

可穿戴织物基射频能量收集整流器的研究进展

付毅^{a,b} 郑聪^{a,b} 胡吉永^{a,b}

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: 现有印刷电路板整流器因硬质厚重的缺点而无法满足柔性可穿戴射频能量收集 (RFEH) 系统的应用需求, 电子纺织品为其提供了新方法。综述了织物基整流器的设计、制备与性能评价方法, 聚焦其在 RFEH 方面的应用。总结整流器的工作原理、结构 (包括传输线、阻抗匹配网络、整流电路) 及织物材料 (电介质与导体)。制备方法涵盖刺绣、丝网印刷、喷墨打印、金属化织物等工艺。性能评价不仅关注整流效率, 还涉及系统集成与穿戴试验。未来研究应聚焦以织物为基底开发柔性高效整流器, 创新材料工艺与结构设计, 以满足可穿戴应用场景需求; 同时, 需探索柔性连接与电子元件技术, 提升多频段射频电路处理能力。

关键词: 织物基整流器; 射频能量收集; 可穿戴; 柔性; 舒适性

中图分类号: TS 101.8

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)08-0001-09

Research progress of wearable fabric based radio frequency energy harvesting rectifiers

Fu Yi^{a,b}, Zheng Cong^{a,b}, Hu Jiyong^{a,b}

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

Abstract: Existing printed circuit board rectifiers cannot meet the application requirements of flexible wearable radio frequency energy harvesting (RFEH) systems due to their rigid and thick drawbacks, and e-textiles provide a new approach. The design, preparation and performance evaluation methods of textile-based rectifiers were reviewed, focusing on their application in RFEH. The working principle, structure (including transmission lines, impedance matching networks, rectifier circuits) and fabric materials (dielectrics and conductors) of rectifiers were summarized. Preparation methods covered processes such as embroidery, screen printing, inkjet printing, and metallized fabrics. Performance evaluation focused on rectification efficiency, system integration and wear tests. Future research should focus on the development of flexible and efficient rectifiers based on fabrics, innovative material processes and structural designs to meet the needs of wearable application scenarios. It was necessary to explore the flexible connection and electronic component

基金项目: 上海市自然科学基金 (22ZR1400800)

收稿日期: 2024-06-14

作者简介: 付毅, 男, 2000 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电子纺织品

通信作者: 胡吉永, 教授, hujy@dhu.edu.cn

technology to improve the multi-band radio frequency circuit processing capability.

Keywords: fabric based rectifier; radio frequency energy harvesting; wearable; flexible; comfortable

随着人们对随时随地访问电子功能需求的提升,可穿戴电子纺织品^[1]成为研究重点。可穿戴电子纺织品兼具电子产品和舒适服装的功能,有望消除各种医疗^[2]、军事^[3]、通信^[4]和娱乐应用中长期检测、传感和能源等方面的技术障碍^[5]。对于可穿戴电子设备而言,使用传统电源即化学电池需定期更换或充电,维护成本高并且笨重^[6]。为此,研究人员不断探索新型能源方案,以降低维护成本,并实现可穿戴设备的自我可持续性^[7]。

作为一种适合可穿戴应用的环境能源,射频能量收集(radio frequency energy harvesting, RFEH)一直备受关注。RFEH是指将环境的射频电磁能量转换为电能^[8],实现远距离的能量传输。无线信号源(如AM/FM收音机、蜂窝网络、Wi-Fi信号和数字/模拟电视)的指数级增长使得射频(radio frequency, RF)能量成为一种出色的环境能源^[9-10]。尽管出于保护人体健康的考虑,公众环境射频暴露的功率密度被限制在 0.4 W/m^2 以内^[11],但低功耗的可穿戴传感器^[12-13]与物联网设备^[14-15]仍能从中受益,这些设备的功耗范围覆盖pW级至mW级。与光能、机械能、热能等环境能源相比,RF能量具有不间断供应的优势。RF信号还能穿透障碍物,如不透明的墙壁或封闭的空间。此外,RFEH系统的小巧和轻便特性使其能够实现便携式和可穿戴应用^[16-20]。但环境中的RF能量密度较低,限制了输出功率^[21],对此,已有研究提出通过设计天线矩阵和添加电源管理等措施改善输出功率。

RFEH系统核心组件包括接收天线、匹配网络、整流电路和功率管理单元等^[5],如图1所示。匹配网络和整流电路通常一并考虑设计,称为整流器。接收天线负责捕获自由空间中的RF能量,然后将其传递给负责RF和直流电(DC)能量转换的整流器,最后整流电路将DC功率通过功率管理单元输出到负载上。RFEH的性能在一定程度上取决于整流器的整流效率^[22],因此,整流器在可穿戴RFEH系统中是至关重要的。典型的RFEH整流器由印刷电路板(PCB)制成,但刚性及质量限制了其在可穿戴设备中的应用。为克服这些限制,纺织基整流

