

文章编号: 1004-7220(2024)02-0361-07

利用光电容积描记法评估心血管系统功能研究进展

李毅¹, 刘晓龙^{2,3}, 杨旻⁴, 王思涵¹

(1. 桂林学院 体育与健康学院, 桂林 541006; 2. 桂林电子科技大学 生命与环境科学学院; 电子工程与自动化学院, 桂林 541010;

3. 桂林生命与健康职业技术学院 康复学院, 桂林 541100; 4. 上海体育大学 运动健康学院, 上海 200438)

摘要: 综述国内外有关光电容积描记法 (photoplethysmography, PPG) 的心血管系统功能评估作用, 以期为 PPG 的医学应用及创新研究提供理论参考与借鉴。现阶段可从 PPG 信号中解析得到心率、心律、血压、容量等功能评价指标, PPG 还可辅助识别诊断血压异常、糖尿病、心律失常、睡眠呼吸暂停综合征、早期缺血性休克等疾病。但 PPG 精确度与准确性、数据解释及标准化、波形分析和临床应用等方面仍存争议。PPG 作为有效评估心血管系统功能状态与辅助诊断各类疾病的工具, 已被广泛应用于医疗及科研领域并展现出重要价值, 未来其有面朝高精度、多参数、非接触式、远程监护或医疗等方向多路发展的趋势。

关键词: 心血管系统功能; 光电容积描记法; 血压; 心率; 心律

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.02.025

Progress in Functional Assessment of the Cardiovascular System Using Photoplethysmography

LI Yi¹, LIU Xiaolong^{2,3}, YANG Yang⁴, WANG Sihan¹

(1. School of Physical Education and Health, Guilin University, Guilin 541006, China; 2. School of Life and Environment Sciences; School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541100, China; 3. Rehabilitation College, Guilin Life and Health Career Technical College, Guilin 541010, China; 4. School of Exercise and Health, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: The role of photoplethysmography (PPG) in the functional assessment of the cardiovascular system at home and abroad was summarized to provide theoretical references and lessons for the medical application of PPG and innovative research. Currently, functional assessment indices such as heart rate, heart rhythm, blood pressure, and volume can be analyzed from PPG signals, which can also assist in identifying and diagnosing abnormal blood pressure, diabetes mellitus, cardiac arrhythmia, sleep apnea syndrome, early ischemic shock, and other diseases. However, the accuracy and precision of PPG, data interpretation and standardization, waveform analysis, and clinical applications remain controversial. PPG has been widely used in medical and scientific research to effectively assess the functional status of the cardiovascular system and assist in diagnosing various diseases. In the future, PPG is expected to show a multipath development trend in high-precision, multi-parameter, noncontact, remote monitoring, and medical treatment.

Key words: cardiovascular system function; photoplethysmography (PPG); blood pressure; heart rate; heart rhythm

收稿日期: 2023-08-25; 修回日期: 2023-09-20

基金项目: 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2023KY1989), 广西研究生教育创新计划项目 (YCSW2021109), 桂林生命与健康职业技术学院自然科学研究项目 (2023GKA002)

通信作者: 王思涵, 副教授, E-mail: 137387637@qq.com

心血管系统疾病 (cardiovascular diseases, CVD) 是现代人类首要死因。据统计,截至 2021 年全球约有 6.21 亿人患 CVD,每年因 CVD 死亡的人数超过 2 050 万人^[1]。中国是 CVD 负担最高的国家之一,截至 2022 年全国患 CVD 约 3.3 亿人,因 CVD 死亡的人数占全国总死亡人数的 45%^[2]。CVD 患病率在全球范围内呈现出逐渐上升的趋势。因此,CVD 的预防和控制目前仍是我国乃至世界公共卫生工作的重要内容。其中,心血管系统功能监测对于 CVD 的早期检测和诊断意义重大^[3]。

