

互联网时代的弄潮儿 ——可穿戴医疗设备

王玲, 战鹏弘, 刘文勇

北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100191

摘要 随着移动医疗的强势兴起、智能传感等新技术的发展以及个性化健康观念的普及, 智能可穿戴设备近年来发展迅速, 其中与健康医疗相关的可穿戴设备已成为最有前景的领域之一。本文从可穿戴医疗设备涉及的新型材料技术、智能传感技术、无线数据传输技术、低功耗电路设计技术、能源采集与存储技术和大数据分析技术等方面, 综述了可穿戴医疗设备关键技术的最新进展, 并分析了该领域未来的趋势和面临的挑战。

关键词 可穿戴; 移动医疗; 智能传感; 电子织物; 大数据

2014年被誉为“可穿戴设备元年”。在这一年的通信界顶级盛会——世界移动通信大会(MWC)上, 众多智能可穿戴设备惊艳亮相。三星 Gear2 智能手表、索尼 SmartBand 智能手环、华为 TalkBand B1 智能手环等, 争相走入消费大众的视野, 预示着可穿戴设备的爆发与普及^[1]。科技巨头苹果公司于2014年发布了旗下的可穿戴设备——Apple Watch, 并于2015年正式上市。该产品除具有打电话、接收短信等基本通信功能外, 更具备健康和运动追踪功能。市场研究机构 Transparency Market Research 在2014年的研究中表明, 医疗是可穿戴设备最具前景的应用领域(其次还可用于健身和娱乐), Ahadome 预测医疗在智能可穿戴设备应用中的占比可超过50%。

什么是可穿戴医疗设备? 广义上讲, 可以理解成具有临床(健康)监护或者治疗(保健)用途的随身衣物和配饰。这种以衣物或配饰为存在形式的新型医疗设备, 融合了当前最

先进的材料、传感、电路设计、信息传输和处理等前沿技术, 力求在实现特定医疗功能的同时给人们提供最舒适便捷的用户体验, 彻底颠覆了消费者对传统医疗设备的认知。这种充满时尚气息甚至科幻感的医疗设备, 是各领域新兴科技飞速发展后诞生的宠儿。各种不同功能的高性能材料, 以编织、印刷、刺绣等各种方式^[2]融入衣物和配饰, 构成了可穿戴设备中最关键的部件, 即传感生物信号的高灵敏度柔性传感器, 处理生物信号的柔性电路板、传导生物信号的舒适导电纤维, 还有采集太阳能、人体机械能等绿色能源的高效供能模块。新型的材料技术、高性能传感器设计技术、低功耗的电路设计技术、安全有效的无线信息传输技术及高效的能量采集与存储技术, 这五大技术共同构成了可穿戴医疗设备的核心技术(图1)。本文将通过阐述这几项技术的发展, 让读者了解可穿戴医疗设备的现状和未来。



图1 可穿戴医疗设备及其五大关键技术

收稿日期: 2016-11-08; 修回日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272039, 61101008)

作者简介: 王玲, 讲师, 研究方向为生物医学建模和信息处理, 电子邮箱: lingwang@buaa.edu.cn; 刘文勇(通信作者), 讲师, 研究方向为医用机器人技术, 电子邮箱: wylu@buaa.edu.cn

引用格式: 王玲, 战鹏弘, 刘文勇. 互联网时代的弄潮儿——可穿戴医疗设备[J]. 科技导报, 2017, 35(2): 12-18; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.02.001

1 可穿戴医疗设备的关键技术

1.1 可穿戴材料

新型导体和半导体材料的发展为可穿戴医疗设备的设计提供了新的动力,例如导电高分子聚合物、金属和金属氧化物的纳米粒子、碳基纳米材料等^[9],这些材料在具有良好导电性的同时,又具有很好的机械特性,其制作成的导电织物具有柔软、轻薄、易拉伸变形的特点^[4],非常适合于可穿戴医疗设备。可穿戴材料技术贯穿于整个可穿戴技术,无论是传感器的设计还是电路的制备,都离不开高性能的材料。

