线[图 6a)], 用于控制和过滤超高频 (ultra-high frequency, UHF) 信号的传播。但刺绣工艺不适用于制造具有不同电导率的分离层传输线。Volakis 等<sup>[39]</sup> 研发出一种新型绣花微带线, 并创新性地提出了光纤传输线的制作工艺, 满足了高频信号传输的需求。王蕊等<sup>[40]</sup> 以纯棉牛仔布为基材制备了刺绣传输线[图 6b)], 并探



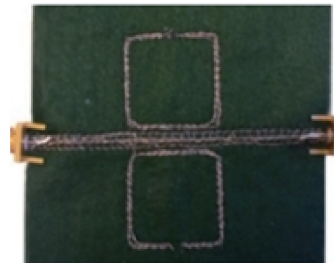
a) 一体集成式传输线织物



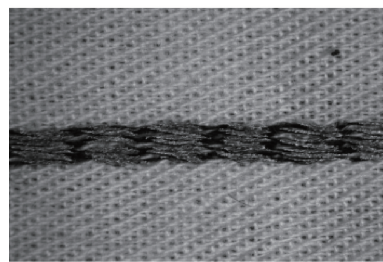
b) 眼图测量实验装置

图 5 数字信号传输线及其电学性能测试  
Fig. 5 Digital signal transmission lines and their electrical performance testing

讨了刺绣工艺参数对传输线直流电阻的影响规律, 发现刺绣密度的增加可提高传输线的导电性。



a) 刺绣电路实例



b) 刺绣传输线实例

图 6 刺绣纺织信号传输线

Fig. 6 Embroidery textile transmission lines

### 2.2 印刷

基于印刷工艺, 可将含有导电颗粒 (如金、银) 的导电介质以油墨的形式沉积在平面纺织成品上, 此类纺织信号传输线的性能取决于导电油墨的质量。如 Locher 等<sup>[41]</sup> 以腈纶棉织物为基材, 通过丝网印刷银墨水制备出一种线路阻抗接近 50 Ω 的纺织

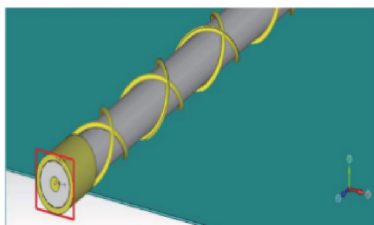
信号传输线,带宽约 4.7 GHz,适合当前大多数可穿戴领域,且印刷层数的增加有助于优化电气性能。Kim 等<sup>[42]</sup>以银、聚合物和溶剂等组成的导电浆料为丝网油墨,通过印刷技术将其涂覆到织物基材上制备传输线,发现该传输线可测量的频率范围在 100 MHz~3 GHz,且时域反射图显示,在 3 dB 下,织物上长 15 cm 的印刷传输线的频率为 80 MHz,信号损耗控制在 1.2 dB 以内。还有研究以同样的方法将导电油墨印刷在非织造材料基材上制备共面传输线,并对传输线的直流电阻、阻抗和频率进行了表征,确定其适用于高频电路<sup>[43]</sup>。

### 2.3 缝纫

基于缝纫技术可制备出高度密集型传输线,其利用具有足够强度和弹性的缝纫线将单个织物基材连接在一起,缺点是存在不连续的接缝。Leśnikowski<sup>[44]</sup>开发出一种由织物基材和导电线缝制的信号传输线[图 7a)],阻抗为 50 Ω,可以稳定地与传统发射、接收设备或无线电天线协同工作。Daniel 等<sup>[45]</sup>基于编织同轴电缆的思路制备出一种用于宽频段信号传输的拼接传输线[图 7b)],开启了传输线的系列多元化设计。与仅用导电线构成的缝合传输线相比,采用铜线和导电线的拼接传输线减少了直流损耗,具有更好的传输特性和足够的频率范围,支持多路传输。



