

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.04.012

智能可穿戴设备:技术融合与应用发展

贺军^{1,2}, 张慧卿³, 陈军^{1,2}, 郭书文¹

(1. 兵器工业卫生研究所 中国兵器工业集团人-机-环境重点实验室, 西安 710065; 2. 西北工业大学 三航脑科学与脑技术研究中心, 西安 710129; 3. 西北工业大学 柔性电子研究院, 西安 710072)

摘要: 综述了智能可穿戴设备在健康监测、运动辅助、军事、医疗康复等领域的应用情况,分析了智能传感技术、生物信号处理与无线传输技术、能源技术、材料技术等智能可穿戴设备的关键技术架构,指出智能可穿戴设备在监测精度、穿戴舒适性、数据安全与隐私等方面仍存在的诸多问题。未来,智能化可穿戴设备将向多功能集成化、智能化与个性化、柔性化与舒适化、跨领域深度融合方向发展,有望进一步便利人们的生活,推动社会的数字化与智能化升级。

关键词: 智能可穿戴设备;技术融合;创新性突破

中图分类号: TP212;TN99

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)04-0095-08

Smart wearable devices: Technology integration and application development

HE Jun^{1,2}, ZHANG Huiqing³, CHEN Jun^{1,2}, GUO Shuwen¹

(1. China Ordnance Industry Group-Machine-Environment Key Laboratory, Institute for Hygiene of Ordnance Industry, Xi'an 710065, China; 2. Sanhang Institute for Brain Science and Technology (SiBST), Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China; 3. Institute of Flexible Electronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The application of smart wearable devices is reviewed from the aspects of health monitoring, sports assistance, military, medical rehabilitation, etc. The key technical architectures of smart wearable devices are analyzed, including intelligent sensing technology, biological signal processing and wireless transmission technology, energy technology, material technology, etc. It is pointed out that smart wearable devices still have many problems in terms of monitoring accuracy, wearing comfort, data security and privacy, etc. In the future, smart wearable devices will develop towards multi-functional integration, intelligence and personalization, flexibility and comfort, and deep cross-domain integration, which is expected to further facilitate people's lives and promote the digital and intelligent upgrading of society.

Key words: smart wearable devices; technological integration; innovative breakthroughs

智能可穿戴设备是材料科学、电子技术、通信技术、计算机科学等多学科技术深度交叉融合的创新性成果。它能够直接穿戴在人体上,通过内置的各类高精度传感器,实现对人体生理参数(如心率、血压、体温等)、运动状态(如步数、运动强度、姿势等)以及周围环境的实时监测和智能交互^[1-3]。近年来,随着大众健康意识的提升和品质生活需求的增长,以及上述相关技术的持续飞速发展,智能可穿戴设备在健康监测、运动辅助、军事应用、医疗康复、应急救援、智能家

居等多个领域展现出了前所未有的巨大应用潜力和广阔发展前景,日益成为学术界和产业界共同关注的热点话题^[4]。

为全面深入地了解该领域的最新进展,本文系统梳理和分析国内外相关文献和研究成果,阐述智能可穿戴设备在医疗健康、运动科学、军事工程等领域的典型应用场景和实施成效,重点探讨柔性传感器、数据处理与传输、能源管理以及新型材料等关键技术的发展现状和未来挑战,分析设备在监测精度、长期佩

收稿日期: 2025-03-01

基金项目: 装备预研项目支持(YJ2023-03)

通信作者: 贺军(1986—),男,高级工程师,主要研究方向为系统工程人体工效学。E-mail: hejun152@126.com

戴适应性、穿戴舒适性、数据安全与隐私保护等方面存在的问题,并展望和预测智能可穿戴设备未来可能的发展方向,如多功能集成化、智能化与个性化服务、柔性化以及与其他领域的深度融合等,旨在为研究人员和相关领域从业者提供参考和借鉴,促进智能可穿戴设备技术的不断创新和发展,更好地为人们的健康管理和服务。

1 智能可穿戴设备的应用领域

1.1 健康监测

智能可穿戴设备对于健康监测具有非常重要的意义。孙希^[5]基于 STM32 单片机设计了监测仪,能够实时监测心率、体温和步数等关键生理参数,其监测准确率超过 98%,该设备以其结构简单、便于携带和高可靠性而受到青睐。孟子征等^[6]将柔性应变传感器嵌套在弹性背心上,监测胸部的呼吸信号,并分析传感器长度、背心尺寸等因素对传感器灵敏度的影响。Seo 等^[7]和 Macdonald 等^[8]分别将智能鞋垫用于步态分析和足部健康监测,Kazanskiy 等^[9]将智能眼镜用于眼部健康监测。可穿戴医疗产品还用在了心血管疾病监测、预防和管理中^[10],通过实时监测生理参数,为患者提供个性化的健康管理方案。这些应用得益于高精度传感器技术的发展,能够实时监测心率、血压、体温等生理参数,同时数据处理技术确保了监测数据的准确性和实时性。

