

· 综述 ·

基于心冲击信号的血压监测技术研究进展

崔子琦¹, 邢晓曼²

1. 北京交通大学电子信息工程学院（北京 100044）
2. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所（江苏苏州 215163）

【摘要】血压是人体重要的生理参数之一，对个体的健康状态临床评估和疾病风险管控具有重要意义。目前基于心冲击图（ballistocardiogram, BCG）的血压监测技术，能够在极低负荷的状态下实现分布式测量，并快速反映血压相关信息，克服了传统侵入式方法和非侵入式方法的使用负荷高、操作不便等问题，在临床应用、居家监测和主动健康方面具有广阔发展前景，成为了血压动态监测领域的热点之一。本文围绕基于 BCG 血压监测技术的原理、研究进展、前景展开综述。

【关键词】心冲击信号；血压测量；无负荷监测

The research and progress of ballistocardiogram-based blood pressure monitoring technology

Zi-Qi CUI¹, Xiao-Man XING²

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, Jiangsu Province, China

Corresponding author: Xiao-Man XING, E-mail: xingxm@sibet.ac.cn

【Abstract】 Blood pressure is one of the most important physiological parameters, which is of great significance to the clinical assessment of individual health status and disease risk management. The ballistocardiogram-based approach to blood pressure monitoring has become one of the hottest topics in the field of blood pressure dynamic monitoring because it can recognize distribution measurement with low load, and quickly reflect blood pressure related information. It overcomes the problems of high load and inconvenient operation of traditional invasive and non-invasive methods. It offers the possibility of useful application in both in clinical and home monitoring. This paper reviews the principles, research progress and prospects of blood pressure monitoring technology based on BCG.

【Keywords】 Ballistocardiogram; Blood pressure monitoring; No-load monitoring

DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.2021.02.07

基金项目：国家重点研发计划（2020YFC2003600）；国家自然科学基金（62001470）

通信作者：邢晓曼，副研究员，硕士研究生导师，E-mail: xingxm@sibet.ac.cn

血压监测在健康管理和临床诊断方面具有重要意义。现有研究表明高血压是引发心血管疾病的危险因素之一，可引起动脉硬化、心脏肥厚、中风、心肌梗死、主动脉瘤等高风险疾病^[1-3]。血压波动情况能科学有效的反映个体体征变化、血液流速、机体新陈代谢以及自身机体内组织器官功能健康状态^[4]，因此血压监测是疾病防控中重要的措施。但由于人的血压具有波动性^[5-6]，单次测量不能够满足血压监测的要求，且情绪波动、体力活动等因素也会对血压产生影响^[7-9]，因此精准的连续动态血压及其短期涨落模式的监测具有重要临床和社会意义。

相较于现有的血压监测技术，如容积钳制法、扁平张力法、基于血液容积波（photoplethysmography, PPG）的测量方法，使用心冲击图（ballistocardiogram, BCG）的血压监测技术无需佩戴复杂的测量设备，也不会压迫血管，不仅可以使用户负荷更低、操作更简便，且能够稳定有效地持续获得数据，可用于动态血压持续监测^[10-12]。BCG中富含丰富的信息量，从单路信号便可提取心率、呼吸率等参数，可应用于动态监测个体健康状况，已被证明测量具有足够的精度^[13]，适用于临床医学的推广和个体的日常居家健康管理。随着电子科学技术的进步，BCG信号获取的方法越来越多样化，精度越来越高，越来越多低廉高性能测量设备涌现出来。随着心脏动力学研究的日益深入和人工智能技术的发展，科学界对BCG信号背后的生理信息有了新的认识，基于BCG的血压监测精度上升到了一个

新的高度。这不仅对低负荷血压监测技术的革新提供新的突破口，也为个体健康管理日常化提供了有效途径。本文就基于BCG信号血压监测的原理、研究现状、发展方向展开综述。

1 BCG的基础知识

1.1 BCG的形成

BCG信号是一种由心脏机械活动引起的躯体的微小震荡，能有效反映人体心血管系统的健康状况^[14]。当心脏泵血时会对血管产生冲击，产生与血液流动方向相反的作用力，并随着人体传到体表，体表传感器接收到的信号便是BCG信号^[15]。因此，基于BCG测量技术是一种非侵入式的方法，无需直接贴附人体，可在使用者无感的情况下实现监测其生理参数，是一种真正零负荷的测量方式。

BCG波形同步反映了心动周期血液动力学的信息^[16-17]。一个完整心动周期的BCG包括G、H、I、J、K、L、M、N波动^[18]，其中H、I、J、K波的幅值最大。典型的BCG波形如图1所示，整个心动周期可分为三部分：收缩前期（GH）、收缩期（IJK）和舒张期（LMN）。现有研究表明，BCG的波形特征，如波峰的幅度、波峰之间的时延等与血压值的变化有很高的相关性，可作为血压监测的指标^[19-21]，且当心血管活动异常时，如出现心脏房颤、早搏时，BCG信号的周期、频率、幅度会有不同程度的改变^[22-23]。