a) 缝制的信号传输线实例



b) 拼接传输线三维设计图

图 7 缝合纺织传输线

Fig. 7 Stitching textile transmission lines

### 2.4 其他方法

柔性织物为导电纱的引入提供了丰富的布线机会,拓展了可穿戴电子设备的集成空间。如有研究

者<sup>[46]</sup>利用传统的纺丝技术开发出一种赛络纺导电纱,其可作为电路结构中的功率和信号传输通道,嵌入针织电路中,形成一个完整的纺织电气元件,具有耐洗、柔软和可拉伸,以及电阻变化稳定、应变范围宽等优点,可满足实际应用。此外,还有使用超声波制备纺织信号传输线的实例,如 Atalay 等<sup>[47]</sup>在 2 层聚酯织物之间插入由不锈钢纱和镀银尼龙纱形成导电纱,并利用超声波技术快速实现了连接,但该线路仅适用于传输恒定的低频信号。Leśnikowski<sup>[48]</sup>基于超声波法,将导电的镀镍聚酯织物和非导电的聚酯织物结合,制备出一种传输频率高达数百兆赫兹的传输线。

当前,纺织信号传输线使用较为广泛的制备技术是刺绣和印刷,表 4 列举了部分纺织信号传输线制备方法的优缺点。另有一些研究人员提出了利用磁控溅射技术制备纺织信号传输线。如 Nowak 等<sup>[49]</sup>利用磁控溅射技术在纺织基衬底上沉积出几何形状可控的导电传输线。磁控溅射技术能精准控制导电材料在纺织材料表面的均匀涂覆,所得传输线导电性均匀稳定,且具有高精度、强附着力等特点,但磁控溅射设备和工艺较复杂,成本较高,同时对基底材料有一定要求,部分纺织材料可能不适用于磁控溅射方法。

## 3 纺织信号传输线性能表征

### 3.1 力学性能

与电子元件相连的纺织信号传输线除了要确保信号传输稳定外,还应能抵抗环境条件和纺织加工等产生的各种应力应变。如 Nowak 等<sup>[49]</sup>利用磁控溅射技术制备的传输线,经 10 次磨损循环后,表面电阻率显著增加,表明磁控溅射法制备的传输线耐磨性能欠佳,使用时需采取保护措施。Leśnikowski 等<sup>[50]</sup>将导电线与织物衬底缝合制备了纺织信号传输线,并发现该传输线在拉伸作用下特征阻抗逐渐降低;且多次抗弯曲和耐磨性测试显示,当循环弯曲次数小于 7 000 时,该传输线的电阻值保持较平稳(在 0~15 Ω),当循环弯曲次数超过 7 000 时,电阻值随弯曲次数的增加而逐渐增大,最高达 100 Ω,且经过 2 000 次磨损循环后,电阻值增加了 5 Ω,表明弯曲和摩擦会影响线路的信号传输质量<sup>[51]</sup>。

表 4 纺织信号传输线制备方法优缺点比较

Tab. 5 Comparison of advantages and disadvantages of preparation methods for textile signal transmission lines

制备方法	工艺参数	优点	缺点
刺绣	针迹密度、针迹类型	可形成复杂多变的图案	不连续、分辨率低,对导电纱耐磨性、柔韧性和耐弯曲性要求高
印刷	印刷层数、固化及烧结条件	工序实施灵活,方法多样,可制备复杂的电路结构	导电性不高,耐洗性差,高速信号传输时电气参数复杂
缝纫	针迹密度、针迹间距	可塑性高、工艺可控性强	不连续,对导电纱耐磨性、柔韧性和耐弯曲性要求高

