

孕妇心电监护可穿戴装备的研究现状与发展趋势

齐晓晓¹, 周捷¹, 张辉²

(1. 西安工程大学 服装与艺术设计学院 西安 710048; 2. 浙江纺织服装职业技术学院 纺织学院 宁波 315211)

摘要: 基于非侵入型小型医疗监护可穿戴设备和围产期孕妇心电监护问题,文章介绍了目前国内外孕妇心电监护可穿戴装备的研究现状,以及现有的和正在研究开发的非侵入型孕妇心电监护装备、小型非服装类、服装类孕妇心电监护装备的最新研究进展。并针对目前孕妇心电监护服装研发过程中,传感技术的实现和服装功能性设计要求的两大难点进行了梳理和分析研究。研究表明:心电监护服装与皮肤之间的日常动态作用的关系、适应围产期孕妇腹围变化的服装可调节性、传感器稳定性、传感器位置与织物结构电路的关系,以及传感原件与服装结合的加工技术等,将成为服装类孕妇心电监护可穿戴装备发展重点及需要解决的关键问题。

关键词: 孕妇心电监护; 胎心电; 胎心监测; 可穿戴装备; 心电监测

中图分类号: TS941.731.93; R714.141 文献标志码: A 文章编号: 1001-7003(2018)12-0057-06 引用页码: 121110

Research status and development trend of wearable electrocardiogram monitoring equipment for pregnant women

QI Xiaoxiao¹, ZHOU Jie¹, ZHANG Hui²

(1. College of Apparel & Art Design, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. School of Textiles, Zhejiang Fashion Institute of Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: Aiming at the problems of non-intrusive small medical monitoring wearable devices and perinatal ECG monitoring for pregnant women, this paper introduces the research status of the wearable device of ECG monitoring for pregnant women at home and abroad, and the latest research progress of non-invasive ECG monitoring equipment for pregnant women, small non-clothing and clothing ECG monitoring equipment in recent years. Besides, this paper analyzes the technical difficulties and design requirements of the current ECG monitoring clothing for pregnant women in the research and development process. The analysis shows that the future development of wearable ECG monitoring equipment for pregnant women and the key problems to be solved include: the daily dynamic interaction between ECG monitoring clothing and skin, clothing adjustability caused by special abdominal circumference changes of perinatal pregnant women, the stability of sensor, the relationship between the position of sensors and fabric structure circuit, the technology of combining sensor components and clothing etc.

Key words: electrocardiogram monitoring for pregnant women; fetal electrocardiogram (FECC); fetal heart monitoring (FHR); wearable equipment; electrocardiographic monitoring

2015—2025 年被确定为可穿戴时代^[1-2]。新的微型及可穿戴产品正逐步得到大规模推广,同时创

新的移动传感和反馈功能的设备及相关服务也在迅猛发展。随着移动传感技术的发展,人们的医疗模式从走进医院的诊断治疗转向随时随地的日常监护,这种转变促使了小型医疗监护设备的出现。这些监护设备被称为可穿戴医疗监护设备(wearable medical devices)或称为便携式医疗设备(portable medical devices),部分设备已经开始支持对用户参数

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-10-25

基金项目: 陕西省科技厅国际科技合作计划项目(2018KW-056)

作者简介: 齐晓晓(1992—),女,硕士研究生,研究方向为内衣人体工学。通信作者: 周捷,副教授, xianzj99@163.com。

的非侵入式测量。非侵入式监控模式的目的是减少用户对于监测过程的有效感知,但却可以检索所需健康数据和相关信息^[3]。这些设备是在日常服装服饰平台上的集成医疗监测系统,使服装服饰等在发挥穿戴物品功能的同时进行人体生理信号的采集,以便对人体的健康状态进行持续监测^[4-5]。

在健康监测的体系中,胎儿健康监测是人们长期持续关注要点之一^[6]。传统远程胎儿健康评估,依赖于母亲对胎儿运动的自我感知。它是一个长期监测(>1 h)过程,母亲的情绪、环境及注意力集中度等都会使这种感知产生偏差^[7-8]。同时研究也发现,对于一个特定的个体,胎儿运动不同于任何其他运动,是相当个性化的^[9]。这种健康监测的方式缺点是明显的,孕妇很难主观获得准确的胎儿运动数,也无法获得胎儿健康的具体参数。与此同时,胎儿宫内缺氧^[10]、产前脐带异常^[11]等产前诊断必须依赖更加科学准确的胎心电监测参数。在这种情况下,开发在特定时间间隔内的胎儿运动及心电数据自动提取系统是及时检测胎儿健康的有效方法。

