

引文格式:

王璐, 王仲怡, 吴子悦, 等. 基于聚偏氟乙烯传感器的心冲击信号影响因素分析 [J]. 集成技术, 2020, 9(1): 36-44.

Wang L, Wang ZY, Wu ZY, et al. The analysis of the influence factors on the acquisition of ballistocardiography signal based on polyvinylidene fluoride sensor [J]. Journal of Integration Technology, 2020, 9(1): 36-44.

基于聚偏氟乙烯传感器的心冲击信号影响因素分析

王 璐¹ 王仲怡² 吴子悦² 徐敬傲² 蒋芳芳² 徐礼胜^{2,3} 于 滨⁴

¹(东北大学计算机科学与工程学院 沈阳 110819)

²(东北大学医学与生物信息工程学院 沈阳 110819)

³(沈阳东软智能医疗科技研究院有限公司 沈阳 110167)

⁴(埃因霍芬理工大学工业设计中心 埃因霍芬 5600)

摘 要 心冲击图(Ballistocardiography, BCG)记录了人体心脏做机械运动时对外界的作用力信号, 不仅能反应心脏节律, 还能作为评估心脏血流动力学参数变化的有效依据。但 BCG 信号的采集过程中影响因素较多, 这些严重地影响着信号形态特征, 进而导致对其进行血流动力学分析得不准确。因此, 该文采用聚偏氟乙烯压电薄膜传感器, 设计并实现了能够有效抑制外界干扰、具有高信噪比的 BCG 信号采集系统。基于该系统研究了传感器位置、床垫硬度、躺卧姿势对采集系统稳定性的影响, 并分析了在呼吸暂停情况下采集系统的检测性能。结果表明, 在卧姿采集 BCG 信号时, 应选择硬质床垫(如木板床), 并将传感器摆在心脏正下方的位置, 使受试者保持平躺姿势。满足上述条件时, 所采集的 BCG 信号波形最佳, H、J、K 波波形明显, 且具有较强的节律性, 有利于提高后续血流动力学分析的精度。

关键词 心冲击信号; 聚偏氟乙烯传感器; 非接触体征监护; 呼吸暂停

中图分类号 N 945.14 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20191201001

收稿日期: 2019-12-01 修回日期: 2019-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773110、61801104); 辽宁省自然科学基金项目(20170540312); 中央高校基本科研业务费项目(N181604006)

作者简介: 王璐, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为深度学习、图像处理等; 王仲怡, 硕士研究生, 研究方向为医学信号处理; 吴子悦, 本科生, 研究方向为生物医学电子学; 徐敬傲, 硕士研究生, 研究方向为深度学习; 蒋芳芳, 讲师, 研究方向为医学信号处理; 徐礼胜(通讯作者), 教授, 博士研究生导师, 研究方向为医学信号与图像处理等, E-mail: xuls@bmie.neu.edu.cn; 于滨, 荷兰埃因霍芬理工大学助理教授, 研究方向为医学信号处理、工业设计。

The Analysis of the Influence Factors on the Acquisition of Ballistocardiography Signal Based on Polyvinylidene Fluoride Sensor

WANG Lu¹ WANG Zhongyi² WU Ziyue² XU Jing'ao² JIANG Fangfang²

XU Lisheng^{2,3} YU Bin⁴

¹(School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

²(College of Medicine and Biological Information Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

³(Neusoft Research of Intelligent Healthcare Technology, Co. Ltd., Shenyang 110167, China)

⁴(Industrial Design Center, Eindhoven University of Technology, Eindhoven 5600, the Netherlands)

Abstract Ballistocardiography (BCG) is a technique that records the force signal caused by the ejection of blood into the arteries with each heartbeat. BCG signal can be acquired non-invasively by using polyvinylidene fluoride (PVDF) sensors integrated in a mattress or chair. In addition to being able to show cardiac rhythms, BCG signals can also be used for assessing cardiac hemodynamic changes. However, body movements, sensor displacement, etc. can easily influence the morphological characteristics of BCG signal, which makes its hemodynamic analysis difficult and even impossible. In this paper, we developed a BCG signal acquisition system using PVDF sensor. The proposed system can effectively suppress external electromagnetic interference and result in high signal-to-noise ratio. Specifically, we systematically investigated the effects of sensor position, mattress hardness and user's posture on the stability of the BCG acquisition system, and analyzed the detection performance under apnea and the difference in gender characteristics of BCG signals. The evaluation results demonstrate that when collecting BCG signals in a lying position, it is better to use a hard mattress (such as a wooden bed) and place the sensor directly below the hear. When the above conditions are met, the collected BCG signals waveform is the optimal; the H, J, and K waves are significant and have a strong rhythm, which is conducive to improving the accuracy of hemodynamic analysis.