上述研究均针对直线导电路径的纺织信号传输线展开,但实际应用中连接电子元件的传输线的方向是不确定的。Kubiak 等<sup>[52]</sup>基于非直线型导电路径研究了拉伸对传输线特性阻抗的影响(图 8)。结果显示,随着拉伸力的增大,基底厚度越小的传输线特性阻抗的波动范围越大,表明这种传输线适合放置在智能服装中不易产生机械变形的部位,或者将导线缝合在较厚的基材上,否则传输的电信号质量会受影响。Locher 等<sup>[41]</sup>采用丝网印刷方法制备出电阻率为  $0.15 \Omega/\text{m}^2$  的片状纺织信号传输线,并通过测量传输线某一位置多次弯折后的印刷层电阻率发现,随着弯折次数的增加,印刷层电阻率增大,最高达  $0.35 \Omega/\text{m}^2$ ,表明传输线在使用过程中受机械应力作用后其电气性能会降低。



a) 利用缝合技术制作的非直线型导电路径的纺织信号传输线



b) 传输线拉伸试验

图 8 非直线型导电路径的纺织信号传输线及拉伸测试

Fig. 8 Textile signal transmission lines and tensile tests for non-linear paths

### 3.2 电学性能

纺织信号传输线电学性能表征主要涉及其在电阻、电容、串扰、带宽、频率特性和整体性能等方面

的表现。其中,整体性能涉及多项指标,如噪声功率比、信噪比和时延等,优化这些特性可提高信号传输的可靠性与效率,满足不同应用场景对数据传输的要求。如 Leśnikowski 等<sup>[53]</sup>以羊毛与聚酯混纺的斜纹机织物为基材,制备由信号路径、地路径和接地面组成的共面传输线,测试其导电性能发现,以面密度在  $60 \sim 160 \text{ g}/\text{m}^2$  (其中含镍量为  $12 \sim 35 \text{ g}/\text{m}^2$ ) 的金属化镍尼龙织物作为传输线的信号路径时,传输线的表面电阻值稳定性较高,其具有良好的导电性能,表明纺织信号传输线的电性能与纺织基材的特性紧密相关。

信号在传输过程中会因电阻、电容等过大而导致能量损失,因此需采取选择合适的导体材料、控制线路长度等措施,减少信号损耗。尤其是传输高速信号的线路,减少信号损耗可提高信号传输速度。Liew 等<sup>[54]</sup>研究了印刷电路板上铜线的信号传输损耗,不同类型输电线路结构的 S 参数测量结果显示,20 GHz 频率下,单线微带线信号损耗约为 8 dB,差分微带线信号损耗约为 6 dB,差分传输线的信号损耗低于单线传输线的,故差分传输线更适用于高速信号的传输。

### 3.3 耐洗性能

可洗涤性一直是电子纺织品在应用方面面临的挑战,因为洗涤会影响产品的可靠性。洗涤本身是一个复杂的过程,涉及很多化学和物理方面的作用。Taylor 等<sup>[55]</sup>将碳纳米管集成到可拉伸纺织品中制备信号传输线,并对传输线进行反复机洗发现,循环洗涤后传输线的信噪比在 20~30 dB,相比于洗涤前的信噪比(35~40 dB)有显著降低,但洗涤后传输线信噪比仍满足商用标准要求。Valenti 等<sup>[35]</sup>对设计的刺绣镀银聚酰胺导电线进行 5 次循环洗涤后发现,导电线电阻增加并在  $78 \sim 102 \Omega$  范围内波动,原因与水分子进入,导电线表面的银涂层逐渐分离,导

电线路被破坏有关。然而也有研究<sup>[56]</sup>对传输线反复洗涤后的电气性能和外观变化进行表征后发现,涂层封装的输电线路在洗涤后并未暴露在外,且外观几乎没有变化,洗涤前后电阻变化较小,说明这种结构的线路在洗涤后仍具有良好的电气性能。

此外,Atakan 等<sup>[57]</sup>基于模拟洗涤循环,提出了一种潮湿状态下传输线电气性能测试的新方法。还有研究<sup>[58]</sup>表明,洗涤后传输线的直流电阻过高,这将导致其不适用于直流信号的传输,可通过额外增

