

电子服装性能及其集成技术研究进展

黄倩倩^{1,2}, 李俊^{1,2,3}, 王云仪^{1,2,3}

(1.东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051; 2.东华大学 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051)

(3.同济大学 上海国际设计创新研究院, 上海 200051)

摘要: 电子服装是电子科技与纺织服装的结合,是服装功能化和电子产品柔性化的表现,电子服装集成技术是电子服装发展的关键。随着电子器件微型化与柔性化技术研究的深入,真正意义上的电子服装原型逐渐形成。通过纺织、涂层和印刷、层压等技术,制成面料电路板(Fabric PCBs),实现搭建各功能模块的基础平台;结合服装与电子器件连接技术、绝缘技术等,实现计算机硬件系统与服装的整合。以上技术在电学信号传输的可靠性、稳定性、有效性与服用安全性、舒适性等方面还有待提高。对电子服装的电学性能与服用性能进行了阐述,并概括了它们的影响因素。基于此,分析了表面结合与内部融合两大类集成技术的发展重点与优缺点,并总结了未来的发展方向。

关键词: 电子服装; 智能服装; 集成技术; 面料电路板; 柔性电子

中图分类号: TS941.79

文献标识码: A

文章编号: 1001-2044(2018)06-0001-06

Research progress of electronic clothing properties and integration technology

HUANG Qianqian^{1,2}, LI Jun^{1,2,3}, WANG Yunyi^{1,2,3}

(1.College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China)

(2.Key Laboratory of Clothing Design and Technology, Ministry of Education, Shanghai 200051, China)

(3.Shanghai Institute of Design and Innovation, Tongji University, Shanghai 200051, China)

Abstract: Electronic clothing is the combination of microelectronic technology and textile technology. It is the representation of functionalization of clothing and flexibility of electronic products. The development of electronic clothing speeds up the transition from traditional manufacturing to fashion and high-tech industry, and it is the inevitable trend of the times. Among them, integration of electronic clothing technology is undoubtedly the key to progress. In recent years, with the miniaturization and flexibility of electronic devices, the true prototype of electronic clothing has gradually formed. The textile, coating and printing, and laminating technology are made of fabric board (Fabric PCBs), which is the basic platform for functional modules. Combing connection technology between clothing and electronic device and insulation technology realize the integration of computer hardware and clothing. Nevertheless, the reliability, stability, effectiveness of electrical signal transmission, and the safety and comfort of clothing of these technologies are still to be improved. The electrical and wearability properties of electronic clothing are described, and their influence factors are summarized. Based on this, the development focus and advantages and disadvantages of the two kinds of integrated technologies of surface bonding and internal fusion are analyzed, and the future direction of development is summarized.

Key words: electronic clothing; smart clothing; integration technology; fabric PCBs; flexible electronic

电子服装是智能服装的一种,由可穿戴计算机发展演变而来^[1]。可穿戴计算机是指配置在人身上的计算机设备,能够实现某些特定功能,具有便捷性特点,比如头戴显示设备、智能手环、智能手表等;电子服装是电子、信息、半导体、无线通信、纺织服装等多领域前沿技术相融合的产物,它能够感受外界和人体的刺激或变化,通过反馈机制,做出反应^[2]。具体而言,电子服装系统的基本组成包括交互设备、通信设备、数据管理、能源管理、集成电路等^[3],电子服装的集成是将电子系统与服装结合,使服装拥有感知、计算和通信等特定功能的技术。

目前,电子服装集成技术主要分为两大类:电子器

件直接与服装进行表面结合,服装仅作为载体存在;电子器件与纤维、纱线、织物等柔性材料融为一体,形成智能织物,通过特殊的制板技术制成服装。这两类技术随着对电子服装性能要求的提高而不断发展,使电子服装具有更好的服用性能。

电子服装已广泛应用在军事、医疗、消防、通信、航天航空各个领域。尽管各领域迫切需要电子服装,但是其发展受到集成技术的制约。电子服装的电学性能是其功能实现的基础,服用性能则是使其具有服装意义的关键。因此,本文分析了电子服装的电学与服用性能,以及它们各自的影响因素,并讨论了两类集成技术的发展现状,总结了未来的发展趋势。