Keywords ballistocardiography; polyvinylidene fluoride sensor; non-contact monitoring; apnea

1 引 言

我国卫生部心血管病防治研究中心 2019 年发布的《中国心血管病报告 2018》^[1]数据显示, 中国心血管病现患病人数为 2.9 亿人, 心血管疾病所导致的死亡人数占城乡居民总死亡人数 40% 以上, 高居首位^[1]。据调查, 中国 60 岁以上老年人有严重的睡眠障碍, 其中 Meta 分析报道老年人睡眠障碍患病率为 47.2%^[2], 且研究显示老年人睡眠障碍可能增加罹患心血管疾病、高血压、糖尿病、抑郁、肥胖等疾病的风险^[3], 已引

起公众的普遍重视。

心冲击信号 (Ballistocardiography, BCG) 是一种反映人体心脏周期性泵血时产生的微弱作用力变化的物理量^[4]。这一基本概念早在 19 世纪就已被提出^[5]。BCG 信号产生的原理是: 当血液流经升主动脉和颈动脉分支时, 血液冲击产生向上的作用力, 身体则受到相同大小的反作用力作用; 当血液通过降主动脉向下流动时, 作用力方向则相反^[6]。BCG 信号与心电信号一样具有周期性, 可以反映人体生理信息, 如心脏的心音、心排量等^[7]。心冲击信号带宽约为 0.6~20 Hz,

理想的人体 BCG 信号由 G~N 八段组成, 其中 J 为正向最大峰值^[8]。

目前, BCG 信号的采集方式主要有 4 种: 立式、坐式、平躺式和可穿戴式。其中, 对平躺式采集装置而言, 当人体平躺时, 心脏泵血和呼吸作用会对人体下方的床垫产生反作用力。基于这一原理, 能够实现一种基于 BCG 信号的非接触式无感知监护方法, 以测量人体在睡眠时的心率、呼吸率以及身体微弱体动, 用于长期夜间生理监护和睡眠分析。此外, BCG 技术也能用于替代传统心电图和呼吸传感器对房颤和呼吸暂停等疾病进行筛查。同时, 非接触式传感器和设备安装操作简单, 无需专业人士辅助, 易用性和用户体验较高, 进而适用于家庭医疗和自我监护^[9]。

当前, 针对 BCG、呼吸等体动信号的研究已经成为一个热点。BCG 信号采集系统的传感器多数采用 EMFi (Electro-mechanical Film) 压电薄膜传感器^[10-12]、加速度传感器^[13]以及聚偏氟乙烯 (Polyvinylidene Fluoride, PVDF) 压电薄膜传感器^[14]。其中, 利用加速度传感器的采集系统较为成熟。村田制造所和欧洲领先的医疗机构合作, 成功地利用加速度传感器采集得到 BCG 信号, 并利用算法从信号中提取出患者的心率、心率变异性、呼吸率等生理指标^[15]。在信号处理方面, 清华大学 Cao 等^[16]对 BCG 信号进行希尔伯特-黄变换处理来计算心率。吉林大学王春武等^[17]将 BCG 信号与同步采集的 ECG 信号进行相关性分析, 为 BCG 应用于临床诊断提供了可靠依据。河北工业大学姜星等^[18]利用经验模态分解对 BCG 信号进行去噪。

本文将 PVDF 压电薄膜传感器集成在床垫中, 以实现一种无感知的人体心率、呼吸率等基本生命体征的非接触式监测方法。但 PVDF 传感器灵敏度较高, 轻微的体动干扰就会造成 BCG 信号严重失真, 无法提取有效的 BCG 信号形态特征, 从而影响血流动力学的分析。因此, 选择

本文所研发系统中传感器放置位置、床垫硬度以及人体呼吸暂停和躺卧姿势等常见外界因素对 BCG 信号的影响进行研究, 为后续利用 BCG 信号评估人体的心率、呼吸等血流动力学生理指标作参考。