目前非侵入式监测胎儿心脏的主要方法有:多普勒超声、使用孕妇腹部表面电极获取胎儿心电图、胎心磁图^[12]、胎心音等。鉴于未来穿戴式监测设备的发展和需求,国内外许多专家开始推荐可穿戴非侵入胎心电监测法^[13-14]。相比医院采用的传统多普勒等胎心监护方法,可穿戴胎心监测的主要优势是在家庭环境中监测孕妇及胎儿的健康状况。这种监测方式不需要向母体和胎儿发射任何信号,属于被动监测^[15],更容易实现长时间的实时在线监测,具有更广泛的应用前景^[16-17]。可穿戴非侵入式胎心监测的实现基础有以下三点:第一,现有国内外研究工作证明了这种远程监测系统的可行性;第二,远程监测的实现意味着每年将减少相当一部分入院监测费用^[18];第三,患者导向的胎心率(fetal heart rate, FHR)监测满意度很高^[19]。

基于此,国内外均有一些便携式胎心电监测设备被开发出来,这些设备采用现场可编程门阵列^[20](field programmable gate array, FPGA)、数字信号处理器^[21](digital signal processor, DSP)、可编程芯片上的系统^[22](system on a programmable chip, SOPC)等方法实现。

1 孕妇可穿戴智能装备发展现状

现有的孕妇商业无线监测器设备,如 Monica

AN24 监视器^[23]、胎儿参数监护仪^[24]等,只有少数可以实现日常家庭中的使用。他们大都有一个庞大而累赘的由传感电极和电线连接的手持装置。Tele-fetalcare 监测器^[25]使用连接在织物上的心电图监测引线,改进了用户体验。但改进后依然存在各种各样的问题,如服装容易产生运动伪影(由于服装稳定性不足而产生的多余运动捕捉效果,即服装自身的运动位移)等。理想状态下,孕妇可穿戴智能监测装置应不仅提供准确的监测数据,可以及时发现并预警潜在并发症,而且还能确保孕妇在使用时的舒适度。

目前已进入市场销售的成熟的孕妇可穿戴智能装备较少。由于孕妇的特殊体型,孕妇所使用的智能服装必须设计为可穿戴自适应模式,重视孕妇穿着的舒适性、方便性及耐久性。同时需要对所提取医学数据的有效性、敏感性和健壮性进行评估。

孕妇智能鞋:2014年成立的重庆小爱科技整合柔性压力传感系统、构建运动步态数据分析系统自主研发了智能产品 aiShoes 智能孕妇鞋及配套的智能鞋垫^[26]。

产前音乐胎教智能装备:美国 RITMO 公司研发的一款 RITMO 妊娠音频带,是针对 17~40 周孕妇的音乐胎教系统。该系统设置了一个标准的 3.5 mm 音频耳机插孔、可洗腰带上分布了 4 个迷你扬声器,在子宫四周均衡地播放舒缓音乐。

2 孕妇心电监护可穿戴装备发展现状

胎儿心脏的发育状况是孕期监测的重要监测项目之一。孕妇心电监护可穿戴装备需要具备心电纺织电极和小型化的采集系统^[27]。医院使用的传统胎心电监护设备因体积较大、价格高、时间场地限制等缺点,在紧急情况下可能同时加大胎儿和母亲的风险。现有心电监测装备在传感性能与信号获取的质量方面都有良好的体现。

目前孕妇心电监护可穿戴装备的研究大致分为非服装类和服装类两类。

2.1 非服装类可穿戴装备

2012年英国 Monica Healthcare 公司研发了具有小巧、可穿戴特点的 MONICA AN24^[23],能够为身体质量指数(body mass index, BMI)优良的孕妇进行准确的胎儿监护。该团队 2014 年研发 Novii Wireless Patch System 中 Monica Novii 使用“剥离和粘贴”贴