加保护层的方法适当提高纺织信号传输线的鲁棒性,减轻其在洗涤过程中受到的机械应力。

现有文献中部分有关纺织信号传输线可洗涤性的研究测试数据如表 5 所示。这些可洗涤性测试是根据相应的洗涤标准进行的,较多使用实验室洗衣机,但实际洗涤环境还有很多因素需要考虑。此外,传输线受洗涤机械应力作用后易断裂和损坏,因此,如何既保证耐洗性和舒适性,又保留良好的传输性能,是未来电子纺织品需攻克的难题。

表 5 纺织信号传输线耐洗涤性能

Tab. 5 Washing resistance of textile signal transmission lines

参考文献	传输线结构	洗涤测试条件	洗涤后单位长度的电阻
[56]	以可拉伸聚酯机织物为基底、不锈钢复合长丝为导体	10 次洗涤循环,转速 30 r/min、洗涤温度 20 ℃,洗涤周期 15 min	0.304~0.318 Ω/cm
[57]	通过刺绣的方法将镀银聚酰胺导电纱固定在棉织物上	湿态下对经 4 500 次磨损循环的传输线进行测试	1.5~5.0 Ω/cm
[58]	传输线路为镍/铜镀聚酯防撕裂织物	3 次洗涤循环,洗涤周期 150 min	0.03~2.00 Ω/cm
[59]	缝制在普通棉织物上的镀银聚酰胺导电纱	10 次洗涤循环,转速 15 r/min	1.35~2.88 Ω/cm
[60]	纤维素基纱线表面涂覆碳化钛纳米材料	20 次洗涤循环,洗涤温度 30~80 ℃	线性电阻增加约 3%

#### 4 纺织信号传输线的发展趋势与展望

纺织信号传输线是电子纺织品创新的重要组成部分。已有许多研究在开发符合穿戴标准且舒适性好、信号传输质量佳的传输线方面取得了技术突破。随着可穿戴设备信息化程度的提升,信号传输线要应对日益复杂的系统和多变的应用环境,因此,功能集成化和智能化将成为未来主要的发展方向,具体可从以下几个方面来实现。

1) 综合考虑材料与电子元器件的集成度,有效提高传输线的数据传输速率、减小能量损耗、增强抗干扰能力等,同时实现更加复杂的功能,如创建自愈合电子线路,或能自动识别、调节或优化信号传输等的传输线,提升用户体验和应用效果。

2) 柔软且信号传输质量佳的传输线与互连技术的兼容性也是一项亟待解决的问题。需采用先进的材料技术实现交互功能,同时提升传输线的可穿戴性,满足不同场景的需求和使用,拓展可穿戴产品的应用。

3) 近年,传输线在制备技术方面虽取得了重大进展,但应用时仍面临耐用性、耐洗性、稳定性等方面挑战。可利用可拉伸、可洗涤且耐磨的材料提高

产品的耐用性和稳定性,优化传输线结构,扩大其应用范围。

4) 未来电子纺织品的发展应更多地考虑环保和可持续等因素。可选择合适的能源供给设备,并结合先进的能源技术,如利用风能、太阳能等可再生能源,减少对环境的影响。

总之,依托导电材料和柔性基材的纺织信号传输线,在满足智能纺织品和电子设备的信号传输方面具有相当大的发展潜力,智能化、高性能化、可持续化和多功能化必将是其未来的主要发展趋势。与此同时,在人工智能和可穿戴设备日益融合的背景下,未来传输线除了传输信号外,还应涵盖更多的功能。如何解决多功能电子元件的集成与组装问题,实现人机交互,优化传输线弹性以更好地适应穿戴需求等,都将是今后研究的方向。