1.2 常见的BCG信号采集方式

BCG信号可通过不同类型的体外传感器获

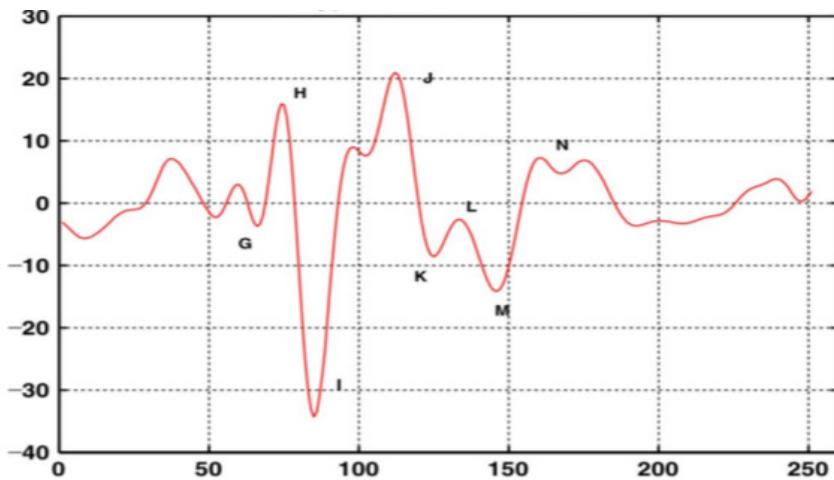


图1 典型的BCG波形^[18]
Figure 1. Typical BCG waveform^[18]

得, 如压力传感器^[12,24]、加速度传感器^[25]、电容耦合传感器^[26]和光纤传感器等^[27-28]。现有研究揭示了不同的传感器在不同测量环境下性能也有所不同, 压力传感器的稳定性和灵敏度一般较高, 可以测量纵向的压力变化, 在供电受限的情况下也可正常工作, 但是需要受试者保持特定的姿势^[12,29]; 加速度传感器稳定性虽低一些, 但适用的范围较广, 在人体不同测量位置都能获得有效的三个方向轴上的参数, 更容易应用于可穿戴设备中^[17,30]; 光学传感器的非磁性质, 使其在测量中抗电磁和射频干扰的性能更强, 且光纤材质化学性质稳定, 更耐水、耐高温、耐腐蚀, 适用环境更广, 但由于其光敏感性, 一般需要高功率的光源, 且对于环境中光强的变化和运动噪声也更加敏感, 因此一般需要在低干扰的环境中工作^[27-28]。相较于其他低负荷式的血压测量技术, 如血液容积法、雷达毫米波等技术, 基于BCG的血压监测方法的负荷更低, 无需佩戴任何胸带、贴片或腕带^[31], 且可根据应用的场景, 选择不同的传感器获取BCG信号, 测量具有更高的抗干扰能力和可重复性^[14]。目前关于BCG信号的测量主要集中在立式、坐式、卧式三种姿态。

1.2.1 立式

2007年González等提出了利用电子秤感应心脏周期泵血时人体足部的压力变化, 来获得BCG信号测量心率的技术, 该设备由斯坦福大学开发, 测量者无需任何额外操作, 只需平稳的站在秤上即可, 该研究验证了BCG信号在提取测量人体参数方面的可信度^[32]。三星研究院使用含有压力应变计的改装体重秤与含有加速度传感器的腕表, 获得了人体站姿时腕部和足部的BCG信号, 并将其用于血压监测的分析, 完成了血压到BCG信号的重建, 扩展了BCG测量的应用场景^[19]。

1.2.2 坐式

Koivistoineen等使用一个装有压电驻极体薄膜(EMFi)传感器的座椅测量BCG信号, 当心脏跳动时, 心血管运动引起身体的纵向力, 会使传感器的厚度发生变化, 从而引起其中电荷的改变。系统的测试结果证明, 该设备可有效记录BCG信号^[33]。Shao等利用一种基于高清视频的方法来测量BCG信号, 该方法利用视频每帧中受试者面部特征的偏移量来获得其身体加速度变化, 但该方法对受试者姿态要求较高, 用户在整个测试过程

中必须保持绝对静止, 微小的无意识移动都会影响测量结果, 且该方法以高分辨率视频为原始数据, 采集的数据量和分析计算量极大, 测量会记录受试者面部特征, 可能涉及用户隐私安全问题, 因此难以日常应用^[25]。

1.2.3 卧式

1996年, 俞梦孙等研制出一种基于充气式的微动敏感床垫, 该设备通过床垫内的气垫变化感知由心动周期引起的躯体震动的压力变化, 获得BCG信号。经实验测试, 该设备可有效记录BCG信号, 并从中提取受试者心率、呼吸等信息, 相关性达0.99^[34]。Su等使用一种基于液压的多路传感器记录受试者卧姿下的BCG信号, 并使用获得的信号与测量的血压值进行相关性分析, 实验结果表明该设备测量记录的BCG信号可有效应用于动态血压监测^[12]。Chen等使用一种基于高灵敏度的多模微弯光纤智能床探测BCG信号, 从中提取的心率和呼吸率测量误差为2 bpm, 证明其具有较高的可用性^[27]。

2 基于BCG信号的血压测量技术的发展

2.1 基于BCG测量血压的理论研究

目前, 基于BCG测量血压的理论研究主要是对不同姿态下心血管系统血液传播的理论进行建模, 研究分析的姿态主要集中于标准站姿和坐姿, 而卧姿状态下心血管受力较为复杂, 研究也相对较少。

2013年, 蒋芳芳等在心脏动力学的视角下, 对标准坐位BCG的产生、体内的传导过程进行了数学建模。该研究主要考虑了左心室中动脉血流的影响, 血流在体内的传导过程被简化为二阶欠阻尼系统, 实验建模恢复了BCG波形的基本特征点, 但由于未考虑躯体力学分布和右心室的影响, BCG信号I波的波谷较低^[35]。2015年, Javaid等分析了不标准站姿和坐姿带来的信号漂移, 并提出了身体姿态在不同偏移角度下的BCG信号纠正方案^[36]。实验结果表明, 纠正方案可大大提高BCG信号的可用性和有效性, 这也在一定程度上扩展了BCG信号的应用场景。2016年, Kim等通过对主动脉血流进行测量和模拟, 定性获得了标准站位BCG波形, 其中I、J、K波的重塑有效性达91%以上, L、M、N波的重塑有效性达83%以上, 该研究还揭示了BCG来源于升