1 电子服装的性能及其影响因素

1.1 电学性能

实现电子服装功能化,需要配置在服装上的传感

收稿日期: 2017-11-21

基金项目: 上海市自然科学基金(17ZR1400500)

作者简介: 黄倩倩(1992—),女,主要从事服装舒适性方面的研究。

通信作者: 李俊。E-mail:lijun@dhu.edu.cn。

器、执行器、处理器、通信设备、移动电源等电子组件协同完成,并且利用搭建的电路实现各模块之间的互联。因此,电子服装应具备可靠的电学性能,保证信号监测、连接和传输的精确与稳定。

在服用过程中,服装经过折叠、拉伸、扭曲、摩擦等正常范围内的形变,电子模块相对人体的位置会发生偏移,信号检测的准确性可能受到一定影响。并且电路中连接点位置和牢靠度会随着服装的形变发生变化,信号传输的精确度与稳定性也可能受到影响。在服装洗涤过程中,不同的洗涤方式和洗涤次数会不同程度地破坏电子器件与电路的完整性,削弱信号传输能力^[4]。

1.2 服用性能

良好的服用性能使电子服装具有普遍的使用价值与应用意义,主要包括服装舒适性与耐用性两方面。

服装舒适性又可分为接触舒适性、压力舒适性、热湿舒适性3种。着装的舒适性是一个主观判断的过程:当人体着装后,皮肤表面的机械感受器、温度感受器和伤害感受器接收到外界刺激,转化为电信号传递至大脑,大脑对此做出触、热、冷、痛感觉的判断,然后根据个人经验、个人情感、社会认知等进行接触舒适性、压力舒适性、热湿舒适性的等级划分。从服装本身来看,电子器件的刚柔性、尺寸、形状、分布、接触方式,以及电路布线方式均会影响接触舒适性;电子器件的质量及其分布会影响压力舒适性;电子服装织物的通透性(透气、透湿汽、透水)和服装整体的热湿传递性能会影响热湿舒适性。服装的形变能力、整体电路布局、人体运动、使用环境条件等都会影响着装整体舒适性。

服装的耐用性是指织物耐拉伸、撕裂、冲击、疲劳等力学性能,以及光热、辐射、氧化、水解、温湿度等各种环境因素影响下的抗老化性能^[5]。电子服装的耐用性还与电学性能有关。目前,讨论较多的是其可水洗性能。

电子服装的电学性能是实现其功能的核心,服用性能则是实际应用的需求。电子服装集成技术应当同时考虑电学性能与服用性能,并融入电路设计当中。

2 电子服装集成技术

电子服装集成技术分为两大类:电子器件或电路等直接依附在服装表面,称为表面结合;电子器件或电路与纤维、纱线、织物等柔性材料融为一体,称为内部

融合。两类技术并存发展,各具优势。第一类电子服装采用的技术较为传统,电学性能较稳定,但服用性能较差。第二类电子服装提高了服用性能,但集成技术相对较难,电学性能较差。因此,第一类服装重点在于优化服用性能,第二类服装重点在于实现柔性化与提高电学性能。

2.1 表面结合技术

电子器件可以通过缝纫、粘贴、钉压等方式配置到服装上,也可以在服装上缝制口袋、拉链等特殊构造,以供电子器件的取放。服用性能的优化需要从提高舒适性及耐用性两方面考虑。目前耐用性主要考虑可水洗性能,一种是采用可拆卸技术,洗涤服装时,将电子器件取出;一种是研究可洗电子器件,如 LilyPad Arduino^[6]实现了断电后可水洗功能。而提高服用性能要从电子器件本身和连接方式着手。

