

可穿戴心电设备在心血管患者中的应用进展

杨健, 杨帆, 孙奥

潍坊市益都中心医院 (山东潍坊 262500)

〔摘要〕 心血管疾病严重威胁人类的健康, 早期对患者进行准确诊断有助于及时干预, 并改善预后、降低病死率。心电图 (ECG) 监测可记录患者心脏电活动, 反映心脏的生理与病理状态。然而, ECG 的检测受场景、时间限制, 难以满足动态监测心脏电活动的需求。可穿戴心电设备体积小、重量轻、可实时连续监测, 可为患者提供全方位的日常心电数据, 但目前该设备种类繁多, 且均存在一定局限性。因此, 该研究综述可穿戴心电设备的工作原理、设备种类、应用领域等, 并分析目前面临的技术挑战, 旨在为技术突破及临床应用提供参考。

〔关键词〕 心血管疾病; 可穿戴心电设备; 人工智能

〔中图分类号〕 R730.8 **〔文献标识码〕** A **〔文章编号〕** 1002-2376 (2025) 16-0161-04

〔DOI〕 10.3969/j.issn.1002-2376.2025.16.050

心血管疾病是中老年人常见的疾病, 包括冠心病、心力衰竭等^[1]。近年来, 受全球老龄化、人们生活方式转变等多种因素影响, 心血管疾病的患病率呈逐年上升趋势^[2-3]。心血管疾病早期症状易被忽视, 具有隐匿性及非特异性。常规监测灵敏度不足, 主要基于患者的回忆或就医时进行心电图 (electrocardiogram, ECG) 检查, 但患者的回忆易受其主观感受影响, 而就医时 ECG 检查为单次检查, 无法捕捉日常瞬时心电活动, 测得的心电数据不够精准^[4-5]。因此, 需对患者进行持续、准确的心电监测, 以捕捉心电图及心率的动态变化, 为疾病的早期干预与治疗提供依据。近年来, 随着科学技术的不断发展, 可穿戴心电设备通过轻量化、智能化及多模态融合技术等革新, 已发展为心血管疾病预防、诊断及管理的重要工具^[6-7]。可穿戴心电设备还可实时采集、传输及分析心电信号, 将心脏健康管理延伸至家庭场景。虽然可穿戴心电设备种类较多、应用范围较广, 但部分产品存在监测精度受限、隐私与安全风险等局限性^[7-8]。基于此, 本研究旨在综述可穿戴心电设备的工作原理及种类, 总结其应用领域、最新技术, 以及其面临的技术挑战, 为可穿戴心电设备的技术突破及临床应用提供参考。

1 可穿戴心电设备工作原理

可穿戴心电设备通常基于电信号监测技术 (心电描记法) 或光学监测技术 (光电容积脉搏波描记法) 监测心脏电生理活动。(1) 电信号监测技术。心脏搏动时, 心肌会依次除极与复极并释放电信号

传导至体表, 可穿戴心电设备的电极可检测体表的电信号变化。由于体表的电信号较微弱且易受外界环境干扰, 设备会将电信号进行放大、滤波处理, 并去除噪声及干扰信号, 从而提高信号的质量及稳定性^[8]。经处理后的信号通过模数转换器转换为数字信号, 之后经数字信号处理算法完成特征提取与波形分析 (识别 P 波、QRS 波群等关键波形), 并精准计算心率等参数, 最终依据预设算法及阈值判断是否存在心律失常风险。处理后的心电数据可通过无线通信模块传输至云端服务器及移动终端, 以便供医师或用户查看和分析, 为心血管疾病监测提供精准数据支持^[9]。(2) 光学监测技术。血液中的血红蛋白具有特殊的血红素卟啉环结构。当绿光照射时, 卟啉环中的二价铁离子可吸收特定能量的光子并引发价电子跃迁, 因此卟啉环结构在 530 nm 绿光波段具有特异性吸收峰。血液吸收绿光后, 反射的光强度随脉搏波动而变化, 可穿戴心电设备通过绿光照射皮肤监测血液容积变化并间接推算心率^[10]。但因为依赖绿光照射, 所以无法直接获取 ECG 波形信息, 且其监测的准确性受皮肤颜色、体毛、运动等因素的干扰。由于心电描记法和光电容积脉搏波描记法各有不足, 因此新的可穿戴心电设备开始采用两种算法的混合方案。