主动脉和降主动脉之间血压梯度，其中，I 波的开始点与 J 波波峰间的时间间隔可代表主动脉脉冲传输时间，J 波的幅值对应于主动脉的脉压（主动脉脉压 = 收缩压 - 舒张压）作用与主动脉横截面的压力值，J-K 波的相对振幅对应于外围血压作用于降主动脉作用横截面的血压值，这表明了 BCG 信号的幅度和时间特征对血压监测和心血管疾病临床风险评估具有重要意义^[37]。在 Kim 等研究的基础上，2019 年，Yousefian 等通过把躯体模拟为刚体、弹簧等相连的力学系统，把心脏搏

动模拟为周期性的流体泵，在腕部和足底的位置获取了同步 BCG 波形参数及其对于躯体力学参数的敏感度^[37]，如图 2、图 3 所示^[19]。该力学系统将 BCG 信号刻画为主动脉脉压梯度与躯体力学系统作用后的结果，通过实验揭示了腕部 I 波和 J 波与主动脉入口舒张压的最小值有关，腕部 J 波和 K 波与主动脉出口的舒张压最小值相关。然而 Yousefian 等的理论模型未考虑周边血管系统对动量的贡献，因此一些推论不符合常理。譬如理论推导的波幅和传播速度独立，实际上，受血管弹

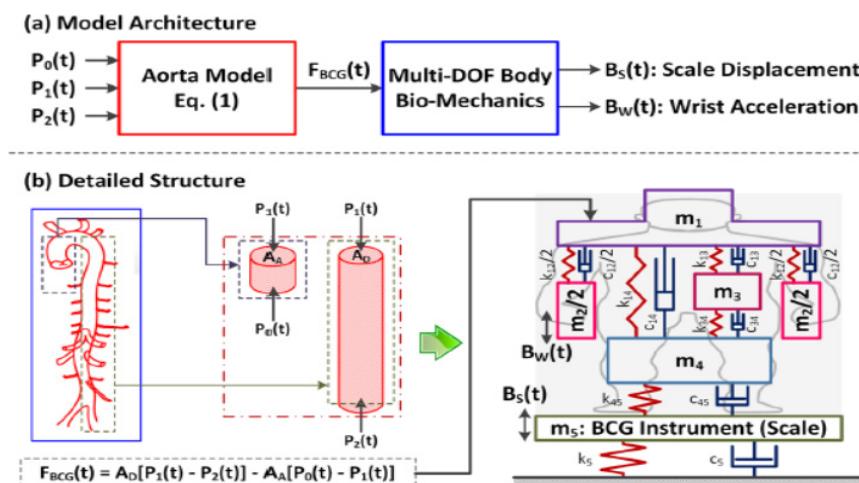


图 2 中心血管血液动力学模拟与躯体微振动的关联模型^[19]

Figure 2. Correlation model between cardiovascular dynamics simulation and body microvibration^[19]

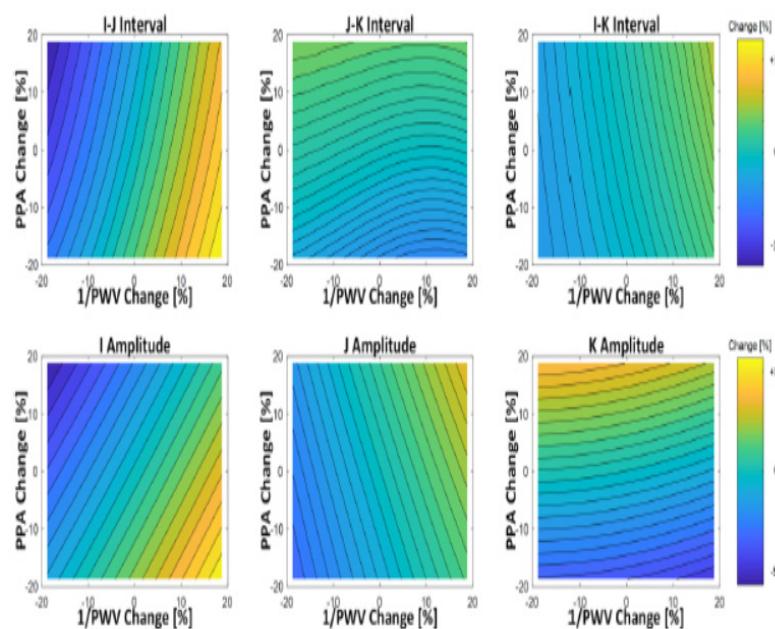


图3 BCG信号对输入参数敏感度分析^[19]

Figure 3. Sensitivity analysis of BCG signal to input parameters^[19]

性、血液惯性和血管树的影响，这两者是密切相关的。

2.2 基于BCG信号测量血压的实验研究

目前关于 BCG 测量血压的研究主要集中于：①利用特征工程提取血压相关的信号特征值，并与测得的金标准血压值进行关联度评估，利用有效特征的线性组合拟合血压值；②联合其他低负荷信号（如 ECG、PPG 等）计算脉冲到达时间（pulse arrival time, PAT）、脉搏传导时间（pulse transit time, PPT）等指标，利用已有的理论进行血压值估计。这些研究主要集中在立式、坐式和卧式三种标准姿态下的血压测量，其中关于立式和坐式的研究分析较为丰富，在信号特征分析、多维度拟合和力学建模方面都有研究，而基于卧式的 BCG 信号由于力学形成相对复杂，目前还罕有力学角度的血压建模分析，此外，单一使用血液循环力学对 BCG– 血压建模的研究还不太丰富。