2.1.1 微型化技术

传统电子器件是有一定大小和质量的刚性物体,附着在服装表面,与皮肤直接接触,是产生不舒适感的直接原因。Knight^[7-8]研究了英国伯明翰大学设计的记录人体生理和生物力学信号的感知背心“SensVest”时,采用 CRS 主观评价,发现不舒服感觉最明显的是依附感(attachment)、感知变化(perceived change)。因此,用于电子服装的功能模块需要在尺寸、质量、形状上进行改变。微电子技术的发展为此提供了可能。

微电子技术是指尽可能减小计算机系统的尺寸与质量,将其封装到一个芯片内,也就是集成电路。目前,片上系统(SoC)^[9]和系统级封装(SiP)^[10]是发展较为先进且有效的技术。高度集成的电路封装在服装服饰当中,通过合理的设计,使功能模块不显露在服装表面。比如可以在纽扣^[11]、胸针、拉链、腰带、装饰带^[12]等嵌入集成电路,实现某种特定的功能。

2.1.2 连接技术

电子器件往往分布在服装中的各个位置,需要用导线进行连接。比如 X-Sens 电子服装的各个传感器粘贴在服装中不同位置,以获取不同关节处的活动角度,通过导线连接。这种传统的连接方式会给人体造成活动束缚感,从而降低服装舒适性。另一种连接方式是通过无线连接,比如能够检测体表温湿度的 iButton 传感器^[13],利用无线传感技术,可实时获取数据。

2.2 内部融合技术

内部融合技术不是简单地将功能模块与服装进行

体实验室提出了电子刺绣(E-broidery)模式^[12]。利用CAD计算机辅助设备数字化控制刺绣使用线程,将不同导电缝线缝制在面料基布上,形成指定的电路布局。Orth^[26]定义了可用于面料电路板缝线的性质。面线必须能够承受一定机械力,包括张力、弯曲力和摩擦力等;底线虽然不需要承受与面线一样的弯曲力,但必须表面光滑且富有弹性。Linz^[9]指出,在受到压力时,采用刺绣和缝纫工艺的面料电路板不具备可靠性,这主要是由金属丝线的张力不够造成的。

2.2.2.2 涂层和印刷技术

导电油墨或高分子材料可以通过涂层或印刷技术,附着在纤维、纱线或织物表面,使其带电,然后参照刚性电路板的制作,用柔性织物代替刚性基底,制得面料电路板。Sari Merilampi^[10]采用丝网印刷技术,分别在织物基布和PVC上使用导电油墨涂层,并对比了两者涂层前后的电阻大小。研究发现在高应力作用下,不同的基底会影响导电薄膜电阻的变化。与此同时,Yongsang Kim^[27]用棉、毛、粘胶、涤纶和聚丙烯腈5种不同织物作基布,对比分析了基布对导线性能的影响。结果表明,基布的弹性可能会影响涂层薄膜的完整性,并且提出纱线越细、织物密度越高的基布越适合用于面料电路板的制作。Kazani^[28]对印刷后的导电织物进行了磨损和洗涤试验,发现经过5 000次摩擦试验、20次洗涤之后,织物的导电率大大减小。

2.2.2.3 层压技术

层压是一种将薄片状材料一层层地叠合,通过加热加压黏合成为一体的结合技术^[29]。Leah Buechley^[11]通过激光切割导电织物,形成电路,用层压技术将导电织物与面料贴合,形成面料电路板。具体步骤如下:激光切割导电织物,形成电路;去除多余的部分;将电路热压到基布上;去除多余的部分,完成面料电路板。另外,Dunne^[30]采用层压技术实现了面料多层电路板的制作。

2.2.3 服装与电子元件连接技术

电子服装中集成了各种功能电子元件,包括微处理器、存储器、传感器、移动电源、显示器等,这些电子元件往往是模块化的,甚至是分布在身体各个部位的。因此,需要恰当的连接技术将其融入面料电路板或服装中^[15]。

(1)焊接。直接将各功能模块焊接在面料电路板上,实现硬件系统的完整连接。焊接一般采用软合金,

如锡、铅、银等。这种方法连接较牢固,导电性能优良。但是焊接点不宜直接与皮肤接触,另需背衬或内衬。Senem^[31]采用热风焊接,并探讨了焊接温度、风速、压力的最优配置。试验发现,温度为350℃、速度为1.5 m/min、压力为6.5 bar时,焊接的电路电信号传输最为有效和稳定。