期刊采编平台



中国知网下载

#### 参考文献

[1] COTTET D, GRZYB J, KIRSTEIN T, et al. Electrical



- characterization of textile transmission lines [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2003, 26(2): 182-190.
- [ 2 ] DECLERCQ F, ROGIER H. Characterization of electromagnetic properties of textile materials for the use in wearable antennas [C] // *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. New York: IEEE, 2009: 1-4.
- [ 3 ] LEŚNIKOWSKI J. Analysis of characteristic impedance of microstrip and coplanar textile signal lines [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2021, 112(5): 828-836.
- [ 4 ] XU Z, KAUFMANN T, FUMEAUX C. Wearable textile shielded stripline for broadband operation [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, 24(8): 566-568.
- [ 5 ] JOSHI R, PODILCHAK S K, CONSTANTINIDES C, et al. Design and test of wearable textile-based transmission lines [C] // *Proceedings of the 51st European Microwave Conference (EuMC)*. New York: IEEE, 2022: 393-396.
- [ 6 ] LEE H, IM H B, ROH J S. Design and fabrication of signal and power transmission textile cable for smart wearables [J]. *Fashion & Textile Research Journal*, 2018, 20(5): 616-620.
- [ 7 ] 周宏, 杨旭东, 陈晓, 等. 信息化服装关键技术研究进展 [J]. *产业用纺织品*, 2010, 28(8): 1-7, 21.
- [ 8 ] 江涵洋, 杨旭东, 胡吉永. 电子织物信号传输电缆扁平化可拉伸织带结构设计及性能评价 [J]. *产业用纺织品*, 2023, 41(9): 23-29.
- [ 9 ] KURT S A, YANG X, HO J S. Wirelessly powered sensor network for high data rate, continuous health monitoring [C] // *Proceedings of the Wireless Power Week (WPW)*. New York: IEEE, 2022: 227-230.
- [ 10 ] POTDAR V, SHARIF A, CHANG E. Wireless sensor networks: a survey [C] // *Proceedings of the International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. New York: IEEE, 2009: 636-641.
- [ 11 ] PARADISO R, LORIGA G, TACCINI N. A wearable health care system based on knitted integrated sensors [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2005, 9(3): 337-344.
- [ 12 ] LIN C C, YANG C Y, ZHOU Z H, et al. Intelligent health monitoring system based on smart clothing [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2018, 14(8): 155014771879431.
- [ 13 ] PANDIAN P S, MOHANAVELU K, SAFEER K P, et al. Smart vest: wearable multi-parameter remote physiological monitoring system [J]. *Medical Engineering & Physics*, 2008, 30(4): 466-477.
- [ 14 ] 王慧玲, 唐虹, 高强, 等. 基于心电信号采集的监护服用电子织物研究 [J]. *丝绸*, 2018, 55(9): 57-61.
- [ 15 ] 张丽娜. 织物基温度传感器的制备与性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2018.
- [ 16 ] 高玥, 孟粉叶, 童杨, 等. 基于柔性纺织传感器的睡眠质量监测技术 [J]. *纺织导报*, 2023(3): 87-88.
- [ 17 ] HEILMAN K J, PORGES S W. Accuracy of the LifeShirt® (Vivometrics) in the detection of cardiac rhythms [J]. *Biological Psychology*, 2007, 75(3): 300-305.
- [ 18 ] ANLIKER U, WARD J A, LUKOWICZ P, et al. AMON: a wearable multiparameter medical monitoring and alert system [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2004, 8(4): 415-427.
- [ 19 ] 姚欢. 基于单片机的心电实时监测系统的设计与实现 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [ 20 ] 林璐, 孙吉海, 李莉莉. 方平组织导电面料的设计与心电监测 [J]. *上海纺织科技*, 2022, 50(5): 13-16.
- [ 21 ] ETANA B B, MALENGIER B, KWA T, et al. Evaluation of novel embroidered textile-electrodes made from hybrid polyamide conductive threads for surface EMG sensing [J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4397.
- [ 22 ] GOVERDOVSKY V, LOONEY D, KIDMOSE P, et al. In-ear EEG from viscoelastic generic earpieces: robust and unobtrusive 24/7 monitoring [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(1): 271-277.
- [ 23 ] SHU L, XU T Y, XU X M. Multilayer sweat-absorbable textile electrode for EEG measurement in forehead site [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(15): 5995-6005.
- [ 24 ] CHEN Y, FU X, KANG S, et al. Strategy of fabricating flexible strain sensor via layer-by-layer assembly of conductive hydrogels [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(9): 3889-3897.
- [ 25 ] HEO J S, SHISHAVAN H H, SOLEYMANPOUR R, et al. Textile-based stretchable and flexible glove sensor for monitoring upper extremity prosthesis functions [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(4): 1754-1760.
- [ 26 ] CHENG Y, WANG R R, SUN J, et al. A stretchable and highly sensitive graphene-based fiber for sensing tensile strain, bending, and torsion [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(45): 7365-7371.
- [ 27 ] WANG Z, ZHANG Y D, YANG S L, et al. (K, Na) NbO<sub>3</sub> nanofiber-based self-powered sensors for accurate