2 可穿戴心电设备的种类

(1) 贴片式。该类可穿戴设备采用贴片式设计 (与创可贴相似), 采用电信号监测技术, 通过两个电极采集心电信号并集成信号调理电路, 具有无创贴附、续航时间长等优势, 适用于 72~120 h 动态心电监测, 但受限于导联数量 (专业医疗设备需 5~12 个导联, 而贴片式简化至 1~3 个), 仅能

收稿日期: 2025-05-21

捕捉基础的心律失常信息^[11]。(2)可穿戴织物胸带。可穿戴织物胸带监测系统主要由两个子系统构成：一是可穿戴数据采集硬件，主要为用于采集生物医学参数的传感器；二是互联网远程监控站，主要用于远程医疗监测与指导。可穿戴织物胸带通常佩戴于胸骨水平，数据采集硬件固定于织物带上，可实时监测 ECG、体温、呼吸频率等生理参数^[12]。

(3) 医疗级多导联式。医疗级多导联式可穿戴心电设备通常采用 7 导联及以上配置，能够全面监测患者心脏电活动的动态变化，其数据精度接近标准 12 导联系统^[11]。但此类设备需通过国家医疗器械相关认证，主要适用于医院及居家联合监护等专业场景。(4) 智能手环类。该类可穿戴心电设备（如 Apple Watch、华为手环等）主要采用光学心率监测技术，通过 530 nm 绿色 LED 光检测血管容积变化实现心率间接推算。部分高端机型整合单导联 ECG 电极系统，可达到临床级心电信号采集精度（采样率 ≥ 250 Hz），但由于设备体积和续航限制（一般 < 72 h），这类设备更适合日常活动监测，尚不具备持续 72 h 以上的动态心电追踪能力^[13]。

3 可穿戴心电设备在心血管领域的应用

3.1 可穿戴心电设备对心律失常监测的价值

(1) 提高心律失常的诊断准确度。心率是心血管疾病诊断与管理中的核心生理指标之一^[14]，不仅可反映心脏功能，还可识别心律失常等异常情况。心率长期处于较高水平的患者预后通常较差。心输出量（由心率与每搏输出量共同决定）依赖心率调节^[15]，是评估心脏泵血能力的重要指标。心血管疾病患者常发生心律失常（包括早搏、心动过速、房颤等）。由于多数患者于日常生活中突然发作，因此常规 ECG 难以捕捉瞬时心电变化，隐匿性及一过性心律失常的检出率较低，导致漏诊或误诊^[16]。可穿戴心电设备可通过持续监测（连续监测时间 > 24 h）提升隐匿性及一过性心律失常的检出率。陆琨等^[17]对 321 例受试者的研究表明，该类设备识别心律失常的准确度、灵敏度、特异度（0.98、0.96、0.99）均较高，说明可穿戴心电设备对心律失常的诊断价值较高。(2) 明确心律失常的起源及类型。通过分析可穿戴心电设备采集的心电信号特征（如心电图形态、节律及心电图各波型的时间关系），医师可更精准判断患者心律失常的起源部位（如房性、室性）及类型（如阵发性室上性心动过速、室性早搏、二联律），进而为明确诊断并制定个性化治疗方案提供依据^[16-17]。(3) 评估抗心律失常药物的治疗效果。在抗心律失常药物治疗中，可穿戴心电设备可实时监测患者心电变化，为评估药物疗效提供客观数据。医师还可通过分析用药前后的心律失常发作频率、持续时间等关键指标，调整药物

剂量或优化治疗方案^[18]。

3.2 可穿戴心电设备对心肌缺血的监测及预警

心肌缺血的主要原因为冠状动脉供血不足，导致心肌对氧的供需失衡，从而造成心肌损伤，如不及时干预，会导致病情持续进展，甚至引发心肌梗死，危及患者生命。在静息状态下，心电图的 ST 段通常位于等电位线水平；而心肌缺血发生时，ST 段会抬高或压低^[19]。可穿戴心电设备能够实时动态监测患者心电图的 ST 段变化，一旦检测到异常情况可立即发出预警，即刻提醒患者，并通过网络将报警信息传输至医师端，敦促医患双方迅速采取干预措施。

3.3 可穿戴心电设备对心脏康复的指导作用

心脏康复为心血管疾病综合治疗的关键环节，包含运动康复、心理康复、生活方式调整等多个层面，可穿戴心电设备在心脏康复中具有重要应用价值。其可实时监测患者运动过程中的心率、心律等心电参数，医师可根据患者的年龄、病情等，借助可穿戴心电设备为其制定个性化运动方案并实时进行康复指导^[20]。医师还能通过比较康复前后患者的心电参数及日常运动情况综合评价患者的心脏康复效果，并适时调整康复计划，最大限度改善其心功能。王春燕等^[21]的研究结果显示，远程可穿戴心电设备可提高冠心病经皮冠状动脉介入术后患者的心电图异常检出率，降低不良事件发生率，有助于患者的术后康复。