心血管系统功能检测方法分为侵入式与非侵入式。侵入式测量方法有动脉穿刺置管、血管造影等,该类方法具有精度高、及时性高等优点,适用于严重心肌梗死和心力衰竭、休克、低温麻醉和控制性降压、需要接受复杂大手术等危重患者,但缺点在于对测量设备、技术、安全性要求较高,易造成患者疼痛、感染风险升高^[4]。非侵入式测量方法包括超声心动图、柯氏音血压测量法、生物电阻抗血流动力测定等,此类方法具备无创、操作简单、成本低等优点,适用人群及范围广,短板在于准确性较低,数据处理难度也较高^[5]。

光电容积描记法 (photoplethysmography, PPG) 是一种利用光电效应测量皮下血管区内光吸收及反射变化,监测心脏搏动与血液量变化的非侵入性生物医学测量技术,具有非侵入性、可连续实时监测、低成本、操作简便、可靠性高、可重复性高、检测速度快等优势^[6]。近年来,诸多研究证实 PPG 在心率、血压、血氧饱和度、呼吸频率、血糖、血流动力学、血管内皮功能、肺功能监测及应激反应评估方面的应用效果良好^[7];同时,PPG 在动脉血管疾病无创检查、游离皮瓣与重建肢体血运监测、身份识别等科学研究领域也有较广泛应用^[8]。随着传统 PPG 与计算机信号处理、遥感、材料科学等技术深度融合发展,PPG 信号中蕴藏的各类生理信息采集、解析、存储、评定研究又焕发出全新活力。PPG 对心血管系统功能检测的相关研究繁多,需系统性归纳整理,本文对既往 PPG 基本原理、心血管系统功能评估作用、心血管系统疾病检测诊断应用进展进行分析整合,以期为 PPG 的创新研究及临床治疗提供思路与理论参考。

1 PPG 概述

1863 年法国生理学家 Étienne-Jules Marey 使用“脉搏计”记录脉搏曲线,后来由德国生理学家 Frank-Starling 开创性地提出动脉脉搏、周期性振荡压力波及其从心脏通过动脉传递到器官的基本概念^[9]。Molitor 等^[10]在 20 世纪 30 年代的动物实验中首次提出 PPG 技术,将其一种基于光学检测血流变化的仪器应用于兔耳部静脉阻塞与血管活性药物的研究中,并在后续研究中于人体指部采集到理想的信号。后续研究中,Hertzman 等^[10]采用反射式 PPG 技术从指尖域采集血流信号,并进一步从 PPG 信号中分离出交流分量与直流分量用以检测血管功能,建立了一套较为完整的血流量及变化量检测方法。20 世纪 60 年代光敏电子元件的发展促进了 PPG 技术的进步。21 世纪 PPG 技术在人体生理信号检测与心血管疾病评估中被广泛应用,其在血压测量、动脉硬化程度评估、心脏功能监测、周边神经系统与中枢神经系统生理学病理学研究及应用中展现出巨大潜力。

PPG 利用皮肤表面组织的光学吸收和反射特性,通过在手指、手腕、耳垂等皮肤表面附近照射红光及红外线光,通过光电传感器检测被吸收或反射光信号,进而获取血流量信号,对血容积波动值进行计算,进而观察与记录心血管功能状态(见图 1)。

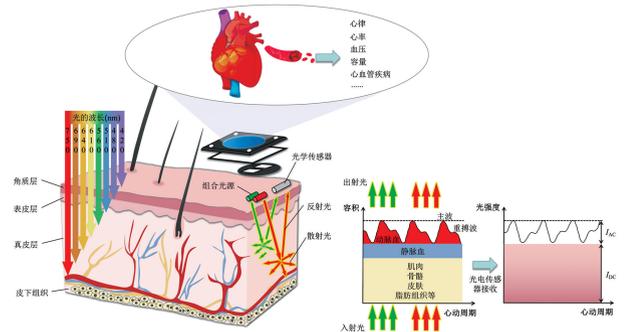


图 1 PPG 心血管系统功能评价作用示意图
Fig. 1 Schematic diagram for the role of PPG in function assessment of the cardiovascular system