中医诊断与智能可穿戴设备的结合也为智能可穿戴设备在健康监测中的应用提供了新思路、新方法。Wang 等^[11]开发了一种受中医启发的全印刷柔性压力传感器阵列,该传感器阵列能够实现自适应压力调节,用于高度可靠的个体化长期脉搏诊断。这种技术将中医的脉诊理论与现代柔性传感器技术相结合,为智能可穿戴设备在中医健康监测中的应用提供了新的思路和方法。

智能可穿戴设备在心理健康监测方面也显示出巨大潜力,能够实现个体心理健康状态的早期识别、预防和干预^[12],从而在心理健康领域发挥重要作用。王越^[13]提出了一种智能健康监测原型系统,该系统集成了多种传感器来收集生理数据,并运用深度学习算法对老年人的健康状况进行分析和预警,涉及心律失常的分类和精神状态的识别等方面。

综上所述,智能可穿戴设备在健康监测领域的应用,不仅使其测量精度显著提升、使用便捷性大幅增强,还能应用于心理健康领域的实时监测,通过对图 1

所示心电、脑电、脉搏、呼吸、体温等信号的监测^[14],为个体化健康管理提供精准的、全面的解决方案。未来,随着技术的进步,智能可穿戴设备将越来越轻便、精准、智能化,并可实时对多种参数进行检测,实现个性化健康管理。

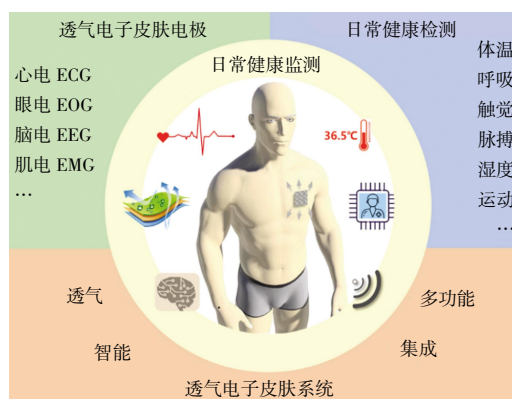


图 1 常见的可穿戴健康监测信号类型及传感器^[14]

Fig.1 Common types of wearable health monitoring signals and sensors^[14]

1.2 运动辅助

智能可穿戴设备在运动辅助方面有着广泛的应用。邱丽伟等^[15]通过调研用户需求,研发了一款集成多模态传感器的智能运动头带,该头带配备了惯性感应器、可拆卸防紫外线 PC 镜片和骨传导耳机等部件,在提升运动沉浸式体验的同时,有效维护户外活动安全性。丁波等^[16]研发的电加热可穿戴产品,能在低温环境下为用户提供温暖,其加热单元与产品一体化

智能可穿戴设备通过先进的传感器和数据处理技术,可以对运动员的生命体征^[17](如图 2 所示)、情绪和运动成绩进行实时监测,从而在提高运动成绩的同时,更好地调整训练计划和比赛策略。Seshadri 等^[18]研发的智能可穿戴设备通过传感器收集生理数据,借助 AI 分析建立心理模型,预测并预警心理变化,为教练提供干预建议。邓威等^[19]通过智能可穿戴设备对运动员的汗液进行监测,以便调整个性化训练方案,精准补水,并通过分析长期监测数据评估训练效果,预测健康趋势,甚至助力比赛策略的制定,全方位提升运动员的状态与表现。

将智能健身器材应用于力量训练的智能化系统开发及个性化训练方案的构建正在掀起新的浪潮^[20]。未来,智能可穿戴装备的精确性和舒适性将随着技术的突破而进一步提高,功能也会更加丰富多样;结合虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术,能够为运动员提供身临其境的训练体验,帮助运动员更好地模拟比赛场景,并对技术动作进行优化;其续航能力和数据

