

# 心率服研究进展及其多元化市场应用

丁欢 何蒙豆 李涵 张川

重庆市计量质量检测研究院, 重庆 401123

**摘要:**综述了心率服相关组成部件的研究进展,重点介绍了作为心率服关键部件的柔性织物电极的研究概况,阐述了心率服在健康管理、运动健身、军事训练等多个领域的应用,展现了心率服作为一种新兴可穿戴设备在促进个人健康管理及医疗服务创新方面的巨大潜力。

**关键词:**心率服;柔性织物电极;健康管理;市场现状

中图分类号:TS 941.15

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)02-0016-08

## Research progress and diversified market application of heart rate suits

*Ding Huan, He Mengdou, Li Han, Zhang Chuan*

Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 401123, China

**Abstract:** The research progress of the relevant components of heart rate suits was reviewed. The research overview of flexible fabric electrode, which was the key component of the heart rate suits, was mainly introduced. The application of heart rate suits in health management, exercise and fitness, military training were described, and the great potential of heart rate suits as an emerging wearable device in promoting innovation in personal health management and medical service was demonstrated.

**Keywords:** heart rate suit; flexible fabric electrode; health management; market situation

2023年6月,国家心血管病中心发布的《中国心血管健康与疾病报告2022》<sup>[1]</sup>指出,我国心血管疾病患者群体庞大,且该疾病具有高发病率、高致残率及高致死率的特点,但发病初期多数患者难以自我察觉,而心血管疾病一旦发作,可能会对患者的生命构成严重威胁。随着人口老龄化的加剧,心血管疾病的发病率和致死率持续上升。心脏作为驱动血液循环的核心,其健康状况直接关系到人体各器官及整体机能的正常运行。心率能够直接体现心脏健

康状态。因此,长期、持续的心率监测成为心血管疾病预防与治疗的第一道防线,其对于健康监测、疾病预防管理以及运动训练优化等具有重要意义,是现代健康管理中不可或缺的一环。

心率服是一种集智能技术和服装于一体的可穿戴设备,融合了电子信息技术、传感器技术,以及纺织科学和材料科学等相关领域的前沿技术,其主要依赖内置的传感器、信号处理和传输系统实时监测心率数据。其一旦监测到心率异常,即在第一时间

收稿日期:2024-10-31

作者简介:丁欢,女,1988年生,硕士,高级工程师,主要从事纺织服装及皮革的研究,zhiyunjia@yeah.net

通过信号接收器向用户发出警报<sup>[2]</sup>,帮助穿戴者及时采取必要的健康措施。此外,用户还可基于实时获得的心率数据,掌握自身的健康状态,并通过全面的数据分析,科学制定日常健康管理及训练计划。

作为一种集健康监测与日常穿戴于一体的新型产品,心率服代表着健康科技与可穿戴智能纺织的最新结合。随着传感器技术和智能设备的不断发展,心率服逐渐向轻量化、便携化和智能化方向发展。近年来,随着健康科技的普及和消费者健康意识的提升,心率服逐渐进入大众视野,受到广泛关注。伴随着技术的不断进步和市场的日益拓展,未来心率服有望成为大众的健康管理助手。

## 1 心率服相关部件研究进展

心率服采用的主体材料除应穿着舒适、透气和吸湿外,还须具备智能性,从而实现长期、持续且精准的心率监测<sup>[3]</sup>。心率服的关键构成部件包括服装基体、柔性织物电极、柔性生物电化学传感器等。这些部件协同作用,为穿戴者提供持续精准的心率监测服务。尤其是服装基体、柔性织物电极与柔性生物电化学传感器,它们作为心率服的核心部件,在实时监测方面发挥着至关重要的作用且发展迅猛。

### 1.1 服装基体

心率服通常采用柔软、透气、吸汗且具有一定弹性的面料制成,以确保穿戴者的舒适性与运动自由度。在设计层面,该类服装需充分考虑传感器布局、数据传输效率及穿戴者的活动需求,从而确保心率监测功能的连续性和精确性。传统心率服面料种类多样且各具特色。如:氨纶(Spandex)和莱卡(Lycra)等弹性纤维面料,它们具有优良的弹性和弹性回复性,能够紧密贴合身体曲线,适应身体的动作变化,为心率监测提供稳定可靠的支撑;尼龙(Nylon)作为一种抗皱耐用的纤维,其强度高,耐磨性及耐候性优异,由尼龙面料制备的心率服耐用性好;莱赛尔(Lyocell)纤维面料也因触感柔软舒适,吸湿排汗性好等特性,成为舒适型心率服面料的理想选择。