器^[16-20]应运而生,并以其固有的柔性和舒适性成为可穿戴RFEH系统的理想组件。新型织物基整流器主要由纺织材料制成,可以无缝集成到服装中,实现良好的整流性能。本文介绍整流器的工作原理及结构,讨论织物基整流器的制备材料及工艺,对比现有织物基整流器的研究进展,做出总结与展望。

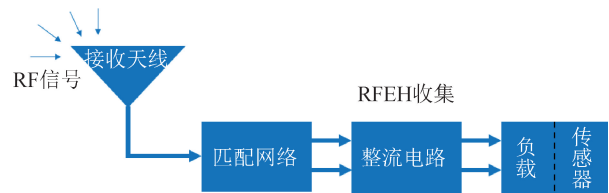


图1 RFEH系统的组成

Fig. 1 Composition of RFEH system

1 整流器的工作原理及结构

整流器由传输线和二极管等电子元件构成,其工作原理在于,利用传输线输送RF信号,阻抗匹配网络(协调天线与整流电路间的阻抗)确保RF信号完整地输入整流电路,整流电路进而将方向不断变化的交流电信号转换为单向的脉冲DC,以供负载使用^[23]。

1.1 传输线

传输线负责传输RF信号^[24]。根据形态结构的不同,其可分为一维(线形)和二维(平面)传输线。二维传输线因更易于与元件集成及进行阻抗匹配设计,故在织物基整流器的结构设计中更为适用。图2展示了几种常见的传输线结构。

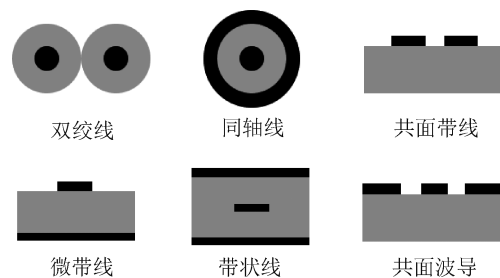


图2 常见的传输线结构

Fig. 2 Common transmission line structures

1.2 阻抗匹配网络

阻抗匹配网络使天线输入阻抗 Z_0 与整流电路

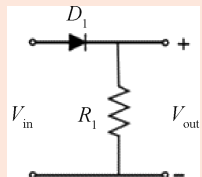
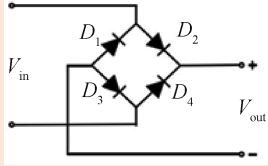
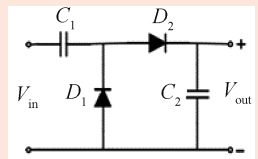
阻抗 Z_L 匹配,实现特定频率的谐振,工作原理如图 3 所示。阻抗匹配直接影响能量传输效率。对于织物基整流器而言,分布式阻抗匹配由于无需刚性元件,更适合柔性化制备。然而,设计高效的阻抗匹配网络极具挑战性,因为整流器的输入阻抗取决于输入信号的频率和功率,而环境中的瞬时 RF 信号又在不断变化,甚至有人建议取消匹配电路^[25]。

1.3 整流电路

整流电路按整流方式可分为半波整流、桥式整流和倍压整流^[23],3 种整流方式的对比列于表 1。

表 1 典型整流电路的特征对比

Tab. 1 Comparison of the characteristics of typical rectifier circuits

整流方式	结构示意图	整流效率	输出电压	结构复杂程度
半波整流电路		低	低	简单
桥式整流电路		高	低	一般
倍压整流电路		高	高	一般

2 织物基整流器的材料

在利用纺织材料构建织物基整流器的过程中,电介质与具有导体属性的纺织品扮演着核心角色。相比传统 PCB,硬质的玻纤基板被传统的织物替代,具有电介质和电绝缘作用;铜线则由导电纱线、导电油墨等替代,用于传输电磁波。此外,整流器还可能涉及焊锡、二极管、电容等非纺织材料,本文暂不讨论。

2.1 电介质材料

电介质材料具有防止导体间漏电以及在电场条件下储存(或消耗)电能的重要作用^[26]。电介质材料的特性(即介电常数和损耗角正切)主要影响传输电路的阻抗匹配,决定织物基整流器的性能。在