无机半导体材料在可穿戴柔性压力传感器领域展现了广阔的应用前景,例如代表性的ZnO和ZnS材料,具有良好的压电特性,制作出的压力传感器无论在响应速度还是在分辨率上都有优异的表现^[5]。碳纳米管具有结晶度高、导电性好、比表面积大、微孔大小可通过合成工艺加以控制,比表面利用率可达100%的特点^[6]。Chun^[7]等利用多臂碳纳米管和银复合,并通过印刷方式得到的导电聚合物传感器,在140%的拉伸下,电导率仍然高达 $20 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。印刷电子产品(图2)具有大面积、弯曲与拉伸性好、低成本和污染小的特点,所采用的油墨或者墨水是具有电学特性(包括导电、介电或半导体)的纳米材料。导体无机纳米材料中的纳米银具有良好的电学特性和成熟的制备方法,较早地应用于印刷电子的制备。而半导体无机纳米材料由于具有较高的电荷迁移率,而且性能较少受外界环境影响的特点,近些年受到越来越多的关注^[8]。普通的织物通常来说都是绝缘材料,但是在导电织物

中,导电材料被通过一定的形式编织到织物中,制作的衣物与正常的衣物无异却具有导电能力^[9](图3),利用导电织物制作的织物天线具有轻便、易携带、隐藏性好等优点,可以满足可穿戴医疗设备对于信号传输的需求。

Cityzen sciences开发了一款关注身体健康的智能衬衫D-Shirt^[10](图4),衬衫纤维中的传感器可以监测运动、心率、速度、呼吸方式、GPS定位等数据。这款衬衫的关键不在于衣服本身,而在于编织在衣服中的导电纤维;Radiate Athletics团队开发的Radiate是一款能够帮助运动者监测身体特定部位或肌肉群的训练情况的运动T恤^[11](图5),能即时感应运动者身体各部位所散发的热量,并通过颜色的变化来传递信息,让运动者随时了解肌肉及血管得到的锻炼情况;在Hexoskin公司开发的一款运动背心^[12](图6)中集成了生物传感器,可以测量心率、心率变化/恢复、步数、卡路里消耗和呼吸等数据,夜间还能追踪睡眠和环境,包括睡觉的姿势及心跳和呼吸活动。

穿戴材料技术的发展,不仅在功能上实现了人体各种生理信号的采集,而且在穿戴的舒适性上也取得了很大的提升,这也为新生儿的健康监测提供了新的思路。体质较弱的新生儿,尤其是具有先天性疾病的婴儿,出生后的一段时间内必须要实时监测其身体状况^[13]。新的轻薄柔软导电织物^[14]的出现,非常适用于设计婴儿的可穿戴医疗设备。柔软轻薄的导电织物不会对婴儿的身体造成伤害,同时可实现各种生理参数的实时检测,例如心电、体温、呼吸等^[15](图7)。

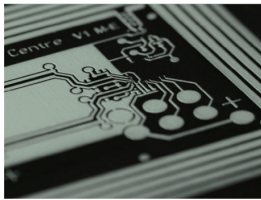


图2 印刷电路

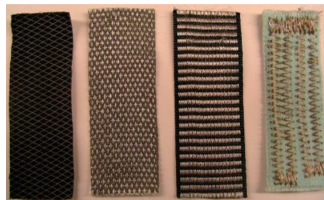
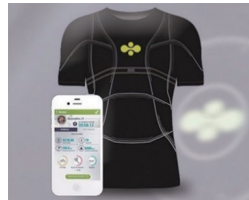
图3 导电织物材料^[9]图4 D-Shirt^[10]图5 Radiate^[11]图6 Hexoskin^[12](a) 胎儿体温检测^[16](b) 胎儿心电监测^[17](c) 完整的胎儿可穿戴医疗设备^[18]