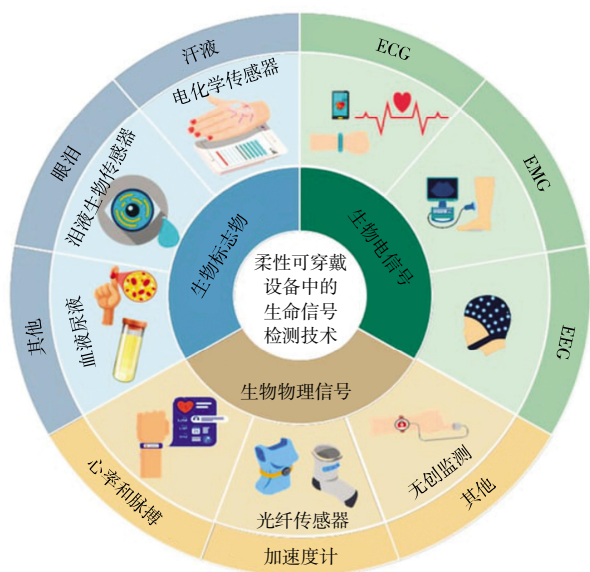


图2 运动中通过柔性可穿戴设备进行生命体征监测的分类

Fig.2 Classification of vital signs monitoring during exercise via flexible wearable devices

传输效率也将得到显著提升,使其在复杂环境和长时间的锻炼中更加实用,为运动员和运动爱好者提供全方位支持。

1.3 军事领域

智能可穿戴设备在作战指挥、武器装备和日常监管等军事领域的应用十分广泛,大幅度提升了军人的作战能力和防护能力。在作战指挥领域,智能眼镜等装备为军人提供了更为直观和丰富的战场信息;在武器装备领域,单兵综合作战系统、智能防护装具、外骨骼系统等先进装备,使士兵的作战效能和生存能力得到了加强;在日常监管中,安全防范管理、生理探测、医疗监护以及装备器材的应用,进一步提高了军事行动的安全性和效率。例如,俄罗斯研制的“多项式”小型化多功能生理监测仪和美国研制的战术飞行员综合生命保障系统 TAILSS 能够实时监测飞行员的关键生理指标,从而确保飞行任务的安全^[21]。贺军等^[22]研制的智能头盔集通信、导航、环境监测等多种功能于一体,显著增强了复杂战场环境下士兵的态势感知能力。这些智能可穿戴设备的全面应用,在提升军事行动科技含量的同时,也为军人提供了更为周全的保障。

1.4 医疗康复

在医疗康复领域,智能可穿戴设备为患者的康复治疗提供了新的手段,潜力巨大。如:为偏瘫患者设计的步态矫正设备、辅助老年人行走的智能内衣等^[23];穿戴式长程血糖监测设备和穿戴式生命体征监测设备在手术期间的血糖管理和生命体征监测方面各有

优势^[24];智能假肢可用于截肢患者的行走辅助以及康复训练^[25];智能康复机器人用于神经损伤患者的上肢康复等。除上述应用外,在关节软骨损伤及康复训练如脑卒中患者康复运动任务自动评估等方面,智能可穿戴设备也发挥着重要作用。基于嵌入式系统的智能穿戴设备通过研究相关技术并引用特定算法进行监测,如图3所示^[26],结果显示其有助于关节功能恢复^[27]。



图3 低成本的可穿戴系统用于收集上肢运动数据并指导患者训练^[27]

Fig.3 Low-cost wearable system for collecting upper-limb motion data and guiding patient training^[27]

1.5 其他领域

智能可穿戴设备在应急救援、智能家居、教育娱乐等诸多领域也显示出广泛的应用潜力,在提升生活便利性和舒适度的同时,也促进了相关领域的数字化、智能化发展。

在应急救援领域,智能可穿戴设备能够实时提供生命体征监测,保证救援人员在极限环境下可以实时监测自身和被救助者的身体状况,同时也可以及时为被救助者提供医疗数据支持,不仅提高了救援行动的安全性和有效性,而且给救援工作带来了更多的科学性和准确性。张梦等^[28]设计生命体征监测系统,可在紧急救援训练中实时监测人员生命体征,提高训练的安全性和有效性。

在智能家居领域,智能可穿戴设备通过与家居系统的联动,实现对家居设备的远程控制和智能化管理。用户可以通过智能手环对家中的灯光、空调、窗帘等设备进行控制,甚至还可以通过语音助手进行更复杂的操作。这一应用不仅提升了生活的便捷性和舒适性,同时也促进了智能家居行业的发展。

在教育领域,智能可穿戴设备可以用来监控学生的学习状态,如注意力集中程度、情绪变化等,从而给教师更准确的教学反馈。智能可穿戴设备还能结合虚拟现实、增强现实等技术,为学生提供更具互动性的学习体验,不仅能够激发学生的学习兴趣和积极性,也能够提高教学效果和学习效率。

在娱乐领域,智能可穿戴设备与虚拟现实和增强现实技术的结合,给用户带来了全新的交互体验。它们可与音乐播放器、游戏手柄等设备组合使用,如智能手环可以通过触摸或语音控制实现歌曲切换、音量调节等功能,智能眼镜则能为用户提供更加逼真的虚拟现实游戏体验。