(2)黏合。采用黏合剂将功能模块连接在服装上,操作简单,但难以保证连接的稳定性和信息传输的可靠性,而且黏合剂通常会改变织物的手感。Linz^[32]指出,为保持织物的柔软性,应该尽量选取弹性模量较低的黏合剂,通常应小于1 000 N/mm²。此外,为了提高传输精度,该学者还提出了3个黏合剂的选取原则:热膨胀系数高,应力松弛低,能够持续保持一定的接触压力。

(3)缝合。使用刺绣或缝纫工艺将各功能模块缝合到服装上。Linz^[33]采用缝纫工艺,将电子元件固定到服装上,并进行了电学稳定性测试。水洗20次之后,通过截面分析,导电性降低了19%。该学者还发现如果没有封装,导电缝线经受不住热可靠性测试^[32]。

(4)压钉。用金属钉子将功能模块直接钉在服装面料上,金属钉子连接在面料电路当中。压钉法容易造成连接错位,因此对操作准确性要求较高,而且金属钉子会降低织物的耐磨性。Simon^[34]采用压钉法,将电子元件功能模块钉在导电织物上,见图4。采用热循环试验测试其可靠性,温度设置为-40℃~85℃,循环1 000 h,结果显示5个连接点信号传输比较稳定。

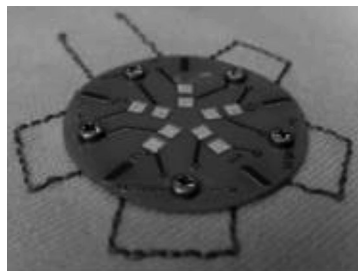


图4 压钉法连接

2.2.4 绝缘技术

大多数导电织物、导电线是非绝缘的,合适的绝缘技术不仅可以防止短路,保证电路连接的稳定性,而且能够保障人体安全。Linz^[33]对电路和电子元件连接进行了测试,发现在热循环试验中,由于封装良好,经过1 000个温度周期(15 min,85℃,15 min,-40℃),封装后的缝线没有受损。绝缘技术可以通过不同的方式

实现,这主要取决于电子服装应用的需求^[11]。

(1)采用覆盖挑针线迹的方法。覆盖挑针线迹方法是在导电缝线上面覆盖一层不导电的缝线,实现导电缝线与外界绝缘。挑针线迹可以与织物融为一体,设计师可以选择颜色匹配的缝线来隐藏线迹,或者将其作为服装上的装饰元素。这种方法的缺点是,一旦织物受到挤压,绝缘线就会与下面的导电缝线分离。因此,这种方法可以防止短路,但不能用于隔离两个可能会频繁接触的导电缝线。另外,这种线迹比较占空间,缝线高3~4 mm,故不能用于需要紧密包装的线迹。

(2)将不导电织物与导电织物黏合。Buechley^[11]检验了黏合前后导电织物导电性能的变化情况,发现黏合后电阻没有增加。这种方法简单易操作,并且可以交替放置织物,实现多层电路的配置,但缺点是,使用黏合剂会使得面料变硬,影响服装局部舒适性。

(3)将橡胶等绝缘涂料覆盖在导电纱线上。涂层的方法虽然不会影响织物导电性能,但绝缘涂料会改变织物的触感和外观,从而影响其着装舒适性。而且这种方法不适用于复杂的电路配置。