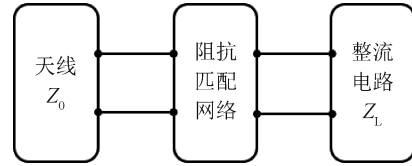


图 3 阻抗匹配工作原理

Fig. 3 Working principle of impedance matching

倍压整流电路和桥式整流电路通常适用于织物基整流器,因为它们能够实现电路复杂性和整流效率之间的良好折中,倍压整流电路还可实现更高的输出电压。

织物基整流器的开发中,电介质织物基材往往要求具有:1)较高的介电常数,满足电路小型化的要求;2)低损耗,介质损耗角正切小;3)稳定的介电常数,在给定的频率、温度和湿度范围内。表 2 列出了几种常见的织物基材和 FR4 环氧玻纤板的性能参数。

表 2 常见电介质材料的性能参数

Tab. 2 Properties of common dielectric materials

材料	表征频率/ GHz	介电 常数	损耗角 正切	参考 文献
棉	1.10	2.20	0.120	[27]
涤纶	2.26	1.55	0.009	[28]
牛仔布	0.89	1.67	0.023	[16]
毛毡	2.45	1.25	0.030	[19]
FR4 环氧玻纤板	—	4.50	0.035	[29]

2.2 导体材料

导体材料用来制作电路,具有传输电信号的重要作用。因为较高的电导率可以降低导体相关的损耗^[30-31],电导率的改善也一直是电子纺织材料的主要研究方向。用于织物基整流器的导体材料主要有导电纱线、导电织物和导电油墨等。表3列出了几种常见导体材料的性能参数。

表3 常见导体材料的性能参数

Tab. 3 Properties of common conductor materials

材料	电导率/ ($10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$)	薄层电阻/ [$\Omega\cdot(\text{sq})^{-1}$]	参考文献
铜丝	6.000	—	[32]
银丝	6.300	—	[32]
镀铜尼龙织物	0.417	0.03	[30]
镀银尼龙织物	—	0.009	[33]
导电油墨	—	0.15~0.23	[34]
导电银浆	5.410	—	[35]

3 织物基整流器的制备方法

电子织物发展的初期,织物仅作为承载结构,电子设备常以贴附、织物口袋等形式与织物集成。随着纺织材料和生产工艺的进步,织物可提供电学和机械连接^[36]。目前,制备可穿戴织物基整流器的工艺集中于利用纺织工艺在织物基底上制备电路,如刺绣、丝网印刷、喷墨打印、金属化织物等,再将相应的电子元件连接在电路上。织物基整流器制备工艺的首要条件是具备良好的导电性,从而在满足RF能量传输的同时降低电路的损耗。同时,整流器在应用于可穿戴系统时,应保持织物的柔韧、舒适等特性。此外,整流器的传输电路还要求具有较高的分辨率以实现精确的电路设计。

3.1 织物电路制备工艺

3.1.1 刺绣

刺绣法利用刺绣机将导电纱线紧密重叠地缝合在织物基底上,形成电路图案,如图4所示。导电纱线通常为导电金属丝或金属化纱线。刺绣法制备电路的优点是工艺简单、灵活度高,易于获得复杂电路图案和优异导电性能。但是紧密的刺绣纱会损害织物原本的柔韧性,在一定程度上限制其应用范围。Kiourti等^[37]利用新型导电纱线和工艺使电路精度达到0.1 mm,更细的纱线实现了更好的柔韧性和良好的RF性能。Zhang等^[38]介绍了一种刺绣导电复

合纤维的新型柔性共形RF电路技术,具有比传统铜材更好的柔韧性,制成的传输线电气性能优异,其插入损耗仅比铜材传输线高0.07 dB/cm。张亚亚^[39]采用刺绣技术制备织物微带线,发现刺绣工艺参数影响微带线电学及信号传输性能,并且论证了刺绣型微带线50 Ω 特性阻抗的可行性。

