

血压检测技术及其应用的研究进展

刘 丹

湖北省京山市温泉社区卫生服务中心, 湖北 京山

收稿日期: 2024年10月1日; 录用日期: 2024年10月26日; 发布日期: 2024年11月1日

摘 要

测量血压有助于诊断、评估患者的病情, 还可以用于评估临床治疗和康复效果。血压的高低可以反映患者的心脏和肺部等健康情况。高血压和低血压都可能带来严重的健康问题。其中, 高血压被认为是全球范围内心血管疾病的主要危险因素, 长期的高血压会对血管壁造成损伤, 定期监测血压对于人体健康至关重要。针对近年来文献报道的各种血压监测方法及应用开展了文献综述分析比较, 引用文献37篇。

关键词

高血压, 血压检测, 血流量, 脉搏波, 超声波

Research Advances of Blood Pressure Detection Technology and Its Application

Dan Liu

Jingshan Wenquan Community Health Service Center of Hubei Province, Jingshan Hubei

Received: Oct. 1st, 2024; accepted: Oct. 26th, 2024; published: Nov. 1st, 2024

Abstract

Measuring blood pressure can help diagnose and evaluate a patient's condition, and can also be used to evaluate clinical treatment and rehabilitation effects. High or low blood pressure can reflect the health of the patient's heart and lungs. Both high and low blood pressure can cause serious health problems. Among them, high blood pressure is considered to be a major risk factor for inner vascular diseases worldwide, long-term high blood pressure will cause damage to the blood vessel wall, and regular monitoring of blood pressure is essential for human health. Various blood pressure monitoring methods and applications reported in recent years were reviewed and compared by citing 37 articles.

Keywords

High Blood Pressure, Blood Pressure Detection, Blood Flow, Pulse Wave, Ultrasonic Wave

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

血压是指血液在血管中流动时对血管壁造成的压力值，当血压值偏离于正常范围时通常意味着疾病的产生。血压异常在临床主要分为高血压和低血压，尤其以高血压最为常见，其一般与遗传因素、年龄及生活习惯有关。监测病患的血压值可以为临床诊断提供数据参考，包括诊断病情、治疗和康复检查。本文主要从血压检测的技术方式和血压检测提供的数据在临床诊断中的应用展开综述。

2. 常见的血压检测方式

血压检测早期是纯手动测量，经过长期的发展可以借助仪器设备方便获取，总的来说，有以下测量方式：手动测量、电子血压计测量、动态血压监测、直接测压法、间接测量法[1]。

3. 血压检测方式及应用

血压异常会严重危害人们的身体健康，维持正常血压对于人体健康是必要的，同时血压检测对于人体健康和临床诊断意义重大。因此，开发新型血压检测方法及设备具有重要的意义，国内外研究者开展了一系列科学实验研究和临床试验研究，以下是具体的研究进展及案例。

吴绍武[1]分析了脉搏波信号、心电图和血压之间的关系，提出了 Xgboost 集成模型和卷积神经网络两种血压预测方法，经实验验证发现这两种方法都能准确有效地预测人体的血压数据，特别是 Xgboost 集成模型在预测收缩压时具有很高的精度。

Kario [2]等研究可穿戴式血压监测仪可以在对患者施加最小压力的情况下频繁测量血压(理想情况是连续监测每搏血压)。可穿戴设备通过增加不同情况下的测量数量，有望显著改变高血压的检测和管理质量，使其能够准确检测对心血管预后产生的不良影响等。高血压的这种新的数字化方法有助于预测在医学方面的一系列风险，并且能够主动采取措施干预并降低风险。

Hailan Zhu [3]等旨在探讨在家中自行测量血压对中国健康体检人群主要健康结局的影响。他们通过对参与者进行 5 年随访，以检查复合心脑血管主要不良事件的发生率和相关危险因素等，得出结论：本研究将有助于确定在血压控制中实施远程医疗技术的最佳方式，从而更好地预防和治疗高血压。研究结果将为中国人群血压异常表型的筛查、风险分层和干预策略的构建提供数据。