- detection of dynamic strain[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(8): 4921-4927.
- [28] YAMASHITA T, TAKAMATSU S, OKADA H, et al. Piezoelectric strain sensor array fabricated by transfer printing methods [C] // *Proceedings of the IEEE SENSORS*. New York: IEEE, 2015: 1-4.
- [29] ISLAM M R, AFROJ S, NOVOSELOV K S, et al. Smart electronic textile-based wearable supercapacitors [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(31): e2203856.
- [30] GORLICK M M. Electric suspenders: a fabric power bus and data network for wearable digital devices[C]// *Proceedings of the Digest of Papers. Third International Symposium on Wearable Computers*. New York: IEEE, 1999: 114-121.
- [31] RANTANEN J, ALFTHAN N, IMPIO J, et al. Smart clothing for the Arctic environment[C]//*Proceedings of the Digest of Papers. Fourth International Symposium on Wearable Computers*. New York: IEEE, 2000: 15-23.
- [32] PU X, LI L X, LIU M M, et al. Wearable self-charging power textile based on flexible yarn supercapacitors and fabric nanogenerators [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(1): 98-105.
- [33] 孙悦, 范杰, 王亮, 等. 可穿戴技术在纺织服装中的应用研究进展[J]. *纺织学报*, 2018, 39(12): 131-138.
- [34] 房翔敏, 曲丽君, 田明伟. 绒面织物基摩擦电式压力传感器的制备及其应用[J]. *现代纺织技术*, 2023, 31(4): 183-191.
- [35] VALENTI S, ZAFAR H, PERNICE R, et al. Feasibility of conductive embroidered threads for I<sup>2</sup>C sensors in microcontroller-based wearable electronics [J]. *Flexible and Printed Electronics*, 2023, 8(1): 015016.
- [36] FERNÁNDEZ-GARCÍA R, GIL I, CANO F. Experimental evaluation of electrical properties of fabrics elaborated with conductive yarns [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2016, 30(2): 272-279.
- [37] POST E R, ORTH M, RUSSO P R, et al. E-broidery: design and fabrication of textile-based computing [J]. *IBM Systems Journal*, 2000, 39(3/4): 840-860.
- [38] MORADI B, FERNÁNDEZ-GARCÍA R, GIL I. E-textile embroidered metamaterial transmission line for signal propagation control [J]. *Materials*, 2018, 11(6): 955.
- [39] VOLAKIS J L, ZHANG L L, WANG Z Y, et al. Embroidered flexible RF electronics[C]//*Proceedings of the IEEE International Workshop on Antenna Technology* (iWAT). New York: IEEE, 2012: 8-11.
- [40] 王蕊, 胡吉永, 张慧萍, 等. 工艺参数对织物基刺绣传输线的直流电阻的影响 [J]. *产业用纺织品*, 2016, 34(5): 6-11.
- [41] LOCHER I, TRÖSTER G. Screen-printed textile transmission lines[J]. *Textile Research Journal*, 2007, 77(11): 837-842.
- [42] KIM Y, KIM H, YOO H J. Electrical characterization of screen-printed circuits on the fabric[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2010, 33(1): 196-205.
- [43] MERRITT C R, KARAGUZE B, KANG T H, et al. Electrical characterization of transmission lines on nonwoven textile substrates[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2005, 870(1): 47.
- [44] LEŚNIKOWSKI J. New kind of textile transmission line with an impedance of 50 Ohms [J]. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2015, 23(2): 51-54.
- [45] DANIEL I H, FLINT J A, SEAGER R. Stitched transmission lines for wearable RF devices[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(5): 1048-1052.
- [46] NIU L, WANG J, WANG K, et al. High-speed sirospun conductive yarn for stretchable embedded knitted circuit and self-powered wearable device [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2023, 5(1): 154-167.
- [47] ATALAY O, KALAOGLU F, KURSUN BAHADIR S. Development of textile-based transmission lines using conductive yarns and ultrasonic welding technology for e-textile applications [J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2019, 14: 155892501985660.
- [48] LEŚNIKOWSKI J. Research into the textile-based signal lines made using ultrasonic welding technology [J]. *Autex Research Journal*, 2022, 22(1): 11-17.
- [49] NOWAK I, KRUCIŃSKA I, JANUSZKIEWICZ Ł. Metallic electroconductive transmission lines obtained on textile substrates by magnetron sputtering [J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2019, 27(3): 51-57.
- [50] LEŚNIKOWSKI J, KUBIAK P. Changes in the characteristic impedance of textile signal lines while mechanically loaded [J]. *Autex Research Journal*, 2019, 19(4): 375-380.
- [51] LEŚNIKOWSKI J. Effect of cyclical bending and rubbing on the characteristic impedance of textile signal lines[J]. *Materials*, 2021, 14(20): 6013.
- [52] KUBIAK P, LEŚNIKOWSKI J. Influence of mechanical deformations on the characteristic impedance of sewed