片,通过蓝牙技术将原始的心电图和肌电图数据发送至现有的胎儿监护仪。

由瑞典 Neovanta Medica 公司研发的 StanViewer Live 软件允许用户远程实时查看胎心宫缩图,形成独特的胎儿心电图平均记录表,从而实现远程诊断。美国 MindChild 公司开发的 MERIDIAN^[28] 胎儿心率监视器,利用外部电极和专有算法,使用非侵入性的装置通过监测收集胎儿和母亲的信号来计算胎心率。

2015 年中国传世未来(北京)信息科技有限公司研发出一款贴于孕妇腹部的高频胎儿监护装置——萌动(Modoo) 投入市面,采用无超声辐射的被动式原理,通过定制的多通道高灵敏度传感器和独立研发

的胎儿监护算法,可随时采集胎心胎动、母体心率、呼吸、计步、睡眠等数据。

这些孕妇心电监护装备虽然在一定程度上实现了装备的小型化和非侵入性,但依然对设备使用的时间和地点有一定的限制。

2.2 服装类可穿戴装备

孕妇心电监护的服装类可穿戴装备是一种可穿戴式产前监测系统。现有的系统研究大多使用适合孕妇身体贴身并且带有心电图监测功能的纺织电极,以衬衫、T 恤、托腹带等为载体。从怀孕后期的孕妇腹部提取心电图信号,通过数据技术分离等最终达到检测胎心率、心电图等目的。目前服装类的孕妇心电监护装备具体研究状况如表 1 所示。

表 1 孕妇心电监护服装类可穿戴装备

Tab. 1 Wearable equipment of ECG monitoring clothing type for pregnant women

年份	服装类型	传感原件数量	传感原件与服装结合方式
2010 ^[31]	弹性的仿皮革与纺织电极制成的紧身衣裤	8 个银编织电极	纺织电极放置于仿皮革
2011 ^[29]	传感衬衫原型	8 ~ 16 电极	可穿戴原件带有传感带
2014 ^[25, 30]	编织内衣织物制成	9 个纺织电极	织物与纺织电极交织
2014 ^[32]	应用于基础的一些宽松类服装,如孕妇带、衬衫等	5 个固体凝胶粘性电极	PCB 电路板连接电极缝制于服装上
2015 ^[7]	紧身 T 恤或传感带	8 个传感器	传感器置于孕妇托腹带
—	以色列公司 Health Watch Fetal-Master Caution 系统	—	—

相关研究大多集中于中后期的数据提取、算法分离等电子信息及数学计算领域。现有研究显示服装与传感器的结合方式依然是一个非常重要且亟待解决的问题,目前只有 2014 年意大利的学者在意大利米兰理工大学实验室采用了将织物与纺织电极交织^[25, 33]的方式进行传感器与服装的结合,但未就服装的日常服用性能进行进一步测试。

3 孕妇心电监护服装的技术难点

目前国内外对于孕妇可穿戴监测服装的研究还没有系统化和标准化,现有研究者来自不同的专业领域,在电子工程、医学及材料等方面的研究较多,且大多停留在实验室阶段。由于学科限制,目前研究多侧重于信号的采集与分析,采用的多是简单将传感器与服装结合起来或者直接放置传感器于孕妇腹部,以实现其功能。孕妇心电监护服装的主要目的,是在小范围破坏服装日常穿着功能的前提下,采集孕妇及胎儿心电^[34]有效信息,以便及时准确地掌握孕妇健康以及胎儿心脏发育状况。因此,孕妇心电监护服装的设计应在实现心电监测数据收集稳定性的同时,满足普通围产期孕妇的日常穿着需求,考

虑人体工学、服装舒适性、安全性、美观性等^[35]。

目前孕妇心电监护服装的研究,可以概述为两大难点:传感技术的实现和服装功能性设计要求。传感技术的实现是一个心电监护设备的核心。心电监护装备由传感器和执行器等部件和设备组成^[36],这些系统需要支持复杂的心电监测原件的应用,并实现短时间内的监测数据处理分析及显示,才能完成一个完整的传感监护过程。实现传感技术的关键点有:传感原理及传感器的选择与实现、材料的选择、电源管理、数据存储、数据传输、数据处理和相关算法、连接器及所需的功能时间等。

