

基于可穿戴与可植入技术的人体健康物联网研究进展

梁峻阁^{1,2}, 宋怡然¹, 孙杨帆³, 计樱莹³, 潘力佳², 施毅²

(1. 江南大学物联网工程学院电子工程系, 江苏 无锡 214122;

2. 南京大学电子科学与工程学院先进微结构协同创新中心, 江苏 南京 210093;

3. 无锡市中心康复医院, 江南大学附属精神卫生中心, 江苏 无锡 214122)

摘要: 健康人群通过在日常生活中对各项生理参数进行监测, 能够在疾病早期预警身体异常和疾病, 从而提高个人生活质量, 减轻国家公共卫生医疗资源压力, 因此, 亟须研发基于人体物联网的可穿戴与可植入传感器系统。以基于体液和电信号的生物信息检测为切入点划分传感技术, 并引入自供能、近端通信等人体健康物联网的关键技术进行讨论。最后探讨了健康数据管理与疾病诊断预防领域的技术进展和产业应用, 尝试构建了基于可穿戴与可植入技术的人体健康物联网概念。

关键词: 物联网; 可穿戴; 可植入; 柔性电子器件

中图分类号: T19

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00343

Research progress of human health IoT based on wearable and implantable techniques

LIANG Junge^{1,2}, SONG Yiran¹, SUN Yangfan³, JI Yingying³, PAN Lijia², SHI Yi²

1. Department of Electronic Engineering, School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

2. Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3. Wuxi Central Rehabilitation Hospital, Affiliated Mental Health Center of Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract: Monitoring various physiological parameters in healthy people daily life can provide early warning of abnormalities and diseases, as well as reduce the pressure on national public health and medical resources. Hence, it is necessary to develop human health IoT system based on wearable and implantable sensors. The bioinformatics detection based on body fluids and electrical signals as the entry point was used to divide sensing technologies, and the key technologies such as self-powered and near-end communication for human health IoT were introduced for discussion. Finally, the technological progress and industrial application in the field of health data management and disease diagnosis and prevention were explored, and the concept of human health IoT based on wearable and implantable technologies was attempted to be constructed.

Key words: IoT, wearable, implantable, flexible electronics

0 引言

物联网系统的基本特征包含全面感知、可靠传递和智能处理三大层面, 将传感器系统、通信模块、

供电模块等以穿戴、植入的方式与人体结合, 可连续长期监测人体生理参数, 实现医疗个性化, 打造面向个体健康数据管理的物联网医疗数据监控系统^[1-3]。随着可穿戴与可植入技术的不断发展, 近年

收稿日期: 2022-04-19; 修回日期: 2023-04-21

通信作者: 梁峻阁, jgliang@jiangnan.edu.cn; 潘力佳, ljpani@nju.edu.cn; 施毅, yshi@nju.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2021YFA1401103); 2022 年度无锡市太湖人才计划创新领军团队项目 (No.1096010241230120)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFA1401103), The Innovative Leading Talent Team supported by 2022 Wuxi Taihu Talent Program (No.1096010241230120)

来已经构建起从皮肤到器官、从头部到脚部、从诊断到治疗全方位多层次的人体健康物联网监控系统。以“可穿戴/wearable”和“可植入/implantable”为关键词分别在中国知网和 Web of Science 对中外文献进行检索并分析，得出 2013—2021 年可穿戴与可植入研究热度趋势，如图 1 所示，可以看出，近年来国际对可穿戴传感器系统的研究热度呈上升状态。2018 年以前可植入传感器的研究热度显著高于可穿戴传感器，近年来呈现回落迹象。国内对可穿戴传感器的研究热度明显高于可植入传感器，近些年来两类研究趋势相对平稳。

柔性电子器件具有可弯曲、可拉伸等特点，能够贴合人体曲线，避免硬质材料对人体组织的刺激与损伤，能够物理无感地整合到皮肤表面甚至植入人体器官组织，在人体可穿戴与可植入领域体现独特优势^[4]。柔性生物电子器件的大规模应用需要对电学性能、机