2 PPG 与心血管系统功能评价

2.1 PPG 与心率检测

心率 (heart rate, HR) 可以反映人体心脏功能、

血液循环情况、运动量等。PPG 检测 HR 具有安全、简便、可靠性高等优点,但测量准确性易受信号采集部位、身体运动、噪声等因素干扰^[11]。

近年来,有学者提出一种包括字典学习、人体运动识别、频谱峰值跟踪、运动伪影消除的 HR 监测方案,将该方案应用于 6 种不同准周期运动后发现,HR 计算平均绝对误差仅为 2.40 次/min^[12]。尽管该方案对于不同运动引起的运动伪影消除具有较高精度及鲁棒性,并且相对于其他监测方案更稳健,但身体运动、噪声等干扰因素在现实生活中极其复杂,使得腕式 PPG 的采集分析仍充满挑战。对运动伪影去除算法的研究发现,将单陷波滤波器和集合经验模式分解结合,可以分别去除图像中的高频及低频噪声和干扰,从而达到更好的运动伪影去除效果^[13]。该算法具有自适应性和普适性,适用于各种不同的运动伪影图像处理场景。当其应用于可穿戴设备时,可有效去除运动干扰,从而提高数据质量、降低计算复杂程度以节省穿戴设备资源、高效确定干扰信号的频率成分、与小波变换等其他信号处理方法结合以提高数据质量和提取更多信号特征。在基于摄像头的 PPG 技术背景下,使用贝叶斯皮肤分类器检测合适的区域,并采用水平集分割方法根据空间均匀性定义和跟踪目标区域,发现绿光能减少运动伪影和噪声带来的影响,在 95.6% 的情况下可以准确评估 HR^[14]。尽管如此,PPG 在真实工作条件下对于 HR 数据的收集及长期监测能力仍存争议。一项针对 22 名医务人员在工作状态下使用 PPG 和传统心电图 (electrocardiogram, ECG) 信号进行 HR 监测及 HR 变异性的研究发现,两种设备的 HR 测量值间存在较强正相关性,而低频分量与高频分量比及低频分量指数百分比间存在中等相关性,并且两种设备所采集数据间总体平均偏差较小;PPG 仪器在真实工作条件下检测 HR、低频分量与高频分量比、低频分量指数百分比方面整体可靠性良好,精准度较高^[15]。但该研究纳入的受试者来源较单一且数量有限,仍需要进行大规模研究以佐证真实工作条件下 PPG 仪器对 HR 及 HR 变异性检测分析的可行性和实用性。伴随生物医学工程技术不断发展成熟,PPG 的 HR 监测方法将更加多样及标准化。

2.2 PPG 与心律检测

常见的心律失常包括心房颤动、心室颤动、房性心动过速、室性心动过速、窦性心动过速等。通过心律检测可以及早发现心律不齐的症状,有效降低心脏衰竭、心肌梗死、中风等疾病的发病风险^[16]。

一项基于 PPG 检测心律失常的预测模型研究发现,可以从 PPG 信号脉冲峰值间隔以及血氧饱和度信号特征中获取脉搏率变异性,仅通过使用移动设备即可获得客观测量结果,以进一步预测判断儿童是否需要接受住院治疗^[17]。另一项针对 29 名心房颤动患者和 30 名窦性心律患者的研究发现,基于 PPG 腕式监测器所采集到的脉搏波与 ECG 内 RR 间隔持续时间吻合度较高,不规则脉冲峰值算法对心房颤动诊断呈现超出 90% 的敏感性及超出 90% 的特异性^[18]。心房颤动与缺血性中风风险正相关,而可穿戴式 PPG 技术可应用于筛查普通人群无症状房颤,从而有效降低与之相关疾病发病率及死亡率。得益于 PPG 技术的无创长时监测、低成本性、普适性、可穿戴智能设备的普及,早期大规模筛查心房颤动成为可能。一项对 112 例接受 ECG 检查的住院患者进行桡动脉脉搏波信号采集与研究发现,桡动脉脉搏波的采集过程较常规 ECG 检测更为便捷,经改进后的时间同步平均算法能够作为一种全新测量脉率变异性及检测心房颤动的方法,该方法在信号质量较差的情况下具有潜在优势^[19]。目前研究认为,持续性心律失常(如心房颤动)通常可以在静息 ECG 的帮助下被发现。有证据表明,长期重复间歇性短 ECG 记录可显著提高心房颤动检测灵敏度,将之与单个时间节点测量相比,所能诊断出的病例数提高了 3 倍^[20]。然而,要发现间歇性心律失常(如阵发性心房颤动、阵发性心动过缓、心动过速的发作),则往往需要长期 ECG 或其他形式的长期心律监测。一方面,当 PPG 和 ECG 同时进行,血压测量的节律分析对诊断心房颤动有很高的敏感性及准确性,提示多生理参数联合在某些指标检测与疾病诊断方面具有潜在优势^[21]。但 PPG 对心律的检测精度受限于传感器的灵敏度和信号处理的算法、环境温度、身体姿势、受测者情绪状态等因素,故需对采集信号进行校准及修正。另一方面,在如居家等无医务人员监督的环境中会产生更多运动伪影,脉冲波形受到影响后将产生大量误