柔性三维布局电子皮肤、碳纳米纤维、感测纤维及形状记忆合金(SMA)纤维等前沿技术产品为心率服的发展注入了新活力。电子皮肤能够提升心率

服的贴合度与感知性;碳纳米纤维以其导电性、舒适性和耐用性著称,能够提高心率服对心率监测的精准性;感测纤维能够将心率数据转换为电信号;形状记忆合金纤维能够调节心率服的松紧度,提高穿着舒适性。纺织与材料科学的发展进步,以及新的前沿技术的集成创新,极大地提升了心率服的智能化水平、穿着舒适度及个性化体验。

#### 1.1.1 柔性三维布局电子皮肤

柔性三维布局电子皮肤是一种基于柔性电子技术的创新材料,其弹性模量与人体皮肤、肌肉等组织的相当。这种材料不仅具有良好的柔韧性与贴合性,而且能够承受各种自由形变和拉伸应力,有效减轻因摩擦等因素导致的穿着不适感,并与人体高度适应,提供精准的生理监测参数<sup>[4]</sup>。Jang等<sup>[5]</sup>推出一种柔性三维布局电子皮肤技术,该技术将柔性电子技术与三维布局设计结合,具有高柔软性和高精度特性。这种电子皮肤由50个部件构成,通过250个微型线圈网络连接,并嵌入防护硅胶中,能够模仿人体皮肤的物理特性和感知功能。该电子皮肤的创新之处在于其三维布局设计使得微型线圈与传感器的排列更灵活紧凑,从而大幅提升了柔韧性和适应性。柔软的硅胶基底能够确保心率服与皮肤紧密贴合,减少空气间隙,提高数据准确性。微型线圈如弹簧般伸缩自如,增强了耐用性。高灵敏度的传感器则能精准捕捉心率、呼吸等方面的生理数据。此外,系统采用无线供电与数据传输技术,解决了有线设备的不便捷问题,实现了数据的实时查看与分析,提升了使用便捷性和实用性。

柔性三维布局电子皮肤实现精准监测的关键在于:1)三维架构传感器仿照人体皮肤的触觉感受细胞设计,具有排列密度高和呈三维空间分布的特性,传感器与电路在皮肤内深浅分布,能够敏锐感知外部作用力,准确捕捉外界刺激;2)柔性电子元件采用柔性材料制成,能够很好地适应人体表面的曲率和形变,并通过三维布局紧密相连,形成稳定的电子电路,确保信号的准确传输和处理;3)信号处理系统基于深度学习算法等前沿技术,能够实现对心率等参数的精准识别和监测<sup>[6]</sup>。

#### 1.1.2 碳纳米纤维

碳纳米纤维兼具金属的导电性与纺织纱线的柔韧可编织特性。碳纳米纤维被织入服装中并与人体

皮肤接触时,能够形成稳定的电接触,有效传输电流,进而捕捉心脏活动释放的电信号。碳纳米纤维不仅具有强度高、导电性佳、组织相容性好、电阻低、柔软且富有弹性等优势,还完美适配传统缝纫技术,能与常规纺织材料自由结合,并且耐水洗,是制备柔软可穿戴智能心率服的优良材料。Taylor 等<sup>[7]</sup>成功将柔性碳纳米纤维缝入运动服中,实现对穿戴者心电图的持续监测。结果发现,该心率服在数据收集精度方面优于标准胸带式监测器,心电监测效果也优于医用电极监测器,且柔性碳纳米纤维能够与穿戴者的皮肤形成稳定的电接触,可作为电极与蓝牙发射器等电子设备连接,将数据传输至智能手机,或同步至便携式 Holter 监测设备。Wang 等<sup>[8]</sup>首次尝试在碳纳米纤维纺丝工艺中引入空气段,并通过重力牵引增强双壁碳纳米管纺丝流的定向性,实现了高取向度(取向因子达 0.994)、高致密度(密度为  $1.96 \text{ g/cm}^3$ )的双壁碳纳米管纤维的可控制备。测试结果显示,该纤维的电导率高达  $1.1 \times 10^7 \text{ S/m}$ ,而变温电阻系数仅为铜导线的 1/2。这种新型碳纳米纤维不仅具有优异的导电性能,还具有良好的柔韧性和可穿戴性,能够满足心率服对材料性能的高要求。然而,尽管碳纳米纤维具有优异的导电性和力学性能,但制备既满足缝纫要求又具有良好导电性的碳纳米纤维纱线,并确保这些纤维在服装中均匀分布且与皮肤稳定接触,以消除外部环境的信号干扰,是需要进一步研究解决的关键问题。