Islam [4]等旨在系统地分析可穿戴式无袖扣血压测量装置的有效性、特点和临床应用，目前有几种使用不同技术的无套管式血压测量设备，提供了连续血压监测的潜力。常见技术方法为：动脉张力法、光电容积脉搏波法、心电图动脉血压法等等。

张洪涛[5]等设计了基于 ARM 嵌入式系统的血压检测系统，该系统采用微控制器 LPC2131 为主进行设计可以实现对血压及脉搏率的准确测量，同时能够实现对测量数据进行存储及显示以及与 PC 机之间进行通信。

张朝福[6]为了实现血压检测便携性和实用性，采用了高性能的 STM32F407 芯片，实现了对血压检

测过程的自动控制与调节。在血压数据采集后,可以实现自动显示以及储存,同时还实时操作系统植入进去,很大程度上提高了系统的稳定性和精度,同时也为软件的再次开发和提升提供了便利。

吕晨阳[7]研究并提出了基于心电脉搏法和单路加速脉搏波法两种血压算法,同时根据提取的脉搏波特征参数,使用神经网络完成了血压的分段估算,采用实验对两种血压检测算法进行了评价,结果证明该检测方案可行。

鲁宏胜[8]仔细研究了前人的无创连续血压测量方法,在前人的研究基础上发展并提出了一种新的血压测量及算法,其原理是基于脉搏波传导时间和脉搏波多特征参数而做出创新改进,同时考虑心电信号和脉搏波信号。该测量方法经实验验证表明:测量精度很高,具有应用推广潜力。

孙毅[9]基于超声波探测血压的原理设计了柔性传感器,该器件近似于一小片薄膜,可以贴附在人体皮肤表面实现无创连续监测血压。具体而言,先采用飞秒激光和磁控溅射等先进制造技术制备柔性电极,再叠加多层电极获得柔性血压探测传感器。经过实验数据验证,该柔性传感器测量的血压数据同时兼具准确性和可靠性。

吴楚宜[10]等以云服务端为核心、手环为载体、心率血压检测模块为采集端、GPRS与蓝牙模块为传输端,构建一个融合互联网技术于人体血压监测领域的系统,结果表明系统具有一定的实用价值,适用于广大有血压监测需求的人群,便于用户及时获知健康信息,以及医者与研究者的医疗工作。

范保存[11]基于人体脉搏波信号精心设计了传感器,并对测量采集的信号进行仿真拟合处理,获得了最优算法。使用该传感器和算法测试了大量实验数据,结果表明,可以实时准确监测人体的脉搏波和血压,可靠性很高。

李睿森[12]深入分析了血压测量与脉搏波之间的关联机制,准确把握住了脉搏波的内在特征参数,从而提出了基于神经网络算法的无创连续血压检测方法,并由此开发了穿戴式血压检测系统,最后证明了基于注意力的神经网络无创连续血压检测算法真实可行。

樊艳梦[13]发现脉搏波信号易受干扰导致测量误差较大,针对性地发展了改进分析方法,新方法能够去除杂质信号的干扰准确抓取关键特征信号从而提高测量精度,最终建立血压测量方法。实验研究结果表明,该方法可以通过提取光电容积脉搏波中与血压相关的关键信息从而实现无袖带血压测量方法。

郜政[14]基于传统的血压测量方案往往存在操作复杂、便携性差等问题,不利于血压的连续实时测量,研究光电容积脉搏波信号利用光信号获得外周组织的血流信息,能够准确反映脉搏波的变化,通过这种方式采集脉搏波信号具有操作简便、成本低廉且性能稳定的特点,适合用于实时无创的连续血压测量。

王芬婷[15]采用非接触非侵入连续照相监测皮肤表面技术获取大量脉搏波信号实验数据,并根据特殊算法结合自建模型得到心率值和血压值,得到可靠血压监测方法。采用该方法测量人体血压数值,稳定好,可靠性高,与医用的欧姆龙电子血压计一致。