3.4 可穿戴心电设备对心血管疾病高危人群的筛查及预防

心血管疾病的高危人群包括高血压、高血脂和糖尿病患者^[1]。可穿戴心电设备作为一种便捷高效的筛查工具，能够对这些高危人群进行长时间的心电监测，并及时发现潜在的心血管异常。目前，可穿戴心电设备已基于人工智能算法，通过对大量患者的心电数据进行深入分析，可准确预测高危人群发生心血管疾病的风险^[22]。因此，可穿戴心电设备在对高危人群进行筛查与预防方面具有重要价值。

4 可穿戴心电设备的最新技术

4.1 传感器材质与监测技术革新

(1) 柔性电极。传统的金属电极材质较坚硬，且长期佩戴时受患者汗液影响易氧化，金属与皮肤摩擦可能引起不适，并有皮肤过敏等风险，影响用户体验和监测依从性^[23]。柔性电极采用柔性材料制造，不但能与皮肤紧密贴合，还可有效减少电极与皮肤间的摩擦，从而减轻皮肤不适感。目前，常用的柔性电极材料主要包括聚二甲基硅氧烷、聚对苯二甲酸乙二酯、碳纳米管和石墨烯等^[23]。其中，碳纳米管和石墨烯因其优良的导电性和柔性，已成为柔性电极研究的焦点材料。此外，部分柔性电极还

具有自黏性，无需额外粘贴其他材料即可牢固贴合皮肤，从而提高佩戴的便捷性，为可穿戴心电设备的广泛应用奠定了基础^[23]。（2）多模态传感器。电信号监测技术和光学监测技术均存在一定局限性，多模态传感器将两种技术融合并集成于同一设备中，可同时采集多种类型的生理参数（心率、血压、血氧饱和度、心电信号等）并综合分析，对心血管功能的评估更加全面和准确^[24]。

4.2 信号处理及分析技术革新

（1）人工智能算法。传统的心电信号分析方法依赖人工设定的特征提取规则和阈值，辨别复杂心电信号的准确性和效率较低，难以满足临床需求。机器学习算法（如支持向量机和随机森林）可通过对大量病例的心电数据进行自动学习及训练，了解心电信号特征，从而精准识别心律失常等异常心电信号，进行鉴别诊断。此外，深度学习算法（卷积神经网络和循环神经网络等）也具备强大的特征学习能力，能够从原始心电信号中提取出深层次和高维度的精细电信号特征，在心律失常诊断和心肌缺血检测等方面发挥重要作用^[22]。（2）实时监测与预警技术。可穿戴心电设备的实时监测与预警功能能及时察觉心血管疾病危急情况、挽救患者生命至关重要。通过优化信号处理算法及无线通信技术，可穿戴心电设备可实现心电信号的实时采集、迅速传输及准确分析^[25]。（3）数据传输及存储技术。可穿戴心电设备于长期监测下会产生过多的心电数据，数据存储及分析成为关键问题。云端存储技术为可穿戴心电设备的数据存储提供了便捷高效的解决方案，通过将心电数据保存在云端，医师及研究人员可随时通过互联网访问、分析数据。云端存储还具备较高级别的数据扩展能力，可轻松应对持续增长的数据存储需求，并通过加密传输、分布式冗余备份等技术手段，确保数据的安全性及可靠性^[26]。

5 可穿戴心电设备面临的挑战

（1）监测精度受限。患者日常活动时，身体运动或电极与皮肤的摩擦会产生与心电信号频率相近的干扰信号，导致心电波形畸变，可能影响医师对心律失常、心肌缺血等的准确诊断^[27]。此外，日常生活中电子设备（如手机、微波炉）的电磁干扰可能使心电信号混入噪声，降低信噪比，从而干扰设备的心电信号特征提取与分析^[8]。（2）电池续航能力局限。电池容量与电池体积存在一定关联，通常电池容量越大，电池的体积也相对增加。可穿戴心电设备需尽量便携，因此对设备体积及重量均有一定限制，导致电池容量不可过大^[28]。而长期且连续的监测对电池续航能力要求较高，因此多数可穿戴心电设备无法满足长期连续使用的需求^[28]。