### 1.1.3 感测纤维

感测纤维作为智能纤维的一种,具有良好的导电性,能够传递和接收电信号,其因独特的感知和处理能力而在心率服中得到广泛应用。将感测纤维与普通纤维混合织制织物,不仅能够保持织物原有的纺织特性,还能赋予其电子功能,实现对心率的智能监测与数据传输。感测纤维的心率监测机制主要基于两方面:一是人体心脏活动产生的微弱电信号,这些信号能够穿透体表并被感测纤维捕捉;二是心脏跳动引发的体表血液流动、肌肉收缩等机械活动,这些动态变化同样能被感测纤维感知并转化为相应的电信号。Lin 等<sup>[9]</sup>以导电纱线和锦纶纱线作为传感织物原料,通过畦编的方法制备了一种全织物型传感器。该传感器引入了灵活的互锁结构设计,能够灵敏地感知脉搏引起的皮肤微小形变,从而实现脉

搏信号的精准获取。Taylor 等<sup>[7]</sup>开发出一款智能心电图监测 T 恤,该 T 恤由普通纤维与碳纳米纤维构成的可缝纫电极及信号传输线组成。这款 T 恤不仅具有与传统纤维织物相媲美的柔软度,而且具有金属级别的导电性能与低阻抗特性,在心电图检测的准确性方面明显优于商业设备,且经过反复洗涤后,性能仍然保持稳定。

然而,心率服在实际应用中还面临另一挑战,即确保在各种不同环境下测试数据的准确性。运动时产生的汗水、静电等因素,可能会对感测纤维的正常工作造成干扰,进而影响数据的精准性。因此,如何进一步提升心率服的环境适应性,是未来研究的重点。

### 1.1.4 形状记忆合金纤维

形状记忆合金在热刺激下能恢复其初始形态,这一特性使得形状记忆合金纤维适合用作心率服的传感器。它通过感应体温或外界热量的细微变化,触发形态的改变,进而将这些变化转换成电信号,实现心率监测<sup>[10]</sup>。SMA 纤维的监测机制主要基于其独特的形状记忆效应和导电性。人体心脏跳动时会产生微弱的电信号与机械活动,这些信号与活动能够通过皮肤接触被 SMA 纤维捕捉。具体而言,心脏跳动引起的皮肤微小形变会使 SMA 纤维发生形变,同时,凭借良好的导电性,SMA 纤维还能感知并传导心脏活动产生的电信号。这些信号被捕捉并传导至信号处理电路后,再经过放大、滤波等处理,最终转化为心率数据<sup>[11]</sup>。

SMA 纤维受到外力作用时,能够发生较大的形变而不损伤其内部结构,去除外力后,又能迅速恢复至初始形态。这种超弹性特征使得 SMA 纤维能够在心率服中有效适应身体的各种运动和形变,同时保持监测的稳定性。尽管关于 SMA 纤维直接感知身体运动和温度变化以实现心率实时监测的研究尚不多见,但伴随着智能纺织材料的发展与心率监测技术的不断进步,相信 SMA 纤维在这一领域的应用前景将十分广阔。

## 1.2 柔性织物电极

心率服中的柔性电极作为心电信号实时采集与传输的核心组件,其性能直接影响心率监测的灵敏性与准确性。随着心率服应用场景的不断拓展,电极材料需具备更强的环境适应性与持久稳定的电化

