

智能传感纺织品研究进展

熊莹,陶肖明

(香港理工大学 智能可穿戴研究中心,中国香港 999077)

摘要:为了分析智能传感纺织品的研究现状,介绍近5年基于纺织的力学、温度、湿度、化学相关传感器的研究。详细阐述传感纺织品在纤维、纱线及织物层面的制造方法,重点介绍使用纺织结构形成柔性传感器件的方法,如通过针织、梭织、刺绣等方式将导电纱线有序地织入织物中,或者通过涂层方式获得传感纺织器件。分析不同传感纺织品的传感原理,并对不同原理传感器进行分类和对比。列举传感纺织品在健康监护及生物医学方面的应用,为智能传感纺织品的研究提供参考。

关键词:智能纺织品;传感器;力学传感;温度传感;湿度传感;化学品传感

中图分类号:TS 106

文献标志码:A

文章编号:1000-4033(2019)07-0008-05

Research Progress of Smart Sensing Textiles

Xiong Ying, Tao Xiaoming

(Research Centre for Smart Wearable Technology, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract:In order to analyze the research status of smart sensing textiles, this paper introduces the research on textile-based stress, temperature, humidity and chemical related sensors in the past five years and elaborates the manufacturing methods of sensing textiles at the fiber, yarn and fabric level. The methods of fabricating a flexible sensor device using a textile structure, such as knitting, weaving, embroidery, etc., inserting conductive yarns into the fabric in an orderly manner, and obtaining a sensing textile device by coating are mainly introduced. At the same time, the sensing principles of different sensing textiles are analyzed, and the sensors of different principles are classified and compared. The application of sensing textiles in health monitoring and biomedicine is listed, which provides a reference for the research of smart sensing textiles.

Key words:Smart Textiles; Sensor; Stress Sensing; Temperature Sensing; Humidity Sensing; Chemical Sensing

智能纺织品是赋予普通纺织品功能性使其能与环境或用户进行相互作用的新型纺织品^[1-3]。通过整合不同类型的基于纺织品的功能元件,如传感功能、信息处理功能及执行功能等,可以形成完整的智能纺织品系统。

传感器用于检测信号,是被动

智能材料的基本元素。传感纺织品是目前电子纺织品及柔性可穿戴技术的研究重点。对于传感纺织品,可以通过对纺织品基材的内在和外在修饰来创建感测功能^[4]。织物传感器对多种物理和化学刺激敏感,可以用于测量力、化学品、湿度和温度变化等^[5-8]。如今,可穿戴

传感纺织品技术成为健康监护、生物医学、军事和航空航天等领域的研究热点^[9-11]。

本文研究用于力学、温度、湿度及化学品传感的纺织品传感器,重点介绍纺织品传感器的制备方法 & 传感原理,为智能传感纺织品的进一步研究提供参考。

基金项目:国家重点研发项目(2018YFC2000900);香港创新科技基金(ITP/36/16TP)。

获奖情况:“第五届(2019年)全国针织编技术研讨会”优秀论文。

作者简介:熊莹(1991—),女,博士生。主要从事智能纺织材料与纺织品研究。

通讯作者:陶肖明(1957—),女,讲座教授,博士。E-mail:xiao-ming.tao@polyu.edu.hk。

1 力学传感

导电纺织品会对因施加外力所导致的变形产生电特性改变,该特性可以作为力学传感原理^[12]。常见的纺织力学传感器包括压力传感器和应变传感器。力学传感原理有电阻式、电容式、压电式等。对于力学传感纺织品,赋予其导电性是基本条件,可从纤维、纱线、织物3个结构层面引入导电特性。导电纤维可以是本身具有导电性能的金属丝、导电聚合物或碳纤维等,也可以通过纺丝将具有导电性能的材料混合到普通聚合物中,或通过涂层方式将导电材料涂覆到纤维上^[10,12]。导电纱线可由普通纤维与导电纤维加捻或直接涂覆导电材料获得^[13-14]。涂层可直接应用于织物表面用来生产导电纺织品^[15],常用的纺织品涂布工艺包括浸渍、化学镀、蒸发沉积、溅射等。另一种方式是将导电纱集成到纺织结构中,如针织、梭织、编织等^[14,16]。