- textile signal lines[J]. *Materials*, 2022, 15(3): 1149.
- [53] LEŚNIKOWSKI J, TOKARSKA M. Modeling of selected electric properties of textile signal lines using neural networks[J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(3): 290-302.
- [54] LIEW E, MALAYSIA M C F, MALAYSIA S A, et al. Signal transmission loss due to copper surface roughness in high-frequency region [C] // IPC APEX EXPO Conference Proceedings, 2014.
- [55] TAYLOR L W, WILLIAMS S M, YAN J S, et al. Washable, sewable, all-carbon electrodes and signal wires for electronic clothing[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(17): 7093-7099.
- [56] YANG Y, CHO G. Novel stretchable textile-based transmission bands: electrical performance and appearance after abrasion/laundry, and wearability [C] // International Conference on Human-Computer Interaction. Berlin: Springer, 2009: 806-813.
- [57] ATAKAN R, ACIKGOZ TUFAN H, ZAMAN S U, et al. Protocol to assess the quality of transmission lines within smart textile structures[J]. *Measurement*, 2020, 152: 107194.
- [58] CHEDID M, BELOV I, LEISNER P. Experimental analysis and modelling of textile transmission line for wearable applications [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2007, 19(1): 59-71.
- [59] ZAMAN S U, TAO X, COCHRANE C, et al. Market readiness of smart textile structures-reliability and washability [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 459: 012071.
- [60] UZUN S, SEYEDIN S, STOLTZFUS A L, et al. Knittable and washable multifunctional MXene-coated cellulose yarns [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(45): 1905015.

## 《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,月刊,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,报道相关领域的新产品、新材料、新技术及新设备,并介绍相关的专利、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行业相关企业工程技术人员、纺织高等院校师生、科研人员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、2024年重点选题方向

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;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。