学性能。

心率服中柔性电极的嵌入方法主要有 3 种:直接编织或缝制、与纺织品直接整合及对纤维涂镀以进行导电化处理。其中,直接编织或缝制是利用导电纤维良好的导电性、生物相容性和柔软性,通过缝纫工艺将其集成到心率服中<sup>[12]</sup>。早在 21 世纪初,Coosemans 等<sup>[13]</sup>和 Catrysse 等<sup>[14]</sup>就研究发现,通过针织工艺能够将不锈钢纤维电极嵌入绷带,再整合到服装中,实现长时间的心率监测。这种方法制备的心率服能够有效降低婴儿心脏骤停的风险,为预防婴儿猝死综合征(SIDS)提供有力支持。与纺织品直接整合的柔性织物电极能够实现较复杂信号的检测<sup>[15-17]</sup>。尤其是柔性传感器阵列薄膜与纺织品的直接整合,具有明显的优势。该方法借助微机电系统(MEMS)在晶圆上制作柔性传感器阵列薄膜,然后通过导电纤维或特定的缝纫技术将传感器阵列薄膜固定在纺织品上。对纤维涂镀以进行导电化处理方法中,常用的导电涂镀材料有聚酰亚胺(PI)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)及聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)等高分子有机材料<sup>[18]</sup>。Yu 等<sup>[19]</sup>将聚丙烯酸(PAA)掺入经氢醌(HQ)改性的聚(3,4-乙撑二氧噻吩)/聚(苯乙烯磺酸)(HQ-PEDOT/PSS)高导电复合材料中,研究结果显示,PAA 能够作为导电 PEDOT 材料和绝缘 PSS 材料间的空间位阻屏障,提高 HQ-PEDOT/PSS 高导电复合材料的稳定性,使其对人体心电图信号的监测高度灵敏并且长期稳定。何朵朵等<sup>[20]</sup>基于棉纤维的羟基功能化特性,创新性采用化学接枝法将  $\gamma$ -巯丙基三甲氧基硅烷(MPTS)接枝到棉纤维上,再通过化学镀银技术,在织物表面沉积银颗粒,成功研制出耐用性强的棉织物电极(Ag/M-CF)。对该电极的系列测试(包括银含量、耐洗性能、拉伸性能和弯曲性能测试)结果显示,其在洗涤、弯曲、氧化和拉伸后仍保持良好的导电性,并且具备一定的抗菌性能。最后,将该织物电极应用到阿木(深圳)新科技术有限公司开发的心电监测服上,成功实现了对穿戴者不同运动强度下心电数据的精准监测。

### 1.3 柔性生物电化学传感器

柔性生物电化学传感器能够嵌入心率服中,实现持久、连续的心率监测。凭借出色的柔韧性,柔性生物电化学传感器能够很好地适应人体的各种动作

和姿势,确保穿戴过程舒适且无束缚感。同时,这类传感器材料通常具有良好的生物相容性,能够减少皮肤刺激和过敏反应。已有研究人员通过刺绣工艺将低成本的柔性生物电化学传感器嵌入 T 恤中,并利用心电图测试技术捕捉心脏的电生理活动。该电极能够连续记录心脏动态,并清晰呈现包括 Q、R、S 等关键波形在内的心电图信号<sup>[21]</sup>。

柔性生物电化学传感器的另一大优势在于可定制性,能够根据使用场景定制其形状,从而适应各种复杂场景,实时捕捉细微生理变化,显著提升可穿戴柔性生物电化学传感器的舒适性和监测精度<sup>[22]</sup>。此外,这类传感器材料还能够与多种材料兼容,加之电子纺丝、激光诱导石墨烯、喷墨打印、3D 打印等技术的发展应用,其生产效率大幅提升<sup>[23-26]</sup>。Chao 等<sup>[27]</sup>报道了一种集可穿戴、透气、可降解、高灵敏度于一体的 MXene/蛋白质纳米复合材料基压力传感器。该传感器由 MXene-丝纤蛋白(MXene-SF)薄膜感测层与 MXene 墨水-SF 梳状电极层通过面对面组装技术整合而成。该传感器的感测范围广,灵敏度在 1.4 ~ 15.7 kPa 时达 298.4 kPa<sup>-1</sup>、在 15.7 ~ 39.3 kPa 时达 171.9 kPa<sup>-1</sup>,响应和恢复时间非常短,分别为 7 ms 和 16 ms,且使用超过 10 000 次后仍具有非常好的稳定性,是一种兼具良好透气性与生物相容性的可降解柔性生物电化学传感器。

柔性生物电化学传感器的发展历程见证了织物电极从简单到复杂、从单一到多元的演变。随着新材料、新工艺及新应用领域的不断涌现,柔性生物电化学传感器将在未来扮演更为重要的角色。然而,柔性生物电化学传感器的发展亦面临稳定性、精确度、可靠性及大规模生产等方面的技术挑战。未来,随着技术的持续进步与创新,柔性生物电化学传感器有望在更多领域得到应用和发展。后续研究将聚焦探索应用新型材料提升传感器的综合性能,开发更为高效且成本低的柔性生物电化学传感器制备技术等。