综上所述,智能可穿戴设备在各个领域都显示出巨大的应用潜力与价值。随着技术的不断进步与创新,相信此类设备在未来会给我们的生活带来更多便利与惊喜。

2 智能可穿戴设备的关键技术架构

2.1 智能传感技术

传感技术是穿戴式设备的数据入口,其性能的飞跃依赖于材料系统的创新和跨学科技术的集成。从基础材料的物性调控到智能算法赋能,“物理效应—器件设计—信号解译”的全链条技术体系已经形成。柔性传感器的传感原理体系可根据检测指标分为柔性物理传感器(涵盖压力、温度、湿度、运动等)和柔性化学传感器(如汗液、气体检测)^[29]。传感原理基于压阻效应、压电效应、电容效应、热电效应、荧光湮灭效应、摩擦电等效效应^[30]。通过精密的制备工艺将柔性传感器集成到穿戴式设备中,可实现对人体生理参数和运动状态的精准监测,显示出了柔性传感器在健康监测、运动追踪和人机交互等领域的应用潜力。值得注意的是,传感器技术正从单一参数检测向多模态感知演进^[31],通过融合多种感知模式与AI,可提升可穿戴设备在人机交互中的性能和可靠性。

2.2 生物信号处理与无线传输技术

智能穿戴设备在运行过程中会产生大量的数据,而高效的处理和传输是必不可少的。在智能可穿戴设备的生物信号处理领域,基于深度学习的新型混合(HybridNew)架构正在引发技术变革。Transformer架构与卷积神经网络的协同优化在心电、脑电等非平稳生理信号的解析方面展现了独特的优势:通过多头自注意力机制构建的跨时域特征关联模型,可以精确捕捉QRS波群等关键生理特征的细微变异。在数据传输方面,蓝牙技术以其低功耗、传输稳定的特点,适合进行近距离的数据同步;Wi-Fi提供高速率的室内传输;而4G/5G技术则打破地域限制,保证室外数据稳定快速上传到远程服务器,为实时分析打下坚实基础。

2.3 能源技术

能源技术是智能可穿戴设备持续运行的保障。王

宁等^[32]介绍了自供能摩擦电纺织品的研究进展,该技术通过摩擦起电原理将机械能转化为可提供可持续能源解决方案。锂离子电池、能量采集技术、电源技术、电池技术的不断发展,也在一定程度上提升了智能穿戴设备的续航能力。

2.4 材料技术

得益于新型功能材料的突破,智能可穿戴设备在轻薄结构、可穿戴、功能多样化等方面均有明显改善。智能可穿戴设备所采用的材料必须具备一系列重要特性,包括良好、舒适的穿戴体验和生物相容性等^[33]。在智能服装领域,弹性针织面料的使用越来越普遍,这种面料既可以满足服装贴合身体、保持透气的基本需求,又可以保证服装中集成的各种传感器能够稳定地发挥作用。导电聚合物、介电聚合物等新型材料的引入和应用,为智能可穿戴设备中传感器性能的提升提供了强有力的技术保障。

3 存在问题

3.1 监测精度瓶颈显著

尽管智能可穿戴设备在生理参数监测方面取得了一定进展,但部分设备的监测精度仍有待提高。目前国内一些生理检测记录仪采用传统民用医疗传感器,未针对航空环境进行适用性设计,存在体积大、接口多、数据传输稳定性差、噪声较大等问题,影响监测精度^[34]。在复杂环境如运动过程中,传感器容易受到干扰,导致测量结果不准确,无法满足高精度监测的需求^[35]。目前主要解决思路是通过多传感器数据融合技术,整合多种类型传感器的数据,如将加速度计、陀螺仪与心率传感器的数据相结合,通过复杂算法对数据进行综合分析处理,以减少单一传感器受干扰产生的误差,提高监测结果的准确性。同时,利用深度学习算法对历史数据进行学习与训练,不断优化监测模型,提升其在复杂环境下对生理参数的精准识别能力。

3.2 穿戴舒适性亟待改善

穿戴舒适性是影响用户使用体验的重要因素。部分智能可穿戴设备在设计上未能充分考虑人体工程学原理,导致佩戴不舒适。例如:部分智能运动可穿戴设备存在出汗闷热不透气、日常佩戴不适等问题;而且设备的质量、尺寸、材质等也可能会对使用者造成负担,影响使用者长时间佩戴的意愿。需要研制和选用透气、吸汗、轻便的新型材料,如采用具有纳米级孔隙结构的透气面料作为设备外壳或表带材料,在保证良好透气性的同时,还能有效降低设备自重。选用柔