庞宇[16]分析了示波血压检测方法难以小型化的原因,改进了脉搏波信号的处理方法,基于微型压力传感器采集脉搏波信号,通过数字滤波新方法准确提取脉搏波的关键信号建立了测量模型。通过实验得出结论,该测量方法准确性很高,测量值兼具稳定性和重现性等优点。

王倩[17]等通过大量研究发现,早发现、早干预动脉病变等可以降低心血管事件,所以她们在无创血压测量技术和设备的进步的基础上,实现了示波法四肢血压与臂踝脉搏波传导速度测量实时同步,可提供压力传导动脉的结构及功能等信息,且因其具有操作简单、节省时间等优势,逐步成为心血管临床的常用仪器之一。本文对示波法同步四肢血压测量指标及其对动脉硬化、狭窄和心脑血管事件的预测价值进行总结,以期对识别外周动脉疾病和具有心血管危险因素人群提供参考依据。

张畅[18]为了减少手动筛选脉搏波信号引起的误差,提出一种新算法抑制信号的背景噪声干扰并提取关键信号,借助遗传算法和神经网络算法建立血压测量方法。实验结果表明,该测量方法具有足够高

的精度,可以满足医学测量的要求,具有工程应用前景。

胡军锋[19]采用神经网络模型仔细分析了心电图或脉搏波的信号处理,提出了信号降噪筛选新方法,从而提高了该类方法的检测精度。研究表明,模态分解技术与心电图信号结合后,血压检测数值的稳定性和准确性都同时提高了。

彭莉[20]等旨在提出一种基于光电容积脉搏波特征提取的血压计算模型,研究表明,基于该脉搏波收缩上升波形特征参数的无创血压检测模型具有较好的鲁棒性和较强的异常血压检测能力。

孙云华[21]研究影响电子血压计应用效果的主要因素以及电子血压计临床应用策略。电子血压计是将电气元件、电子技术和常规血压测量技术进行融合后出现的产物,是目前临床医学中应用比较广泛的医疗设备。电子血压计属于间接检测类型,具有操作简便、携带方便、可重复性突出、检测结果准确性高等突出优势,尤其适合应用在需要长期、频繁进行血压检测的医疗岗位,对于家庭血压监测也有比较高的应用价值。文章对血压测量以及电子血压计测量原理进行简要分析,探究影响电子血压计应用效果的主要因素以及电子血压计临床应用策略。

何鸿[22]研究与设计一款基于示波法的可穿戴血压检测装置,该装置能够自动对人体的血压、脉率进行检测,同时通过无线通信将数据传输到电脑上位机显示并储存,并且能够对异常参数报警提醒,方便医护人员观察结果。通过研究得出结论:实验装置的续航时间、数据上传成功率以及体征参数测量精度均满足预期设计指标和相关医疗标准。

张晓奇[23]提出一种非接触式新型血压测量方法,该方法是在视频运动放大技术的基础上提出的。实验通过摄像机运用视频运动放大技术放大提取受试者的脉搏波信号,通过计算获得心率和双路脉搏波的传导时间。通过大量实验数据得出结论,该方法用于测量人体血压,具有数据准确、可靠、重复性好等优点。

储芳芳[24]研究设计了一种网络化无创血压检测设备,可以对血压的变化进行早发现和干预,从而降低患病风险。该设备主要通过采集人体臀部皮肤表面的光电容积脉搏波和心电信号,再建立预测模型,结合优化算法,可以实现快速、准确、可靠的无创血压检测。

彭莉[25]通过建立基于光电容积脉搏波特征参数的血压检测模型,比较反射式前额脉搏波和透射式手指脉搏波的无创血压检测性能。通过采集成年受试者前额和手指的脉搏波信号,以及参考血压值,并将数据随机分为两组,然后提取预处理后脉搏波信号的20个时域参数并进行筛选,经实验验证得出结论:前额和手指这两个地方采集的脉搏波信号对血压检测的精度无影响,都可用于无创血压的连续监测。