## 2 心率服的应用

心率服作为一种结合了科技与健康理念的可穿戴设备,能够实时监测和记录用户的心率,在促进健康管理、提供训练指导等方面发挥着不可忽视的

作用。

## 2.1 健康管理

### 2.1.1 早期预警

心率是衡量人体健康状况的重要指标之一。心率服通过持续的心率监测,及时发现心率异常及潜在健康问题的早期信号,及时提醒用户寻求医疗关注。心率服不仅能够监测心率,还能通过分析心率的变化趋势,结合其他生理参数(如血压、血氧饱和度等),综合评估用户的健康状况,提前预警心血管疾病、贫血、感染等多种潜在疾病。对于运动爱好者而言,心率服同样具有重要的早期预警功能。在高强度运动中,心率服能够实时监测用户的心率变化,并在心率值超出安全范围时发出警告,预防运动损伤及过度运动风险。

### 2.1.2 日常监测

心率服适合日常穿戴,能够持续监测用户心率变化,为心血管疾病患者及健康老年群体等提供便捷的日常健康监测方案,同时辅助高血压、糖尿病等慢性疾病的管理,为医生提供准确的数据支持。Sun等<sup>[28]</sup>开展了一项涉及近万名高血压患者的多中心回顾性随访研究,结果发现:高血压患者的心率若小于65次/min或大于等于80次/min,其发生主要不良心血管事件的风险会显著增加,且这在65岁及以上老年群体尤其是男性中尤为明显;将心率控制在65~79次/min,有助于降低高血压患者的主要不良心血管事件风险。此外,研究还显示,心率与主要不良心血管事件发生风险之间存在U形曲线关系,当心率为72次/min时,风险降至最低。因此,对于高血压患者,尤其是男性和老年群体,持续监测并管理心率对于改善高血压预后具有重要意义。

### 2.1.3 远程医疗

心率服能够实时监测患者的心率、心电等生理参数,并借助无线通信技术,将这些数据传输至远程医疗平台或医生的设备上,从而为患者提供定制化医疗指导与建议,提升医疗服务的便捷性和精准性。此外,5G、人工智能(AI)等技术赋能下,心率服在远程医疗方面的应用将更加高效与智能,其不仅能够将数据传输给家庭成员或社区医护人员,还促进了家庭与社区间的健康信息共享与协同管理。邱华云等<sup>[29]</sup>探讨了家庭远程血压/心率监测在左心力衰竭(心衰)合并高血压患者院外管理中的应用效果。

该研究选取2020年7月—2021年6月在粤北人民医院心血管内科住院确诊的近400例左心衰合并高血压患者作为研究对象,根据是否接收家庭远程监测,将其分为远程监测组(112例)和常规随诊组(278例)。远程监测组患者每天早晚测量血压和心率并上传数据,医护团队基于接收的这些数据提供指导。常规随诊组患者自行测量并记录血压和心率数据,定期门诊随诊。研究结果显示,家庭远程血压/心率监测有助于左心衰合并高血压患者出院后更好地监控血压和心率,延长患者再入院时间,降低再住院率。

### 2.1.4 睡眠质量评估

心率服能够监测用户睡眠过程中的心率变化,帮助用户了解各睡眠阶段的身体状况,评估并改善睡眠质量。庞耕<sup>[30]</sup>利用心动描记法(BCG)信号对睡眠质量进行客观评估,旨在及时发现并缓解失眠问题,促进个人健康管理。该研究通过解析BCG信号,提取心率等与睡眠状态紧密相关的生理参数,并结合匹兹堡睡眠质量指数(PSQI)评价方法,运用多种生理指标提取算法对受试者进行全面的睡眠质量评估。研究结果表明,基于BCG信号的睡眠质量评估结果与受试者自主记录的结果高度吻合,评估分数的统计学差异不显著,这充分证实了该评估方法的有效性与便捷性。研究成果为日常化、家庭化的睡眠监测及睡眠质量评估提供了更多的可能性与技术支持。

## 2.2 运动健身

### 2.2.1 个性化训练

实时监测运动过程中的心率变化,能够为精准调整训练强度、科学制定训练方案等提供数据支撑。通过对心率数据的深入分析,还能精确划分不同的训练区间,协助运动员选定适宜的训练强度,实现个性化训练计划的制定。