孕妇心电监护服装需要保证动态条件下传感器的稳定性^[37]。传感器与皮肤的合理接触、传感器在服装中的集成技术等都是功能性设计需要重点解决的问题。因此,在服装功能性和结构设计方面必须具有创新性。功能性设计因素同时包括设备的物理特性,例如传感材料的设计与选择、传感器形状数量及位置的确定、外壳和相关材料的柔软度^[38]、固定元件与服装的黏附、人体正常生理因素的干扰(如汗液等)、服装中电路导线的无弹性及服装面料弹性之间的矛盾、服装的日常洗涤、围产期孕妇腹围尺寸的变

化^[39]等其他功能性设计问题。

4 结 语

孕妇可穿戴心电监护系统是心电传感器与孕妇服装结合的医疗监护服装,是多学科交叉的产品。涉及电子信息、人体工效、材料学、工业设计和服装设计等多个领域,最终真正实现需要各个方面的研究专家共同合作来完成。目前就服装学科需要考虑解决的问题如下:

1) 服装与皮肤之间的日常动态作用研究。电极及传感器的柔性化发展为医疗监护服装的研究设计提供了可能。孕妇的日常生活会产生肢体移动,造成柔性电极、传感器与服装相对位置移动和接触压力的变化,这种变化会影响到信息的有效监测与判断,同时影响穿着的舒适性。对监护服装与皮肤之间的动态作用进行研究,提高孕妇心电监护服装的可靠性及穿着舒适性,可以加快实现医疗监护服装的实际应用价值。

2) 针对孕妇孕期腹围变化,服装的可调节性及传感器稳定性研究。进行人体生理信息监测时,要求传感器与被监测人体保持良好接触,集成附带传感器的医疗监护服装必须与孕妇人体紧密贴合。随着孕妇怀孕月份的不断增加,腹围也在发生规律性的变化。这就要求孕妇所穿戴的贴身服装必须在具有可调节功能,同时不破坏传感器监测的稳定性。

3) 传感器的位置及织物结构电路研究。传感器的位置决定了所采集的心电信号质量,同时决定了织物结构电路的分布及走向。目前孕妇心电监护可穿戴医疗监护设备上使用的传感器大都采用传统的传感器与服装的简单的物理结合,没有实现结构的集成。要实现孕妇心电监护服装的日常化,需要实现传感器等电子元件与服装系统的完美整合。基于此,孕妇心电监护服装的传感器位置及织物结构电路研究将是一个非常重要的研究方向。

4) 传感原件与服装结合的加工技术。柔性电极、传感器、传导电路等集成了各种复杂的电子模块,目前这些电子模块的集成技术要进行规模性生产还有一定的难度。在服装加工技术环境上,既要考虑日常服装加工的基本条件,又要考虑硬件平台的集成环境,如何将两个生产环境进行有效结合值得深入研究。目前的孕妇心电监护服大多还停留在实验室阶段,如何实现心电监护服装的量产,将是未

来商业化发展的方向。

参考文献:

- [1]舒伟. 柔性可穿戴技术的未来:第12期纺织科技新见解学术沙龙编后记[J]. 纺织学报,2018,39(5):177-180. SHU Wei. The future of flexible wearable technology: postscript of the 12th academic salon of new ideas on textile science and technology [J]. Journal of Textile Research, 2018,39(5):177-180.
- [2]李晓红,祁萌. 5项颠覆性技术引领未来制造业发展[J]. 机器人技术与应用,2018(1):17-22. LI Xiaohong, QI Meng. Five subversive technologies lead the future development of manufacturing [J]. Robot Technique and Application, 2018(1):17-22.
- [3]CHIA E L, HO T F, RAUFF M, et al. Cardiac time intervals of normal fetuses using noninvasive fetal electrocardiography [J]. Prenatal Diagnosis, 2005,25(7):546-552.
- [4]LYMBERIS A, GATZOULIS L. Wearable health systems: from smart technologies to real applications [C]//2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. New York: IEEE. 2006:6789-6792.
- [5]严妮妮,张辉,邓咏梅. 可穿戴医疗监护服装研究现状与发展趋势[J]. 纺织学报,2015,36(6):162-168. YAN Nini, ZHANG Hui, DENG Yongmei. Research progress and development trend of wearable medical monitoring clothing [J]. Journal of Textile Research, 2015,36(6):162-168.
- [6]ROOIJAKKERS M J, RABOTTI C, LAU H D, et al. Feasibility study of a new method for low-complexity fetal movement detection from abdominal ECG recordings [J]. IEEE Journal of Biomedical & Health Informatics, 2016,20(5):1361-1368.
- [7]ZHAO L, WU W, ZENG X, et al. A new method for fetal movement detection using an intelligent T-shirt embedded physiological sensors [C]//2015 IEEE 16th International Conference on Communication Technology (ICCT). Hangzhou: IEEE. 2015:563-567.
- [8]WARRANDER L K, BATRA G, BERNATAVICIUS G, et al. Maternal perception of reduced fetal movements is associated with altered placental structure and function [J]. Plos One, 2012,7(4):1-9.
- [9]MAULIK D. Fetal growth restriction: the etiology [J]. Clinical Obstetrics & Gynecology, 2006,49(2):228-235.
- [10]王璇,许文雷,樊国丽. 异常胎儿心电图对晚期妊娠胎儿宫内乏氧的监测意义[J]. 中国妇幼保健,2009,24(29):4194-4195. WANG Xuan, XU Wenlei, FAN Guoli. Significance of