1.1 电阻式传感

与其他形式相比,电阻式传感器的测量及原理较简单。对于电阻式传感纺织品而言,当施加外力时,纱线内部电阻改变或纱线间接触电阻改变,均可引起测量电阻变化。接触电阻是指两个物理接触的导电体之间的电阻。根据 Holm 理论^[17],两个接触物体的接触电阻可用式(1)表示。

$$R_k = \frac{\rho}{1.13} \sqrt{\frac{\varepsilon H}{nF}} \quad (1)$$

式中: R_k 表示两个接触物体的接触电阻; ρ 和 H 分别表示物体的电阻率和硬度(假设两个物体的材料相同); n 表示接触区域中接触点的数量(在宏观尺度中,接触表面实际上由许多单独的接触点组成); F 表示施加的接触力; ε 表示常量参数。

由式(1)可知,接触电阻与接触力 F 和接触点数量 n 呈反比。随着接触数 n 和接触力 F 的增加,接触电阻将相应地减小。

接触电阻是纺织应变传感器的关键机制,因此,如何通过纺织材料和结构来构造接触点是纺织传感器设计的关键。导电纺织品接触电阻的变化可在纤维、纱线及织物层面发生^[16]。

在纤维尺度上,导电纤维表面可通过物理或化学处理,如等离子体和液氮处理,得到随机或规则分布的裂缝,在纤维延伸和恢复周期中通过打开和关闭裂缝构建接触点的变化,从而改变纤维电阻。此外,也可通过化学方法将导电粒子附着在纤维表面或将导电粒子加入纤维内部成为纤维复合物,在纤维拉伸和恢复过程中,导电粒子之间的接触变化同样可以引起测量电阻的变化^[14]。接触点数量和纤维应变之间的关系将决定传感器的灵敏度,而该应变传感器的可重复性将由纤维的恢复能力决定。

在纱线尺度上,除了纤维上的接触电阻,还存在纤维与纤维之间的接触电阻^[13]。当纱线被拉伸时,纱线内部的纤维将产生横向压力,接触电阻将随着接触力的增加而减小,同时,纤维之间的间隙减小,纤维与纤维接触的数量也将增加,这两个因素同时降低了纱线的总电阻。

在织物尺度上,除了纤维上的接触电阻和纱线中纤维与纤维之间的接触电阻外,还存在纱线与纱线的接触。在织物结构中,接触的纱线、纤维的实际数量将随着压力的增加或织物的延伸而增加,更多的纤维将转移到直接接触界面,从而降低纱线接触的总电阻。不同的织物结构将产生不同分布的纱线

接触,并且可相应地构造不同的电路网络,该电路网络可以影响织物传感器的特性。针织结构特别是纬编结构,由于具有良好的延伸性和回复性,因此成为制造应变传感器的常用组织^[18]。将导电弹性纱织入纬平纹组织,能够制备出具有高稳定性(高达500次循环拉伸)、大应变(高达200%)的应变传感器。针对导电纱编织纬平纹织物的线圈电阻模型及电路网络已有学者进行了研究^[19]。

涂层得到的导电织物也可以用作电阻式应变传感器^[11]。如,在弹性锦纶、聚氨酯纬编织物上涂覆氧化石墨烯(GO)纳米片,然后用硼氢化钠还原氧化石墨烯(RGO),制造柔性应变传感织物^[15]。传感机理是由织物的结构变形引起导电RGO纳米片的接触变化,从而引起织物电阻的变化。随着织物被拉伸到一定程度,RGO纳米片在织物上的重叠程度降低。该类传感器在0~30%的应变范围内具有较高灵敏度。