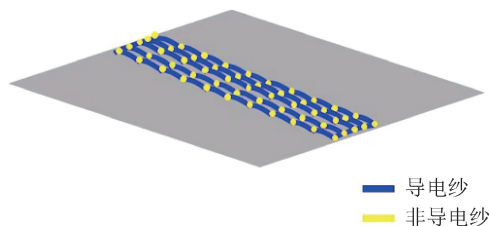


图4 刺绣制备织物电路

Fig. 4 Embroidery for manufacturing fabric circuit

3.1.2 丝网印刷

丝网印刷是一种快速简单的织物电路制备方法,其利用刮板将导电浆料透过印版的网孔印刷在织物上,如图5所示。印制电路的印刷精度及边缘清晰度主要取决于织物表面的粗糙度和孔隙率,对织物基材的表面形态要求较高。此外,印刷过程中存在的刮板压力会导致导电浆料被挤压渗透到织物结构中,影响其电学性能。Locher等^[40]首次使用丝网印刷方法将导电银膏印在腈纶-棉交织物上,该织物组织紧密且不含有网孔,实现了良好的印刷效果,制得的传输线表面电阻低至0.1 Ω/sq 。涂华婷^[41]研究发现提高丝网印刷精度和质量能有效改善丝网印刷微带电路的电学性能及高频信号传输性能。谢森培^[35]通过改善织物的表面粗糙度来优化印刷效果,采用聚乙烯醇/聚氯乙烯(PVA/PVC)对织物基底进行改性处理再印刷导电银浆,所得电路电阻率达 $1.85 \times 10^6 \text{ S/m}$,并且实现了微米级的印刷精度。

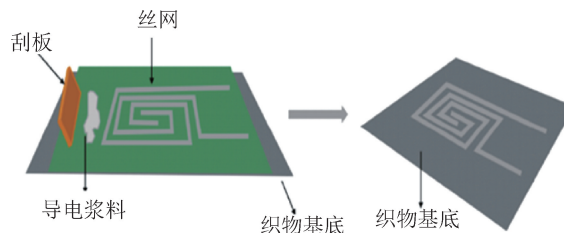


图5 丝网印刷制备织物电路

Fig. 5 Screen printing for manufacturing textile circuits

3.1.3 喷墨打印

喷墨打印是一种将导电油墨喷射到织物基板上

形成电路的快速增材制造方法,如图 6 所示。打印图案直接由计算机预先设计,无需使用掩模或后续蚀刻工艺。喷墨打印电路的分辨率同样受织物表面粗糙度和与孔隙率的影响,且烧结工艺会损害织物本身的柔韧性。为防止喷嘴堵塞,要求使用黏度较低的油墨,而油墨电导率一般取决于其中导电材料颗粒的含量。Shahariar 等^[42]以机织物、针织物及非织造布为基底,采用喷墨打印技术制备电路,发现喷墨打印电路的导电性和分辨率与织物结构及纤维的堆积和密度有紧密联系。Stempien 等^[34]采用含银离子的低温烧结油墨,在织物衬底上喷墨沉积银导电层,织物电路表面电阻为 $0.15 \sim 0.23 \Omega/\text{sq}$ 。Huang 等^[43]通过对喷墨施加外加静电场力,提出电喷印技术,克服了高黏度溶液堵塞喷嘴和现有打印设备分辨率受限等固有问题。

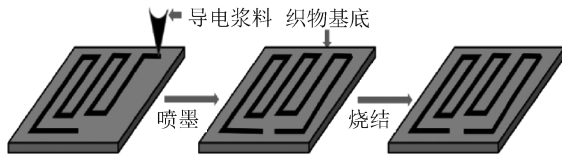


图 6 喷墨打印制备织物电路
Fig. 6 Ink jet printing for manufacturing textile circuits

3.1.4 金属化织物

金属化织物指在非金属织物表面,以化学镀、涂层或磁控溅射等方法复合薄层金属,使其具有金属的导电等性能。金属化织物具备优异的导电性能,但无法直接在织物上设计电路,可通过机器切割成具有一定形状与分辨率的织物电路^[16,19]。织物表面直接金属化仍存在很多问题,如工艺复杂,镀层与织物的结合牢度低等。Wang 等^[44]采用牛血清白蛋白对织物表面进行改性处理,改变导电涂层与织物基材的黏附强度,制得的织物电阻低至 1.6Ω 。Peng 等^[45]对涤纶织物进行激光预处理,再利用磁控溅射技术在织物表面镀覆铜膜,所得铜膜与织物的结合牢度得到显著提高,表面电阻低至 $0.239 \Omega/\text{sq}$ 。

3.2 织物基整流器的制备工艺

Monti 等^[16]提出一种超高频纺织基整流天线的制备方法。其中整流器采用微带线结构,通过切割镀铜尼龙非织造布制成电路,并粘贴在牛仔布基底上,如图 7 所示。作为导体的尼龙非织造布是一种低成本的镀铜导电织物,表面电阻为 $0.04 \Omega/\text{sq}$,且

能够以切割方式实现复杂的几何形状;同时,镀铜织物可通过锡焊将集总元件安装到微带线上。虽然镀铜织物电路的导电性能优秀,但其柔韧性较差,制备工艺复杂,并且三明治结构的整流器设计也使其显得厚重笨拙。