- abnormal fetal electrocardiogram in monitoring fetal hypoxia in late pregnancy [J]. *Maternal & Child Health Care of China*, 2009, 24(29): 4194-4195.
- [11]李震雷,李风雷. 胎心监护和血气分析对脐带异常的围生儿监测的临床意义[J]. *检验医学与临床*, 2016, 13(5): 679-681.
LI Zhenlei, LI Fenglei. Clinical significance of fetal heart monitoring and blood gas analysis in perinatal monitoring of umbilical cord abnormalities [J]. *Laboratory Medicine and Clinic*, 2016, 13(5): 679-681.
- [12]PETERS M, CROWE J, PIÉRI J F, et al. Monitoring the fetal heart non-invasively: a review of methods [J]. *Journal of Perinatal Medicine*, 2001, 29(5): 408-416.
- [13]吴军,李劲松,雷健波,等. 胎心电监测国内外现状研究综述[J]. *中国医疗设备*, 2017, 32(7): 106-109.
WU Jun, LI Jingsong, LEI Jianbo, et al. Reviews of current research situation of the fetal ECG monitoring in domestic and overseas [J]. *China Medical Devices*, 2017, 32(7): 106-109.
- [14]FRUHMANN G, GAVARD J A, MCCORMICK K, et al. Standard external doppler fetal heart tracings versus external fetal electrocardiogram in very preterm gestation: a pilot study [J]. *Ajp Reports*, 2016, 6(4): 378-383.
- [15]SOLUM T, INGEMARSSON I, NYGREN A. The accuracy of abdominal ECG for fetal electronic monitoring [J]. *Journal of Perinatal Medicine*, 1980, 8(3): 142-149.
- [16]PIERI J, CROWE J A, HAYESGILL B R, et al. Compact long-term recorder for the transabdominal foetal and maternal electrocardiogram [J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2001, 39(1): 118-125.
- [17]石立娟. 胎心电采集系统的集成、检测实验及提取方法[D]. 南京: 南京大学, 2013.
SHI Lijuan. FECC Acquisition System Integration, Testing Experiments and Extraction Methods [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [18]BUYSSE H, MOOR G D, MAELE G V, et al. Cost-effectiveness of telemonitoring for high-risk pregnant women [J]. *International Journal of Medical Informatics*, 2008, 77(7): 470-476.
- [19]KERNER R, YOGEV Y, BELKIN A, et al. Maternal self-administered fetal heart rate monitoring and transmission from home in high-risk pregnancies [J]. *International Journal of Gynaecology & Obstetrics the Official Organ of the International Federation of Gynaecology & Obstetrics*, 2004, 84(1): 33-39.
- [20]TORTI E, KOLIOPOULOS D, MATRAXIA M, et al. Custom FPGA processing for real-time fetal ECG extraction and identification [J]. *Computers in Biology & Medicine*, 2017, 80: 30-38.
- [21]李智,沈汉聪,莫玮. 基于 DSP 的自适应胎儿心电图仪研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2008, 25(2): 309-312.
LI Zhi, SHEN Hancong, MO Wei. Research on an adaptive fetal electrocardiograph based on DSP [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2008, 25(2): 309-312.
- [22]李琦. 基于 SOPC 蓝牙无线通信的家用胎儿监护仪设计[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2009, 27(5): 78-80.
LI Qi. Design of home fetal monitor based on SOPC bluetooth wireless communication [J]. *Journal of Qinghai University (Nature Science)*, 2009, 27(5): 78-80.
- [23]PHILIPPE A, CURINIER S, PIQUIER-PERRET G, et al. Utilisation du dispositif portable Monica AN24™ pour l'enregistrement cardiocardiographique continu au cours du déclenchement artificiel du travail [J]. *Journal De Gynecologie Obstetrique Et Biologie De La Reproduction*, 2012, 41(2): 194-197.
- [24]LU Y S, WANG H J, LIU G C, et al. Fetal/maternal multi-parameter monitor [J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2002, 26(2): 38.
- [25]FANELLI A, SIGNORINI M G, FERRARIO M. Telefetalcare: a first prototype of a wearable fetal electrocardiograph [J]. 2011, 2011(4): 6899-6902.
- [26]王新同. 用“智能孕妇鞋”呵护天下母婴[J]. *职业*, 2016(4): 51-53.
WANG Xintong. Use intelligent pregnant women shoes to care for mother and baby all over the world [J]. *Occupation*, 2016(4): 51-53.
- [27]SIGNORINI M G, FANELLI A, MAGENES G. Monitoring fetal heart rate during pregnancy: contributions from advanced signal processing and wearable technology [J]. *Comput Math Methods Med*, 2014, 2014(1): 707581.
- [28]ROHAM M, SALDIVAR E, RAGHAVAN S, et al. A mobile wearable wireless fetal heart monitoring system [C]// 2011 5th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMIC1T). Montreux, Switzerland: IEEE. 2011: 135-138.
- [29]DANESE G, LEPORATI F, MAJANI A, et al. A wearable intelligent system for the health of expectant mom's and of their children [C]// 2011 14th Euromicro Conference on Digital System Design. Oulu, Finland: IEEE, 2011: 757-763.
- [30]LANZOLA G, SECCI I, SCARPELLINI S, et al. A Mobile Remote Monitoring Service for Measuring Fetal Heart Rate [M]// XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2013. West Berlin and Heidelberg: Springer International Publishing, 2014: 1435-1438.
- [31]FANELLI A, FERRARIO M, PICCINI L, et al. Prototype of a wearable system for remote fetal monitoring during