### 2.2.2 运动安全

心率服能够帮助运动员和教练评估运动强度和负荷,确保训练活动在安全范围内进行,避免因过度训练引发的身体疲劳和损伤,降低运动猝死的风险。同时,心率服还能记录运动员在运动过程中的能量消耗情况,为合理制定训练计划与营养补充策略提供数据支持。

Nuutila等<sup>[31]</sup>分析了高强度训练与低强度训练

对业余跑步者夜间心率变异性 (HRV) 的影响。研究中,受试者被分成 2 组:一组是 15 名经历了 2 次相同低强度训练的跑步者,另一组是 23 名参与了 3 000 m 测试的跑步者。研究结果显示,低强度训练对受试者的夜间 HRV 指标无明显影响。相比之下,参与 3 000 m 高强度测试后,受试者的夜间心率明显上升,同时 HRV 明显下降,表明高强度训练可能会对心血管恢复能力产生不利影响。

### 2.3 军事训练

#### 2.3.1 体能训练评估

心率数据是评估军事体能训练中训练强度和负荷的重要指标。在多样化的军事体能训练项目中,不同的训练内容和强度对军人体能有着不同的要求。借助心率服采集和提供的数据,能够精确评估军人在不同训练阶段的负荷强度与心率动态响应,进而科学制定训练计划,最大化训练效果,同时预防因训练过度引发的身体损伤和意外情况。此外,在军事体能训练结束后,还能基于心率数据了解军人的身体状况,评估其恢复能力。心率监测因无创、易操作、易分析等特性,已成为教练员和运动员评估运动强度、疲劳程度的重要手段。在训练计划的制定中,需综合考虑对频率、持续时间与强度这三大要素的有效监控。王大磊等<sup>[32]</sup>探讨了心率与最大摄氧量在最大强度运动下的线性关系。因最大摄氧量是能量消耗的关键指标,故可以通过心率与最大摄氧量的线性关系推算运动过程中的能量消耗情况。因此,通过监测心率储备百分比或最大心率百分比,能够简便有效地估算运动强度。心率监测技术的稳定性与快速响应特性,使其成为运动强度监控的通用方法。

#### 2.3.2 紧急救援

在紧急救援场景中,心率数据对于评估伤者健康状况、判断病情危急程度及制定救援方案等至关重要。一方面,医护人员可通过心率数据迅速了解伤者的心脏功能状态,为是否有必要实施心肺复苏等紧急救治措施及规划后续救治方案提供科学依据,有效提升紧急救援的效率和质量。心率服能够通过无线传输技术将实时监测到的生命体征数据传送给远程医疗中心或专家团队,以便他们远程分析伤者的病情,并迅速给出相应的治疗建议。另一方面,对于普通民众而言,心率服还能够增强他们的自

救互救能力。突发紧急状况下,若有人突然倒地或丧失意识,旁观者可利用心率服快速获取伤者的生命体征信息,并依据这些信息采取初步急救措施,同时等待专业救援人员的到来。这一过程不仅抓住了救援的宝贵时间窗口,还极大地提高了救援效率与伤者的存活率。

### 2.4 其他领域

#### 2.4.1 娱乐竞技

在电子竞技、马拉松等娱乐性竞技赛事中,心率服能够帮助参赛者实时监测自身生理状态,据此灵活调整比赛策略,提升整体竞技水平。对于观众而言,大屏幕实时展示运动员的心率数据,不仅直观反映了选手的身体状况与赛事的激烈程度,还极大地增强了他们的沉浸感与互动体验,提高了娱乐竞技的观赏性。此外,还可在赛事结束后对心率服采集的数据进行分析与展示,为科学评价运动员的表现提供可靠的依据。

#### 2.4.2 运动生理学研究

心率服在运动生理学研究中发挥着重要作用。一方面,心率服能够为科研人员提供准确、连续的心率数据,为运动生理学研究奠定基础。另一方面,心率服作为一种智能可穿戴设备,其舒适度与合体性对于用户的接受度和使用体验至关重要。科研人员可以借助心率服展开人体工程学研究,分析不同材质、结构和尺寸的服装对心率监测效果的影响。如, Mohammadalizadeh 等<sup>[33]</sup>通过对格斗运动案例的深入研究,结合运动学与生理学分析,揭示了该运动对人体产生的广泛影响。研究采用实时监测参赛者心率变化的先进技术,精准捕捉他们在激烈运动中心血管系统的动态反应及其所承受的负荷。这一方法不仅有助于深入理解运动对心脏健康的潜在益处与风险,还揭示了运动员在面临极限体力挑战时的生理极限状态。研究结果显示,在对决的尾声阶段,参赛者的心率水平突破了基于其年龄预测的最大安全心率界限。