2.2.1 立式与坐式

三星高等研究院联合马里兰大学、密歇根大学、加拿大阿尔伯塔大学等在 2016—2019 年期间集中发表了多篇论文，围绕标准站位（改装体重秤，如图 4a 所示）和标准坐位（压电薄膜，如图 4b 示），从多个角度探索了 BCG 波形特征与血压值之间的相关性，证明从 BCG 信号中提取血压值的可行性和准确性^[19–21,38,40–41]。其中在 BCG 联合其他生理信号获得 PPT 测量血压的研究中，Martin 等于 2016 年结合 BCG、PPG、ECG、ICG 等信号评估了基于站姿下的 PPT 血压测量方法，发现 BCG–PTT 评估比 PPG–PTT 评估要准确，主要原因因为 BCG 的波形尖峰与心脏搏动的关联更紧密，而 PPG 反映的容积变化有不固定的时间

滞后^[40–41]；Kim 等发现 BCG 特征与血压变化的关联在大多数情况下优于 PPG 特征，但是在某些情况下逊于 PPG 特征（譬如运动后）^[21]。

由于使用 BCG 联合其他生理信号计算血压的方法大多是利用多路信号的时间差计算 PPT 或 PAT，测试时一般需要同时使用多路传感器进行测量，会导致受试者佩戴传感器的负荷较大，且姿态受到严格限制。因此，Kim 等还探究了单独使用 BCG 测量血压的潜力，相关性分析发现，BCG 的 I–J 波之间的时间间隔与舒张压有较好的相关性 ($r=0.70$)，BCG 的 J–K 波间的相对振幅与脉压有较好的相关性 ($r=0.69$)^[21]。类似的，Peyman 等在 2018 年使用腕式 BCG 测试 20 余名健康年轻志愿者^[20]，使用主成分分析和线性拟合算法，收缩压误差达到 14.7 ± 1.4 mmHg，舒张压误差为 11.9 ± 1.1 mmHg。分析结果还表明，要获得稳定且具有实际意义的血压监测值，最少需要使用 BCG 波形的特征数目为 3。如算法结合肢端 PPG 信息，能够将误差降低到 7.6 mmHg 和 5.1 mmHg^[36]，这提示了血液循环力学在 BCG–BP 模型中作用不容忽视。

2.2.2 卧式

卧式 BCG 的波形与立式和坐式显著不同，因此提取的波形特征血液循环力学模型也与这两种姿态下的研究不同。Sakajiri 等设计了一种非接触电容耦合系统同步稳定测量受试者的电容性心电和电容性心冲击图，并将血压与 BCG 的关系公式化为心率与 BCG 参考 ECG 拐点时间差乘积的指数函数，公式化后的血压误差平均值为 2.37mmHg，但是由于呼吸运动引起的胸内压变化会压缩血管，所以每次呼吸时血压都会发生变化，且随着

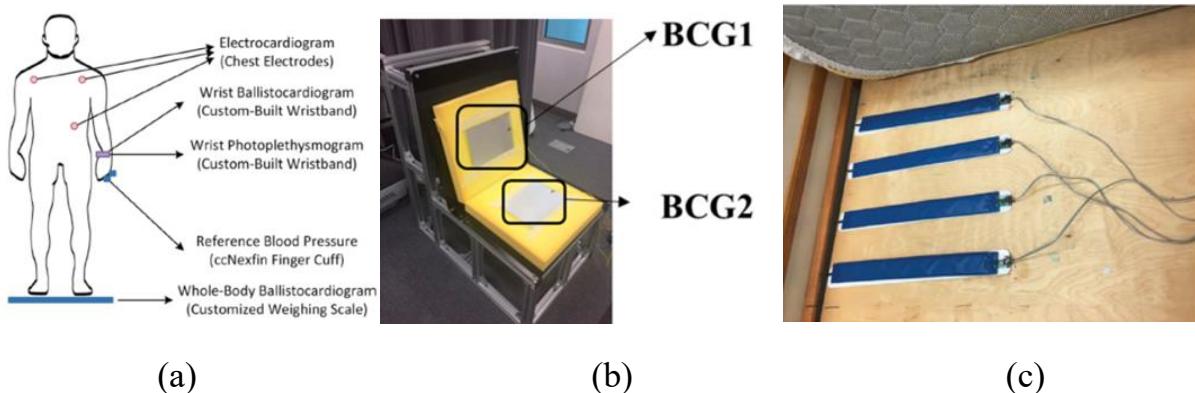


图4 主要的BCG测量模式 (a) 立式 (b) 坐式 (c) 卧式^[12,38–39]
Figure 4. Main BCG measurement modes (a) vertical (b) seated (c) horizontal^[12,38–39]

测量时间的推移，参考时间轴发生偏移，计算的误差随之增大，该研究还需在该方面进行改进^[26]。Su 等在躯干部位使用一维分布的 4 个条状水压传感器（如图 4c），在标准仰卧状态下进行了小范围实验测试。通过对 BCG 波幅的提取，取得了 BCG-BPS 与金标准平均相关度 0.9 的结果（如图 5）^[12]。该研究证实了基于卧式 BCG 血压测量的可行性和正向相关性。但是由于样本量小（48 名健康志愿者）、特征单一（仅使用波幅）、测试者保持静止、血压保持平稳，不能严格证明其对血压短期波动的有效性，需在此基础上结合理论研究进行优化。