图7 胎儿可穿戴医疗设备

1.2 传感器技术

穿戴医疗设备监测的各种生理信号和生命体征都需要依靠强大的生物传感技术。因此,高灵敏抗噪的柔性传感器设计是可穿戴医疗设备的核心之一。随着材料和电子科技的发展,可穿戴的生物传感器性能逐渐升级。从较为常见的监测心电的导电织物^[19](图8)、监测脉搏和血氧的光电传感指环、监测呼吸的压电腰带和胸带、监测体温的红外线耳环等^[20],到更为新颖的随身“纹身”^[21](钠离子传感器,它通过监测佩戴者汗液中的钠离子含量以通知佩戴者电解质的平衡情况)(图9)等,可穿戴传感器向着更多的功能、更稳定的信号和更低的功耗方向不断发展。石墨烯是近年来材料研究领域的热点,首尔国立大学Dae-Hyeong Kim团队发明了一种可监测并调节血糖水平的石墨烯腕带^[22](图10),创造性地将石墨烯与金掺杂在一起,使石墨烯变成了可以检测皮肤温度和湿度、汗液pH和葡萄糖浓度的传感器,最终根据皮肤的温度和湿度、汗液的pH值和葡萄糖浓度,综合分析出血糖浓度。鲍哲楠等^[23]研究了一种基于微毛结构的柔性压力传感器(图11),该传感器对于脉搏跳动带来的压力变化有很强的放大作用,因此可以很好地检测人体脉搏信号,同时由于该传感器超轻超薄,可以在不影响人体运动的情况下长时间佩戴,非常适用于可穿戴医疗设备。麻省理工大学和新加坡科技与设计大学的团队^[24]研究出一种高顺应性的碳纳米管纤维

弹性应力传感器(图12),具有超过900%的拉紧程度及高灵敏度和响应速度,用于手套裤袜等衣物上可以很好地检测人体运动状态,具有很大的应用潜力。



图8 心电电极^[19]



图9 纹身传感器^[21]

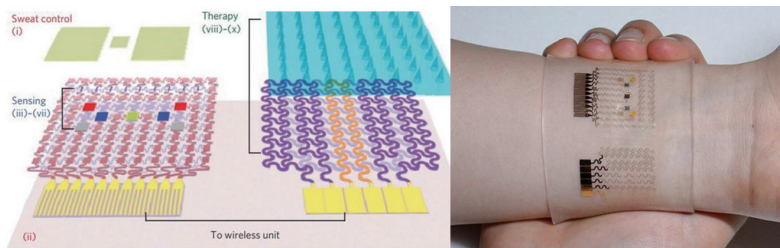


图10 石墨烯腕带^[22]

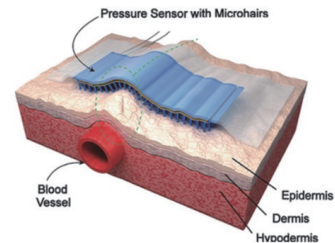


图11 基于微毛结构的柔性压力传感器^[23]

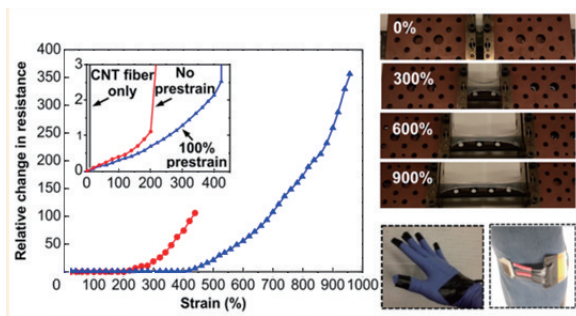


图12 碳纳米管纤维弹性应力传感器^[24]

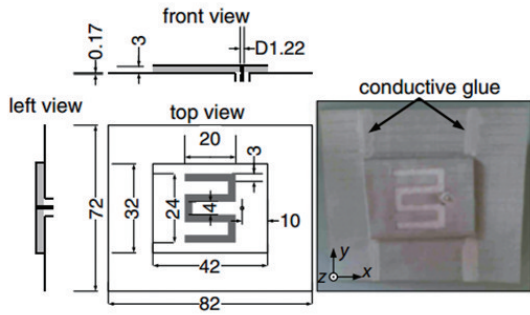
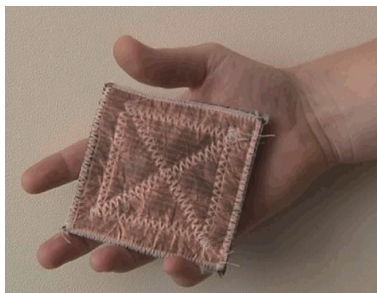
1.3 无线数据传输