械性能和生物相容性等进行综合研究改进，提升系统长期使用的舒适性和安全性^[5-6]。现行的导电电极多采用纳米银方案制备，研究表明该方案具有一定的毒性^[7]。目前，该领域研究热点为提升有机聚合物材料的导电性能以及在柔性电子器件中实现应用，通过对其物理结构和机械性能的进一步优化，有望同步突破舒适性、安全性和电学特性等限制^[8]。此外，电子材料所产生的细胞毒性、皮肤刺激、致敏反应等影响生物相容性的问题仍需要进一步研究。

人体健康物联网监测与调控系统如图 2 所示，包括以可穿戴式可植入器件为主的传感器检测模块、人体近端通信模块、自供电模块、数据处理模块、主动调控模块等。对人体近端通信模块的研究既包含对传统有线、无线通信模块的小型化研究^[9]，又包含对柔性无源天线的研究^[10]。当前对自供电模块的研究主要集中在纳米发电机^[11]、柔性光能材料^[12]和基于温

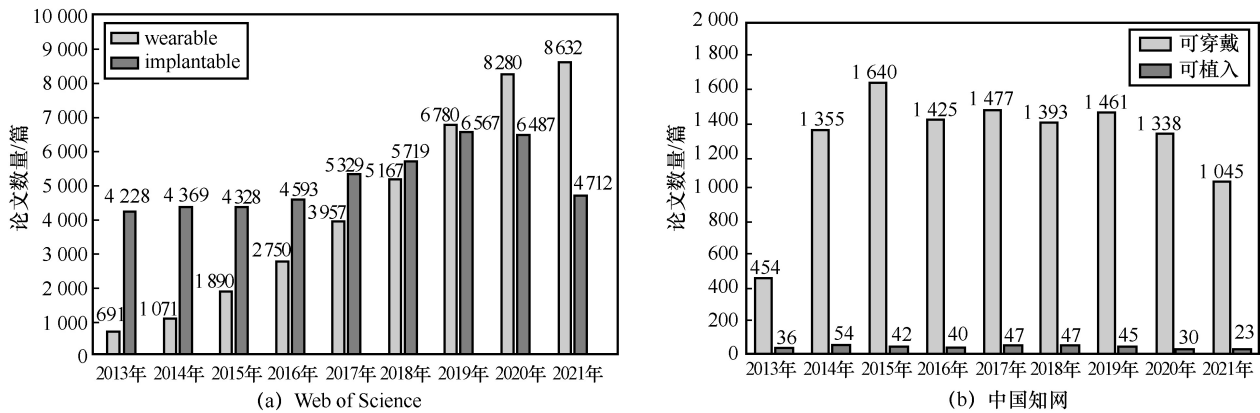


图 1 2013—2021 年可穿戴与可植入研究热度趋势

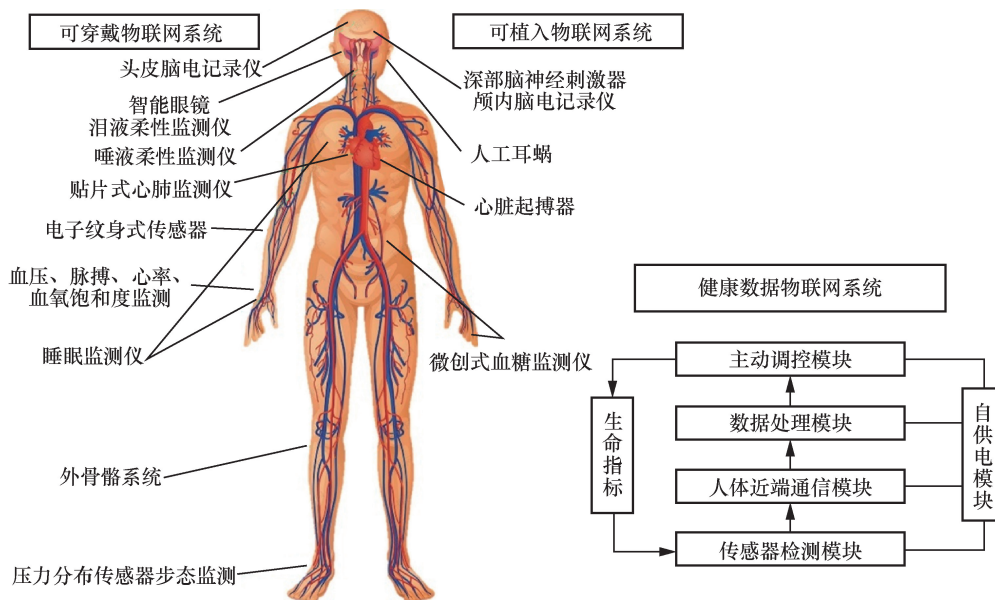


图 2 人体健康物联网监测与调控系统

度梯度的能量收集方案等方面^[13-14]，其中纳米发电机通过摩擦等形式高效收集人体运动动能并持续转化为电能驱动系统工作，是一种不受限于环境的自供电解决方案^[15-16]。

可穿戴与可植入人体健康物联网产品经过迅速发展，由单一监测方案发展到一体化多功能监测。随着移动通信设备的高度普及和通信效率的提高，结合可穿戴与可植入监测设备采集的生理特征参数，人体健康物联网产品可为用户提供高清、流畅的医生会诊等服务，应用于国内外的人体健康监测领域，逐渐改变人们的健康监测方式。美国高通公司开发了一款基于云服务的物联网系统，能够与不同的医疗 App 对接，存储个人医疗数据^[17]。用户使用该物联网系统能够共享家人的健康情况并将其发送给医生实现远程医疗。任何包含蓝牙或 Wi-Fi 模块的医疗设备都可以通过 2 NET 物联网系统连接到用户的智能设备上，并将数据存储到云端实现个体健康数据管理。我国企业在人体健康监测领域进步显著，小米、华为等公司研发了多款可穿戴人体健康物联网产品，如智能手表、智能手环等设备，通过日常佩戴采集用户的健康信息^[18]。