软、亲肤且有一定弹性的材质制作直接接触肌肤的部位,提升佩戴舒适度。

3.3 数据安全与隐私问题

随着智能穿戴设备收集的数据量越来越大,数据安全和隐私问题越来越突出。智能可穿戴设备收集的个人信息涉及用户隐私,如果泄露或滥用将造成用户权益受损^[36]。数据加密、门禁等安全技术 in 智能穿戴设备上的应用尚不完善,存在资料外泄风险。为了解决数据安全和隐私问题,未来数据加密技术的应用还需要进一步加强,比如:利用区块链技术来实现数据的分布式存储和不可篡改;完善门禁机制,确保敏感数据只有授权用户才能访问;制定与实施相关法规,为数据安全、促进行业健康发展提供法律保障。

4 未来发展趋势

4.1 多功能集成化

未来智能穿戴设备多功能融合的趋势会越来越显著。目前,虽然有些设备已经具备了一些基本功能,但从长远发展来看,其功能集成的深度和广度的拓展空间还是很大的。未来的智能可穿戴设备将像一个高度集成的微型智能中心,将越来越多类型的传感器和功能模块集成在一起,实现对人体生理参数、运动状态、环境信息的全方位、多层次的监测分析。

以健康监测为例,席立锋等^[37]预测未来的智能可穿戴设备很可能不再局限于单纯的心率、步数监测,而是可以将心率、血压、血糖、睡眠监测等多种功能整合在一起。这意味着用户只需佩戴一台设备,就能随时全面了解自己的身体健康状况,无需再携带多台独立的监测设备,大大提高了便捷性。而且,随着人工智能和大数据技术的不断发展,这些整合设备将不再只是数据的采集者,而将成为数据的深度分析者。它们可以挖掘和分析收集到的海量数据,为用户提供个性化的健康管理建议,比如根据用户每天的运动数据和健康状况,为其制定专属的饮食和运动方案,从而实现真正意义上的全面健康管理。

在运动场景中,多功能集成的智能穿戴设备能够实时监控运动者的运动强度、姿势、肌肉疲劳程度等信息,同时结合温度、湿度、海拔等环境信息,更科学合理地为运动者提供运动指导。例如,当设备监测到运动者在高温环境下锻炼,心率过高时,就会及时提醒运动者适当降低运动强度,补充水分,以免发生中暑等危险状况。

4.2 智能化与个性化

智能化、个性化是未来智能穿戴设备发展的重要

方向,将为用户带来更为贴心的专属使用感受。智能穿戴设备将借助先进的人工智能算法,拥有更强大的自主学习和分析能力,能够自动识别用户的行为模式、健康状况等信息^[38]。利用深度学习算法深入分析老年人的生理数据,不仅能准确识别心律失常等疾病症状,还能有效监测预警老年人的精神状态,为老年人提供个性化的健康管理方案。未来,这一个性化的智能服务将更加深入人心。智能穿戴设备将根据每个用户的日常习惯、健康需求和喜好,对设备的工作方式和功能设置进行自动调整。对于习惯晨跑的用户来说,该设备可以自动切换到每天早晨的运动监测模式,根据用户以往的运动目标,实时提供运动反馈与建议;对于睡眠质量不佳的用户,设备可以通过监测睡眠数据,分析影响睡眠的因素,进而调整设备的提醒时间,避免用户深度睡眠时的打扰,同时提供有助于睡眠改善的建议,如调整卧室环境温度、播放舒缓音乐等。

此外,智能化的智能可穿戴设备还能够与用户进行更加自然、流畅地交互。通过语音识别、手势识别等技术,用户可以更加便捷地操作设备,获取所需信息,设备也能更好地理解用户的意图,提供更加准确和个性化的回应,真正实现设备与用户之间的无缝沟通,甚至远程化实现各种信号的传输与解读^[39]。

4.3 柔性化与舒适化

为了给用户带来更高品质的佩戴体验,未来智能穿戴设备在设计上将更加偏重于柔性化、舒适化2个方面。

柔性材料的应用将成为智能穿戴设备发展的关键趋势之一,这得益于柔性传感器等技术的不断进步,为智能穿戴设备的柔性化提供了强有力的支撑。未来的智能可穿戴设备将大量采用柔性材料和轻薄化设计,使其能够更好地贴合人体各部位,减少对用户活动的限制,让用户佩戴时几乎感觉不到设备的存在。在材质选择上,智能可穿戴设备将采用更多具有良好柔韧性、透气性、舒适性以及生物相容性的材质。例如,智能服装除了继续采用弹性针织面料以满足贴合、透气等要求外,材质性能也将进一步优化,使其具有更好的吸汗排湿功能,避免用户因运动或日常活动中出汗而产生闷热感。导电高分子、介电高分子等新型材料的应用,不仅可以提升传感器的性能,还可以使设备更柔软,增强佩戴的舒适度。