报,进而增加医疗成本。此外,心律失常、心衰等疾病的患者由于心跳不规则或血管弹性已产生变化,可能会影响光电容积脉搏波测量结果,故此类疾病患者并不适用于PPG心律检测。目前来看,尽管PPG可用于连续及动态实时检测心房颤动,但其检测性能是否可满足临床级要求,仍有赖大量实证研究佐证。

2.3 PPG与血压检测

通过测量脉搏波速度与时间参数,可对血压进行计算^[22]。

研究表明,PPG技术在血压监测方面的准确性和可重复性,与传统的袖套式动脉压力测量方法相当^[23]。PPG信号中的各类特征参数可有效反映机体血压数值,同时又兼具较强的血压异常检测能力与鲁棒性。一项以PPG形态特征及光谱分量为参数的人工神经网络血压算法研究提示,只用PPG信号就能获取较为精准的血压计算效果,其舒张压绝对误差可低至 (2.27 ± 1.82) mmHg,而收缩压绝对误差可低至 (4.02 ± 2.79) mmHg ($1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$)^[24]。Biobeat Tech公司于2019年提出了一种基于脉搏传递时间的血压计算设备,并获得美国食品药品监督管理局认证^[25]。该设备能有效测量机体血压,但在实际使用过程中需频繁进行校准,快速适配性还有待提高。Ramtanu等^[26]研发出一种基于PPG的新型反射式传感器,消除了血压测量过程中产生的运动伪影与压力干扰;还根据人口统计学中人类肤色的变化,同步开发出了一种新算法,以保证血压测量准确可靠。通过对186位受试者进行干预发现,其所研发的传感器与算法对血压的检测准确度高达98%。该血压检测方法在实际测量过程中表现出准确、可靠、低成本、便捷、交互性友好等优点,适用于婴儿、老年人以及有创口、烧伤、重症监护患者等人群。近期公开的一种基于PPG的辅助装置,可对使用左心室辅助装置的患者进行无创血压测量。通过对21名使用左心室辅助装置的成年患者进行测试,并将计算得到的平均动脉压力与基于多普勒测量方法获取的平均动脉压力进行比较发现,该装置能够实现准确、自动、无创血压测量,可适用于使用左心室辅助装置患者家庭的健康监测^[27]。基于PPG的可穿戴式血压检测设备由于适应长期和高舒适度的穿戴要求,在日常血压检

测的发展中取得了长足进步。但当前PPG检测血压的精准度仍受检测部位、运动伪影、压力干扰、皮肤颜色变化等因素影响,故可穿戴式连续血压监测设备的研发及临床应用依然面临巨大挑战。