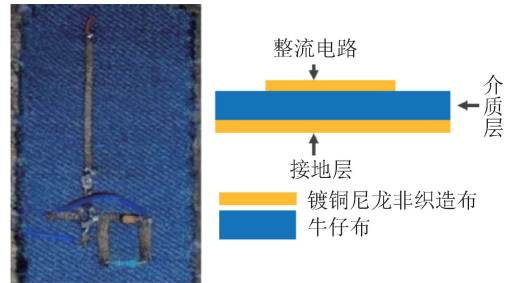


图 7 基于牛仔布的整流器
Fig. 7 Denim based rectifier

Vital 等^[17]设计了一种基于纺织品的可穿戴整流器,采用微带线结构将镀银铜丝刺绣在欧根纱织物上构成电路,集总元件则焊接在刺绣电路上,如图 8 所示。此设计使得电路的损耗性能与硬质电路板的相当。同时,通过调整传输线长度,整流器实现了驻波,并且仅用 1 个二极管即可实现最高 70% 的整流效率。但是,导电纱刚性较大且刺绣增加了织物的厚度和密度,这导致整流器的柔韧性受到影响。

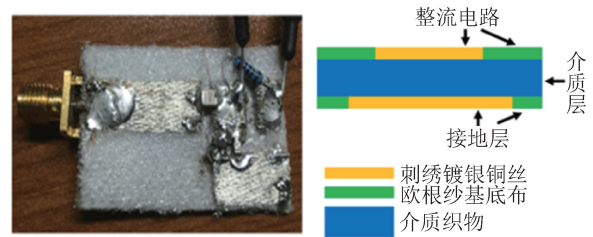


图 8 刺绣法织物基整流器及其结构和材料
Fig. 8 Embroidery fabric based rectifier and its structure and materials

Estrada 等^[18]提出一种在棉 T 恤上丝网印刷导电油墨的紧密耦合的单二极管整流天线阵列,如图 9 所示。每个阵列单元馈电通过银漆和焊料连接到封装的肖特基二极管上,此设计简化了整流电路。整流天线阵列在高入射功率密度下实现了 32% 的最大能量转换效率。为解决织物表面难以直接焊接贴片二极管,或需要通过导电环氧树脂附着在导电油墨上的问题,先将导电银涂料涂覆于油墨上,固化后再行焊接。尽管利用天线阵列实现了更高的输出功率,但刚性元件数量的增加影响了整体的柔性,并

导致更大的能量损耗。

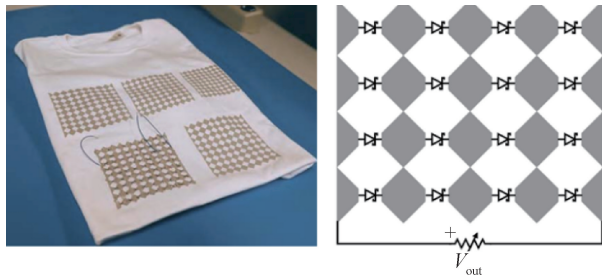


图9 棉T恤上丝网印刷的整流天线及其结构示意图
Fig. 9 Screen printed rectifier antenna on cotton T-shirt and the antenna structure

Lopez-Garde 等^[19]以毛毡为电介质层、镀铜涤纶塔夫绸(涂覆纯铜的平纹机织物)为导电层,结合微带线结构焊接集总元件,从而搭建了织物基整流器,如图10所示。镀铜涤纶塔夫绸在2.45 GHz下的表面电阻为0.05 Ω/sq,面密度约为80 g/m²。毛毡在2.45 GHz下的介电常数和损耗角正切分别为1.25和0.003,实现了较低的传输损耗。该整流器通过传输线阻抗匹配减少了刚性元件的使用,并采用倍压整流电路最大化直流输出电压。



图10 基于毛毡的整流器
Fig. 10 Rectifier based on felt

Wagih 等^[20]采用光刻技术在厚度小于50 μm的单面聚酰亚胺铜层压板上制备了采用共面波导(CPW)的整流器,并将其集成在织物口袋中,如图11所示。这种集成技术增强了电路对弯曲和洗

涤的适应性,同时不影响舒适性,但结构复杂。柔性聚酰亚胺铜层压板可承受高达400 °C的温度,因此高温焊接可用于SMA接头和集总元件。此外,整流器的共面波导结构使得中心导体、接地导带和集总元件处于同一平面,为织物基整流器实现小型化和结构简化提供了思路。但是聚酰亚胺基材限制了整流器的柔韧性和舒适性,不利于可穿戴应用。