在设计过程中,将充分利用人体工程学原理,对人体的结构和运动特点进行深入研究,对设备的结构和佩戴方式进行优化。如智能手环的表带设计将更加

贴合腕部曲线,降低对腕部的压迫感;智能头盔的内部结构会根据头部的形状和压力分布进行设计,提高佩戴的稳定性和舒适度。这些设计改进可以使智能穿戴设备更加自然地融入到用户的生活中,避免用户因为佩戴设备而产生不适。

4.4 与各领域深度融合

智能可穿戴设备与各领域的深度融合是未来发展的必然趋势,这将为其打开更广阔的应用场景和价值空间。

在医疗领域,智能可穿戴设备将与远程医疗、智能家居等系统紧密结合,实现远程实时监控患者、健康管理全周期等。患者在家中佩戴智能穿戴设备,就可以实时向医生传输自己的生理数据,医生可以根据这些数据及时对治疗方案进行调整。智能可穿戴设备还可以与智能家居系统联动,当监测到患者生理状况出现异常时,自动启动智能家居设备进行相应的处理,如开启紧急呼救按钮,调节室内温度及通风换气等,为患者提供更为及时和周全的医疗保障。

在娱乐领域,虚拟现实游戏的玩家佩戴智能穿戴设备后,将不仅能通过手势、动作等与虚拟环境进行自然交互,还能在虚拟场景中通过设备感受触觉、温度等信息,使游戏体验更加真实刺激。同时智能穿戴设备还能与音乐、影视等娱乐内容深度融合,为用户提供更个性化的娱乐服务,如自动推荐适合自己的音乐或影视节目,根据用户的情绪和场景进行选择。

无线传输技术的发展将进一步促进智能穿戴一体化的发展。一方面,融合多种无线通信技术的优势,形成更加高效、稳定的主流传输技术;另一方面,通过整合多种无线传输方式,根据所处的环境,自动选择最佳的解决方案,以增强设备的适应性和用户体验,促进其在更多领域的深度应用。

智能穿戴设备与其他领域的融合发展,将为人们的生活创造更多创新的应用模式和服务,带来更多便捷和乐趣,促进各领域的数字化、智能化升级。

5 结束语

作为多学科技术融合的产物,智能可穿戴设备已经在健康、运动、军事、康复等诸多领域显示出巨大的应用潜力。这些设备通过将传感器、数据处理、能源管理以及新材料等技术集成在一起,为用户提供了一系列方便快捷的解决方案。未来,随着技术的不断进步和应用领域的不断拓展,智能穿戴设备有望向多功能

集成、智能与个性化服务、柔性舒适设计以及与其他领域的深度融合等方向发展,在数字化、智能化升级的人类社会中贡献更多的力量。

参考文献:

- [1] 陈筹. 智能可穿戴设备在医疗健康领域的发展与应用[J]. 上海信息化, 2014(12): 83-85.
CHEN Q. Development and application of smart wearable devices in medical and health field[J]. Shanghai Informatization, 2014(12): 83-85(in Chinese).
- [2] 朱雅倩, 汪鹏飞, 李育文, 等. 用于人体运动监测的双层柔性应变传感器[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(3): 159-163.
ZHU Y Q, WANG P F, LI Y W, et al. Double-layer flexible strain sensor for human motion monitoring[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(3): 159-163(in Chinese).
- [3] 杨鸿珍, 王云焯, 吴建伟, 等. 电网有限空间作业可穿戴环境监测及报警系统设计和实现[J]. 电子器件, 2022, 45(3): 760-766.
YANG H Z, WANG Y Y, WU J W, et al. Design of wearable environment monitoring and alarm system for limited space operation in power grid[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2022, 45(3): 760-766(in Chinese).
- [4] 沈雷, 孙涵. 智能可穿戴领域研究现状和发展趋势[J]. 服装学报, 2023, 8(2): 125-133.
SHEN L, SUN T. Intelligent wearable research status and its development trend[J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(2): 125-133(in Chinese).
- [5] 孙希. 基于STM32的智能穿戴式人体生理参数监测仪[J]. 仪表技术, 2024(1): 26-29.
SUN X. Intelligent wearable human physiological parameter monitor based on STM32[J]. Instrumentation Technology, 2024(1): 26-29(in Chinese).
- [6] 孟子征, 刘莉, 何崑, 等. 基于柔性传感器的智能背心呼吸监测技术研究[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2021, 41(4): 36-41.
MENG Z Z, LIU L, HE Y, et al. Respiration monitoring technology of smart vest based on flexible sensors[J]. Journal of Beijing Institute of Fashion Technology (Natural Science Edition), 2021, 41(4): 36-41(in Chinese).
- [7] SEO M, SHIN M J, PARK T S, et al. Clinometric gait analysis using smart insoles in patients with hemiplegia after stroke: Pilot study[J]. JMIR MHealth and UHealth, 2020, 8(9): e22208.
- [8] MACDONALD E M, PERRIN B M, KINGSLEY M I C. Factors influencing Australian podiatrists' behavioural intentions to adopt a smart insole into clinical practice: A mixed methods study[J]. Journal of Foot and Ankle Research, 2020, 13(1): 28.