可穿戴医疗设备采集到的人体生理数据是海量的,同时,设备本身舒适便携的需求使其前端趋于微型化。因此,必然要将可穿戴终端采集的数据上传至电脑等处理器或者

移动互联网的“云端”进行海量计算,其计算结果又需要传至可穿戴终端反馈给用户,而高效安全的无线传输技术则是这种服务模式的保证^[25]。目前使用较广泛的无线通信技术主要有:Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、红外等,其中,蓝牙和ZigBee常被用作可穿戴医疗设备的数据传输方式。ZigBee协议具有功耗低、成本低的特点,尤其是低功耗的特点非常适合于可穿戴医疗设备,据估计,使用ZigBee的设备仅靠两节5号电池就可以维持长达6个月以上的使用时间,缺点是传输速率较低。蓝牙传输协议具有速度快、功耗低、安全性高的特点,而且蓝牙模块已经成为目前市场上主流智能移动设备(例如手机、平板等)的必备功能模块,使用蓝牙传输协议的可穿戴医疗设备可以方便地与智能移动设备进行数据传输^[26]。

随着导电织物技术的发展,一项新的技术——可穿戴天线^[27]得以发展,在结构上更加小巧、便携,并且柔软可弯曲,非

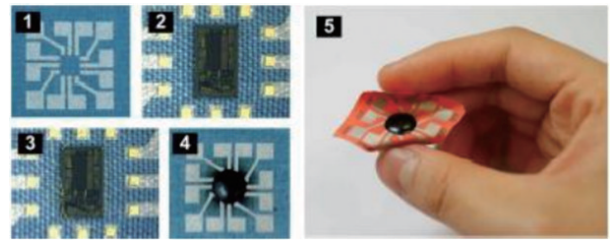
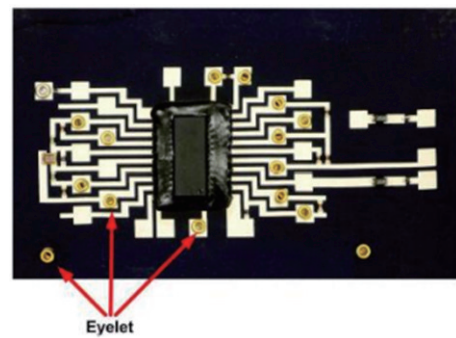
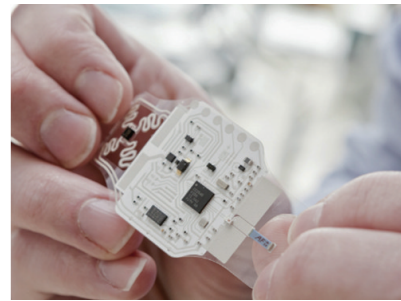
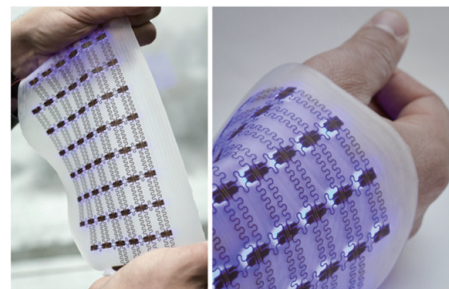
常适合于可穿戴数据无线传输。Katholieke Universiteit Leuven(比利时天主教鲁汶大学)和 Universiti Malaysia Perlis(马来西亚玻璃市大学)的学者首次开发出一种完全由织物构成的电线^[28](图13),其结构小巧而且具有很强的鲁棒性,可以用于2.45 G和5.4 G双波段的无线传输;Patria^[29]公司是一个从事织物天线研究的公司,该公司开发了一种由传统或工业织物制作的织物天线(图14),其导电天线部分由流行的导电纤维制成。

图13 织物天线结构^[28]图14 Patria公司的织物天线^[29]