1.2 电容式传感

电容式传感器基于电容器原理制造而成,由两个相对的电极以及电极中间的介电层组成。传感器的电容可由式(2)来描述。

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (2)$$

式中: C 表示电容; A 表示电极面积; d 表示电介质厚度; ε_0 表示真空介电常数; ε_r 表示电介质的相对介电常数。

对于电容式传感器而言,其电容的改变可由电极面积、电极间距离、相对介电常数的改变实现。电极间距离改变是纺织电容传感器的常用原理。

在电容压力传感器中,导电纱线及织物均可作为电极,而介电层

则由不导电、低模量、易变形的材料构成,一般是织物、合成泡沫、软聚合物,如硅胶、聚氨酯等^[20-22]。纤维或纱线型电容传感器具有结构简单、可组装等优势。两根导电纱涂上介电硅胶后交叉叠放在一起可形成压力传感器,当施加压力时,纱线交叉处的电极对应面积增大,电极间距离减小,电容增大^[20]。该传感器灵敏度高(0.21 kPa^{-1})、响应迅速(约 40 ms)、弛豫时间短暂(约 10 ms)。这得益于该类压力传感器的垂直交叉结构,使得硅胶层能够在外部压力下有效地变形,从而可以可逆地存储和释放能量。纱线型电容传感器也可以用于拉伸传感,扭转结构^[21]、多壳芯结构^[22]的拉伸电容传感器均有被研究,但其滞后性以及可重复性仍需要改善。

织物型电容传感器以导电织物为电极,对于压力传感器而言,两块织物电极之间介电层的可变形性及回复性决定了传感器的灵敏度和迟滞程度。两片导电纬平纹织物层压在微结构硅树脂介电层上,可形成灵活、灵敏度高的压力电容传感器^[23]。由于弹性体介电层内存在微孔,该压力传感器即使在非常小的压力下也可高度变形,从而显著提高其灵敏度。此外,压缩下微孔的逐渐闭合增加了有效介电常数,从而进一步增强了传感器的灵敏度。同时,由于针织物表面存在起伏空间,当针织物的表面层压到硅氧烷弹性体上时,这些空间在硅氧烷弹性体和导电织物的表面之间形成气隙,这些气隙为该织物传感器增加了第二介电层,从而提高了灵敏度。

织物电容传感器也可以用于触感感应,用作可穿戴键盘^[24]。人体触摸检测的感测原理是测量导

电织物电极和人体手指之间的电容。针织物作为基底赋予其良好的拉伸性,同时提供了可穿戴品的自然兼容性。导电聚合物 PEDOT:PSS 在基底上形成图案化的电极,再涂覆上硅胶,制成响应人手触摸的电容传感器,此类触摸传感器可为新型可穿戴人机界面服务。

1.3 压电型传感

压电型压力或应变传感器的原理是基于压电效应,当外部压力或应变施加到压电材料上时,瞬间产生电荷。压电型压力或应变传感器具有超快的响应时间和高灵敏度,但只能用于动态压力或应变的测量。压电现象仅发生在某些具有非中心对称晶体结构的材料中。由于氧化锌(ZnO)纳米线和含铅材料如锆钛酸铅(PZT)具有很高的压电常数,因此被广泛用于柔性压力传感器^[25]。然而,无机材料的使用显示出如制造工艺成本高、含铅材料毒性高等缺点,而且其柔韧性有机材料和聚合物不具有可比性,并且由于其动态响应范围较小而限制了应用。

聚合物压电材料如聚偏二氟乙烯(PVDF)以及聚合物和无机压电材料的复合材料具有良好的机械柔韧性及压电性能,在某些应用中远远优于刚性材料^[26]。例如,具有导电芯的熔融纺丝得到的 PVDF 纤维以刺绣方式结合到手套上,可以作为传感器元件^[27]。