2.4 PPG与容量检测

针对人体液体总量和分布情况的检测,有助于医护人员评估受测者血容量、循环功能、体液平衡状态等信息,从而指导液体管理和治疗决策^[28]。

Chen等^[29]对血容量及术中失血量的研究发现,PPG在评估早期术中失血量方面优于有创动脉血压测量;而当发生大量术中失血时,有创动脉血压测量模型性能则较好。另一项研究采集了244名自愿献血450 mL受试者在献血过程中PPG、收缩压、心率、心输出量、每搏输出量数据,结果发现,PPG对于检测少量血容量下降比其他传统生理测量方法更加灵敏及准确^[30]。这些发现对于实际创伤环境中的早期医学检测与治疗意义重大,但亟待更多临床试验支持。Keramidas等^[31]对12名健康男性进行自行车运动过程中的容量测试,该研究采用60%最大摄氧量强度持续运动75 min,期间以激光多普勒流量计测量运动者前臂皮肤血流量,以PPG采集左食指指尖皮肤血流量。结果发现,PPG血流量与前臂激光多普勒皮肤血流量之间存在显著相关性,两种测量方法均可对稳态运动时皮肤血管运动张力及机体循环功能进行准确评估。Marcinkevics等^[32]提出了一种双频谱成像PPG检测系统,用于在临床治疗中评估浅表与深层皮肤微循环状态,并采用4种不同评价方法对38名受试者进行测试;结果表明,双频谱PPG系统在功能评估与血液灌注状态检测方面具有很高的潜力,在临床环境中可作为激光多普勒成像仪的经济有效替代方案,用以记录浅表和深层皮肤灌注情况。总体来看,通过PPG监测机体外周血液灌注的相关指标可以判断机体的容量状态及血管反应性,对于运动参与者、临床麻醉、围手术期和重症监护者的循环状态评价、血流动力学监测、早期休克诊断等意义重大。

2.5 PPG与心血管系统疾病辅助诊断

PPG在CVD的诊断中已具有初步应用,但其检测的指标通常被用作辅助诊断和评估的工具,而并不直接用于诊断特定的心血管疾病。当将PPG、ECG、人工智能等技术联合应用时,则可辅助诊断多

种 CVD,并展示出巨大潜力。

Nafis 等^[33]对 45 例受试者指尖 PPG 信号进行研究,结果发现,识别 PPG 信号中波形时长、脉搏波振幅、重搏波切迹等特征可以有效评估透析患者患低血压的风险,其精准度高达 94.5%。透析过程中由于血管扩张、液体移除、体位变换等原因可能导致患者出现低血压症状,当 PPG 技术应用于低血压的监测及管理时,可有效协助治疗团队采取措施,进而提高患者透析治疗效果和安全性。Zhu 等^[34]近期提出了一种基于能量代谢守恒和机器学习的无创血糖浓度检测方法,该方法包含手腕部多传感器集成检测探头与两种机器学习算法,通过对 12 名受试者测试发现,该检测方法预测血糖数值与参考标准值间相关系数高达 0.936。该结果证明基于 PPG 的糖尿病检测方法可行性较高且潜力巨大,未来可进一步将血流速度传感器与血糖探头集成微型化,用以实时监测人体血糖浓度。同时,也应重点关注传感器灵敏度提升、测量结果与实际值间的相关性分析、算法优化等领域。一项针对 129 名缺血性卒中患者及 104 名急性 ST 段抬高型心肌梗死幸存者的研究发现,与基于 ECG 的 HR 变异性相比,基于 PPG 的 HR 变异性准确性同样较高,可以作为一种代替 ECG 评估 HR 变异性的实用方法^[35]。不可否认,PPG 是一种用于检测脉搏率和脉搏波不规则性的既定技术,然而脉搏波振幅的时间变化是否反映了急性血流动力学或对整体血管功能变化的自主反应组合,及其是否携带预后信息仍不清楚。根据 1 957 名不同人种夜间多导睡眠图的研究发现,夜间脉搏波振幅衰减指数与心血管事件的发生风险呈负相关关系,特别是在男性和非裔美国人中^[36]。研究表明,PPG 衍生的夜间脉搏波振幅衰减指数可以快速、便捷、无创地通过可穿戴设备获取,有效提进行心血管发病风险标记。不仅如此,PPG 在识别睡眠呼吸暂停综合征方面也具有优异表现。李肃义等^[37]同步采集 6 227 例受试者 PPG 与 ECG 信号,结果发现,PPG 模型对睡眠呼吸暂停综合征最高识别率与预测率分别为 80.30% 和 80.13%,而 ECG 模型最高识别率与预测率分别为 77.60% 和 77.67%。上述结果说明,PPG 可替代 ECG 识别睡眠呼吸暂停综合征;同时,因 PPG 获取信号难度较小且检测中无需佩戴电极,故能有效规