周慧婕[26]为了降低人体特征差异对血压预测模型的影响,进一步提高血压预测的准确度,提出了一种基于脉搏波传递时间改进的无创血压检测方法。通过与SVM、RF和传统水银计测量方法对比发现,POS-ELM方法求得的舒张压(DBP)与收缩压(SBP)平均绝对误差(MAE)均满足美国医疗仪器促进协会(AAMI)制定的 ± 5 mmHg的标准,与水银计测血压方法具有更好的一致性,并且在 ± 5 mmHg误差范围的命中率均高于SVM与RF方法的命中率。

陆一乾[27]针对近年来无创连续血压检测的准确性问题开展了系列研究。其研究发现皮肤表层的血管外周阻力及脉搏波传递时间计算方法对于提高血压检测准确性的重要意义。在其研究中引入了多波长光电容积脉搏波信号检测技术,并提出了一种更优的脉搏波信号算法。通过大量实验可知,该方法可以快速、准确实现无创血压检测。

朱雅芳[28]研究发现预防和控制高血压对于降低心血管类疾病的风险至关重要。因目前市面上用于血压测量的设备是不仅会给被测者带来不适感也不方便的借助于袖带充放气的测量方法,所以提出一套更舒适且便携的解决方法,即利用单路光电容积脉搏波信号测量血压,具体方案包括信号筛选,模型搭建,结果分析,个体化校准这几个大模块。

郭子玉[29]着重对脉搏波波形与血压的关系进行研究,建立起两种对血压预测的方法,第一种是以脉搏波形态学特征入手结合常用机器学习回归算法对血压进行预测,第二种是对划分周期后的脉搏波周期数据结合深度学习算法(TCN-LSTM 回归模型)进行研究。经测试证明,TCN-LSTM 回归模型对本文所使用数据的预测较提取特征进行机器学习模型更优,模型的稳定性也更强。

王焕泽[30]采用光刻蚀刻和转印工艺等技术手段构建了柔性超声传感器,以便通过超声方法准确采集人体动脉的脉冲信号,并通过先进的仿真建模算法处理脉冲信号,最终建立柔性超声血压测量方法。实验验证表明,该测量方法较前人的研究方法大大提高了信噪比,具有很高的测量准确性,值得推广。

胡旭东[31]利用光电容积脉搏波信号对高血压检测诊断进行了研究,分析了国内外取得的成果及优缺点,通过改进信号处理方法,借助机器学习和深度学习算法构建了血压测量模型。经实验得出结论,机器学习和深度学习算法在预测人体收缩压和舒张压的时候,其平均绝对误差标准为 3.80 ± 5.02 mmHg 和 1.65 ± 2.70 mmHg,满足临床测量的精度要求。因此该方法可用于准确测量血压,预期具有广阔的应用前景。

王军昂[32]针对原始脉搏波信号具有高噪声等缺点,采用小波变换方法对该信号进行降噪处理并重构动脉血压信号从而进行图像化输出显示,借助深度神经网络算法建立了血压测量方法。借助实验数据验证,结果表明:该测量方法具有准确性高、稳定性好等优点,具有一定的临床推广价值。

陈勤达[33]通过智能坐便垫实时采集人体的光电容积脉搏波信号和心电信号,设计了一种智能血压监测系统。提取生理信号的重要特征参数,并结合人体特征参数作为输入,构建基于机器学习算法的无创血压预测模型,实现对血压的高精度测量。通过实验得出结论,智能血压监测系统检测出 6 名测试者的收缩压和舒张压的 MAE 均满足 AAMI 标准,说明该设计的智能血压监测系统可满足实际应用需求。