2 温度传感

核心体温是临床判断和健康管理的重要参数之一。纺织温度传感器可集成到服装中,用于在非临床环境中人体温度的连续测量和监控。

温度传感技术所用材料有热敏电阻、热电偶以及电阻温度检测器^[3,28]。热敏电阻芯片可嵌入纱线

纤维中用于开发电子温度传感纱线,该纱线可以嵌入纺织品或服装中^[7,29]。使用树脂封装热敏电阻可以保护热敏电阻免受机械和化学应力的影响。该温度传感器的温度测量范围为 $25\sim 38^\circ\text{C}$,响应时间为 $0.01\sim 0.35 \text{ s}$ 。热电偶由两根不同的导线制成,这些导线焊接在一起并且需要相对复杂的调节电子元件。

相比于热敏电阻及热电偶,电阻式温度传感器具有相对较高的灵敏度,并且可以集成到纺织品基底中。电阻式温度传感器是根据电阻与温度的关联性来测量温度。通常,金属线在很大的温度范围内表现出线性响应,具有稳定性高和抗环境干扰特性^[30],但金属线的高刚性限制了其集合到织物上的方式,同时也限制了整个电子纺织系统的灵活性。选择最适合嵌入传感元件的纺织结构和纺织工艺很重要。

除了缝纫、刺绣,也可以选择针织和梭织结构。针织结构相比于梭织结构具有更好的透气性和舒适性。将感测线以衬纬的方式嵌入针织结构中生产温度感测织物的方法可行^[31],制备的温度传感器可测量范围为 $20\sim 50^\circ\text{C}$,电阻-温度曲线呈线性趋势,测定系数范围为 $0.990\sim 0.999$ 范围内。

3 湿度传感

基于纺织品的湿度传感器是智能可穿戴电子纺织品的重要组成部分,在管理伤口、失禁、皮肤病症或服装微气候控制方面具有潜在应用。

湿度传感机制包括电阻式和电容式,电阻式是通过电导率的改变来响应湿度变化,而电容式是通过介电常数的改变来响应湿度变化^[8]。常用的是电阻式湿度传感器,

当湿度改变时,金属纱线(如不锈钢纱线)、导电聚合物(如 PEDOT: PSS)的电阻会发生变化^[32]。传统方式是通过刺绣或印刷将湿度敏感元件附着在纺织品上^[33]。

基于纺织品的湿度传感器的最新解决方案是开发可用作湿度传感器的智能纱线^[8],研究难点在于能够制造具有适当导电性和对水分子敏感性的坚韧长丝。一维单层碳纳米管(SWCNT)是制造具有导电网络的理想材料,而聚乙烯醇(PVA)是一种环境友好型聚合物,吸水后膨胀,这意味着 PVA 分子链可被水分子改变。由湿纺工艺制造的超强 SWCNT、PVA 长丝可用于开发可穿戴纺织品湿度传感器。长丝中的导电 SWCNT 网络可通过吸收水分子使 PVA 分子链溶胀来调节管间距离,在潮湿条件下,SWCNT、PVA 长丝的直径可达到干燥时的两倍,该SWCNT、PVA 长丝生产的纺织品湿度传感器在较高的相对湿度(60%~100%)下显示出较高灵敏度,并且在相对较短的响应时间(40 s)内电阻增加超过 24 倍。

4 化学品传感

有毒气体和化学品检测是对未知环境及某些工作场所安全评估的一项重要指标。具有化学传感功能的纺织传感器可以将小型化学或气体传感器通过缝合附着到织物基底上,或者将化学敏感聚合物涂层到纺织品上^[34]。

常用于制造纺织化学品传感器的活性或敏感材料是导电聚合物,如聚吡咯和聚苯胺^[35-36]。这些导电聚合物的电阻对化学环境敏感,例如,掺杂铜和钼的聚吡咯显示出对氢气和一氧化碳气体的电阻变化。导电聚合物可通过化学或电化学沉积直接合成到织物表面,或通