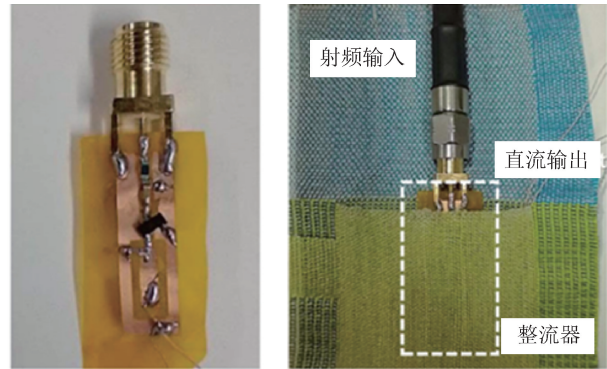


图11 基于聚酰亚胺的整流器及其在织物口袋中的集成
Fig. 11 Rectifier based on polyimide and its integration in a fabric pocket

上述织物基整流器的各项参数对比列于表4。织物基整流器的研究聚焦于结构设计与制备工艺。结构设计旨在提高整流器的柔性以满足可穿戴应用,这主要取决于传输线的类型,传输线决定了导电层与介质层的分布;制备工艺则需兼顾电路设计的精准性和低损耗特性,同时需降低工艺难度。总体而言,织物基整流器仍面临结构复杂、柔性较差等问题,这阻碍了可穿戴RFEH系统中织物基整流器的应用与发展。

表4 织物基整流器的参数对比

Tab. 4 Comparison of parameters for fabric based rectifiers

参考文献	工作频率/GHz	导体材料	电介质基底	制备工艺	传输线	阻抗匹配	整流电路	能量转换效率/%
[16]	0.876	镀铜尼龙非织造布	牛仔布	切割	微带线	分布式	桥式	50
[17]	2.450	镀银铜丝	欧根纱织物	刺绣	微带线	分布式	半波	70
[18]	2.000~5.000	导电油墨	棉布	丝网印刷	—	—	半波	32
[19]	2.450	镀铜涤纶塔夫绸	毛毡	切割	微带线	分布式	倍压	56
[20]	0.915	铜箔	聚酰亚胺	光刻	共面波导	集总元件	倍压	80

4 织物基整流器的性能评价

整流器的性能评价指标包括回波损耗、输出电压和能量转换效率等。能量转换效率是衡量整流器性能最重要的指标,但不同研究中的指标名称及其定义存在差异。例如:整流效率特指整流器输出的直流功率与输入整流器的信号功率之比;RF-DC 转换效率指整流器输出功率与天线接收的 RF 信号功率之比。整流器的性能评价除需单独对其整流效率进行测试外,还应将整流器集成到 RFEH 系统中联合织物基天线和织物基超级电容器进行试验。为验证织物基整流器的可穿戴特性,性能评价还应涵盖柔性测试及人体穿戴试验^[18,20]。

Monti 等^[16]将可穿戴天线和织物基整流器集成,测试其在不同 RF 输入信号频率下 RF-DC 转换效率,结果显示可穿戴整流天线在 876 MHz 时达到最大 RF-DC 转换效率(约 50%)。Lopez-Garde 等^[19]将织物基整流器和织物天线集成并建立串联 4 个整流天线的阵列,该阵列在 2.40 GHz 频段测得的平均直流功率为 14 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,射频输入功率密度为 1.1 mW, RFEH 转换效率为 31%,且倍压电路提高了输出电压;此外,输出功率相比单个整流天线呈倍数增加,而 RFEH 转换效率未发生明显变化。Wagih 等^[20]将制备的柔性 PCB 整流器隐藏在织物口袋中,并置于人体手臂上进行测试,得到最大 75%的整流效率;该整流器还可承受至少 200 次弯曲循环,且不影响 DC 输出。整流器连接天线后和织物基超级电容器组成集成模块,结果显示,在距离射频发射器 2.2 m 处 3 min 内,电容器中存储的能量约为 28 mJ,集成模块的能量转换效率约为 35%。

5 总结与展望

现有研究在制备织物基整流器时为保持优异的整流性能,会在一定程度上牺牲可穿戴特性。同时,织物基整流器亟需更多针对可穿戴特性表征和应用场景的试验测试。在结构设计上,当前搭建织物基整流器的思路局限于复刻印刷电路板的结构,但这种简单复刻无法满足实际应用需求。织物基整流器应尽量避免采用打孔、多层等结构简化方式。未来