2 系统原理与整体方案

压电薄膜传感器的核心是 PVDF 压电薄膜, 其具有正压电效应, 能将施加于其上的机械振动信号变为电信号。压电薄膜由两个电极与中间的晶体层紧贴构成, 其中晶体层中的各个晶格中储存有永久带电的电荷。当给压电薄膜施加外力时, 这些晶格会发生形变, 电荷的带电方向也会发生变化, 薄膜的两个电极上则会感应出与作用力大小相对应的电荷^[19]。本文所选用的 PVDF 压电薄膜为泰科电子有限公司生产的 FDT 系列薄型 PVDF 传感器。该传感器表面粘贴金属屏蔽层, 并用柔性软布包裹, 使用时对人体无压迫感, 能做到 BCG 信号的无感知测量。

本文利用压电薄膜传感器, 设计了一种适用于卧姿非接触式的人体心率、呼吸率等基本生命体征的监测系统。该系统具有结构简单、检测条件限制小、监护时间长等特点, 尤其适用于夜间长期监护。

本文针对该系统设计了模拟信号变换电路部分、信号采集与处理硬件部分。信号采集部分使用从电荷采集到模数转换输入的全差分结构电路, 图 1 为所设计全差分电路示意图。为采集到精确的微弱 BCG 信号, 设计了主动屏蔽层驱动电路等措施进一步降低外界引入的干扰。针对大型 PVDF 传感器内阻大、输出电荷微弱、极易引入外界干扰的问题做了优化: 在电流/电压变换电路中使用高灵敏度的运算放大器。考虑到实用性因素, 在电路设计方面首先引入了 2.5 V 直流偏置, 且所有运算放大器均只需 0~5 V 供电,

具有轨至轨输出特性; 其次, 使用的 FDNR 陷波滤波器对电器元件精度要求低, 且元件易得。此外, 选择的模数转换器内部集成了如振荡器、电压基准等电路, 外部无需其他的驱动电路。这样整体电路具有结构精巧简洁, 可以使用单 5 V 电源供电, 制造成本低等优点。

模拟电路部分采用 Analog Devices 公司 AD8641、AD8619 运算放大器、AD8227 仪表放大器, Texas Instrument 公司 OPA350 运算放大器; AD 转换部分使用 ADS1118 16 位 Σ - δ 型全集成 ADC 芯片, 嵌入式信号采集设备使用“树莓派”ARM 开发板。硬件电路能采集具有高信噪比的 BCG 信号, 具有较低的工频干扰噪声、较高的肢体运动噪声容忍度, 能准确描绘出所测人体的呼吸与 BCG 波形等特点并与心电信号 (Electrocardiogram, ECG) 同步采集。信号处理器使用“树莓派”ARM 开发板, 其相应的操作系统开发文档较为完善, 适合在制作前期快速进行原型验证。

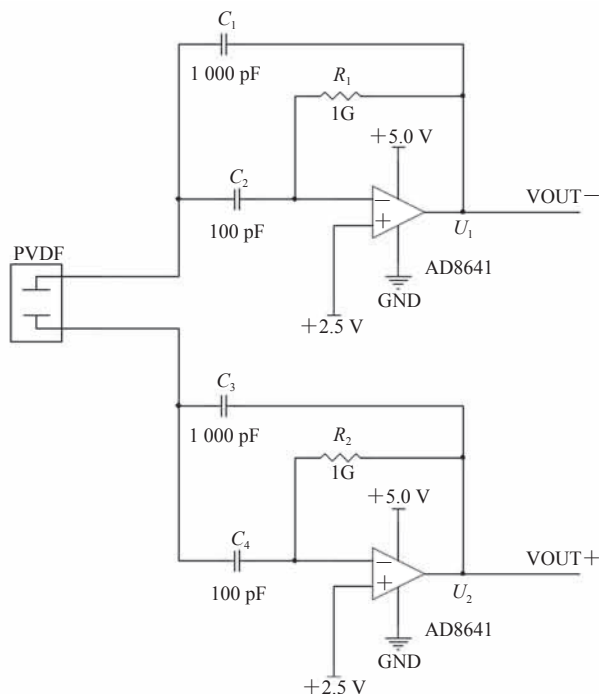


图 1 双电流-电压变换电路组成的差分结构电路

Fig. 1 Differential circuit for transforming current to voltage

为验证本文采集系统的准确性及所采集的 BCG 信号的质量, 使用本系统同步采集 BCG 信号与 ECG 信号。采集得到的信号如图 2 所示, 过滤掉呼吸信号后的 BCG 信号有着较强的规律性, 每个心冲击信号波群代表着一次心跳动作, 对比同步记录的心电信号可以证明这一规律性。初步验证所设计的采集系统可以采集得到稳定可靠的人体 BCG 信号, 表明可进一步的量化分析与研究。