此外，专门针对老年人设计研发了智能手表，子女可在手机上监测其健康状况。此外，该设备还具有防止走失定位功能、防摔倒和突发心脏病自动报警等功能^[19]。此类智能设备通过与物联网系统结合实现了健康监测与远程医疗，为人体健康的主动监测提供了新手段。

本文针对物联网技术，尤其是基于可穿戴与可植入技术，对人体健康监测管理领域的研究进展进行了综述，主要包括：生物信息检测、健康数据管理与疾病防治。

1 生物信息检测

本节聚焦于应用在人体健康监测领域中的生物信息检测物联网系统，介绍了使用可穿戴与可植入物联网设备进行的生物信息检测的实例。从生物体液检测和生物电信号监测两方面对可穿戴物联网系统（如汗液监测仪），以及可植入物联网系统（如脑机接口）等人体健康物联网系统进行综述。讨论了生物信息检测物联网系统的发展前景。

1.1 生物体液检测

生物体液包括血液、间质液、汗液、泪液、唾液等，其组成成分与含量可用于临床表征人体的多项生理参数。通过研发可穿戴与可植入传感器与物联网系

统提取生物体液并分析其组成成分，可用于对人体健康指标的量化分析或长期监测^[20]。汗液中含有电解质、代谢物、氨基酸、蛋白质和激素等，可以表征人体的代谢性疾病、醉酒程度和血糖水平^[21-22]。以血糖监测为例，糖尿病患者一般采用指腹取血结合血糖仪监测，根据病情需要每天测试 4~7 次，频繁的操作会给患者带来严重不适，也存在细菌感染的风险，此外监测过程的不连续性无法确保患者及时察觉突发危险状况^[23-24]。

基于电化学双通道设计汗液血糖监测系统，通过离子导入方式改变组织液渗透压，调节血液与组织液渗透和重吸收平衡关系，驱使血糖定向渗透到皮肤表面指定位置，基于可穿戴传感器模块对血糖水平进行实时监控评估，并结合自动注射胰岛素泵实现血糖水平的监测与控制一体化，是典型的物联网系统工作模式^[25]。该技术路线仍存在如下问题：首先，通过施加电流提取汗液的技术手段可能对皮肤造成灼伤；其次，该检测识别程度目前尚未达到侵入式血糖检测的水准，美国食品与药物管理局（FDA, food and drug administration）仅建议该方案作为血糖监测的辅助设备使用。