通过对各种基于 BCG 信号的血压测量方法的分析可以看出，由于不同姿态下 BCG 信号的测量方法、特征提取方法、力学分析建模等各不相同，BCG 信号测量血压的性能也各不相同。目前测量的方法主要是结合 BCG 信号与其他测量的生理信号（ECG、PPG 等）计算 PPT、PAT 等指标，再结合关于这些指标较为完善的理论知识及动脉弹性腔理论，建立特征参量与血压间的相关关系方程计算血压值。相较于传统的研究方法，结合了 BCG 的血压测量精度得到了有效的提升，这也从侧面证实了 BCG 的信号特征与血压变化有一定的关联。在此基础上，为了进一步实现血压监测的无负荷化，单一使用 BCG 信号的血压测量方法也相继开展，从 BCG 信号特征分析和血液循环力学切入，目前已可稳定重建受试者 BCG 波形、获取血

压变化的相对值，随着对 BCG 认识的不断深入，这将是未来 BCG 测量血压主要的研究方向之一。

2.3 基于BCG信号测量血压的临床进展及前景

基于 BCG 的血压测量技术不仅在理论和实验方面发展迅速，其在临床方面的应用也前景光明，虽然市场上尚未出现符合临床应用标准的测量仪器，但该方法具有低负荷、易操作和能够动态测量等特性，未来可能在操作性、精确性和舒适性等方面弥补现有测量方法的不足，甚至代替某些方法。

具体来说，目前临床中血压测量的金标准是侵入性动脉导管^[42]，但由于其侵入式的测量方式，该方法仅仅在一些危重症患者手术时应用。柯氏音血压测量法克服了侵入式测量的缺点，但是需要专业操作人员对听到的脉搏音进行判读从而读取血压值^[43]，人为因素对读取结果的影响很大，且难以实现血压动态监测。

为了进一步实现无创连续的血压测量，基于动脉张力、恒定容积、脉搏波测量等方法也应用于临床当中。其中基于动脉张力的方法需要对骨骼周围的动脉施压使得血管内外压相等，然后使用特定传感器获得压力值，该方法在临床中准确性较好，可实现连续测量，但是需要与受试者动脉周边骨骼紧密固定，在连续测量时受试者束缚感和不适感强，而且临床研究表明，该技术对大的瞬时血压变化不敏感^[44]，在老年人群中缺乏可靠性^[45]。基于恒定容积的测量方法往往也需要对

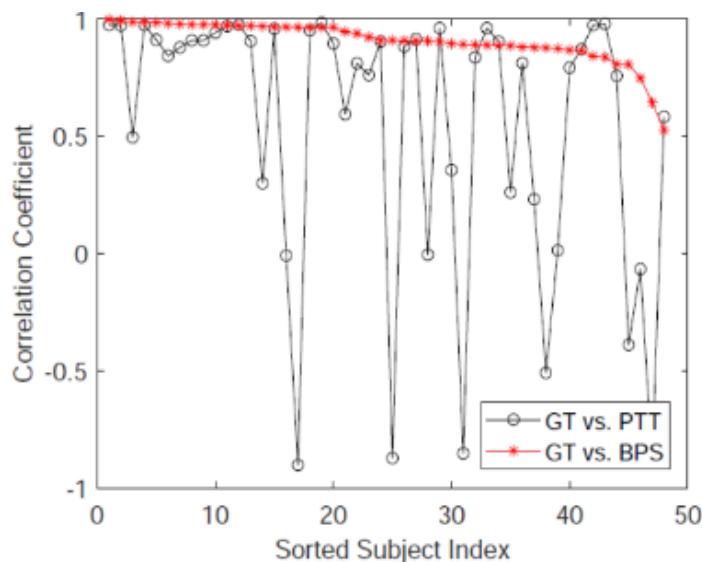


图5 基于BCG的动态收缩压（BPS）与金标准能够保持稳定正相关^[12]

Figure 5. BCG – based dynamic systolic pressure (BPS) was positively correlated with the gold standard^[12]

受试者的血管壁施压，因此受试者在动态测量过程中感受到的压迫感强，且长期施压更易导致受试者静脉处于充血状态，从而影响测量值^[46]，不利于长期测量。而脉搏波测量法虽大大降低了测量时的压迫感，但需要在两个不同的动脉部位安装传感器，测量结果受到动脉壁硬度和血管形态的影响，现有研究证明其对舒张压的评估不适用^[47]，该技术目前仍在持续改进。

相比之下，基于 BCG 信号的血压测量方法无需采用束缚式传感器，受试者的测量负荷可进一步降低，甚至可以达到零负荷，且避免了压力束缚改变受试者生理状态的现象，在长期动态监护上有着无可比拟的优势。此外，由于 BCG 信号可以稳定获取，使得逐拍血压监测成为可能，进而提高对血压瞬时变化的监测敏感程度，在对特定疾病的监测时该方法可弥补动脉张力法等传统方法的不足。更重要的是，BCG 信号中附加很多额外信息，目前临床中已通过 BCG 信号判断睡眠呼吸暂停、心脏房颤、早搏等，这也使得用单一设备低负荷多方位监测生理状况成为可能。而且 BCG 传感器成本低，为降低监测的医疗成本提供了契机，结合 BCG 测量方法操作简单的优势，居家监测也可能成为现实。但是目前基于 BCG 的血压监测技术仍在发展阶段，虽然在临床实践中已可以判断不同类型的高血压^[48]，但其精度和动态性还需进一步提高，市面上需要符合临床标准的测量设备，这也是 BCG 测量技术发展面临的重要挑战。