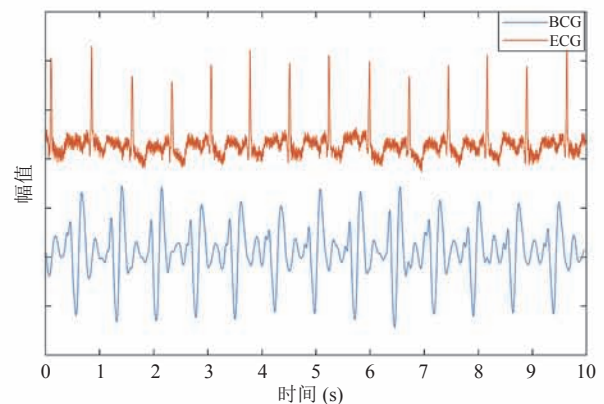


图 2 同步采集的 BCG 信号与 ECG 信号示意图

Fig. 2 Synchronized ECG signal and BCG signal

3 信号质量的影响因素分析

在信号采集过程中, BCG 信号质量受多重因素影响^[17], 如传感器摆放位置、受试者采集姿势等。除此之外, 由于 PVDF 传感器的高灵敏度, 受试者微小的体动也会影响所采集的 BCG 信号的波形特征。本文对传感器位置、床垫硬度、呼吸暂停和躺卧姿势等影响 BCG 信号质量因素进行实验分析。

3.1 传感器位置影响

PVDF 传感器实际上采集的是其表面的机械信号, 因此传感器摆放位置也会对心冲击信号质量造成一定影响。图 3 为采集信号所需的 3 个 PVDF 传感器 (自头部至脚方向将传感器位置依次定义为上方、中间部位和下方) 并行放置位置

示意图。其中,中间传感器放置于心脏正下方,其余两个传感器分别置于其上方 5 cm(上)和下方 5 cm(下)的位置。

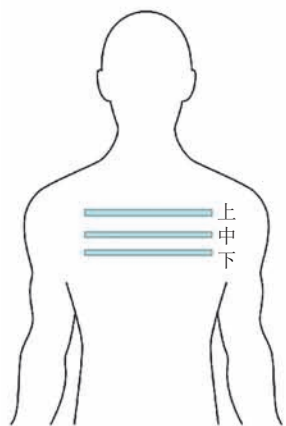


图3 传感器摆放位置示意图

Fig. 3 The location of the sensors

图4为3个传感器同时采集得到的BCG信号波形图。本文计算在3种情况采集原始信号的峰峰值、呼吸波峰峰值和心冲击峰峰值等指标,

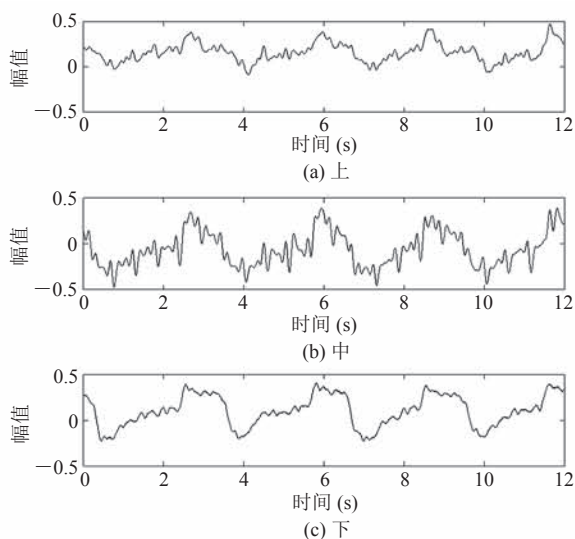


图4 传感器在不同位置采集得到的BCG信号示意图

Fig. 4 BCG signals acquired at different locations

其对比结果如表1所示。从表1可看出,位于中间的传感器信号强度最高,呼吸与BCG信号占比均匀;位于上方的传感器采集的呼吸信号较弱,BCG信号相对突出;位于下方的传感器呼吸信号则更突出。由此可以得出结论,BCG信号强度最高的位置是心脏正下方对应心尖的部位,这与BCG信号产生的机理相符。从波形来看,位于心脏正下方传感器采集得到的BCG信号周期性更好、信噪比更高,与标准BCG信号相似性更好,有利于进一步分析使用。这提示在采集信号时,将传感器置于心脏正下方对应心尖的位置,所采集的BCG信号质量较好。