1.4 电路设计

无论是传感器还是织物天线,都需要通过电路连接成为一个整体后,才能使可穿戴医疗设备具备其应有的功能,电路设计是可穿戴医疗设备功能实现的重要保障。同时,良好的电路设计也是决定可穿戴医疗设备能否实现便携、可穿戴的重要因素之一^[30]。传统的印制电路板(printed circuit board, PCB)电路设计采用的电路板通常是由玻璃纤维等材料制成,材质硬、厚度和体积等较大,尤其是对于复杂的可穿戴医疗系统,电路设计较为复杂,将传统的电路板缝制在衣物上会显著地影响穿戴的舒适性,对信号采集的质量也会带来一定的影响。F-PCB(planar fashionable circuit board)是一种电路板制版的新技术^[31],其底板由织物制成,通过丝网印刷技术将电路印刷在织物底板上,集成电路元件放置在织物底板上并通过上面的导电纤维等导电材料进行连接,最后用不导电的环氧基树脂进行封装,制成稳定的电路系统(图15)。F-PCB电路板基于导电织物制成,结构上柔软有弹性,非常适合于可穿戴医疗设备。韩国科学技术院的研究者在该项技术的基础上,基于导电织物制作出了多层织物电路板^[32](图

16),将F-PCB技术又向前推进了一步。OLAE(organic and large area electronics)技术通过丝网印刷将电子元件固定在柔软的贴片上,并且采用导电黏合剂实现了多层电路板的设计,同时集成了低功耗蓝牙模块、加速度计、温度传感器和湿度传感器等用于信号的采集和传输^[33](图17)。基于OLAE技术的另一种电路设计是将电路印刷在聚二甲基硅氧烷(PDMS)材料上(图18),通过弯曲易拉伸的电路连接各个电子元件,具有很好的柔软性和弹性,可以很好地适应例如手腕等位置的固定。

图15 F-PCB^[31]图16 多层织物电路板^[32]图17 可穿戴低功耗电子贴片^[33]图18 可弯曲拉伸的电路^[33]

1.5 能量的采集与存储

可靠和持续的电量供应是可穿戴医疗设备发挥其优越性能的前提^[34]。目前绝大多数可穿戴医疗设备采用锂电池供电。要提高整个系统的续航能力,必须增大锂电池的容量,但电池的体积和质量都会增大,可穿戴医疗设备的便携性就会受到影响^[35]。锂电池技术的发展并没有像整个可穿戴行业发展得如此迅速,甚至已经成为可穿戴技术发展的一个瓶颈,很多研究团队开始研究其他能量采集与存储的方式。

环境中的太阳能、机械能和热能的转换一直是一个重要的研究领域,也成为可穿戴医疗设备持续供电的重要途径之一^[36],例如覆盖一层氧化锡的金属或者高分子聚合物纤维可以被用作转换光能的光电设备,而且随着材料技术的发展,光电转换的效率不断提高:相比传统硅纤维的光电转化效率,基于钛纤维制作的太阳能电池的效率提高到了5.41%^[37];基于碳纳米纤维的太阳能电池也表现出很高的转化效率,含有 Fe_3O_4 的碳纳米纤维的转化效率高达8.03%^[38]。韩

国釜庆大学的学者研制了一种使用柔软的光电电池(flexible photovoltaic, FPV)进行供电的可穿戴医疗设备(图19),通过将太阳能转化成电能,极大地延长了设备的使用时间,该设备能够监测人体的心电信号和脉搏信号,并且通过一定的算法计算出心率和血压反馈给用户^[39]。

除了利用环境中的能量,另一种方式是将人体日常活动中的机械能(例如身体运动、肌肉拉伸、血压等)转化成电能^[40]。人体日常活动中的能量大部分通过热量或者振动的形式散失掉,通过压电材料的压电特性可以将人体运动过程中对材料的压力和拉力等转化成电能^[41]。常见的压电材料有纳米半导体压电材料、钙钛矿结构的纳米压电材料和压电高分子聚合物等。王中林团队^[42]研究了纳米发电机(图20),其研究的摩擦电纳米发电机可以利用人体运动过程中身体各个部位之间的摩擦来产生电能,可用于驱动数百个LED灯以及给一些小设备的锂电池充电。

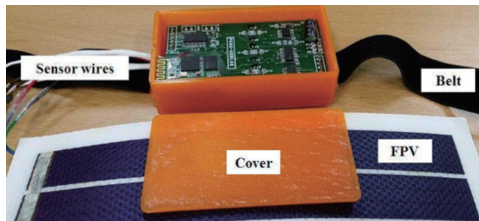


图19 使用FPV供电的无线可穿戴设备^[39]