研究应聚焦在以织物为基底搭建柔性高效整流器的材料工艺及结构设计方面,以使其更适用于可穿戴的应用场景。

除了提高织物电路的柔韧性和电学性能,已报道的织物基整流器原型多采用市售刚性二极管等电子元件,元件的连接多采用传统的锡焊,但这限制了其柔韧性和共形性。因此,实现高效整流的柔性(尤其是纺织品基产品)连接以及电子元件技术成为未来工作的又一重点。

为提高可穿戴 RFEH 系统的能量收集效率,材料研发和整流器的电子设计需并进。因现有射频频段的数量不可预测,射频电路需收集所有潜在的射频能量。未来整流器需处理来自多个频段的功率,输出功率也会随着射频频段数量的增加而增加。

鉴于织物基整流器主要应用于可穿戴 RFEH 系统,因此织物基整流器穿戴于人体时的实用性能极其重要。这包括人体对织物基整流器产生干扰造成的损耗,实际穿戴时弯曲拉伸对整流器性能的影响,以及织物吸湿改变基材的介电常数进而对整流性能产生的影响等。已有研究测试了整流器穿戴于人体时的性能,但织物弯曲、吸湿等特性对整流器的影响尚未讨论。

织物基无线能量采集器及集成纺织品的美观性亦不容忽视。作为服装产品,美观设计必不可少,但在可穿戴电子产品的早期开发中常被忽视。纺织品因其柔韧、轻质、透气的特性,是制备兼具舒适性和美观性的织物基整流器的理想材料。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 王春红,王瑞,于飞. 智能电子纺织品及其应用[J]. 产业用纺织品,2006,24(2):41-43.
- [2] 魏乐倩,李沂蒙,蓝丽珍,等. 导电高分子膜材料制备及其生物医用研究进展[J]. 东华大学学报(自然科学版),2021,47(3):1-11.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] ULLAH M D A, KESHAVERZ R, ABOLHASAN M, et al. A review on antenna technologies for ambient RF energy harvesting and wireless power transfer: designs, challenges and applications[J]. IEEE Access, 2022, 10:17231-17267.
- [6] BITO J, RYAN B, HESTER J G, et al. A novel solar and electromagnetic energy harvesting system with a 3-D printed package for energy efficient internet-of-things wireless sensors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(5):1831-1842.
- [7] KAZMIERSKI T J, BEEBY S. Energy harvesting systems: principles, modeling and applications[M]. New York: Springer New York, 2011.
- [8] YUSUKE Y. Textile materials for wireless energy harvesting[J]. Electronic Materials, 2022, 3(4): 301-331.
- [9] TRAN L G, CHA H K, PARK W T. RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications[J]. Micro and Nano Systems Letters, 2017, 5(1):1-16.
- [10] SHAFIQUE K, MAHMOOD K B, KHURRAM M D, et al. Energy harvesting using a low-cost rectenna for internet of things (IoT) applications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 30932-30941.
- [11] 环境保护部辐射环境检测技术中心. 电磁环境控制限值: GB 8702—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 6.
- [12] LEE J, CHO S. A 1.4 μW 24.9 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ current reference with process-insensitive temperature compensation in 0.18 μm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012, 47(10):2527-2533.
- [13] SOURI K, CHAE Y, THUS F, et al. 12.7 A 0.85 V 600 nW all-CMOS temperature sensor with an inaccuracy of ± 0.4 $^{\circ}\text{C}$ (3σ) from 40 to 125 $^{\circ}\text{C}$ [C]. IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers, 2014:222-223.
- [14] UENO K, HIROSE T, ASAI T, et al. A 300 nW, 15 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, 20 ppm/V CMOS voltage reference circuit consisting of subthreshold MOSFETs[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(7): 2047-2054.
- [15] JAMES S, LAJEVARDI P, HEKMAT M, et al. A 56 M Ω CMOS TIA for MEMS applications[J]. IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2009:199-202.
- [16] MONTI G, CORCHIA L, TARRICONE L. UHF wearable rectenna on textile materials[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(7):3869-3873.
- [17] VITAL D, BHARDWAJ S, VOLAKIS J L. Textile-based large area RF-power harvesting system for wearable applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3):2323-2331.
- [18] ESTRADA J A, KWIATKOWSKI E, LÓPEZ-YELA A, et al. RF-harvesting tightly coupled rectenna array tee-shirt with greater than octave bandwidth[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(9):3908-3919.
- [19] LOPEZ-GARDE J M, DEL-RIO-RUIZ R, LEGARDA J, et al. 2 \times 2 textile rectenna array with electromagnetically coupled microstrip patch antennas in the 2.4 GHz WiFi band[J]. Electronics, 2021, 10(12):1447.
- [20] WAGIH M, HILLIER N, YONG S, et al. RF-powered wearable energy harvesting and storage module based on E-textile coplanar waveguide rectenna and supercapacitor[J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2021, 2:302-314.
- [21] RAZA S H H, ZORBAS D, O' FLYNN B. A comprehensive survey on RF energy harvesting: applications and performance determinants[J]. Sensors, 2022, 22:2990.
- [22] MUHAMMAD S, WALY M I, MALLAT N H, et al. RF rectifier circuit for low-powered IoT wireless sensor nodes[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2023, 170:154787.
- [23] 黄若琦. 小型化 2.4/5.8 GHz 微波整流电路研究与设计[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022.
- [24] KALAGA S, YENUMULA P. Design of electrical transmission lines[M]. London: CRC Press, 2016.
- [25] SONG C, HUANG Y, ZHOU J, et al. Matching network elimination in broadband rectennas for high-efficiency wireless power transfer and energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5):3950-3961.
- [26] YUSUKE Y. Dielectric properties of textile materials: analytical approximations and experimental measurements-a review[J]. Textiles, 2022, 2(1):50-80.
- [27] MUKAI Y, SUH M. Relationships between structure and microwave dielectric properties in cotton fabrics[J]. Materials Research Express, 2020, 7(1): 015105.