3.2 床垫硬度影响

心脏与肺部机械运动施加的反作用力将作用在PVDF传感器与床垫上,不同硬度的床垫对PVDF传感器采集到的BCG信号有着较大影响。本文使用木质床板(硬质)、普通床垫(正常)和软布折叠床(柔软)进行测试。其中,随机选取一名受试者分别在3种床上以平躺姿势躺卧,传感器与人体相对位置基本保持在人体心脏下方不变,仰卧躺好静息5 min后开始记录数据。最终挑选没有体动干扰的数据作图,具体如图5所示。

三种情况下原始信号峰峰值与使用算法得到的呼吸波峰峰值、心冲击信号峰峰值对比结果如表2所示。从表2可以看出,将传感器置于适当厚度的床垫,原始信号中包含较为明显的BCG信号成分。其中,软布折叠床(软)所测得的原始信号中呼吸波信号成分更为明显,而BCG成分较少;普通床垫床(正常)所测得的BCG信号中呼吸成分较弱,BCG信号占比虽高,但幅值

表1 传感器放置位置对BCG信号的影响

Table 1 The influence of the sensor location on BCG signal

传感器位置	原始峰峰值	呼吸峰峰值	呼吸/原始(%)	心冲击峰峰值	心冲击/原始(%)
上	0.560	0.23	41.10	0.38	68.50
中	0.983	0.43	42.60	0.46	46.90
下	0.660	0.43	65.30	0.29	44.10

较低; 木质床板(硬)所测得的 BCG 信号呼吸与心冲击信号占比均匀, BCG 信号幅值较高, 波形质量较好, 有利于进一步的分析使用。由此可知, 在采集信号时, 使用硬质床板, 采集的 BCG 信号质量较好。

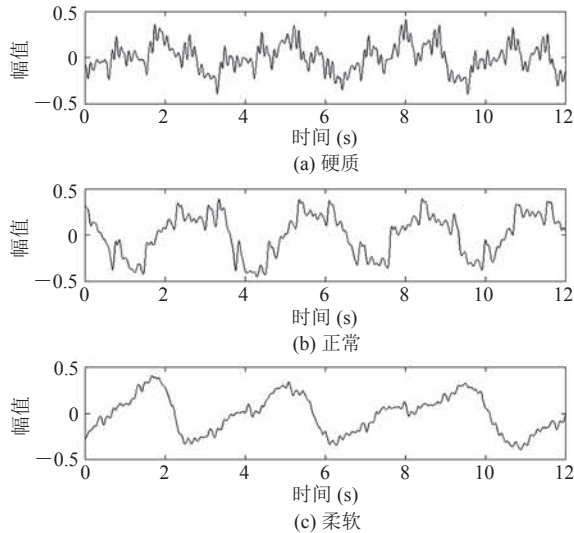


图 5 床垫硬度对 BCG 信号的影响示例

Fig. 5 The influence of mattress hardness on BCG signal

3.3 躺卧姿势影响

通过实验发现, 不同人的 BCG 信号形态特征有着细微差别, 且对于同一个人来说, 人体躺卧姿势对 BCG 信号形态特征也有着较大影响。BCG 信号的测量数据定义有 3 个方向^[16]: 纵向(从头至脚)、横向(从身体的一侧到身体的另一侧)和腹背方向(从人体的后背到胸部)。本实验探究了横向(即侧卧)和腹背方向(平躺)采集得到的 BCG 信号的区别。为直观表达出不同躺卧姿势的区别, 采用提取 BCG 信号模板的方法来对比不同躺卧姿势下 BCG 信号波形的区别。

