

微机电系统在智能服装领域的研究与展望

毕研伟^{1,2}, 潘力^{*1,2}

(1. 大连工业大学 服装学院, 辽宁 大连 116034; 2. 大连工业大学 服装设计与工程国家级实验教学示范中心, 辽宁 大连 116034)

摘要:根据智能服装对电子元件趋向微型化、柔性化的应用要求,通过分析微机电系统的特性,梳理出微机电系统在智能服装领域的发展现状,总结微机电系统在智能服装设计中的应用形式;并依据电子元件与服装材料间的依附关系试图提出智能服装与人体、环境间的信号转换关系模型,对微机电系统在智能服装领域的发展进行展望。

关键词:微机电系统;电子元件;智能服装

中图分类号:TS 941.73 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2018)04-0308-06

Research and Prospect on Micro-Electro-Mechanical Systems in Intelligent Garment

BI Yanwei^{1,2}, PAN Li^{*1,2}

(1. School of Fashion, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Fashion Design and Engineering Education, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: In view of the application requirements of miniaturized and flexible electronic components in the development of smart clothing, the development status of micro-electromechanical systems in the field of intelligent garment was sorted out through the characteristic analysis of the micro-electromechanical systems and the application form of micro-electromechanical systems in intelligent garment design was summarized. Based on the attachment relationship between electronic components and garment materials, the signal conversion model between intelligent garment as well as human body and environment was proposed. The development of micro-electro-mechanical systems (MEMS) in the field of intelligent garment was prospected.

Key words: micro-electro-mechanical system, electronic components, intelligent garment

智能服装^[1]通过先进的材料及纺织技术,在服装中植入微型化、柔性化的电子元件装置,使服装具备信息感知、计算和通信等功能,因此越来越受到消费者的追捧。然而要想实现服装的智能化则需要从纤维、纤维的结合体和电子元件上进行研究,三者的实现方式各不相同^[2]。通过嵌入电子元件将信息技术和微电子技术引入服装中,是实现服装智能化应用较早、发展较为成熟的方式之一^[3]。但由于电子元件与服装材料间存在体积、材质等差

异,使智能服装在穿着、功能、价格等方面的问题都难以解决。

微机电系统作为微/纳米技术研究的重要方向,是继微电子技术之后在微尺度研究领域中的又一次革命^[4],已从初期的探索研究,转向生产应用阶段^[5]。微机电系统在生物医疗^[6-8]、电动汽车^[9]、军事侦察^[10]等领域迅速发展,同时在服装领域也逐渐得到重视。

文中对微机电系统的特性以及微机电系统在

收稿日期:2018-04-02; 修订日期:2018-06-27。

基金项目:辽宁省教育厅攻关项目(2016J010)。

作者简介:毕研伟(1993—),男,硕士研究生。

*通信作者:潘力(1963—),女,教授,博士生导师。主要研究方向为数字化服装工程与技术、服装市场营销。

Email: 1020404190@qq.com

智能服装设计上的应用方式进行分析归纳,试图提出智能服装与人体、环境间的信号转换关系模型,梳理出微机电系统在智能服装领域的发展瓶颈,从而展望其应用前景与发展方向。

1 基于智能服装的微机电系统

1.1 功能及作用

微机电系统将传感器、执行器与信息处理和存储集为一体,这种微型集成系统具有“传感—计算(控制)—执行”的功能^[4]。微机电系统在智能服装领域的研究主要体现在电子元件的微型化与集成化上,随着研究的深入将会为智能服装的发展提供更多的可能性。

微机电系统的加工尺寸在微米(μm)量级,元件尺寸在毫米(mm)量级,具有微小尺寸、系统集成与批量生产等基本特性^[11-12],可使电子元件微型化、集成化与批量化,从而解决智能服装在舒适性、低成本等方面的问题。