3 结 语

电子服装的发展加快了服装产业从传统制造业向时尚高科技产业的转型,其中电子服装集成技术无疑是发展的关键。直接将刚性硬件系统嵌入服装中的集成技术,往往会改变服装的热湿传递性能和接触手感等,影响着装舒适性,使得电子服装发展缓慢。近年来,面料电路板与电子元件微型化、柔性化技术的出现为行业发展带来了生机。LilyPad Arduino 是典型的微电子组成集合系统,具有柔软和可水洗等特点,未来结合服装设计或者微型化技术处理,极有可能成为电子服装的第一代产品。相对于第一类技术,第二类技术内部结合技术难度更大,但更能体现服用性能,而不是仅作为电子器件的载体。目前,香港理工大学提出的特殊针织技术和麻省理工大学提出的电子刺绣技术成为研究的重点,织物在测试中呈现出良好的电学、力学性能,并能承受一定的水洗测试,表现出相对较好的服用性能。但是对于制成的电子服装,在人体着装条件下,其信息传输的可靠性、稳定性、有效性与服用安全性、舒适性等方面还有待进一步提升,这需要各学科之间交流合作才能实现。未来的电子服装从外观上与普通服装无异,而且更加智能与舒适。



参考文献:

- [1] DUNNE L E. The design of wearable technology: addressing the human-device interface through functional apparel design [D]. New York: Cornell University, 2004.
- [2] 田苗,李俊.智能服装的设计模式与发展趋势[J].纺织学报,2014,35(2):109-115.
- [3] TAO X M. Wearable electronics and photonics [M]. Cornwall: Woodhead Publishing, 2005.
- [4] 郑能干,吴朝晖,林曼,等.电子织物研究进展[J].计算机学报,2011,34(7):1173-1187.
- [5] 于伟东,储才元.纺织物理[M].上海:东华大学出版社,2009.
- [6] BUECHLEY L, EISENBERG M. The LilyPad Arduino: Toward wearable engineering for everyone [J]. IEEE Pervasive Computing, 2008, 7(2): 12-15.
- [7] KNIGHT J F, BABER C. A tool to assess the comfort of wearable computers [J]. Human Factors, 2005, 47(1): 77-91.
- [8] JAMES F KNIGHT. The comfort assessment of wearable computers: STEPHANIE KAWADA [C]. Proceedings of the 6th International Symposium on Wearable Computers. Seattle: The Printing House, 2002: 65-73.
- [9] LINZ T. Analysis of failure mechanisms of machine embroidered electrical contacts and solutions for improved reliability [J]. Neuroimage, 2011, 37(4): 1417-1426.
- [10] MERILAMPI S, BJÖRNINEN T, HAUKKA V, et al. Analysis of electrically conductive silver ink on stretchable substrates under tensile load [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(12): 2001-2011.
- [11] BUECHLEY L, EISENBERG M. Fabric PCBs, electronic sequins and socket buttons: Techniques for e-textile craft [J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2009, 13(2): 133-150.
- [12] 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): 840-860.
- [13] CHAPMAN L, MULLER C L. A low-cost wireless temperature sensor: Evaluation for use in environmental monitoring applications [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014(5): 1-24.
- [14] ROSSI D D. Electronic textiles: A logical step [J]. Nature Materials, 2007, 6(5): 328-329.
- [15] CASTANO L M, FLATAU A B. Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(5): 53001.
- [16] WANG C T, HUANG K Y, LIN D T W, et al. A flexible proximity sensor fully fabricated by inkjet printing [J]. Sensors, 2010, 10(5): 5054-5062.
- [17] RUQUAN Z, JIANQIANG L, DEJUN L, et al. Study of the structural design and capacitance characteristics of fabric sensor [J]. Advanced Materials Research, 2011(194): 1489-1495.
- [18] HOLLECZEK T, RÜEGG A, HARMS H, et al. Textile pressure sensors for sports applications [J]. Sensors, 2010, 143(2): 732-737.
- [19] 钱鑫,苏萌,李风煜,等.柔性可穿戴电子传感器研究进展[J].化学学报,2016,74(7): 565-575.