采用贴片微针阵列以微创形式实现高精度的血糖实时监测，该微针尺寸范围恰好可穿过角质层而不触及痛觉神经。微针根据其物理形态分为固体微针、中空微针、可溶性微针、涂层微针等，分别在提取效率、生物相容性、操作便捷等方面体现出各自的优势^[26-27]。此外，微针兼具给药能力，在皮肤表面构建给药通道，使药物到达皮下毛细血管并被吸收，有助于提高药物给药效率，构建诊断—治疗一体化的微针系统^[28]。通过加工高为 10~20 000 μm 、直径为 10~50 μm 的贴片微针阵列，贴附于皮肤表面使用，用于提取血液或组织液样本^[29-30]。组织液不仅含有与血液相似的蛋白质、小分子和 RNA，也包含比血液更丰富的特定生物标志物，如皮肤类疾病等^[31-33]。例如，Liu 等^[34]通过 3D 打印制备微针阵列生物传感装置进行血糖的连续监测。该工作使用面投影微立体光刻技术打印了 9×9 的微针阵列，单个微针的结构为锥形。微针阵列确保工作电极和皮肤之间有充分的接触面积，通过减小器件尺寸，形成稳定的传感器—皮肤界面。微针生物传感器采用双电极结构，每个电极占据一定的微针阵列，电极上固定葡萄糖氧化酶。当微针插入小鼠皮肤真皮层时，在皮下葡萄糖的作用下，工作电极上的酶促

反应产生 H_2O_2 ，从而产生电信号进行传感。该生物传感装置已经实现了糖尿病小鼠皮下葡萄糖水平的连续实时监测，结果与商业血糖仪的监测水平相当。该微针生物传感器如果结合物联网技术，将监测到的电信号转换为可以实时观测到的数据，有望为皮下电子皮肤监测糖尿病患者的血糖提供有效途径，实现生物体液实时监测。

1.2 生物电信号监测

人体组织通过控制细胞级别的离子分布产生规律性的电信号，进而对人体活动包括生命状态、运动、认知、记忆等进行控制，对外体现为脑电、心电、肌电等微弱的电信号^[35]。以脑机接口（BMI, brain-machine interface）为例，人脑在外界刺激、思维活动、神经性疾病等状态下，脑功能活动在大脑皮层表面产生电压为几百微伏的低频脑电信号。脑机接口技术可分为侵入式与非侵入式两类实施方案^[36-37]，在神经系统疾病的临床辅助诊断中普遍被应用，如癫痫、中风、帕金森、脊髓损伤等^[38-40]。相比于图像类诊断方案（如 CT、MRI、SPECT 等），脑电图（EEG, electroencephalography）对大脑空间信息的识别能力较弱，但其数据记录在时间上具备连续性，且对使用者的活动状态无严格限制^[41]。使用人员可以在不影响其生活的前提下长期佩戴脑电采集设备，甚至长达数周时间连续记录脑功能动态活动，提升记录到猝发性事件或者间歇性癫痫放电的概率，从时域维度进一步了解脑功能状况，揭示神经疾病病理、生理状态及其活动特性，为辅助诊断治疗神经或精神类疾病等提供重要数据参考^[42]。

侵入式脑机接口通过手术将电极植入大脑皮层或深部特定位置，所采集信号的空域时域信息还原度高，且空间信息相对明确^[43-44]。鉴于脑机接口技术的巨大潜力，产业界也开展了大量研究，其中马斯克的 Neuralink 公司研发了脑机接口设备，用于治疗精神分裂症和记忆力丧失等相关精神疾病^[45]。美国 BrainGate 公司研发了首款 FDA 批准的大脑皮层植入式电极，面向中风、渐冻症等神经类疾病展开治疗^[46]。

非侵入式脑机接口在医学康复保健领域应用广泛，在治疗精神疾病、运动障碍等方面发挥了重要作用^[47]。与其他手段相比，脑电记录能够更充分、更真实地反映大脑的情感活动，提取并分析脑电信号的时频特性可以对愉悦、愤怒、恐惧、平静等情绪进行判别分析，用于辅助研究精神类疾病的发病