1.1.1 舒适性 舒适度是智能服装设计中最大的挑战之一^[13]。服装接触大约 90% 的皮肤表面,在智能服装上使用微型传感器可以更好地提高其舒适度^[14]。由于传统的电子元件(如刚性印刷电路),植入服装内会造成人体不舒适感,电路不能随着织物一起变形。电子元件的微型化与柔性化,可以更好地将电子元件整合到服装中去,避免元件附着后所带来的异物感。柔性化的电子元件在接触皮肤时更加具有舒适性与服用性,并且用户还有减少手机、电池等额外负重的需求,将会增强用户对于智能服装的体验效果。

1.1.2 功能性 由于微制造技术与微电子技术之间的高度兼容,微机械与微电子集成诞生了微机电系统^[11]。微机电系统制造出可靠性、稳定性高的电子元件,可使服装具有更加快捷的功能性与娱乐性。加拿大 Athos 推出的智能运动衣是目前比较成熟的智能服装。这款智能服装内置微型传感器,可以检测运动者的呼吸频率、心率和肌肉运动情况,并将检测到的数据通过蓝牙实时发送到智能手机中;除为人体保健提供相关数据参考外,还会像普通衣服一样保洁洗涤、烘干后多次使用。内置微型传感器整体质量不到 20 g,并且可以连续使用 10 h 以上^[15]。

1.1.3 低成本 智能服装的价格高昂,产品性价比低,无法满足消费者的真正需求,使得产品的用户黏性低,难以被中低收入水平的消费者所接受^[13]。例如 Athos 推出的智能运动衣官方价格在

298 美元;蒙特利尔(OMsignal)公司开发的可机洗的衬衫售价高达 80 美元,只能适合极少数人穿戴^[15]。微机电系统批量化生产的电子元件用于智能服装上,将大大降低智能服装的生产成本。

1.2 应用方式

智能服装通过微机电系统使用的微小元件构成微电集成电路,实现服装的各种功能。通过电子元件与服装材料间依附关系的不同,将其分为穿戴型智能服装与纤维型智能服装。微机电系统在智能服装中的应用形式如图 1 所示。

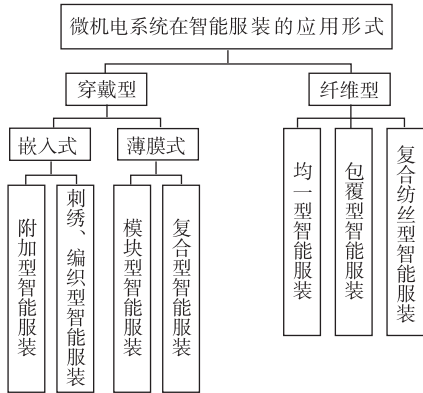


图 1 微机电系统在智能服装的应用形式

Fig.1 Application form of MEMS in intelligent garment

1.2.1 穿戴型 穿戴型智能服装是将电子元件隐藏或是嵌入服装织物表面,依附于服装面料表面而不改变服装内部属性^[16]。由于结合方式不同,将其分嵌入式与薄膜式。

1)嵌入式是将电子元件以嵌入手法与服装复合。根据嵌入手法的不同细分为以下两种:①附加型。服装作为电子元件的载体,通过特殊封装,使用物理方式直接附加到服装上,达到特定的功能。2014 年 Mino 公司生产的婴儿连体衣,便将所搭载的英特尔 Edison 芯片隐藏在可拆卸的塑料乌龟内。②刺绣、编织型。通过刺绣、编织等手法将电子元件附着在服装上。刺绣与编织技术发展成熟,现已成为目前应用最广的电子元件连接技术^[17]。

2)薄膜式是将电子元件通过织物涂层技术实现与服装材料的复合。根据涂层技术的不同细分为以下两种:①模块型。通过织物涂层技术,实现信息传递和转换,有效连接独立的电子元件,并将可操作的电子元件的接口整合到服装内部,再利用柔性电子设备实现服装的智能化^[18]。如香港理工大学通过对织物表面进行 PPY 聚合物涂层,研制出导电柔性织物传感器,并将其缝于服装的膝部或肘部,由此制得配合演员动作引发相应音乐的“跳舞衣”。②复合型。利用复合技术将电子元件嵌入导