- pregnancy [C]// 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology. Buenos Aires , Argentina: IEEE. 2010: 5815.
- [32] PERUSQUÍA-HERNÁNDEZ M , CHEN W , FEIJS L. Garment design for an ambulatory pregnancy monitoring system [C]// International Workshop on Ambient Assisted Living. Dordrecht: Springer , Cham , 2014: 219-227.
- [33] ROOIJAKKERS M J , SONG S , RABOTTI C , et al. Influence of electrode placement on signal quality for ambulatory pregnancy monitoring [J]. *Comput Math Methods Med* , 2014 , 2014(1) : 1-12.
- [34] CLIFFORD G , SAMENI R , WARD J , et al. Clinically accurate fetal ECG parameters acquired from maternal abdominal sensors [J]. *American Journal of Obstetrics & Gynecology* , 2011 , 205(1) : 47.
- [35] 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 of Textile Research* , 2014 , 35(2) : 109-115.
- [36] CHAN M , ESTÈVE D , FOURNIOLS J Y , et al. Smart wearable systems: current status and future challenges [J]. *Artificial Intelligence in Medicine* , 2012 , 56(3) : 137-156.
- [37] DUNNE , LUCY E. *The Design of Wearable Technology: Addressing the Human-device Interface Through Functional Apparel Design* [D]. New York: Cornell University , 2004.
- [38] GIUSEPPE A , EMILIO S C , PAOLO P. Defining requirements and related methods for designing sensorized garments [J]. *Sensors* , 2016 , 16(6) : 769.
- [39] 叶清珠 , 陈东生 , 吕佳. 基于孕妇腹围特征的孕妇下装号型研究 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)* , 2016 , 41(12) : 113-117.
YE Qingzhu , CHEN Dongsheng , LÜ Jia. On maternal bottom's size based on maternal abdominal girth's features [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)* , 2016 , 41(12) : 113-117.