## 3 结束语

心率服作为一种集现代科技与健康理念于一体的可穿戴设备,在健康管理、运动健身、军事训练及娱乐竞技等领域展现出巨大的应用潜力和广阔的发

展前景。近年来,得益于高精度传感器、人工智能大模型及云端分析技术的深度融合,心率服已实现全天候心率监测、异常预警及个性化健康建议等功能,极大地提升了用户的体验与健康管理水平。值得一提的是,深度融合技术的应用使心率服的监测精度与实时性大幅提高,使其能够精准识别并分析用户的心率变化模式,并根据用户的实时运动状态调整监测参数,从而确保数据的准确性与有效性。

随着消费者健康意识的日益增强和技术的持续革新,心率服在运动健身、医疗保健及个性化健康管理等领域的应用范围将不断拓展。未来,有望通过持续的技术创新与跨界合作,进一步拓宽心率服的应用场景,为用户带来更加精准、个性化的健康管理服务。



期刊采编平台

中国知网下载

### 参考文献

- [ 1 ] 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 2022》概要[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2023, 31(7): 485-508.
- [ 2 ] SALIM F, PROHASKY D, BELBASIS A, et al. Design and evaluation of smart wearable undergarment for monitoring physiological extremes in firefighting [ C ] // Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers: Adjunct Program. Seattle, Washington: ACM, 2014: 249-254.
- [ 3 ] 胡亦雯, 唐虹, 葛睿. 健康监测智能服装的发展现状及趋势[J]. 针织工业, 2023(6): 82-85.
- [ 4 ] 孔霞, 宋浩冉, 宋佳音, 等. 多维感知柔性电子皮肤的发展现状 [ J ]. 材料导报, 2022, 36 ( 11 ): 194-204.
- [ 5 ] JANG K I, LI K, CHUNG H U, et al. Self-assembled three dimensional network designs for soft electronics [ J ]. Nature Communications, 2017, 8: 15894.
- [ 6 ] LEI M, FENG K, DING S, et al. Breathable and waterproof electronic skin with three-dimensional architecture for pressure and strain sensing in nonoverlapping mode [ J ]. ACS Nano, 2022, 16 ( 8 ): 12620-12634.
- [ 7 ] TAYLOR L W, WILLIAMS S M, YAN J S, et al. Washable, sewable, all-carbon electrodes and signal wires for electronic clothing [ J ]. Nano Letters, 2021, 21(17): 7093-7099.
- [ 8 ] WANG H Z, JIAO X Y, GAO Z Q, et al. Highly conductive double-wall carbon nanotube fibers produced by dry-jet wet spinning [ J ]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(39): 2404538.
- [ 9 ] LIN Z M, CHEN J, LI X S, et al. Triboelectric nanogenerator enabled body sensor network for self-powered human heart-rate monitoring [ J ]. ACS Nano, 2017, 11(9): 8830-8837.
- [ 10 ] 龙前生, 王欢, 秦发祥, 等. 一种 Ni-Mn-Ga 系列形状记忆合金微米纤维的制备方法: CN107900297B [ P ]. 2019-10-15.
- [ 11 ] 蒋思琪, 邓咏梅. 心脏活动监测智能服饰的应用与发展趋势 [ J ]. 纺织科技进展, 2023(4): 6-9.
- [ 12 ] 关芳兰, 赵芳菲, 周一帆, 等. 一种柔性织物心电电极及其制备方法和应用: CN116421190A [ P ]. 2023-07-14.
- [ 13 ] COOSEMANS J, HERMANS B, PUERS R. Integrating wireless ECG monitoring in textiles [ C ] // The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Seoul: IEEE, 2005: 228-232.
- [ 14 ] CATRYSSSE M, PUERS R, HERTLEER C, et al. Towards the integration of textile sensors in a wireless monitoring suit [ J ]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 114(2/3): 302-311.
- [ 15 ] 孙玥. 柔性压电薄膜传感器设计及其在连续血压测量中的应用研究 [ D ]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.
- [ 16 ] 于江涛. 柔性力敏薄膜材料制备及压力传感器阵列的研制 [ D ]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [ 17 ] 李亚雷, 刘艳花, 刘严欢, 等. 一种基于柔性透明传感器对人体心跳进行监测的系统: CN111436922A [ P ]. 2020-07-24.
- [ 18 ] LIU F, HAN J L, QI J, et al. Research and application progress of intelligent wearable devices [ J ]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2021, 49 ( 2 ): 159-171.
- [ 19 ] YU Y J, JUNG Y C, KIM Y K, et al. A highly conductive polymer composite with enhanced stretchability and long-term stability for wearable electronic applications [ J ]. Polymer, 2023, 282: 126191.