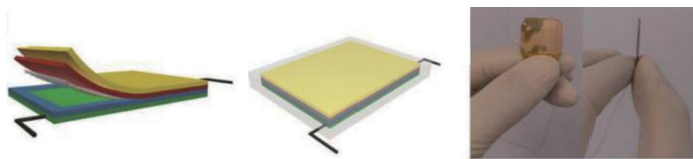


图20 摩擦电纳米发电机^[42]

2 可穿戴医疗与大数据

随着可穿戴技术的迅速发展,可穿戴医疗设备功能日趋完善,其采集的生理信息具有海量、多维、动态等典型特征。已有研究证明,对这种有效生理信息的深入分析对于疾病的筛查、预测和诊断都具有十分重要的作用^[43]。因此,新的可穿戴医疗数据分析方案需要针对海量生理数据进行深层次的数据挖掘^[44]。大数据分析已经在互联网领域崭露头角,各大互联网商家都在利用大数据分析从海量的数据中提取有价值的信息为用户提供更好的服务。谷歌公司曾利用大数据分析算法,根据互联网用户在谷歌搜索引擎中输入的检索关键字,预测新一轮流感病毒的到来,甚至可以具体到特定的地区,事实证明其预测结果十分有效。可见随着数据量的增大,在人类生活的各个领域,大数据分析都将给人类带来巨大的价值,可穿戴医疗领域更是如此。

目前针对于多种传感器信号的数据处理主要分为3方面:异常检测、疾病预测和疾病诊断^[45]。其中异常检测通常基于分类算法进行异常身体状态的分类,例如支持向量机^[46]、马尔可夫模型^[47]和小波分析^[48]等;疾病预测有助于预防慢性疾病以及疾病的早期诊断,监督学习算法^[49]被广泛地应用于疾病的预测,其中的关键环节包括特征提取、训练及检验等;疾病的诊断需要尽可能全面地获取人体的生理数据,通过对数

据进行综合的分析以期得到正确的诊断结果,常见的数据分析算法有神经网络^[50]和决策树^[51]等。

3 结论与展望

在移动互联网时代,可穿戴医疗设备作为融合了医疗和可穿戴技术的新兴产物,旨在以一种舒适便捷的方式,随时随地监护人体健康。随着“云”计算与大数据时代的到来,可穿戴医疗设备将能够实现海量数据的远程处理,为疾病的预防与早期诊断提出有效的指导方案,从而有望解决现今社会医疗资源不足的现状。目前的可穿戴医疗设备仍然存在一些不足,例如结构设计的舒适性、信号采集的稳定性、设备的功耗及数据的隐私保护等问题。但总的来说,可穿戴医疗设备现在正处在蓬勃发展的上升期,导电织物材料、传感器、电路技术以及云计算和大数据相关技术的发展创新都为可穿戴医疗设备的发展提供了强大的推动力。随着技术上的不断创新与突破,可穿戴医疗设备穿戴舒适度将与正常衣物无异,并且能够全天候监测人体各个部位的多种生理参数,通过网络上传到“云端”服务器,结合大数据分析相关算法进行数据处理,将用户的身体健康状况及时反馈给用户,并给出预防措施和就医指导,做到疾病的早发现早治疗。

可穿戴医疗设备的技术研究跨越各个学科、各个领域,

只有在各项技术上保持不断创新,才能为可穿戴医疗设备的发展提供源源不断的动力,提升个人健康水平。

致谢:本文完成过程中得到课题组成员马建爱、张岫等的配合和帮助,特此致谢。

参考文献(References)