朱涛[34]为研究居家环境下的非穿戴式无创血压测量方法,在双通道 BCG 信号与 PTT 的强相关性的基础上提出一个深度学习模型。首先,利用融合卷积神经网络模型等进行血压预测,实验结果表明,该模型的血压预测估计误差满足标准要求;其次,提出基于 Concat-CNN 血压测量模型和迁移学习的模型参数迁移策略,来解决模型精度下降问题,通过实验得出结论,该策略可提升原模型在实际应用中的易扩展性和适用性;最后,针对居家环境下持续血压测量应用缺乏的问题,本文开发了一个健康监测系统,研究表明该系统可以周期性监测用户的心率、呼吸、血压和睡眠质量,具有良好的推广价值和前景。

闫昊[35]等认为方便准确的血压测量方法将有助于高血压的防控,提出了一种基于面部视频信号的连续血压测量方法。通过实验得出结论:基于面部视频的血压测量结果与标准血压值较为一致,所以该血压检测方法可以用于血压的测量。

肖淑绵[36]为降低临床患者创伤,提高对高血压等心血管疾病患者实现慢病数字诊疗装备的推广普及,提出了将形态学分析方法、容积补偿法及机器学习算法结合,提取与血压变化强相关的 PPG 形态学特征信息,以实现连续无创的血压变异辨识和监测。实验结果表明了本研究提出的血压监测技术能够实现无创、准确、连续的血压检测及血压异动辨识,为治疗过程实时提供临床中的血压变化,以便治疗。

叶青[37]等通过文献综述发现在临床诊断过程中,血压能够反映患者血液流动、身体体征变化等生理信息,是诊断组织器官健康状态的重要参考数据。但由于传统血压测量方法存在有创、间断等局限性,利用光电容积脉搏波描记法实现血压的无创连续检测成为当前血压测量的热门研究领域。该论文针对 PPG 进行血压预测的公开数据集、评估标准、预处理方法、特征提取、模型建立的流程进行了分析比较,并就不同方法的优缺点进行了对比分析。

4. 总结

测量血压是临床监测病患生命体征的重要手段,有助于诊断、评估患者的病情。血压的高低可以反

映心脏功能、血流量、血容量以及血管的弹性和舒缩功能是否正常协调。血压异常升高(高血压)或降低(低血压)都可能指示着潜在的健康问题,如心脏病、脑卒中等。高血压被认为是全球范围内心血管疾病的主要危险因素,长期的高血压会对血管壁造成损伤,甚至带来严重危害。因此,定期监测血压对于人体健康至关重要。此外,血压测量还可以用于评估临床治疗和康复效果。针对近年来文献报道的手动测量、电子血压计测量、动态血压监测等方法开展了分析比较。可以预见的是,随着现代血压检测技术的提高,新型无创、非侵入式、柔性可穿戴血压监测微型设备将获得越来越广泛的应用,将提供实时、快捷、可靠的血压监测数据。