在提取 BCG 信号模板的过程中, 由于 BCG

信号 J 波最为明显且一般为一个周期中幅值最大的点, 所以本文采取最大值提取算法提取 J 波峰值点, 同时结合手动标注去除错误点并标注出算法没有标记到的 J 波峰值点。在标记出的 J 波峰值点左右各取 125 点即时间为 1S 的序列, 叠加后取平均值即可得到如图 6 所示的 BCG 信号模板, 其 J 波峰位于模板正中间。

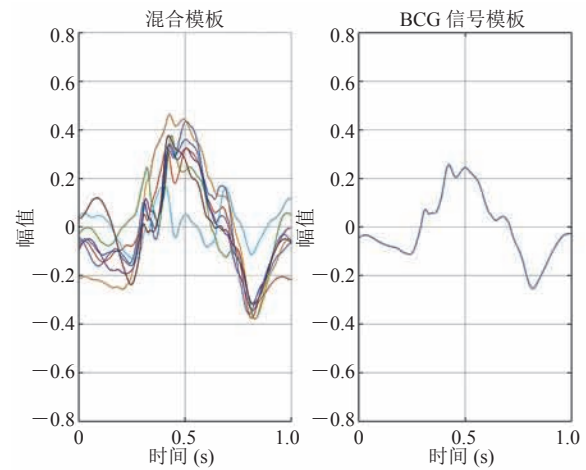


图 6 提取 BCG 信号模板示例

Fig. 6 The template of BCG signals

图 7 为同一位受试者侧卧与平躺时 BCG 信号模板的变化。当受试者侧卧时, 人体 BCG 信号较为典型。但当受试者平躺面部向上时, 人体 BCG 信号则相对较为简化, J 波较为明显, 其

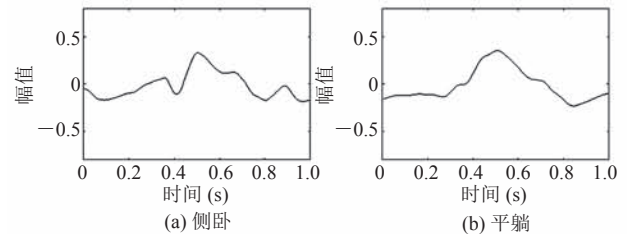


图 7 躺卧姿势对 BCG 信号的影响

Fig. 7 The effect of lying posture on BCG signals

表 2 床垫硬度对 BCG 信号的影响

Table 2 Influence of mattress hardness on BCG signal

床垫硬度	原始峰峰值	呼吸峰峰值	呼吸/原始 (%)	心冲击峰峰值	心冲击/原始 (%)
正常	0.81	0.38	46.40	0.61	74.80
硬	1.68	1.25	74.30	1.11	66.10
软	0.81	0.59	72.80	0.32	39.40

他波峰则不是很明显。这与 Bicen 等^[20]所描述的这两种 BCG 信号的区别相符,也验证了本文所设计系统的可实施性。同时,基于侧卧与平躺间 BCG 信号的异同,通过比较不同时间的 BCG 信号模板可得知人体躺卧姿势变化信息。这为后续应用人体 BCG 信号进行睡眠监护分析时判断睡姿提供了可能性。

3.4 呼吸暂停影响

使用憋气方法验证呼吸暂停时对呼吸信号提取的影响。图 8(a)为一段模拟从呼吸暂停到恢复状态的原始信号,使用移动平均滤波处理后,效果如图 8(b)所示。可以看出,经过处理后,基本能还原原始呼吸产生的波动,但呼吸暂停部分有毛刺现象出现。继续使用 0.2 Hz 低通滤波对所提取的呼吸波进行处理后,毛刺消失,所得波形基本能反映呼吸变化情况(图 8(c))。