避因佩戴电极所致睡眠舒适度降低,以及进而引发的诊断率下降。另一项针对 41 万余名智能手表消费者的研究发现,通过 PPG 信号可发现脉搏不规则性或变异性,进而识别心房扑动或心房颤动^[38]。该研究结果为智能手表算法识别脉搏不规则性和变异性提供了初步证据,并显示出基于 PPG 可穿戴式设备识别隐匿性房颤所存在的优势及潜力。随着基于 PPG 可穿戴式设备消费者群体迅速扩大,未来还可将其用于大规模检测未诊断的房颤等领域。

Lee 等^[39]提出基于多波长多通道传感器的 PPG 测量系统与使用独立分量分析的运动伪影减少算法可有效提升 PPG 信号对于运动伪影的鲁棒性。另一项对 235 例受试者进行腕部多通道 PPG 信号参数的比较研究表明,多通道参数测量对 HR 与血压的整体预测效果更优异^[40]。整体来看,多通道 PPG 方案具有更高准度及鲁棒性,并且能提供更准确及全面的生理信息。但在实际应用中也应考虑到其系统复杂、成本较高、信号处理难度大等因素。

3 总结与展望

PPG 是一种非侵入性、便捷、准确、可重复、前景广阔且新颖的生物医学检测技术,近年来逐步从 PPG 信号中分离解析及量化出诸如 HR、心律、血压、容量、血流动力学等多种指标。该技术在反映心血管系统功能状态以及辅助诊断各类疾病等领域具有重要价值。

PPG 虽然已得到广泛应用,但仍存局限性。例如,国际尚无统一测量标准,且各国研究团队的 PPG 检测设备与方法较为多样,致使研究结果可重复性较差。此外,PPG 检测的精准性易受个体差异、外部环境、生理过程等因素影响。一方面,前期大量研究致力于开发更加准确和稳定的传感器,以提高测量的精度和可靠性。另一方面,研究人员也开发了各类新算法与模型,以更好地解析和处理光电容积脉搏波信号,提高数据可用性及精确性,有效消除如运动伪影、环境光干扰、生理噪声等精度干扰因素。伴随人工智能和机器学习等技术的应用,PPG 技术可以更好发掘数据中的潜在信息,但其在疾病监测与诊断研究方面仍需大量随机对照试验的数据支持。在算法方面,尽管脉搏传递时

间、脉搏波传导速度、深度学习等多种算法相继出现并取得了一定的成果,但要达到商业化应用的标准,PPG技术仍需在轻量级模型的特征挖掘与优化、个性化标定技术、远程PPG技术、异构大数据集构建等几个方面进行深入研究。

与单一PPG信号解析相比,多测量通道对于心血管系统指标检测、心血管系统功能状态评估、疾病诊断等方面通常会产生更好效果^[39-40]。未来,PPG技术还可与脑电图、ECG、超声心动图、呼吸监测等技术深度结合,在机体健康监测与个人健康管理、疾病筛查和诊断辅助、远程医疗和远程监护、运动生理监测、生物识别和身份验证等领域为人类提供更加全面和便捷的医疗服务。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:李毅负责资料收集、论文撰写;刘晓龙负责资料整理、论文修改;杨畅负责文献查阅;王思涵负责论文审校。

参考文献:

- [1] LINDSTROM M, DECLEENE N, DORSEY H, *et al.* Global burden of cardiovascular diseases and risks collaboration, 1990–2021 [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2022, 80 (25): 2372-2425.
- [2] 中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2020 概要[J]. *中国循环杂志*, 2021, 36(6): 521-545.
- [3] 孔启航, 周骏腾, 刘小菁. 心血管生物力学与力学生物学 2022 年研究进展[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(3): 420-432.
- [4] KONG QH, ZHOU JT, LIU XJ. Advances in cardiovascular biomechanics and mechanobiology research in 2022 [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(3): 420-432.
- [4] HERNANDEZ G, MESSINA A, KATTAN E. Invasive arterial pressure monitoring: much more than mean arterial pressure! [J]. *Intensive Care Med*, 2022, 48(10): 1495-1497.
- [5] 肖汉光, 刘畅, 黄金锋, 等. 无创中心动脉压测量的现状与展望[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(6): 995-1001.
- [5] XIAO HG, LIU C, HUANG JF, *et al.* Current status and prospects of non-invasive central arterial pressure measurement [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(6): 995-1001.
- [6] YANG TY, HUANG L, MALWADE S, *et al.* Diagnostic accuracy of ambulatory devices in detecting atrial fibrillation: Systematic review and meta-analysis [J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2021, 9(4): e26167.
- [7] ALIAN AA, SHELLEY KH. Photoplethysmography [J]. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol*, 2014, 28(4): 395-406.
- [8] ZAUNSEDER S, TRUMPP A, WEDEKIND D, *et al.* Cardiovascular assessment by imaging photoplethysmography—A review[J]. *Biomed Tech*, 2018, 63(5): 617-634.
- [9] MIDDEKE M. The pioneer in hemodynamics and pulse-wave analysis, Otto Frank [J]. *J Am Soc Hypertens*, 2016, 10(4): 290-296.
- [10] ALLEN J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement [J]. *Physiol Meas*, 2007, 28(3): 1-39.
- [11] SARHADDI F, KAZEMI K, AZIMI I, *et al.* A comprehensive accuracy assessment of Samsung smartwatch heart rate and heart rate variability [J]. *PLoS One*, 2022, 17 (12): e0268361.
- [12] HE W, YE Y, LU L, *et al.* Robust heart rate monitoring for quasi-periodic motions by wrist-type PPG signals [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2020, 24(3): 636-648.
- [13] SONG J, LI D, MA X, *et al.* A Robust dynamic heart-rate detection algorithm framework during intense physical activities using photoplethysmographic signals [J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 1-17.
- [14] TRUMPP A, LOHR J, WEDEKIND D, *et al.* Camera-based photoplethysmography in an intraoperative setting [J]. *Biomed Eng Online*, 2018, 17(1): 1-19.
- [15] LI X, HU C, MENG A, *et al.* Heart rate variability and heart rate monitoring of nurses using PPG and ECG signals during working condition: A pilot study [J]. *Health Sci Rep*, 2022, 5(1): e477.
- [16] 苏锦锋, 杨凡, 邓莉. 昼夜节律与心律失常的研究进展[J]. *中国医学科学院学报*, 2022, 44(5): 919-922.
- [17] GARDE A, GUOHAI Z, RAIHANA S, *et al.* Respiratory rate and pulse oximetry derived information as predictors of hospital admission in young children in Bangladesh: A prospective observational study [J]. *BMJ Open*, 2016, 17 (8): 1-10.
- [18] KABUTOYA T, TAKAHASHI S, WATANABE T, *et al.* Diagnostic accuracy of an algorithm for detecting atrial fibrillation in a wrist-type pulse wave monitor [J]. *J Clin Hypertens*, 2019, 21(9): 1393-1398.
- [19] DING X, WANG Y, HAO Y, *et al.* A new measure of pulse rate variability and detection of atrial fibrillation based on improved time synchronous averaging [J/OL]. *Comput Math Methods Med*, 2021, doi: 10.1155/2021/5597559.
- [20] RAJA JM, ELSAKR C, ROMAN S, *et al.* Apple watch, wearables, and heart rhythm: Where do we stand? [J].