机制。在康复治疗环节，基于脑机接口实施精神反馈训练，医生可观测其治疗手段对大脑意识形态的实时影响，在精神类患者的治疗中发挥积极作用^[48]。脑出血、脑卒中、脑损伤等经常导致不可逆的机体运动障碍，给患者的生活带来极大影响^[49-50]。通过脑机接口技术直接获取其运动意图，对假肢或外骨骼进行控制，可辅助改善其生活状态^[51]。此外，构建康复性脑机接口，施加反馈刺激，增强神经元突触间的联系，能够重塑受损的神经系统^[48]。

此外，本团队研发了一款低功耗、高增益、在 1 V 工作电压下同时提供高跨导和低于 60 mV/dec 开关的柔性有机薄膜晶体管（OTFT, organic thin film transistor）^[52]。将该 OTFT 应用于可穿戴物联网设备的心电信号检测中，可以将人体生理信号放大 900 倍，用于监测临床设备检测不到的微弱的心电图波。本团队目前正在利用雷达开发监测呼吸和心跳的物联网设备，将持续关注并深耕于人体健康物联网领域。

1.3 生物信息检测物联网系统的发展展望

用于生物信息检测的可穿戴与可植入物联网系统仍面临许多挑战。例如，电子纹身式传感器面临着以下问题。第一，电子材料不能选用刚硬的，要用柔性材料保证身体运动时材料可以像皮肤一样拉伸。在材料方面要实现材料自修复与可生物降解等功能。第二，需要将电子皮肤的材料做成可以感受到不同物体的人造皮肤。第三，需要通过物联网系统实现信号的接收、处理和输送，从而将人造皮肤收集的信号与人体接合。

近年来，学者们已经研究出一系列具有拉伸性、自修复性、可降解的材料，下一步需要做的是提高这些材料制作的传感器的检测灵敏度以及分辨外界信号的能力。已经通过在小鼠体内植入电子皮肤证实了人造皮肤可以和生物体系相容，仍需研发生物相容性更好的材料。由于材料要与人体接触，在真正使用前，材料的稳定性、安全性、细胞毒性、皮肤刺激、致敏反应、对人体是否有害等问题都需要很长的时间来验证。同样，这些问题也存在于生物电信号监测的可植入物联网系统（如脑机接口）的研究中。脑电信号自大脑皮层或深部产生，向外传输过程中不同区域的脑电信号彼此交叉干扰，从而丢失大量空间信息^[53-54]。穿越路径中的脑脊液、硬脑膜、颅骨、肌肉、皮肤等高损耗生物介质进一步模糊了脑电信号的有效信息，此外头皮表

面采集脑电信号易受到肌电、眼电、心电等干扰，因而导致非接触式方案提取信号信噪比低、精度差。而有创式植入存在一定的感染风险，主要用于对短期难治性神经疾病的手术监测和调控^[55]。因此，在实际应用中应选择合适的治疗方案。可穿戴与可植入的物联网系统有无线供电和储电系统供电两种方式，未来可能实现利用人体的汗液作为导电质进行自供电。解决上述问题对可穿戴与可植入物联网系统在生物信息检测领域大规模应用起着重大的作用。

2 健康数据管理与疾病防治

近年来，人们生活水平不断提高，平均预期寿命延长，社会老龄化加速，打造面向个体健康数据监测的物联网系统成为医疗技术发展的新趋势。人体健康物联网的数据管理与疾病防治如图 3 所示，健康人群基于可穿戴传感器系统对日常生活中各种生理参数进行监测管理，贯彻“主动健康”理念。对于重大疾病，如心脑血管疾病、肿瘤等，其发病早期往往难以被觉察而导致病情加重，造成患者痛苦或危及生命，给公共卫生资源带来巨大负担，通过个性化的医疗监控系统，可以在疾病早期诊断并预警。患有无法根治性疾病的患者，在人体健康物联网系统支持下感知、记录、分析、调控、治疗疾病，维持健康状态，避免突发状况并有效改善生命质量。本节聚焦于应用在人体健康监测领域中的健康数据管理与疾病防治物联网系统，介绍使用可穿戴与可植入物联网设备进行健康数据管理与疾病防治的实例。在健康数据管理方面，探讨智能手表、汗液监测仪等可穿戴物联网系统的进展。在疾病诊断预防方面，讨论血氧饱和度检测仪、睡眠监测仪等可穿戴物联网系统的实例。在疾病实时监控与治疗方面，讨论心脏起搏器、自动胰岛素注射泵等可植入物联网系统的最新进展。最后，讨论了健康数据管理与疾病防治物联网系统的未来发展趋势。