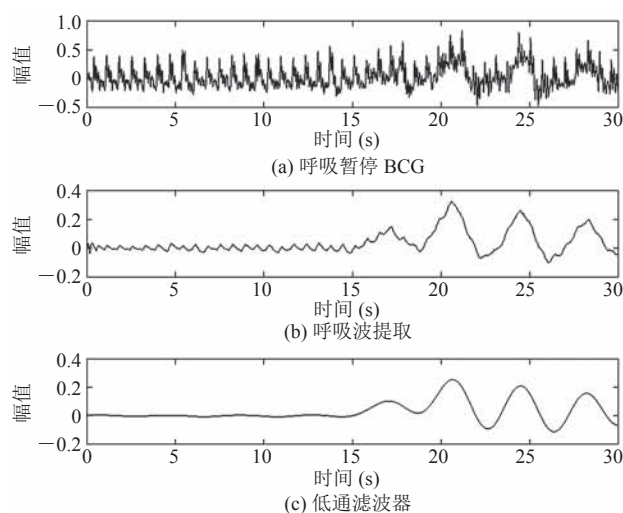


图 8 模拟呼吸暂停过程提取呼吸信号的效果示例

Fig. 8 Example of extracting respiratory signals during apnea

4 讨论

本文基于 PVDF 传感器,设计了能够有效抑制外界电磁干扰,具有高信噪比的 BCG 信号采集设备。BCG 信号除了能反应心脏节律信息

外,还能作为评估心脏血流动力学功能的有效依据。近年来,通过分析 BCG 信号对心肌功能进行评估的研究也越来越深入。已有研究表明,通过提取 BCG 信号的特征可以有效评估心脏的射血分数^[20]。但这些基于 BCG 信号的心血管血流动力学研究都对 BCG 信号质量和波形特征的重复性和稳定性有着较高的要求。本文通过对比实验的方式对 BCG 信号质量的影响因素进行了系统的分析研究。实验结果表明,在卧姿采集 BCG 信号时,应选择较硬床垫、传感器摆在心脏正下方的位置、受试者保持仰卧平躺姿势,这样采集得到的 BCG 信号波形效果最佳,更有利于进一步的血流动力学分析。

5 总结与展望

本设计利用 PVDF 传感器的压电特性,将传感器铺设于床垫上,采集人体心脏与肺部活动产生的机械信号,使用者无需佩戴传感器或粘贴电极,只需躺在床上、坐在椅子上或站在平台上就能够检测其心率、呼吸率等基本生理信号,做到心率与呼吸率的无感知测量。

通过与 ECG 信号进行对比,验证了所设计系统采集 BCG 信号的有效性,同时从外部以及人体自身角度出发,探究了传感器位置、床垫硬度、呼吸暂停、躺卧姿势等因素对信号有效性的影响,提高了 BCG 信号的实用价值。相较于其他 BCG 信号采集系统的研究——大多数从电路、传感器等方面入手^[21],而忽略了 BCG 信号采集因素的影响,本文系统地讨论了几项影响 BCG 信号质量较为明显的因素,为今后 BCG 信号采集系统的研究打下了基础。

BCG 信号作为一种能够无感知测量的生理信号,有着极大的应用前景。BCG 信号缺点在于不同人所反映的 BCG 信号形态有可能不是非常相似,即变异性较大,且受采集姿势、体动影

响较大,这就导致无法用肉眼观察出 BCG 信号的规律性,也无法与有关疾病直接对应。随着医学检查手段的进步,目前彩超、冠脉 CT、血管造影等手段已能清晰地了解心脏实时工作状态,这意味着 BCG 信号作疾病诊断有了可靠的标准;且随着深度学习技术的发展,通过深度学习或许可以找到信号的规律性或与现有可靠标准对接,使 BCG 信号具有更广泛的应用价值,如远程家庭监控、睡眠呼吸障碍、疾病诊断等。除此之外,将 BCG 信号采集系统应用于家用医疗监护床也是当前的一种趋势。