- [28] YAMADA Y, BHARAMBE V T, ADAMS J J, et al. Effect of bending and padding on the electromagnetic performance of a laser-cut fabric patch antenna [J]. *Textile Research Journal*, 2019, 89(14): 2789-2801.
- [29] AZLAN A A, BADRUN M K A, ALI M T, et al. A comparative study of material leucaena leucocephala stem wood plastic composite (WPC) substrate with FR4 substrate throughout single patch antenna design [J]. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2014, 59: 151-166.
- [30] THANGASELVI E, JEYANTHI M A K. Implementation of flexible denim nickel copper rip stop textile antenna for medical application [J]. *Cluster Computing*, 2018, 22:635-645.
- [31] WAGIH M, HILTON G S, WEDDELL A S, et al. 5G-enabled E-textiles based on a low-profile millimeter-wave textile antenna [J]. *E-Textiles*, 2022, 15(1):13.
- [32] HAYNES W M. CRC handbook of chemistry and physics [M]. USA: CRC Press, 2016.
- [33] MIKULIĆ D, ŠOPP E, BONEFAČIĆ D, et al. Textile slotted waveguide antennas for body-centric applications [J]. *Sensors*, 2022, 22(3):1046.
- [34] STEMPIEN Z, RYBICKI E, RYBICKI T, et al. Inkjet-printing deposition of silver electro-conductive layers on textile substrates at low sintering temperature by using an aqueous silver ions-containing ink for textronic applications [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 224: 714-725.
- [35] 谢森培. 基于纸和织物的柔性电子薄膜制备及印刷工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [36] 陶肖明, 刘苏, 杨宝, 等. 织物电子器件及系统的发展现状、科学问题、核心技术和应用展望 [J]. *科学通报*, 2021, 66(24): 3071-3087.
- [37] KIOURTI A, LEE C, VOLAKIS J L. Fabrication of textile antennas and circuits with 0.1 mm precision [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15(1):151-153.
- [38] ZHANG L L, WANG Z Y, VOLAKIS J L. Embroidered textile circuits for microwave devices [C] // *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2012:1-2.
- [39] 张亚亚. 刺绣型织物基导体带电学性能的影响因素及作用机理 [D]. 上海: 东华大学, 2022.
- [40] LOCHER I, TRÖSTER G. Screen-printed textile transmission lines [J]. *Textile Research Journal*, 2007, 77(11):837-842.
- [41] 涂华婷. 面向无芯片 UHF RFID 标签的织物基微带多谐振电路的设计、制备与性能评价 [D]. 上海: 东华大学, 2021.
- [42] SHAHARIAR H, KIM I, SOEWARDIMAN H, et al. Inkjet printing of reactive silver ink on textiles [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(6):6208-6216.
- [43] HUANG Y A, BU N B, DUAN Y Q, et al. Electrohydrodynamic direct-writing [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(24): 12007-12017.
- [44] WANG C, GUO R, LIN S, et al. A highly electro-conductive and flexible fabric functionalized with bovine serum albumin for a wearable electronic device [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(17):14927-14934.
- [45] PENG L H, GUO R H, LAN J W, et al. Preparation and characterization of copper-coated polyester fabric pretreated with laser by magnetron sputtering [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, 48(2):482-493.

欢迎投稿《产业用纺织品》

<https://cyyf.cbpt.cnki.net> techtex@dhu.edu.cn