电性塑料薄膜内,使其像织物一样可以任意扭曲折叠。

1.2.2 纤维型 电子智能纤维主要有导电纤维和抗静电纤维两种,其中以导电纤维最具代表性^[1]。导电纤维是纤维型智能服装的关键材料。通过导电纤维类别的不同,将这类智能服装分为以下几种:

1)均一型。由均一型导电物质(如金属纤维、碳纤维、导电聚合物等)构成纤维材料,与传感器、微电源接口连接后用于服装。

2)包覆型。将合成纤维外层涂覆导电成分构成导电纤维,与传感器、微电源接口连接后用于服装。

3)复合纺丝型。成纤高聚物与碳黑或金属化合物复合纺丝构成导电物质^[19],与传感器、微电源接口连接后用于服装。

纤维型智能服装是将电子元件融入到服装织物内部,与导电纤维相结合。根据不同的使用目的连接相应设备,使服装具有不同的功能^[17]。

2 微机电系统信号接收和转换流程

基于微机电系统的智能服装是以服装为物理载体,在其基础上增加传感器、控制器、电源等微型电子元件,构成微机电系统,从而实现某种特定功能。服装与环境、人体之间由于微机电系统的嵌入,构成了新的信号关系,具体如图 2 所示。只有明确信号的转换及传递关系,才能更好地把握微机电系统在智能服装上的研究方向。

2.1 信息转换

基于微机电系统的智能服装与环境、人体之间

有着错综复杂的关系,而微机电系统中的电子元件是实现信号接收和转换的关键。基于微机电系统的智能服装通过传感器对自然界信号进行感知,并将其转化为可被识别与处理的电子信号,再通过执行器转换成可被人体接收的信号;信号作用于人体后,使人体产生相应的物理信号。一方面通过传感器转换为电子信号,使服装产生光、声、电等信号,可以提示、响应,直接作用于人体;另一方面通过无线传感系统将人体产生的物理信号转换为数据,显示在手机 APP 等终端平台上,对人体进行监控,间接作用于人体。由此形成智能服装信号转换的系统。

微机电系统是由传感器、执行器和微能源以及导线连接而成。在系统流程中为保证微机电系统的完整性与可用性,必须保证导线的连接与能源的持续供给,因此基于微机电系统的智能服装导线与能源问题成为重要的研究方向。

2.2 信息传递

基于微机电系统的智能服装通过信号接收单元、通信接口单元实现自然信号从环境到人体的传递;在人体产生物理信号后通过无线、蓝牙等传感技术将人体信号传递到终端平台后将转化成数据,并对数据分析,从而间接对人体状态进行监控与分析。

通过电子信息技术制造的电子元件,可使智能服装功能性更为突出,但电子元件与服装的完美融合问题却较难解决^[20]。在系统流程中必须保证微机电系统的介入不能对服装的舒适性产生影响,因此基于微机电系统的智能服装的材质与传感技术将是另一重要研究方向。

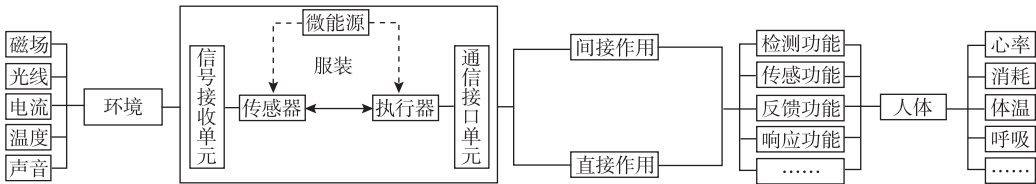


图 2 基于微机电系统的智能服装与环境、人体的关系

Fig.2 Relationship between intelligent garment as well as environment and human body based on MEMS