过喷墨印刷、丝网印刷、选择性浸涂、染料涂覆或静电纺丝技术沉积结合到织物上^[37]。

除了导电聚合物,石墨烯也在制造柔性化学传感器中发挥作用,可用于检测各种气体,如二氧化氮、氨、氢气、硫化氢、二氧化碳和二氧化硫等^[38],也可检测有毒重金属离子(如汞、铅、铬等)和挥发性有机化合物,包括硝基苯、甲苯、丙酮、甲醛、胺类、酚类、爆炸物、化学试剂和环境污染物等。

5 结束语

基于纺织的传感器设计使用不同的结构,可制备具有传感性能的纤维、纱线、织物,也可通过纺织方法将传感元件集合到纱线、织物中,以赋予它们电阻、电容等传感特性。纺织传感器的灵敏度范围在很大程度上取决于其应用目的以及几何形状和机械要求。制备纺织传感器是一个复杂的过程,因为需要确保传感器具有传感功能,同时要求织物穿着舒适、手感柔软。纺织传感器提供了传统电子设备无法实现的技术可能性,但与它们的传统电子对应物相比,传感性能及稳定性还需进一步提高。此外,大规模生产、生产成本以及实际应用也是一个挑战。柔性电子技术的发展以及现有电子元件的小型化和纳米复合材料的进步将会推动纺织传感器的发展和应用。

参考文献

[1]陶肖明.交互式的织物和智能纺织品[C]//提高全民科学素质,建设创新型国家——2006 中国科协年会论文集(下册).北京:2006 中国科协年会,2006: 116-125.
[2]ZENG W, SHU L, LI Q, **et al**. Fiber-based wearable electronics: a review of materials, fabrication, devices, and applications[J].Advanced Materials,2014, 26(31):5310-5036.

[3]WENG W, CHEN P, HE S, **et al**. Smart electronic textiles [J].Angewandte Chemie International Edition,2016,55 (21):6140-6169.
[4]SEYEDIN S, ZHANG P, NAEBE M, **et al**. Textile strain sensors: a review of the fabrication technologies, performance evaluation and applications [J].Materials Horizons,2019,6(2):219-249.
[5]田明伟,李增庆,卢韵静,等.纺织基柔性力学传感器研究进展[J].纺织学报,2018,39(5):170-176.
[6]ATALAY O, ATALAY A, GAFFORD J, **et al**. A highly sensitive capacitive-based soft pressure sensor based on a conductive fabric and a microporous dielectric layer [J].Advanced Materials Technologies,2018,3(1):1700237.
[7]HUGHES-RILEY T, LUGODA P, DIAS T, **et al**. A Study of thermistor performance within a textile structure [J].Sensors,2017,17(8):1804.
[8]ZHOU G, BYUN J H, OH Y, **et al**. Highly sensitive wearable textile-based humidity sensor made of high-strength, single-walled carbon nanotube/poly (vinyl-alcohol) filaments[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2017,9(5):4788-4797.
[9]谢浩月,唐虹,顾琳燕,等.基于温湿度监测功能的智能消防内衣研究[J].针织工业,2019(5):58-62.
[10]WANG F, LIU S, SHU L, **et al**. Low-dimensional carbon based sensors and sensing network for wearable health and environmental monitoring [J].Carbon,2017,121(1):353-367.
[11]WANG X, TAO X, SO R C H, **et al**. Monitoring elbow isometric contraction by novel wearable fabric sensing device [J].Smart Materials and Structures,2016, 25(12):125022.
[12]CHEN S, LIU S, WANG P, **et al**. Highly stretchable fiber-shaped e-textiles for strain/pressure sensing, full-