（3）应用局限性。现阶段，市面上的可穿戴心电设备产品众多，然而缺少统一的性能评价标准及应用规范。厂家及设备型号不同，其所生产的设备在信号采集精度、数据分析算法等层面亦存在较大差异，使医师无法对不同设备监测所得的结果进行统一解读和比较，因此限制了其在临床诊断中的应用范围^[8, 11]。（4）隐私与安全风险。可穿戴心电设备收集的健康数据属于用户隐私，一旦泄露可能被用于非法目的（如保险歧视、就业歧视），从而损害用户权益。同时，数据传输及存储过程中，也存在安全防护措施不到位（如未采用隐私保护技术），黑客可能通过网络攻击并篡改用户数据，不仅影响用户体验，还会降低医师诊断的准确性^[29]。

6 总结与展望

可穿戴心电设备作为心血管领域具有潜力的新兴技术，在临床应用和技术创新方面已取得一定成效，但仍面临许多挑战，包括监测精度受限、电池续航能力不足、临床应用缺乏统一标准等，且存在数据泄露等安全隐患。因此，建议相关部门制定统一的行业标准和使用规范，并开展大规模、多中心的临床研究，明确可穿戴心电设备的应用效果，提高其临床认可度。同时，建议加强跨领域合作，将医疗、科研等各方面资源进行整合，使可穿戴心电设备更便捷、实用，以推动其相关产业的健康、快速发展，为心血管疾病的防治提供支持保障。

【参考文献】

- [1] WILSON M, AL-HAMID A, ABBAS I, et al. Identification of diagnostic biomarkers used in the diagnosis of cardiovascular diseases and diabetes mellitus: A systematic review of quantitative studies[J]. *Diabetes Obes Metab*, 2024, 26(8): 3009-3019.
- [2] TERZI M B, ARIKAN O. Machine learning based hybrid anomaly detection technique for automatic diagnosis of cardiovascular diseases using cardiac sympathetic nerve activity and electrocardiogram[J]. *Biomed Tech (Berl)*, 2023, 69(1): 79-109.
- [3] 朱晚婷, 范平. 可穿戴心电设备在心律失常诊断中的应用进展[J]. *实用心电学杂志*, 2022, 31(3): 180-183.
- [4] 楚俊昆, 赵倩, 杨毅宁. 可穿戴心电设备在心血管疾病中的发展历程及应用进展[J]. *中国医疗设备*, 2023, 38(12): 158-164.
- [5] 石亚君, 郜玲, 王晋丽, 等. 可穿戴心电设备快速筛查模式的探索[J]. *中国医疗器械杂志*, 2021, 45(2): 228-230.
- [6] 王晋丽, 陈韵岱, 郜玲, 等. 12导联实时可穿戴心电设备在家庭和基层医院患者远程早期事件监测中的应用[J]. *实用心电学杂志*, 2021, 30(5): 305-