- [9] KAZANSKIY N L, KHONINA S N, BUTT M A. Smart contact lenses—a step towards non-invasive continuous eye health monitoring[J]. *Biosensors*, 2023, 13(10): 933.
- [10] 顾林跃. 可穿戴医疗产品在心血管健康管理方面的应用研究[J]. *中国医疗器械信息*, 2023, 29(23):61–63.
GU L Y. Research on the application of wearable medical products in cardiovascular health management[J]. *China Medical Device Information*, 2023, 29(23):61–63(in Chinese).
- [11] WANG X, WU G R, ZHANG X K, et al. Traditional Chinese medicine (TCM)-inspired fully printed soft pressure sensor array with self-adaptive pressurization for highly reliable individualized long-term pulse diagnostics[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(1): 2570002.
- [12] LONG N N, LEI Y X, PENG L H, et al. A scoping review on monitoring mental health using smart wearable devices [J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2022, 19(8): 7899–7919.
- [13] 王越. 基于深度学习和人体生理数据的智能健康监测研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
WANG Y. Research on intelligent health monitoring based on deep learning and human physiological data[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022(in Chinese).
- [14] YANG Y, CUI T R, LI D, et al. Breathable electronic skins for daily physiological signal monitoring[J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 161.
- [15] 邱丽伟, 张一佳, 史晓明, 等. 基于人机工程学的智能运动头带舒适度研究[J]. *黑龙江科学*, 2024, 15(12): 44–47, 51.
QIU L W, ZHANG Y J, SHI X M, et al. Research on comfort of intelligent sports headband based on ergonomics[J]. *Heilongjiang Science*, 2024, 15(12): 44–47, 51(in Chinese).
- [16] 丁波, 张辉. 电加热可穿戴产品的研究进展[J]. *纺织导报*, 2023(2): 62–67.
DING B, ZHANG H. Research advances in electrically heated wearable products[J]. *China Textile Leader*, 2023 (2): 62–67 (in Chinese).
- [17] JU F Y, WANG Y J, YIN B F, et al. Microfluidic wearable devices for sports applications[J]. *Micromachines*, 2023, 14(9): 1792.
- [18] SESHADRI D R, LI R T, VOOS J E, et al. Wearable sensors for monitoring the physiological and biochemical profile of the athlete[J]. *NPJ Digital Medicine*, 2019, 2: 72.
- [19] 邓威, 张德彬. 智能可穿戴设备军事应用与发展趋势[J]. *国防科技*, 2016(1):57–60.
DENG W, ZHANG D B. The research on military application and development tendency of intelligent wearable devices[J]. *National Defense Technology*, 2016 (1): 57–60(in Chinese).
- [20] FARROKHI A, FARAHBAKHS R, REZAZADEH J, et al. Application of internet of things and artificial intelligence for smart fitness: A survey[J]. *Computer Networks*, 2021, 189: 107859.
- [21] 邱婧, 吴国栋, 满庚, 等. 飞行员智能可穿戴式生理监测设备研究综述[J]. *中国个体防护装备*, 2023 (4): 45–47.
QIU J, WU G D, MAN G, et al. Research summary of intelligent wearable physiological monitoring equipment for pilots [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2023 (4): 45–47 (in Chinese).
- [22] 贺军, 考希宾, 万红, 等. 穿戴式生理监测装置设计研究[J]. *针织工业*, 2023(9): 69–73.
HE J, KAO X B, WAN H, et al. Design and research of wearable physiological monitoring device[J]. *Knitting Industries*, 2023(9): 69–73(in Chinese).
- [23] 张志, 尚盈辉. 面向康辅的智能可穿戴产品设计分析[J]. *电子元器件与信息技术*, 2022(7): 1–3, 11.
ZHANG Z, SHANG Y H. Design and analysis of intelligent wearable products for rehabilitation aids[J]. *Electronic Components and Information Technology*, 2022(7): 1–3, 11 (in Chinese).
- [24] 李嘉宇, 潘华峰, 王刚, 等. 加速康复外科围手术期可穿戴式监测设备应用进展[J]. *中国实用外科杂志*, 2023, 43(7): 833–836.
LI J Y, PAN H F, WANG G, et al. Application and development prospect of accelerated perioperative wearable monitoring device in enhanced recovery after surgery[J]. *Chinese Journal of Practical Surgery*, 2023, 43(7): 833–836(in Chinese).
- [25] LIU C, GUO K, LU J, et al. A review on the application of intelligent control strategies for post-stroke hand rehabilitation machines[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2023, 15(1): 16878132221148018.
- [26] WANG J, LI C, ZHANG B, et al. Automatic rehabilitation exercise task assessment of stroke patients based on wearable sensors with a lightweight multichannel 1D-CNN model[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 19204.
- [27] ZHANG Y, SUN W, CHEN J. Application of embedded smart wearable device monitoring in joint cartilage injury and rehabilitation training[J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022, 2022: 4420870.
- [28] 张梦, 刘欣然, 王中举, 等. 应急救援培训生命体征监测系统设计[J]. *计算机技术与发展*, 2022, 32(7): 133–137.
ZHANG M, LIU X R, WANG Z J, et al. Design and development of vital signs monitoring system for emergency rescue training[J]. *Computer Technology and Development*, 2022, 32(7): 133–137(in Chinese).
- [29] 贺军, 郭书文, 李琳, 等. 面向智能可穿戴纺织品的聚合物基柔性传感器的研究进展[J]. *棉纺织技术*, 2024, 52(11): 27–33.
HE J, GUO S W, LI L, et al. Research progress of polymer-