- [1] 张雨晨, 金心宇, 沈剑峰. 可穿戴健康监测设备现状和技术分析[J]. 医学信息学杂志, 2015(9): 1-7.
- [2] 周学思, 钟荣华, 王天辉. 柔性传感技术及其在健康医疗领域中的应用[J]. 军事医学, 2015(11): 876-880.
- [3] 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): 5310-5336.
- [4] Gimpel S, Mohring U, Muller H, et al. The galvanic and electrochemical modification of textiles[J]. *Band und Flecht Industrie*, 2003, 40(4): 115-120.
- [5] Li R Z, Hu A, Zhang T, et al. Direct writing on paper of foldable capacitive touch pads with silver nanowire inks[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(23): 21721-9.
- [6] 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.
- [7] Chun K Y, Oh Y, Rho J, et al. Highly conductive, printable and stretchable composite films of carbon nanotubes and silver[J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(12): 853-7.
- [8] 孙加振, 魏先福, 黄蓓青. 纳米材料在印刷电子中的应用[J]. 网印工业, 2014(7): 49-52.
- [9] Pola T, Vanhala J. Textile Electrodes in ECG Measurement[C]//International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information. Melbourne Australia: IEEE Xplore, 2008: 635-639.
- [10] D-Shirt[EB/OL]. [2016-08-15]. <http://www.cityzensciences.fr/>.
- [11] Radiate[EB/OL]. [2016-08-15]. <http://www.radiateathletics.com>.
- [12] Hexoskin[EB/OL]. [2016-08-15]. <http://www.hexoskin.com>.
- [13] Murkovic I, Steinberg M D, Murkovic B. Sensors in neonatal monitoring: Current practice and future trends[J]. *Technology and Health Care*, 2003, 11(6): 399-412.
- [14] Zhu Z, Liu T, Li G, et al. Wearable sensor systems for infants[J]. *Sensors*, 2015, 15(2): 3721-3749.
- [15] Patel S, Park H, Bonato P, et al. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2012, 9(1): 21-38.
- [16] Chen W, Dols S, Oetomo S B, et al. Monitoring body temperature of newborn infants at neonatal intensive care units using wearable sensors [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Body Area Networks. Corfu, Greece: ACM, 2010: 188-194.
- [17] Coosemans J, Hermans B, Puers R. Integrating wireless ECG monitoring in textiles[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 130: 48-53.
- [18] Bouwstra S, Chen W, Feijs L, et al. Smart jacket design for neonatal monitoring with wearable sensors[C]//2009 Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks. Berkeley, California, United States: IEEE, 2009: 162-167.
- [19] Chen W, Oetomo S B, Feijs L, et al. Design of an Integrated Sensor Platform for Vital Sign Monitoring of Newborn Infants at Neonatal Intensive Care Unit[J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2010, 1(4): 535-554.
- [20] Pacelli M, Loriga G, Taccini N, et al. Sensing fabrics for monitoring physiological and biomechanical variables: E-textile solutions[C]//Proceedings of the 3rd IEEE-EMBS International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors. Boston: IEEE, 2006.
- [21] Bandodkar A J, Jia W, Wang J. Tattoo-based wearable electrochemical devices: A review[J]. *Electroanalysis*, 2015, 27(3): 562-572.
- [22] 石墨烯腕带[EB/OL]. [2016-08-15]. <http://www.yidianzixun.com/n/0CmgBZbj?s=8&appid=xiaomi>.
- [23] Pang C, Koo J H, Nguyen A, et al. Sensors: Highly skin-conformal microhairry sensor for pulse signal amplification[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(4): 634-640.
- [24] Ryu S, Lee P, Chou J B, et al. Extremely elastic wearable carbon nanotube fiber strain sensor for monitoring of human motion[J]. *Acs Nano*, 2015, 9(6): 5929-36.
- [25] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [26] Nemati E, Deen M J, Mondal T. A wireless wearable ECG sensor for long-term applications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(1): 36-43.
- [27] Giddens H, Paul D L, Hilton G S, et al. Influence of body proximity on the efficiency of a wearable textile patch antenna[C]//2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Prague, The Czech Republic: IEEE, 2012: 1353-1357.
- [28] Yan S, Soh P J, Vandenbosch G A E. Wearable dual-band composite right/left-handed waveguide textile antenna for WLAN applications[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(6): 424-426.
- [29] Patria[EB/OL]. [2016-08-15]. <http://www.patria.fi/>.
- [30] Matteo S, Alessandro C. Wearable electronics and smart textiles: A critical review[J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 11957-11992.
- [31] Kim H, Kim Y, Kwon Y S, et al. A 1.12 mW continuous healthcare monitor chip integrated on a planar fashionable circuit board[C]//2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference-Digest of Technical Papers. Philadelphia, United States: IEEE, 2008: 150-603.
- [32] Lee S K, Kim B H, Yoo H J. Planar fashionable circuit board technology and its applications[J]. *JSTS: Journal of Semiconductor Technology and Science*, 2009, 9(3): 174-180.
- [33] Brand J V D, Kok M D, Koetse M, et al. Flexible and stretchable electronics for wearable health devices[J]. *Solid-State Electronics*. IEEE, 2015, 113: 116-120.
- [34] Roundy S, Steingart D, Frechette L, et al. Power sources for wireless sensor networks[C]//European Workshop On Wireless Sensor Networks. Berlin Heidelberg: Springer, 2004: 1-17.
- [35] Nishide H, Oyaizu K. Toward flexible batteries[J]. *Science*, 2008, 319(5864): 737-738.
- [36] Gilbert J M, Balouchi F. Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2008, 5(4): 334-347.
- [37] Cai X, Hou S, Wu H, et al. All-carbon electrode-based fiber-shaped dye-sensitized solar cells[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2012, 14(1): 125-130.
- [38] Thang T V, Chung W Y. High-efficient energy harvester with flexible solar panel for a wearable sensor device[J]. 2016, PP(99): 1-1.
- [39] Sun H, Yang Z, Chen X, et al. Photovoltaic wire with high efficiency attached onto and detached from a substrate using a magnetic field[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 52(32): 8276-8280.