3 微机电系统的应用瓶颈

微机电系统在智能服装领域的应用体现在电子元件微型化与集成化等方面,增强元件与服装间的融合度,通过传感器、执行器等实现信号间的转换。微机电系统使智能服装在舒适性、功能性及低廉性上都得到很大改善,然而基于微机电系统的智能服装仍面临以下问题。

3.1 电源的配置

微机电系统需要能源的提供与储存^[19]。现阶段智能服装上使用的电源多是利用移动电源的方式,这种外接电源续航能力有限,并严重影响服装的美观性与安全性。如果将人体热能、机械能、化学能或生物能转换成电能储存起来植入微机电系统,那么电池的体积大、寿命短、需要更换等问题,便可以迎刃而解^[21]。

3.2 材质的选择

智能服装选用材料主要包括以服装为载体的功能材料和服装面料^[15]。由于微机电系统的材料和工艺特殊性,使原有的服装特性发生变化,给人以异物感,舒适性下降。就服装而言,材料应保持原有柔软、易变形、舒适等特性;从微机电系统角度分析,在服装面料环境下,电子元件的可靠性是主要关注点之一^[22]。特别是接口元件^[23]与外界有线连接,如何在不同的运动环境下确保其性能、使用寿命与可用性,是微机电系统在智能服装领域发展的关键问题^[24]。而连接方式的无线化与内置化,将使智能服装更具时尚化、智能化^[25]。

3.3 元件的磨损

电子元件的摩擦与磨损行为对于微机电系统的性能与可靠性具有重要影响,如导线易损毁,则会破坏系统的完整性。智能服装中的电子元件在运动过程中会产生摩擦与磨损。如何保证微机电系统在服装上的正常运用,而不受机械作用的影响也是其研究难点之一。利用涂层材料进行保护,探究降低摩擦系数的方法是研究的重点^[26]。

3.4 质量的检测

通过嵌入电子元件可使服装具备特殊功能,但由于电子元件的特殊性,容易引起消费者对智能服装安全性能的担忧。目前,智能服装没有相应的检测标准,只能暂借纺织品与智能产品的。然而,智能产品的检测标准远无法满足智能服装的安全需要^[27],因此需要通过效果评价以确保其安全性,从而进一步完善其标准^[28]。智能服装的功能性、可靠性、可洗性等都能通过检测进行认证,从而被市场所接受,所以对智能服装检测标准的完善是智能服装发展急需解决的问题。

3.5 市场的需求

智能服装在提供电子设备功能性的同时也应满足服装的舒适性和时尚性^[29]。智能服装注重功能,但缺少对智能服装本身设计的重视。服装的功能性固然重要,它可以增加智能服装的价值,却不是消费者购买智能服装的主要原因^[30]。由于智能服装设计者对消费者需求尚不明确,故难以满足消费者在功能、价格、设计与使用上的需求。

4 前景展望

随着智能服装的关注度逐渐提高,其销量将从 2014 年的约 2.12 亿美元增长到 2021 年超过 18 亿美元^[31]。微机电系统与智能服装的结合,已成为相关学者的研究重点。尽管智能服装的研究还处于

初级阶段,但随着微机电系统的深入,智能服装必将得到快速发展。未来微机电系统在智能服装领域的研究将从以下 5 个方面展开。

4.1 智能服装的新型化

针对能源问题,需要打破传统能源技术,趋向于微能源技术的研究。太阳能电池作为新型能源,是最具潜力的重要能源之一^[31]。柔性太阳能电池的使用可解决智能服装的供能问题^[14]。太阳能发电技术具有环保等优良特性,但轻便性能及转换率依旧有待提高^[32];体能发电、温差发电等自生电技术,可利用人体运动、内环境等变化,实现微弱电流的转换,为微机电系统提供所需能源。北卡罗来纳州立大学的研究团队研制的热电式发电装置,则利用空气与人体温度的差异产生电能,能够将人体的热能转换成为电能,并证明将热电发电装置嵌入衣服中具有可行性。