- based flexible sensor for smart wearable textiles[J]. *Cotton Textile Technology*, 2024, 52(11): 27-33(in Chinese).
- [30] 殷晓玉, 蒋诗萌, 王军. 辅助技术在智能可穿戴设备中的研究进展[J]. *毛纺科技*, 2024, 52(5): 72-77.
YIN X Y, JIANG S M, WANG J. Research progress of assistive technology in smart wearable devices[J]. *Wool Textile Journal*, 2024, 52(5): 72-77(in Chinese).
- [31] GUO X, SUN Z, ZHU Y, et al. Zero-biased bionic fingertip e-skin with multimodal tactile perception and artificial intelligence for augmented touch awareness[J]. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla)*, 2024, 36(39): e2406778.
- [32] 王宁, 龚维, 王宏志. 面向可穿戴电子产品的自供能摩擦电纺织品研究进展[J]. *纺织学报*, 2024, 45(4): 41-49.
WANG N, GONG W, WANG H Z, et al. Review on self-powered triboelectric textiles for wearable electronics[J]. *Journal of Textile Research*, 2024, 45(4): 41-49(in Chinese).
- [33] 赵艳娇, 宁浩宇, 孙玥, 等. 智能可穿戴产品现状及评价方法研究[J]. *纺织科学研究*, 2024(9): 19-24.
ZHAO Y J, NING H Y, SUN Y, et al. Research on the current situation and evaluation methods of intelligent wearable products[J]. *Textile Science Research*, 2024(9): 19-24(in Chinese).
- [34] BRASIER N, WANG J, GAO W, et al. Applied body-fluid analysis by wearable devices[J]. *Nature*, 2024, 636(8041): 57-68.
- [35] GIURGIU M, VON HAAREN-MACK B, FIEDLER J, et al. The wearable landscape: Issues pertaining to the validation of the measurement of 24-h physical activity, sedentary, and sleep behavior assessment[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2025, 14: 101006.
- [36] 吴敏. 多场景智能头盔监测系统的设计研究[J]. *科技与创新*, 2022(23): 90-92.
WU M. Design and research of multi-scene intelligent helmet monitoring system[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2022(23): 90-92(in Chinese).
- [37] 席立锋, 周衡书, 张淳, 等. 智能可穿戴产品的开发及应用现状[J]. *针织工业*, 2021(4): 70-75.
XI L F, ZHOU H S, ZHANG C, et al. Development and application status of smart wearable products[J]. *Knitting Industries*, 2021(4): 70-75(in Chinese).
- [38] CHANDRAMOULI N A, NATARAJAN S, ALHARBI A H, et al. Enhanced human activity recognition in medical emergencies using a hybrid deep CNN and bi-directional LSTM model with wearable sensors[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 30979.
- [39] VAGHASIYA J V, MAYORGA-MARTINEZ C C, PUMERA M. Wearable sensors for telehealth based on emerging materials and nanoarchitectonics[J]. *NPJ Flexible Electronics*, 2023, 7: 26.

本文引文格式:

贺军, 张慧卿, 陈军, 等. 智能可穿戴设备: 技术融合与应用发展[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(4): 95-102.

HE J, ZHANG H Q, CHEN J, et al. Smart wearable devices: Technology integration and application development[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(4): 95-102(in Chinese).