3 结语

血压监测对心血管疾病、中风等高风险疾病的诊断和早期防控具有重要意义。BCG 技术由于无创、低负荷、可连续监测、蕴含大量生理信息等优点，已成为血压动态监测的一个发展方向。目前结合 BCG 和其他生理信号的血压监测技术已有良好进展，测量结果的稳定性和准确性都较高。关于单一 BCG 测量的技术仍在发展，目前已证明 BCG 信号特征与血压值之间具有高度相关性，且在坐姿和站姿下已有较完备的力学分析理论和测量实践，具有较为良好的测量精度；关于卧姿的力学分析仍在发展中。随着电子信息技术的发展，BCG 测量和提取技术将更加可靠，未来需结合数据分析经验和力学模型分析，进一步完善 BCG 测量血压的理论，提高其测量精度。

参考文献

- 《中国高血压基层管理指南》修订委员会. 中国高血压基层管理指南(2014年修订版)[J]. 中华高血压杂志, 2015, 23(1): 24–43. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-0815.2015.01.004. [Revision committee of Chinese guidelines for primary hypertension management. Chinese guidelines for primary hypertension management (2014 revision)[J]. Chinese Journal of Hypertension, 2015, 23(1): 24–43.]
- Inan OT, Etemadi M, Wiard RM, et al. Robust ballistocardiogram acquisition for home monitoring[J]. Physiol Meas, 2019, 30(2): 169–185. DOI: 10.1088/0967-3334/30/2/005.
- 孙宁玲, Chen JW, 王继光, 等. 亚洲高血压合并左心室肥厚诊治专家共识[J]. 中华高血压杂志, 2016, 24(7): 619–627. DOI: CNKI:SUN:ZGGZ.0.2016-07-008. [Sun NL, Chen JW, Wang JG, et al. Expert consensus on diagnosis and treatment of Asian hypertension with left ventricular hypertrophy[J]. Chinese Journal of Hypertension, 2016, 24(7): 619–627.]
- Brunström M, Carlberg B. Association of blood pressure lowering with mortality and cardiovascular disease across blood pressure levels[J]. JAMA Intern Med, 2018, 178(1): 28–36. DOI: 10.1001/jamainternmed.2017.6015.
- Perez-Lloret S, Toblli JE, Vigo DE, et al. Infradian awake and asleep systolic and diastolic blood pressure rhythms in humans[J]. J Hypertens, 2006, 24(7): 1273–1279. DOI: 10.1097/01.hjh.0000234106.00745.50.
- Larry CD, Yeo S. The circadian rhythm of blood pressure during pregnancy[J]. J Obstet Gynecol Neonatal Nurs, 2000, 29(5): 500–508. DOI: 10.1111/j.1552-6909.2000.tb02771.x.
- Hermida RC, Ayala DE, Smolensky MH, et al. Sleep-time blood pressure: unique sensitive prognostic marker of vascular risk and therapeutic target for prevention[J]. Sleep med rev, 2017, 33: 17–27. DOI: 10.1016/j.smrv.2016.04.001.
- Bruno RM, Taddei S. Asleep blood pressure: a target for cardiovascular event reduction?[J]. Eur heart J, 2018, 39(47): 4172–4174. DOI: 10.1093/eurheartj/ehy557.
- Hermida RC, Crespo JJ, Otero A, et al. Asleep blood pressure: significant prognostic marker of vascular risk and therapeutic target for prevention[J]. Eur heart J, 2018,