4.2 智能服装的柔性化

针对材质与连接问题,智能服装上柔性材料的使用主要分为柔性传感器、柔性储能元件、柔性连接材料 3 个部分。传统的传感器、储能元件与连接材料存在柔软性差、金属厚重感强以及涂层手感差、不能机洗等缺点,影响了服装原本轻质、柔软、舒适等特性,难以达到设计目标和使用性能的要求。柔性材料的使用直接影响到智能服装性能,这是基于微机电系统智能服装的研究重点。如石墨烯及衍生材料^[33],由于自身的特殊性能成为智能服装的柔性材料及能源的重点研究对象。

4.3 智能服装的复合化

在智能服装领域,涂层和复合技术赋予服装诸多的特殊功能。如中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所^[34]从事于智能穿戴纳米技术的研究,在纳米墨水、纳米芯片与织物的集成、纳米纤维柔性超级电容器等领域均有涉及。利用纳米材料的分散性、稳定性、物理化学活性等优良性能实现智能服装的系统集成与智能应用。另外,由于石墨烯纤维具有高电子迁移率、高导热系数、良好的弹性和刚度等多种特质,通过创新设计石墨烯与普通纤维的复合可研制出石墨烯改性导电纤维,它具有良好的柔性和可纺性,稳定性高,经水洗、皂洗、酸碱汗渍、干摩擦、湿磨擦后仍然保持良好的导电性能^[35]。

4.4 智能服装的标准化

对于智能服装的安全性,现阶段在市场上尚未有具体的检测标准,相关标准的研究已成为智能服装亟待解决的问题。只有遵循检测标准进行设计,

才能让消费者信服其智能服装的安全性。目前,深圳市计量质量检测研究院针对智能加热服装的热效应评价方法与智能压力传感鞋垫的检测提出了相关的检测标准,为智能服装在热效应与压力传感方面提供了检测依据^[36]。

4.5 智能服装的市场化

智能服装正逐步由概念转变成现实消费市场,消费者已从过去的盲目从众逐渐走向理性购买。智能服装也将随着市场的发展,形成自己的市场秩序^[36]。智能服装作为服装的同时也拥有物联网、大数据等概念,在发展过程中要明确消费者需求,从传统的“生产”“销售”为中心向“消费者”为中心转变^[37]。如国内羽绒服品牌艾莱依在宣传本品牌的智能恒温服时通过对智能服装产品说明书和吊牌进行重新设计,讲述品牌故事,试图使消费者与产品建立联系,以一种新的方式满足消费者需求,受到消费者的一致好评^[38]。

5 结 语

尽管基于微机电系统的智能服装在研究过程中依旧存在诸多难点与瓶颈,但微机电系统与智能服装相结合的课题,对于智能服装的发展具有深远影响。文中通过对微机电系统的特性分析,梳理出微机电系统在智能服装领域的发展现状,总结出微机电系统在智能服装设计中的应用形式。提出了智能服装与人体、环境间的信号转换关系模型,从而明确微机电系统在智能服装上的研究方向。对研究中存在的瓶颈问题进行梳理,并针对性地提出微机电系统在智能服装领域的“五化”趋势。基于微机电系统的智能服装改变了消费者对服装的传统认知,并满足消费者对服装功能性、娱乐性的各类需求。随着电子信息技术的不断进步,基于微机电系统的智能服装也必然会得到长足的发展。

参考文献:

- [1] 沈雷,李仪,薛哲彬. 智能服装现状研究及发展趋势[J]. 丝绸,2017,54(7): 38-45.
- SHEN Lei, LI Yi, XUE Zhebin. Current situation and development trend of intelligent garment[J]. Journal of Silk, 2017,54(7): 38-45. (in Chinese)
- [2] 陶肖明. 颠覆性科技改变传统纺织[C]//2017 世界智能制造大会. 南京:世界智能制造大会组委会,2017.
- [3] 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.
- TIAN Miao, LI Jun. Design mode and development tendency of smart clothing[J]. Journal Textile Research,