参考文献

- [1] 吴绍武. 基于深度学习的血压检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- [2] Kario, K., Saito, I., Kushiro, T., *et al.* (2014) Home Blood Pressure and Cardiovascular Outcomes in Patients during Antihypertensive Therapy: Primary Results of HONEST, a Large-Scale Prospective, Real-World Observational Study. *Hypertension: An Official Journal of the American Heart Association*, **64**, 989-996. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.114.04262>
- [3] Zhu, H.L., Liang, X.Y., Pan, X.F., *et al.* (2020) A Prospective Cohort Study of Home Blood Pressure Monitoring Based on an Intelligent Cloud Platform (the HBPM-iCloud Study): Rationale and Design. *Therapeutic Advances in Chronic Disease*, **11**, 182-241. <https://doi.org/10.1177/2040622320933108>
- [4] Shariful, I.S.M., Chow, C.K., Reza, D., *et al.* (2022) Wearable Cuffless Blood Pressure Monitoring Devices: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Heart Journal—Digital Health*, **3**, 323-337. <https://doi.org/10.1093/ehjdh/ztac021>
- [5] 张洪涛, 黄杰, 王琰. 一种基于 ARM 嵌入式系统的血压检测系统的设计[J]. 湖北工业大学学报, 2010, 25(2): 70-72.
- [6] 张朝福. 基于 ARM 嵌入式系统的便携式血压检测仪设计[J]. 无线互联科技, 2018, 15(23): 130-132.
- [7] 吕晨阳. 基于指端光电容积脉搏波的血压检测算法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [8] 鲁宏胜. 基于脉搏波的无创连续血压检测系统研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南工业大学, 2020.
- [9] 孙毅. 柔性超声波微传感器研制及其对人体动脉血压检测[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [10] 吴楚宜, 陈悦, 鞠泽亮, 等. 基于云服务的人体血压特征监控系统设计[J]. 自动化应用, 2020(7): 83-86.
- [11] 范保存. 基于 FBG 的人体脉搏波血压检测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽工业大学, 2021.
- [12] 李睿森. 基于 LSTM 网络的无创连续血压检测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北工业大学, 2021.
- [13] 樊艳梦. 基于 PPG 信号的无袖带血压检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [14] 郜政. 基于 PPG 的无创连续血压测量技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [15] 王芬婷. 结构优化 BP 神经网络的非接触血压检测[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [16] 庞宇, 何鸿, 蒋伟. 可穿戴血压检测系统算法研究与设计[J]. 中国测试, 2022, 48(6): 99-105.
- [17] 王倩, 邹玉宝. 示波法同步四肢血压检测的临床应用现状[J]. 中国分子心脏病学杂志, 2021, 21(6): 4375-4379.
- [18] 张畅, 陈辉, 郑秀娟. 基于优化脉搏波特征的无袖带血压检测方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(24): 1-7.
- [19] 胡军锋, 郑彬. 基于深度学习的 ECG/PPG 血压测量方法[J]. 生物医学工程研究, 2022, 41(1): 46-54.
- [20] 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.
- [21] 孙云华. 电子血压计的应用研究进展[J]. 中国医疗器械信息, 2022, 28(7): 58-60.
- [22] 何鸿. 基于示波法的血压检测算法研究及可穿戴血压检测装置设计[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022.
- [23] 张晓奇. 基于视频运动放大技术的非接触式血压检测研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2022.
- [24] 储芳芳. 基于 PPG 信号和 ECG 信号的无创血压智能检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [25] 彭莉, 宋鑫, 鄢苏鹏, 等. 基于前额和手指 PPG 特征参数的无创血压检测性能比较[J]. 中国医疗设备, 2022,

37(12): 24-29.

- [26] 周慧婕, 陈小惠, 于舒洋, 等. 基于 PSO-ELM 的无创血压检测方法[J]. 计算机技术与发展, 2022, 32(12): 63-68.
- [27] 陆一乾. 基于多波长光电容积脉搏波的无创连续血压检测技术[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 中国科学院大学(中国科学院深圳先进技术研究院), 2022.
- [28] 朱雅芳. 基于 PPG 的无袖带式血压检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- [29] 郭子玉. 基于脉搏波特征的连续血压的预测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2023.
- [30] 王焕泽. 基于柔性压电阵列的可穿戴血压检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.
- [31] 胡旭东. 基于光电容积脉搏波的血压预测模型研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.
- [32] 王军昂. 基于深度神经网络的连续无创血压测量方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [33] 陈勤达. 无创血压智能监测技术的方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- [34] 朱涛. 基于 BCG 信号和迁移学习的血压检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江师范大学, 2023.
- [35] 闫昊, 李霞, 朱田杨, 等. 基于视频流的非接触式连续血压检测算法研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2023, 40(2): 249-256.
- [36] 肖淑绵. 基于容积补偿法的连续无创血压监测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2023.
- [37] 叶青, 章祎枫, 沙金亮, 等. 基于光电容积脉搏波的无创血压连续测量研究进展[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 1756-1774.