- range human motions detection, health monitoring, and 2D force mapping [J]. 2018, *Journal of Materials Science*, 53(4):2995–3005.
- [13] CHENG Y, WANG 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.
- [14] WU X D, HAN Y Y, ZHANG X X, **et al.** Highly sensitive, stretchable, and wash-durable strain sensor based on ultrathin conductive layer[®] polyurethane yarn for tiny motion monitoring [J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(15):9936–9945.
- [15] CAI G, YANG M, XU Z, **et al.** Flexible and wearable strain sensing fabrics [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 325(2):396–403.
- [16] ZHANG H. Flexible textile-based strain sensor induced by contacts [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(10):105102.
- [17] HOLM R. *Electric contacts: theory and application* [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [18] SEYEDIN S, MORADI S, SINGH C, **et al.** Continuous production of stretchable conductive multifilaments in kilometer scale enables facile knitting of wearable strain sensing textiles [J]. *Applied Materials Today*, 2018(11):255–263.
- [19] WANG J, LONG H, SOLTANIAN S, **et al.** Electro-mechanical properties of knitted wearable sensors: part 2-parametric study and experimental verification [J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(2):200–213.
- [20] LEE J, KWON H, SEO J, **et al.** Conductive fiber-based ultrasensitive textile pressure sensor for wearable electronics [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(15):2433–2439.
- [21] CHOI C, LEE J M, KIM S H, **et al.** Twistable and stretchable sandwich structured fiber for wearable sensors and supercapacitors [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12):7677–7684.
- [22] FRUTIGER A, MUTH J T, VOGT D M, **et al.** Capacitive soft strain sensors via multicore-shell fiber printing [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(15):2440–2446.
- [23] ATALAY O, ATALAY A, GAFFORD J, **et al.** A highly sensitive capacitive-based soft pressure sensor based on a conductive fabric and a microporous dielectric layer [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(1):1700237.
- [24] TAKAMATSU S, LONJARET T, ISMAILOVA E, **et al.** Wearable keyboard using conducting polymer electrodes on textiles [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22):4485–4488.
- [25] LIAO X, LIAO Q, ZHANG Z, **et al.** A highly stretchable ZnO fiber-based multifunctional nanosensor for strain/temperature/uv detection [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(18):3074–3081.
- [26] TRUNG T Q, LEE N E. Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring and personal healthcare [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22):4338–4372.
- [27] AKERFELDT M, LUND A, WALKENSTR M P. Textile sensing glove with piezoelectric PVDF fibers and printed electrodes of PEDOT:PSS [J]. *Textile Research Journal*, 2015, 85(17):1789–1799.
- [28] LI Q, ZHANG L N, TAO X M, **et al.** Review of flexible temperature sensing networks for wearable physiological monitoring [J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2017, 6(12):1601371.
- [29] LUGODA P, HUGHES-RILEY T, MORRIS R, **et al.** A wearable textile thermograph [J]. *Sensors*, 2018, 18(7):2369.
- [30] LI Q, CHEN H, RAN Z Y, **et al.** Full fabric sensing network with large deformation for continuous detection of skin temperature [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(10):105017.
- [31] HUSAIN M D, KENNON R, DIAS T. Design and fabrication of temperature sensing fabric [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2014, 44(3):398–417.
- [32] CASTANO L M, FLATAU A B. Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(5):053001.
- [33] MECNIKA V, HOERR M, JOCKEHOEFEL S, **et al.** Preliminary study on textile humidity sensors [C]// *Smart SysTech 2015: European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies*. Aachen: VDE, 2015: 1–9.
- [34] TESSAROLO M, GUALANDI I, FRABONI B. Recent progress in wearable fully textile chemical sensors [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(10):1700310.
- [35] WANG Y, QING X, ZHOU Q, **et al.** The woven fiber organic electrochemical transistors based on polypyrrole nanowires/reduced graphene oxide composites for glucose sensing [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2017, 95(1):138–145.
- [36] ZHAO J, WU G, HU Y, **et al.** A wearable and highly sensitive CO sensor with a macroscopic polyaniline nanofiber membrane [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(48):24333–24337.
- [37] PARRILLA M, CANOVAS R, JEEPAPAN I, **et al.** A textile-based stretchable multion potentiometric sensor [J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2016, 5(9):996–1001.
- [38] SINGH E, MEYYAPPAN M, NALLWA H S. Flexible graphene-based wearable gas and chemical sensors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(40):34544–34586.

收稿日期 2019年5月10日