- 2014, 35(2): 109-115. (in Chinese)
- [4] 高世桥,曲大成. 微机电系统(MEMS)技术的研究与应用[J]. 科技导报,2004(4): 17-21.
- GAO Shiqiao, Qu Dacheng. Researches on micro-electro-mechanical systems and its applications[J]. Science and Technology Review, 2004(4): 17-21. (in Chinese)
- [5] 葛文勋,丛鹏. 微机电系统发展动向[J]. 纳米技术与精密工程,2007,5(3): 182-189.
- GE Wenxun, Cong Peng. Trends and frontiers of MEMS[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2007, 5(3): 182-189. (in Chinese)
- [6] CHEN M, MA Y, SONG J, et al. Smart clothing: connecting human with clouds and big data for sustainable health monitoring[J]. Mobile Networks and Applications, 2016, 21(5): 825-845.
- [7] NESENBURG K. Architecture of smart clothing for standardized wearable sensor systems[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 2016, 19(5): 36-64.
- [8] SHANBHAG P P, PATIL N S. BioMicroelectromechanical systems: a novel approach for drug targeting in chronic diseases[J]. New Horizons in Translational Medicine, 2017,3(6): 265-271.
- [9] 黄军辉,杨旭志. MEMS 传感器技术在汽车上的应用研究与展望[J]. 农业装备与车辆工程,2010(9): 3-8.
- HUANG Junhui, YANG Xuzhi. The research and prospect on applications of MEMS sensor technology in automotive[J]. Agricultural Equipment and Vehicles Engineering, 2010(9): 3-8. (in Chinese)
- [10] 李雪梅,王春玲. 微机电系统的未来趋势[J]. 科教文汇,2016(12): 186-187.
- LI Xuemei, WANG Chunling. On the trend of microelectromechanical systems[J]. The Science Education Article Cultures, 2016(12): 186-187. (in Chinese)
- [11] 温诗铸. 关于微机电系统研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(2): 159-163.
- WEN Shizhu. Research on the micro-electromechanical system[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(2): 159-163. (in Chinese)
- [12] 冯帆. 微机电系统的发展与应用[J]. 工业技术,2015(19): 117.
- FENG Fan. MEMS technology and its application[J]. Industrial Technology, 2015(19): 117. (in Chinese)
- [13] DUNNE L. Smart clothing in practice: key design barriers to commercialization[J]. Fashion Practice, 2010, 2(1): 41-65.
- [14] AXISA F, SCHMITT P M, GEHIN C, et al. Flexible technologies and smart clothing for citizen medicine, home healthcare, and disease prevention[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2005, 9