- Ann Transl Med, 2019, 7(17): 417-423.
- [21] CHAN PH, WONG CK, PUN L, *et al.* Diagnostic performance of an automatic blood pressure measurement device, Microlife WatchBP Home A, for atrial fibrillation screening in a real-world primary care setting [J]. *BMJ Open*, 2017, 15(6): e013685.
- [22] ELGENDI M, FLETCHER R, LIANG Y, *et al.* The use of photoplethysmography for assessing hypertension [J]. *NPJ Digit Med*, 2019, 26(2): 60.
- [23] 彭莉, 宋鑫, 鄢苏鹏, 等. 基于 PPG 收缩期上升波形特征参数的无创血压检测模型[J]. *中国医学物理学杂志*, 2022, 39(3): 333-340.
- [24] MARTINEZ G, HOWARD N, ABBOTT D, *et al.* Can photoplethysmography replace arterial blood pressure in the assessment of blood pressure? [J]. *J Clin Med*, 2018, 7(10): 316-329.
- [25] 麻琛彬, 张鹏, 宋凡, 等. 基于光电容积脉搏波的无袖带血压测量技术研究进展[J]. *北京生物医学工程*, 2023, 42(2): 194-203.
- [26] MUKHERJEE R, GHOSH S, GUPTA B, *et al.* A universal noninvasive continuous blood pressure measurement system for remote healthcare monitoring [J]. *Telemed J E Health*, 2018, 24(10): 803-810.
- [27] NAGY P, SAX B, KOZAK A, *et al.* Automatic non-invasive blood pressure measurement in left ventricular assist device patients with a photoplethysmography assisted device [J]. *Int J Artif Organs*, 2023, 46(5): 274-279.
- [28] 李颯家, 袁芳, 刘虹. 血液透析患者容量评估新进展[J]. *中南大学学报(医学版)*, 2021, 46(7): 759-766.
- [29] CHEN Y, HONG C, PINSKY MR, *et al.* Estimating surgical blood loss volume using continuously monitored vital signs[J]. *Sensors*, 2020, 20(22): 6558-6572.
- [30] STEWART CL, MULLIGAN J, GRUDIC GZ, *et al.* Detection of low-volume blood loss: Compensatory reserve versus traditional vital signs [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2014, 77(6): 892-898.
- [31] KERAMIDAS ME, GELADAS ND, MEKJAVIC IB, *et al.* Forearm-finger skin temperature gradient as an index of cutaneous perfusion during steady-state exercise [J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2013, 33(5): 400-404.
- [32] MARCINKEVICS Z, RUBINS U, ZAHARANS J, *et al.* Imaging photoplethysmography for clinical assessment of cutaneous microcirculation at two different depths [J]. *J Biomed Opt*, 2016, 21(3): 35005-35018.
- [33] NAFISI VR, SHAHABI M. Intradialytic hypotension related episodes identification based on the most effective features of photoplethysmography signal [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2018(157): 1-9.
- [34] ZHU J, ZHOU Y, HUANG J, *et al.* Noninvasive blood glucose concentration measurement based on conservation of energy metabolism and machine learning [J]. *Sensors*, 2021, 21(21): 6989-7000.
- [35] THEURL F, SCHREINLECHNER M, SAPPLER N, *et al.* Smartwatch-derived heart rate variability: A head-to-head comparison with the gold standard in cardiovascular disease [J]. *Eur Heart J Digit Health*, 2023, 4(3): 155-164.
- [36] SHAHRBABAHI SS, LINZ D, BAUMERT M. Nocturnal pulse wave amplitude attenuations are associated with long-term cardiovascular events [J]. *Int J Cardiol*, 2023, 15(385): 55-61.
- [37] 李肃义, 姜珊, 刘丽佳, 等. 光电容积脉搏波的睡眠呼吸暂停综合征筛查方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(6): 1852-1857.
- [38] TURAKHIA MP, DESAI M, HEDLIN H, *et al.* Rationale and design of a large-scale, app-based study to identify cardiac arrhythmias using a smartwatch: The Apple heart study [J]. *Am Heart J*, 2019, 207(5): 66-75.
- [39] LEE J, KIM M, PARK H, *et al.* Motion artifact reduction in wearable photoplethysmography based on multi-channel sensors with multiple wavelengths [J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1493-1507.
- [40] 王欣榕. 基于寸关尺三通道脉诊信息预测血压及虚实证的人工智能方法学初探[D]. 北京: 北京中医药大学, 2021.