- 309, 317.
- [7] 马乐萍. 浅析可穿戴心电监护设备的设计与智能化技术 [J]. 中国设备工程, 2024 (15): 38-40.
- [8] 楚俊昆, 赵倩, 杨毅宁. 可穿戴心电设备在心血管疾病中的发展历程及应用进展 [J]. 中国医疗设备, 2023, 38 (12): 158-164.
- [9] 于松. 基于表面肌电信号的上肢痉挛量化评估算法及可穿戴式设备研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [10] 赵静. 基于光学原理的可穿戴心电信号监测方法及实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [11] 孙家璇, 杜跃, 曾一, 等. 可穿戴设备在心血管疾病治疗中的应用进展 [J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2024, 22 (20): 3728-3730.
- [12] 王馨乐. 接触式纺织结构柔性心电电极穿着舒适性研究 [D]. 西安: 西安工程大学, 2017.
- [13] 新型可穿戴式手环医疗监测准确率达 99.3% [J]. 医学信息学杂志, 2020, 41 (7): 95.
- [14] 余新艳, 赵晓晔, 杨建云, 等. 可穿戴单导联远程心电监测设备结合散点图在院外应用的分析 [J]. 中国循环杂志, 2021, 36 (11): 1096-1100.
- [15] 张晓娟, 顾志乐, 赵瑞琴, 等. 可穿戴单导联远程心电监测设备采集不同时长心电数据在心律失常筛查中的效果分析 [J]. 宁夏医学杂志, 2021, 43 (11): 965-968.
- [16] 余新艳, 王志新, 郎立国, 等. 单导联可穿戴远程心电监测设备在有症状心律失常患者中的应用模式探讨 [J]. 实用心电学杂志, 2021, 30 (1): 46-49.
- [17] 陆琨, 张松文, 储建军, 等. 可穿戴心电监测设备的临床应用及评价 [J]. 实用心电学杂志, 2023, 32 (6): 430-434, 438.
- [18] 孙利, 王贵锦, 丁子建, 等. 基于哈长城市群科技云平台的生物医药评测服务——以可穿戴心电硬件设备为例 [J]. 中国科技资源导刊, 2020, 52 (4): 24-29, 93.
- [19] 鲍明悦, 郭建魁, 王能才, 等. 可穿戴设备在医疗健康领域研究热点的可视化分析 [J]. 中国医学装备, 2025, 22 (3): 115-119.
- [20] 方海丽, 周秀玲, 胡安琪. 可穿戴健康类设备在心脏康复患者中的应用及展望 [J]. 中国医疗设备, 2025, 40 (2): 143-148, 182.
- [21] 王春燕, 陈文琴. “互联网+”模式下远程可穿戴心电设备在冠心病介入治疗后慢病管理中的应用 [J]. 现代电生理学杂志, 2023, 30 (4): 234-237.
- [22] 穆耶赛尔·麦麦提明, 刘惠娟, 王芳丽, 等. 基于人工智能的可穿戴设备在心房颤动筛查中的应用 [J]. 实用心电学杂志, 2024, 33 (2): 191-194.
- [23] 单聪淼, 韦明, 张煜, 等. 基于柔性电极的穿戴式多生理参数检测系统设计与实现 [J]. 航天医学与医学工程, 2024, 35 (5): 311-318.
- [24] 闻后来. 基于多传感信息融合的可穿戴实时心率监测技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [25] 王泓森, 陈韬, 颜勇, 等. 十二导联穿戴式心电设备院前诊断室上性心动过速的回顾性研究 [J]. 中华保健医学杂志, 2022, 24 (2): 87-90.
- [26] 梁存禹, 赵倩, 宋宁, 等. 基于“互联网+”的可穿戴式心电设备在冠心病患者 PCI 术后慢病管理中的应用效果评价 [J]. 上海交通大学学报 (医学版), 2022, 42 (3): 275-281.
- [27] 魏良, 黄海韵, 鄢苏鹏, 等. 基于心电信号和机械信号同步传感的穿戴式心功能监测 [J]. 中国医学物理学杂志, 2023, 40 (11): 1390-1394.
- [28] BJØRNÅGE"BOB"BRANDAL. 可穿戴设备 SoC 的动向与 Nordic 解决方案 [J]. 电子产品世界, 2021, 28 (5): 12.
- [29] 穆驭新. 可穿戴心电监测应用软件 APP 及其隐私数据安全性研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2023.



(上接第 160 页)

- [18] 夏哲远, 余爽, 施慧, 等. 耳穴贴压联合中医食疗对痰湿体质孕妇血糖控制及妊娠结局的影响 [J]. 广西中医药大学学报, 2021, 24 (1): 19-22.
- [19] 许丽亚. 中医情志护理在胎心监护室孕妇中的应用研究 [J]. 新中医, 2021, 53 (5): 157-159.
- [20] 吴春兰. 经络穴位按摩催乳法联合中医药膳在自然分娩产妇产后通乳中的应用 [J]. 基层医学论坛, 2021, 25 (36): 5256-5258.
- [21] 张海妮, 卿洁. 中医催乳手法联合中医药膳治疗气血虚弱型缺乳疗效观察 [J]. 世界最新医学信息文摘 (连续型电子期刊), 2019, 19 (27): 186-187.
- [22] 李银宽, 赵华, 尤尊, 等. 穴位按摩联合辨证施膳中医护理干预促进初产妇泌乳 128 例分析 [J]. 饮食保健, 2016, 3 (20): 75-76.
- [23] 候小燕, 钟林. 中医辨证护理联合中药督脉熏蒸对产后缺乳产妇泌乳能力的影响 [J]. 现代医药卫生, 2024, 40 (23): 4052-4055, 4060.
- [24] 沈红丽, 赵敏芳, 王玉琴, 等. 督脉熏蒸疗法在自然分娩产妇早期康复中的应用 [J]. 中国妇幼保健, 2023, 38 (10): 1794-1797.
- [25] 金静, 蔡玉娟, 袁海艳, 等. 中药督脉熏蒸治疗产后腹痛的效果及对恶露持续时间的影响 [J]. 浙江中医杂志, 2023, 58 (10): 721-722.