- [20] ZHANG L, FAIRBANKS M, ANDREW T L. Rugged textile electrodes for wearable devices obtained by vapor coating off-the-shelf, plain-woven fabrics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(24): 1700415.
- [21] 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.
- [22] LOCHER I, TROSTER G. Enabling technologies for electrical circuits on a woven monofilament hybrid fabric [J]. *Textile Research Journal*, 2008, 78(7): 583-594.
- [23] DHAWAN A, GHOSH T K, SEYAM A M, et al. Development of woven fabric-based electrical circuits [J]. *Mrs Online Proceedings Library Archive*, 2002(736): 191-196.
- [24] DHAWAN A, GHOSH T K, SEYAM A M, et al. Woven fabric-based electrical circuits part I: Evaluating interconnect methods [J]. *Textile Research Journal*, 2004, 74(11): 955-960.
- [25] LI Q, TAO X M. Three-dimensionally deformable, highly stretchable, permeable, durable and washable fabric circuit boards [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2014, 470(2171): 472.
- [26] ORTH M. Defining flexibility and sewability in conductive yarns [J]. *MRS Proceedings*, 2002(736): 1-4.
- [27] KIM Y, KIM H, YOO H J, et al. Electrical characterization of screen-printed circuits on the fabric [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2010, 33(1): 196-205.
- [28] KAZANI I, HERTLEER C, DE MEY G, et al. Electrical conductive textiles obtained by screen printing [J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2012, 90(1): 57-63.
- [29] 罗瑞林. 织物涂层 [M]. 北京: 中国纺织出版社, 1994.
- [30] DUNNE L E, BIBEAU K, MULLIGAN L, et al. Multi-layer e-textile circuits; ANIND K. DEY. proceedings of the 2012 ACM conference on ubiquitous computing [C]. New York: Pittsburgh, 2012.
- [31] BAHADIR, SENEM KURSUN, KALAOGLU, FATMA, EVSNIK S. The use of hot air welding technologies for manufacturing e-textile transmission lines [J]. *Fibers and Polymers*, 2015, 16(6): 1384-1394.
- [32] LINZ T, VON KRSHIWOBLOZKI M, WALTER H, et al. Contacting electronics to fabric circuits with nonconductive adhesive bonding [J]. *Journal of the Textile Institute*, 2012, 103(10): 1139-1150.
- [33] LINZ T, VIEROTH R, DILS C, et al. Embroidered interconnections and encapsulation for electronics in textiles for wearable electronics applications [J]. *Advances in Science and Technology*, 2008(60): 85-94.
- [34] SIMON E P, KALLMAYER C, ASCHENBRENNER R, et al. Novel approach for integrating electronics into textiles at room temperature using a force-fit interconnection [C]. *IEEE. 18th European Microelectronics & Packaging Conference*. Brighton, England: 2011: 1-7.

欢迎订阅 2018 年《上海纺织科技》

《上海纺织科技》创刊于 1973 年,是由上海市纺织科学研究院主办的综合性纺织技术类期刊,国内外公开发行,已连续七届(1992、1996、2000、2004、2008、2011、2014 年)被评为全国中文核心期刊,2013 年中国科技核心期刊,2015 年 RCCSE 中国核心学术期刊。

《上海纺织科技》现已被《中国期刊全文数据库》《中国科技论文统计源期刊》《中国学术期刊综合评价数据库》《万方数据资源系统数字化期刊群》《中国科技期刊精品数据库》美国《乌利希国际期刊指南》等多种数据库收录。

《上海纺织科技》国际标准连续出版物号为 ISSN1001-2044、国内统一刊号为 CN31-1272/TS,邮发代号 4-397,月刊,2018 年每期定价 12 元,全年 144 元,每月 18 日出版。

1. 邮局订阅,本刊邮发代号:4-397,请广大读者直接到当地邮局咨询订阅。

2. 编辑部订阅,请填写订阅单、传真或邮件向本刊编辑部直接订阅。

地址:上海市平凉路 988 号 《上海纺织科技》编辑部

电话:021-55211341 传真:021-51670000

邮编:200082 联系人:徐毅、冯雪峰

在线投稿系统: <http://sfk.cbpt.cnki.net> 和 <http://tg.cntexcloud.com>

邮箱: shfzkjt@126.com 微信号:“上海纺织科技”

收款单位:上海市纺织科学研究院有限公司

开户银行:中国银行上海市杨浦支行营业部 帐号: 435159252974