- 39(47) : 1459. DOI: [10.1093/eurheartj/ehy475](https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy475).
- 10 Silke B, Meauley DF. Accuracy and precision of blood pressure determination with the Finapres: an overview using re-sampling statistics[J]. *J Hum Hypertens*, 1998, 12(6): 403–409. DOI: [10.1038/sj.jhh.1000600](https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1000600).
- 11 Komori T, Eguchi K, Hoshide S, et al. Comparison of wrist-type and arm-type 24-h blood pressure monitoring devices for ambulatory use[J]. *Blood Press Monit*, 2013, 18(1): 57–62. DOI: [10.1097/mbp.0b013e32835d124f](https://doi.org/10.1097/mbp.0b013e32835d124f).
- 12 Su BY, Enayati M, Ho KC, et al. Monitoring the relative blood pressure using a hydraulic bed sensor system[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2018, 66(3): 740–748. DOI: [10.1109/tbme.2018.2855639](https://doi.org/10.1109/tbme.2018.2855639).
- 13 Etemadi M, Inan OT. Wearable ballistocardiogram and seismocardiogram systems for health and performance[J]. *J Appl Physiol*, 2018, 124(2): 452–461. DOI: [10.1152/japplphysiol.00298.2017](https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00298.2017).
- 14 Giovangrandi L, Inan OT, Wiard RM, et al. Ballistocardiography: a method worth revisiting[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2011, 2011: 4279–4282. DOI: [10.1109/embc.2011.6091062](https://doi.org/10.1109/embc.2011.6091062).
- 15 Starr I, Wood FC. Twenty-year studies with the ballistocardiograph: the relation between the amplitude of the first record of "healthy" adults and eventual mortality and morbidity from heart disease[J]. *Circulation*, 1961, 23(5): 714–732. DOI: [10.1161/01.CIR.23.5.714](https://doi.org/10.1161/01.CIR.23.5.714).
- 16 Starr I, Rawson AJ, Schroeder HA, et al. Studies on the estimation of cardiac output in man, and of abnormalities in cardiac function, from the heart's recoil and the blood's impacts; The ballistocardiogram[J]. *Am J Physiol*, 1939, 127(1): 1–28. DOI: [10.1152/ajplegacy.1939.127.1.1](https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1939.127.1.1).
- 17 Inan OT, Migeotte PF, Park KS, et al. Ballistocardiography and seismocardiography: a review of recent advances[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2017, 19(4): 1414–1427. DOI: [10.1109/JBHI.2014.2361732](https://doi.org/10.1109/JBHI.2014.2361732).
- 18 Ganesan M, Sumesh EP. Evaluating the force of contraction of heart using ballistocardiogram[C/OL]// 2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC). IEEE, 2016: 1–5. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7460371>.
- 19 Yousefian P, Shin S, Mousavi AS, et al. Physiological association between limb ballistocardiogram and arterial blood pressure waveforms: a mathematical model-based analysis[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 5146. DOI: [10.1038/s41598-019-41537-y](https://doi.org/10.1038/s41598-019-41537-y).
- 20 Peyman Y, Sungtae S, Azin M, et al. Data mining investigation of the association between a limb ballistocardiogram and blood pressure[J]. *Physiol Meas*, 2018, 39(7): 075009. DOI: [10.1088/1361-6579/aacfe1](https://doi.org/10.1088/1361-6579/aacfe1).
- 21 Kim CS, Carek AM, Inan OT, et al. Ballistocardiogram-based approach to cuff-less blood pressure monitoring: proof-of-concept and potential challenges[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2018, 65(11): 2384–2391. DOI: [10.1109/TBME.2018.2797239](https://doi.org/10.1109/TBME.2018.2797239).
- 22 曹欣荣, 刘蕾, 蔡东阳, 等. 心冲击图特征统计及其医学诊断应用 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2014, 54(5): 633–637. DOI: [CNKI:SUN:QHXB.0.2014-05-015](https://doi.org/10.1109/TBME.2018.2797239). [Cao XR, Liu L, Cai DY, et al. Cardiac impact chart characteristic statistics and its application in medical diagnosis[J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science)*, 2014, 54(5): 633–637.]
- 23 Wen X, Huang Y, Wu XM, et al. A feasible feature extraction method for atrial fibrillation detection from BCG[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2020, 24(4): 1093–1103. DOI: [10.1109/JBHI.2019.2927165](https://doi.org/10.1109/JBHI.2019.2927165).
- 24 王敏. 基于智能床垫的心冲击图信号处理及其在心血管健康评估中的应用研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2018. [Wang M. Cardiac impulse chart signal processing based on smart mattress and its application in cardiovascular health assessment [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.]
- 25 Shao D, Yang Y, Tsow F, et al. Non-contact simultaneous photoplethysmogram and ballistocardiogram video recording towards real-time blood pressure and abnormal heart rhythm monitoring[C/OL]// 2017 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017). IEEE, 2017: 273–277. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7961752>.
- 26 Sakajiri Y, Ueno A. Simultaneous measurements of capacitive electrocardiogram and ballistocardiogram using in-bed fabric sheet electrode for blood pressure estimation[C/OL]// 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). IEEE, 2020: 4543–4546. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9176548>.
- 27 Chen Z, Lau D, Teo JT, et al. Simultaneous measurement of