- [20] 何朵朵, 钱丽颖, 王丽, 等. 用于心电信号捕捉的高耐用性棉织物电极[J]. 精细化工, 2022, 39(11): 2241-2248.
- [21] ALSHABOUNA F, LEE H S, BARANDUN G, et al. PEDOT:PSS-modified cotton conductive thread for mass manufacturing of textile-based electrical wearable sensors by computerized embroidery [J]. Materials Today, 2022, 59: 56-67.
- [22] CHEN S W, QI J M, FAN S C, et al. Flexible wearable sensors for cardiovascular health monitoring [J]. Advanced Healthcare Materials, 2021, 10 ( 17 ): e2100116.
- [23] 汪婉婉, 赵蒙蒙. 传感器件在智能监测服装中的应用[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(1): 8-14.
- [24] 窦颖艳, 姚俊. 高性能可穿戴式柔性压力传感器的制作与检测[J]. 电子器件, 2023, 46(6): 1680-1684.
- [25] 郑姿辰, 唐宁, 王金凤. 导电纱线及柔性传感器耐久性影响因素研究[J]. 丝绸, 2024, 61(1): 52-60.
- [26] 徐滔, 张晓燕. 智能可穿戴技术在服装设计中的应用与挑战[J]. 服装设计师, 2024(4): 67-70.
- [27] CHAO M Y, HE L Z, GONG M, et al. Breathable  $Ti_3C_2T_x$  MXene/protein nanocomposites for ultrasensitive medical pressure sensor with degradability in solvents [J]. ACS Nano, 2021, 15(6): 9746-9758.
- [28] SUN N L, CHEN Y Y, XI Y, et al. Association between heart rate and major adverse cardiovascular events among 9 991 hypertensive patients: a multicenter retrospective follow-up study [J]. Frontiers in Cardiovascular Medicine, 2021, 8: 741784.
- [29] 邱华云, 巫艳芳, 宋珈名, 等. 基于家庭远程血压/心率监测系统的医院外心衰管理效果观察[J]. 现代医药卫生, 2024, 40(9): 1467-1472.
- [30] 庞耕. 基于 BCG 信号的睡眠质量评估方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
- [31] NUUTTILA O P, SEIPÄJÄRVI S, KYRÖLÄINEN H, et al. Reliability and sensitivity of nocturnal heart rate and heart-rate variability in monitoring individual responses to training load [J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2022, 17 ( 8 ): 1296-1303.
- [32] 王大磊, 申玉波, 欧阳海宁. 心率监测在体能训练监控中的应用进展及问题[J]. 军事体育学报, 2019, 38(3): 120-124.
- [33] MOHAMMADALIZADEH M, JAISWAL S, SEMKEN S, et al. Kinematic and physiological analysis of medieval combat sport using motion analysis, blood lactate measurement, and heart rate monitoring: a case study [J]. Sensors, 2024, 24(11): 3443.

(上接第 15 页)

- [17] 邹萌萌, 刘德铭, 周朝钢. 气体过滤用熔喷材料过滤性能的优化探讨 [J]. 产业用纺织品, 2024, 42(9): 9-14.
- [18] 罗先建, 魏俊富, 杜晓, 等. 高吸水非织造布的制备及性能研究 [J]. 化工新型材料, 2017, 45(3): 222-224.
- [19] 王刚毅. 溶液喷射甲基丙烯酸酯系复合交联结构纤维及其吸油性能研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2015.

欢迎投稿《产业用纺织品》

<https://cyyf.cbpt.cnki.net>    [techtex@dhu.edu.cn](mailto:techtex@dhu.edu.cn)