- (3): 325-336.
- [15] 易莉莉. 智能服装的贴心设计及其发展潜力分析[J]. 毛纺科技, 2016, 44(3): 63-67.
YI Lili. Intimate design of intelligent clothing and its development potential [J]. Wool Textile Technology, 2016, 44(3): 63-67. (in Chinese)
- [16] BRIEDIS U, VALISEVSKIS A, GRECKA M, et al. Development of a smart garment prototype with enuresis alarm using an embroidery-machine-based technique for the integration of electronic components[J]. Procedia Computer Science, 2017, 104: 369-374.
- [17] 李昕. 电子智能纺织品的研究进展[J]. 轻纺工业与技术, 2013(6): 51-53, 45.
LI Xin. The present state of smart textile research[J]. Light and Textile Industry and Technology, 2013(6): 51-53, 45. (in Chinese)
- [18] 张亮. 电子服装的研究进展和应用前景[J]. 国际纺织导报, 2008(6): 52-59.
ZHANG Liang. Research progress and application prospect of electronic clothes[J]. Melliand China, 2008(6): 52-59. (in Chinese)
- [19] NATARAJAN T S. Functional nanofibers in microelectronics applications[M]//Functional Nanofibers and Their Applications. Amsterdam: Elsevier Inc, 2012: 371-410.
- [20] 沈雷, 方东根, 唐颖. 智能服装材料的研究现状与发展趋势[J]. 上海纺织科技, 2016, 44(2): 1-4, 36.
SHEN Lei, FANG Donggen, TANG Ying. Research progress and development trend of smart garment materials [J]. Shanghai Textile Technology, 2016, 44(2): 1-4, 36. (in Chinese)
- [21] 严宇才, 张端. 微机电系统技术的研究现状和展望[J]. 电子工业专用设备, 2011(4): 119.
YAN Yucai, ZHANG Duan. MEMS technology research status and further research works forecast[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2011(4): 119. (in Chinese)
- [22] RAFIEE P, KHATIBI G, ZEHETBAUER M. A review of the most important failure, reliability and nonlinearity aspects in the development of microelectromechanical systems (MEMS) [J]. Microelectronics International, 2017, 34(1): 9-21.
- [23] 黄勇, 王胜军. 浅析微机电系统 (MEMS) 的发展瓶颈及趋势[J]. 中国科技博览, 2010(34): 196.
HUANG Yong, WANG Shengjun. Analysis on the development bottleneck and trend of micro-electromechanical system (MEMS) [J]. China Science and Technology Review, 2010(34): 196. (in Chinese)
- [24] MEDJAH K, SKIMAN K H, ZERHOUNI N. Condition assessment and fault prognostics of microelectromechanical systems[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(1): 143-151.
- [25] TAO X M. Wearable electronic and photonics [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2004: 198-214.
- [26] KEIMEL C, CLAYDON G, LI Bo, et al. Microelectromechanical-systems-based switches for power applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4): 1163-1169.
- [27] 林奕翔. 智能服装服饰检测认证[C]//国际智能服装服饰产业高峰论坛. 深圳: 深圳市智能服装服饰产业发展研究协会, 2017.
- [28] 沈雷, 方东根, 童夏青. 安全性服装的设计模式[J]. 纺织学报, 2015, 36(5): 158-164.
SHEN Lei, FANG Donggen, TONG Xiaqing. Design process of security clothing [J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(5): 158-164. (in Chinese)
- [29] DING W, NAGAI Y, LIU Jing, et al. Designing comfortable smart clothing: for infants' health monitoring [J]. International Journal of Design Creativity and Innovation, 2018: 1-13.
- [30] PERRY A, MALININ L, SANDERS E, et al. Explore consumer needs and design purposes of smart clothing from designers' perspectives [J]. International Journal of Fashion Design, Technology and Education, 2017, 10(3): 372-380.
- [31] HWANG C, CHUNG T L, SANDERS E A. Attitudes and purchase intentions for smart clothing: Examining US consumers' functional, expressive, and aesthetic needs for solar-powered clothing [J]. Clothing and Textiles Research Journal, 2016, 34(3): 207-222.
- [32] WU Chaoxing, KIM T W, GUO Tailiang, et al. Wearable ultra-lightweight solar textiles based on transparent electronic fabrics [J]. Nano Energy, 2017, 32(2): 367-373.
- [33] 侯成义. 面向智能服装的功能仿生柔性器件[C]//国际智能服装服饰产业高峰论坛. 深圳: 深圳市智能服装服饰产业发展研究协会, 2017.
- [34] 陈韦. 智能穿戴纳米技术[C]//国际智能服装服饰产业高峰论坛. 深圳: 深圳市智能服装服饰产业发展研究协会, 2017.
- [35] 赵猛. 石墨烯导电纤维及发电服装突破智能穿戴续航瓶颈[C]//国际智能服装服饰产业大会. 上海: 上海国际智能服装服饰博览会, 2018.
- [36] 张海煊. 智能服装服饰[C]//国际智能服装服饰产业大会. 上海: 上海国际智能服装服饰博览会, 2018.
- [37] 周海峰. 数据驱动服装产业, 从消费者的体验端开始 [C]//国际智能服装服饰产业大会. 上海: 上海国际智能服装服饰博览会, 2018.
- [38] KOBERNICK D. 从客户角度来看待智能科技[C]//国际智能服装服饰产业大会. 上海: 上海国际智能服装服饰博览会, 2018. (责任编辑: 邢宝妹)