- [40] Wang Z L. Towards self-powered nanosystems: From nanogenerators to nanopiezotronics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2010, 18(22): 3553–3567.
- [41] Swallow L M, Luo J K, Siores E, et al. A piezoelectric fibre composite based energy harvesting device for potential wearable applications[J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(2): 025017.
- [42] Zheng Q, Shi B, Fan F, et al. In vivo powering of pacemaker by breathing-driven implanted triboelectric nanogenerator[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(33): 5851–6.
- [43] Gaura E, Kemp J, Brusey J. Leveraging knowledge from physiological data: On-body heat stress risk prediction with sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2013, 7(6): 861–870.
- [44] Sow D, Turaga D S, Schmidt M. Mining of sensor data in healthcare: A survey[M]. *Managing and Mining Sensor Data*. Berlin Heidelberg: Springer, 2013: 459–504.
- [45] Banaee H, Ahmed M U, Loutfi A. Data mining for wearable sensors in health monitoring systems: A review of recent trends and challenges [J]. *Sensors*, 2013, 13(12): 17472–500.
- [46] Lee K H, Kung S Y, Verma N. Low-energy formulations of support vector machine kernel functions for biomedical sensor applications[J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2012, 69(3): 339–349.
- [47] Zhu Y. Automatic detection of anomalies in blood glucose using a machine learning approach[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2011, 13(2): 125–131.
- [48] Gialelis J, Chondros P, Karadimas D, et al. Identifying chronic disease complications utilizing state of the art data fusion methodologies and signal processing algorithms[C]//*International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare*. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 256–263.
- [49] Yoo I, Alafairet P, Marinov M, et al. Data mining in healthcare and biomedicine: A survey of the literature[J]. *Journal of medical systems*, 2012, 36(4): 2431–2448.
- [50] Karlen W, Mattiussi C, Floreano D. Sleep and wake classification with ECG and respiratory effort signals[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2009, 3(2): 71–78.
- [51] Frantzidis C A, Bratsas C, Klados M A, et al. On the classification of emotional biosignals evoked while viewing affective pictures: An integrated data-mining-based approach for healthcare applications[J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2010, 14(2): 309–318.

Shock troopers in the age of internet: Wearable medical devices

WANG Ling, ZHAN Penghong, LIU Wenyong

School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract With the emergence of the mobile medicine, the development of smart sensing technologies and the popularization of the concept of the personalized medicine, the smart wearable devices develop at a high speed in recent years and the wearable medical devices become one of the most promising focuses. This paper reviews the latest development of several key technologies related to wearable medical devices, including the advanced materials technology, the smart sensing technology, the wireless transmission technology, the low-power circuit design technology, the energy generation and storage technology, and the big data analysis technology. The future developing trend and the possible challenges of this field are also discussed.

Keywords wearable; mobile medicine; smart sensing; e-textile; big data

(责任编辑 刘志远)