- breathing rate and heart rate using a microbend multimode fiber optic sensor[J]. *J Biomed Opt*, 2014, 19(5): 057001. DOI: [10.1117/1.JBO.19.5.057001](https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.5.057001).
- 28 Zhang Y, Chen Z, Chen W, et al. Unobtrusive and continuous BCG-based human identification using a microbend fiber sensor[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 72518–72527. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2919407](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919407).
- 29 金晶晶. 心冲击图信号的无感觉检测与分析方法研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010. [Jin JJ. Study on the non-sensory detection and analysis method of cardiac impulse chart signal[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.]
- 30 Pandia K, Inan OT, Kovacs GT, et al. Extracting respiratory information from seismocardiogram signals acquired on the chest using a miniature accelerometer[J]. *Physiol Meas*, 2012, 33(10): 1643–1660. DOI: [10.1088/0967-3334/33/10/1643](https://doi.org/10.1088/0967-3334/33/10/1643).
- 31 Zheng YL, Ding XR, Poon CC, et al. Unobtrusive sensing and wearable devices for health informatics[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2014, 61(5):1538–1554. DOI: [10.1109/TBME.2014.2309951](https://doi.org/10.1109/TBME.2014.2309951).
- 32 González LR, Casas O, Pallàs AR. Heart rate detection from an electronic weighing scale[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2007, 2007: 6283–6286. DOI: [10.1109/IEMBS.2007.4353791](https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4353791).
- 33 Koivistoinen T, Junnila S, Värrä A, et al. A new method for measuring the ballistocardiogram using EMFi sensors in a normal chair[J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2004, 2004: 2026–2029. DOI: [10.1109/IEMBS.2004.1403596](https://doi.org/10.1109/IEMBS.2004.1403596).
- 34 俞梦孙, 杨军, 周玉彬, 等. 用微动敏感床垫监测睡眠的研究 [J]. 中华航空航天医学杂志, 1999(1): 41–46. DOI: [10.3760/ema.j.issn.1007-6239.1999.01.011](https://doi.org/10.3760/ema.j.issn.1007-6239.1999.01.011). [Yu MS, Yang J, Zhou YB, et al. Study on monitoring sleep with micro-motion sensitive mattress[J]. *Chinese Journal Of Aerospace Medicine*, 1999(1): 41–46.]
- 35 蒋芳芳, 王旭, 杨丹. 基于心脏动力学的体震信号建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(3): 420–424. DOI: [CNKI:SUN:XTFZ.0.2013-03-007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2003.03.012). [Jiang FF, Wang X, Yang D. Modeling and simulation of ballistocardiogram signal based on cardiac dynamics[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(3): 420–424.]
- 36 Javaid AQ, Wiens AD, Fesmire NF, et al. Quantifying and reducing posture-dependent distortion in ballistocardiogram measurements[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2015, 19(5): 1549. DOI: [10.1109/JBHI.2015.2441876](https://doi.org/10.1109/JBHI.2015.2441876).
- 37 Kim CS, Ober SL, McMurtry MS, et al. Ballistocardiogram: mechanism and potential for unobtrusive cardiovascular health monitoring[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 31297. DOI: [10.1038/srep31297](https://doi.org/10.1038/srep31297).
- 38 Yousefian P, Shin S, Mousavi A, et al. The potential of wearable limb ballistocardiogram in blood pressure monitoring via pulse transit time[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 10666. DOI: [10.1038/s41598-019-46936-9](https://doi.org/10.1038/s41598-019-46936-9).
- 39 Lee K, Roh J, Cho D, et al. A chair-based unconstrained/nonintrusive cuffless blood pressure monitoring system using a two-channel ballistocardiogram[J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(3): 595. DOI: [10.3390/s19030595](https://doi.org/10.3390/s19030595).
- 40 Martínez-Yebra A, Landreani F, Casellato C, et al. Evaluation of respiratory- and postural-induced changes on the ballistocardiogram signal by time warping averaging[J]. *Physiol Meas*, 2017, 38(7): 1426–1440. DOI: [10.1088/1361-6579/aa72b0](https://doi.org/10.1088/1361-6579/aa72b0).
- 41 Martin LO, Carek AM, Kim CS, et al. Weighing scale-based pulse transit time is a superior marker of blood pressure than conventional pulse arrival time[J]. *Sci Rep*, 2016, 6(1): 39273. DOI: [10.1038/srep39273](https://doi.org/10.1038/srep39273).
- 42 Cannesson M, Pestel G, Ricks C, et al. Hemodynamic monitoring and management in patients undergoing high risk surgery: a survey among North American and European anesthesiologists[J]. *Crit Care*, 2011, 15(4): R197. DOI: [10.1186/cc10364](https://doi.org/10.1186/cc10364).
- 43 张政波, 吴太虎. 无创血压测量技术与进展 [J]. 中国医疗器械杂志, 2003, 27(3): 196–199. DOI: [10.3969/j.issn.1671-7104.2003.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2003.03.012). [Zhang ZB, Wu TH. Noninvasive blood pressure measurement technology and Its Progress[J]. *Chinese Journal of Medical Devices*, 2003, 27(3): 196–199.]
- 44 Weiss BM, Spahn DR, Rahmig H, et al. Radial artery tonometry: moderately accurate but unpredictable technique of continuous non-invasive arterial pressure measurement[J]. *Br J Anaesth*, 1996, 76(3): 405–411. DOI: [10.1093/bja/76.3.405](https://doi.org/10.1093/bja/76.3.405).
- 45 Harasawa K, Yamane M, Morimoto Y, et al. Performance of a tonometer for arterial pressure measurement during anesthesia in the elderly[J]. *J Anesth*, 2004, 18(4): 316–317. DOI: [10.1007/s00540-004-0261-5](https://doi.org/10.1007/s00540-004-0261-5).

- 46 周亚群, 丁存涛, 孙希鹏, 等. 原发性高血压患者红细胞分布宽度、中性粒细胞 / 淋巴细胞比值与内皮功能关系的研究 [J]. 首都医科大学学报, 2018, 39(2): 292–298. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7795.2018.02.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7795.2018.02.025). [Zhou YQ, Ding CT, Sun XP, et al. Relationship between erythrocyte distribution width, neutrophil/lymphocyte ratio and endothelial function in patients with essential hypertension[J]. Journal of Capital Medical University, 2018, 39(2): 292–298.]
- 47 Drzewiecki GM, Melbin J, Noordergraaf A. Arterial tonometry: review and analysis[J]. J Biomech, 1983, 16(2): 141–152. DOI: [10.1016/0021-9290\(83\)90037-4](https://doi.org/10.1016/0021-9290(83)90037-4).
- 48 吴慧芳, 郭自强, 许秋雯, 等. 高血压不同中医证型病人超声心动图及心冲击图的差异性分析 [J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2020, 18(13): 2024–2027. DOI: [10.12102/j.issn.1672-1349.2020.13.002](https://doi.org/10.12102/j.issn.1672-1349.2020.13.002). [Wu HF, Guo ZQ, Xu QW, et al. Difference analysis of echocardiography and cardiac impact map in patients with different TCM syndromes of hypertension[J]. Journal of Combined Chinese and Western Medicine, Cardio-Cerebrovascular Disease, 2020, 18(13): 2024–2027.]

收稿日期: 2020 年 11 月 25 日 修回日期: 2021 年 01 月 04 日

本文编辑: 桂裕亮 黄笛

引用本文: 崔子琦, 邢晓曼. 基于心冲击信号的血压监测技术研究进展 [J]. 医学新知, 2021, 31(2): 145–154. DOI: [10.12173/j.issn.1004-5511.2021.02.07](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-5511.2021.02.07)
Cui ZQ, Xing XM. The research and progress of ballistocardiogram-based blood pressure monitoring technology[J]. Yixue Xinzhi Zazhi, 2021, 31(2): 145–154. DOI: [10.12173/j.issn.1004-5511.2021.02.07](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-5511.2021.02.07)