参 考 文 献

- [1] 胡盛寿,高润霖,刘力生,等.《中国心血管病报告 2018》概要[J].中国循环杂志,2019,34(3):6-17.
- [2] 刘芸,董永海,李晓云,等.中国 60 岁以上老年人睡眠障碍患病率的 Meta 分析[J].现代预防医学,2014,41(8):1442-1445.
- [3] Inan OT, Etemadi M, Wiard RM, et al. Robust ballistocardiogram acquisition for home monitoring[J]. *Physiological Measurement*, 2009, 30(2): 169.
- [4] Su BY, Enayati M, Ho KC, et al. Monitoring the relative blood pressure using a hydraulic bed sensor system[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2019, 66(3): 740-748.
- [5] Kim JM, Hong JH, Cho MC, et al. Wireless biomedical signal monitoring device on wheelchair using noncontact electro-mechanical film sensor[C] // 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2007: 574-577.
- [6] Luna-Lozano PS, Alvarado-Serrano C. Time and amplitude relationships of the ballistocardiogram in vertical and horizontal direction[C] // International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, 2012.
- [7] Hassan MA, Malik AS, Fofi D, et al. Video-based heartbeat rate measuring method using ballistocardiography[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(14): 4544-4557.
- [8] Bruser C, Stadlthanner K, de Waele S, et al. Adaptive beat-to-beat heart rate estimation in ballistocardiograms[J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2011, 15(5): 778-786.
- [9] Díaz DH, Casas O, Pallas-Areny R. Heart rate detection from single-foot plantar bioimpedance measurements in a weighing scale[C] // Proceedings of Engineering in Medicine and Biology Society, 2010: 6489-6492.
- [10] Castiglioni P, Faini A, Parati G, et al. Wearable seismocardiography[C] // 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2007, doi: 10.1109/IEMBS.2007.4353199.
- [11] Yu B, Zhang BY, Xu LS, et al. Automatic detection of atrial fibrillation from ballistocardiogram (BCG) using wavelet features and machine learning[C] // Proceedings of 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2019: 4322-4325.
- [12] Sadek I, Biswas J, Abdulrazak B. Ballistocardiogram signal processing: a review[J]. *Health Information Science and Systems*, 2019, 7(1): 10.
- [13] Noordergraaf A, Heynekamp CE. Genesis of displacement of the human longitudinal ballistocardiogram from the changing blood distribution[J]. *American Journal of Cardiology*, 1958, 2(6): 748-756.
- [14] Giovangrandi L, Inan OT, Wiard RM, et al. Ballistocardiography—a method worth revisiting[C] // Proceedings of International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, 2011.
- [15] Nagura M, Mitsukura Y, Kishimoto T, et al. A practical BCG measuring system with bed sensors and algorithm for heartbeat detection[C] // IEEE 15th International Workshop on Advanced Motion Control, 2018.
- [16] Cao XR, Guo H, Tang JT. Heart rate extraction

- of ballistocardiogram based on Hilbert-Huang transformation [J]. IFMBE Proceedings, 2013, 39: 619-622.
- [17] 王春武, 程礼邦, 丁煜, 等. 基于脉搏的心冲击信号特征提取方法研究 [J]. 微型机与应用, 2016, 35(22): 36-39.
- [18] 姜星, 耿读艳, 付志刚, 等. 基于 EMD-ICA 的心冲击信号降噪研究 [J]. 中国生物医学工程学报, 2019, 38(2): 13-20.
- [19] Rajala S, Lekkala J. Film-type sensor materials PVDF and EMFi in measurement of cardiorespiratory signals—a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(3): 439-446.
- [20] Bicen AO, Gurel NZ, Dorier A, et al. Improved pre-ejection period estimation from ballistocardiogram and electrocardiogram signals by fusing multiple timing interval features [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(13): 4172-4180.
- [21] Hersek S, Semiz B, Shandhi MMH, et al. A globalized model for mapping wearable seismocardiogram signals to whole-body ballistocardiogram signals based on deep learning [J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2019, 7(1): 1-23.

欢迎订阅 2020 年《集成技术》

《集成技术》系由中国科学院主管，中国科学院深圳先进技术研究院为第一主办单位，科学出版社为第二主办单位及出版单位的学术期刊。于 2012 年 5 月创刊，国际连续出版物号 ISSN 2095-3135，国内连续出版物号 CN 44-1691/T，是一本大 16 开中文双月刊（逢单月 20 日出版）。

《集成技术》办刊主旨为：努力反映理工农医四大领域的新理论、新技术、新成果和发展趋势以及交叉集成。尤其关注一些新的热点领域：虚拟现实与增强现实、大数据、云计算、机器学习、机器人及先进制造、新能源新材料、纳米医疗、精准医学和脑科学等。

栏目设置：生物医药与生物医学工程、电子信息、新能源新材料。

期刊订阅：

2020 年定价 48 元 / 册，全年刊期：6 期，全年定价 288 元。

①各地邮局订阅：邮发代号 46-139；

②科学出版社期刊发行部：联系电话 010-64017032 64017539；

③网上购买：搜淘宝店、微店店铺名称：中科期刊（订阅及销售过刊）；或扫描下方二维码。

④淘宝购买链接：

<https://item.taobao.com/item.htm?spm=a1z38n.10677092.0.0.1e261debktbJMv&id=45473999484>

⑤微店购买链接：

<https://weidian.com/item.html?itemID=2580439973>