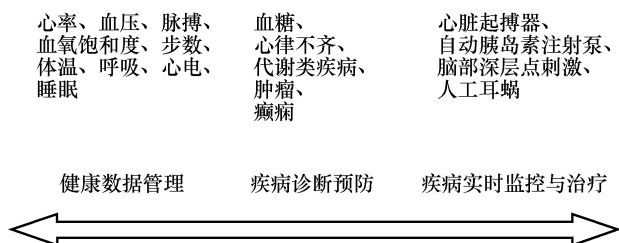


图 3 人体健康物联网的数据管理与疾病防治

2.1 健康数据管理

目前，面向健康人群的可穿戴设备大多可与手机或其他终端无线连接，如智能手环、手表、眼镜等，该类设备的生理、病理指标监测类型有限，且参数精确度不足，难以满足临床诊断需求，因此目前主要应用于日常的健康监测，辅助促进个体健康水平，避免亚健康，提升个体生活质量。例如，健康类可穿戴设备主要包括智能手表、智能手环等产品，实现对人的运动数据（如心率、步数、血氧饱和度和、压力、运动训练等数据）的实时监测，主要用于指导提升运动效果，记录睡眠状态^[56]。人在剧烈运动时可以产生足量的生物流体，可穿戴非侵入性生物传感器可以监测和分析汗液中的代谢物和营养素的含量，进而监测早期健康异常的状况，实现健康数据管理。Wang^[57]开发了一种名为“NutriTrek”的可穿戴设备用于连续分析汗液中与人体健康相关的代谢物和营养物分子（包括全部的 9 种必需氨基酸和多种维生素），成功地将其应用到糖尿病、肥胖症等患者体内支链氨基酸的动态评估。为实现对人体健康相关代谢物及营养物的动态监测，该系统包括 4 个模块：用于局部按需汗液刺激的离子电渗模块、用于高效汗液采集的多入口微流道模块、用于汗液中代谢物及营养物分子的识别检测阵列、用于实时传感器校准的温度和电解质校准传感器。结合物联网技术（如柔性电路板）及软件开发，“NutriTrek”实现了可编程、一体化、自动式分析的平台研发。该设备最终可以实现多任务可调控的无创、原位、长期监测，以及汗液中营养物和代谢物指标的动态分析，并开发出针对不同个体的个性化医疗诊疗方案。物联网技术与可穿戴设备相结合，在实时监测膳食营养摄入等健康数据管理方面有着重大的意义和应用。本团队开发了一种聚合物/金属肖特基结构的柔性自供电压力传感器（SPS, self-powered pressure sensor），并将其应用于可穿戴电子皮肤的触觉传感器阵列^[58]。与传统的压力传感器相比，SPS 具有自供电能力，可以感应动态和静态力，具有较高的灵敏度。将 SPS 与物联网技术相结合，可进一步开发出具有触觉功能的可穿戴电子皮肤设备用于监测人体健康。本团队还研发了一种可以同时监测血糖、乳酸、甘油三酯等多种生命体征物质的生物传感器，该传感器在可穿戴与可植入人体健康物联网领域具有大规模应用的巨大可能性^[59]。

2.2 疾病诊断预防

可穿戴设备受众广泛构建了医疗健康大数据的基础。通过开展大数据分析对重大疾病进行诊断筛查,可降低重大疾病风险和国家卫生资源消耗,对医疗窗口前移有重要意义,受到了政府与产业界的广泛关注。《中国心血管病报告 2018》显示,中国每年约 54.4 万人死于心脏性猝死,居全球之首,且在年轻群体中患病率呈上升趋势,其中 50%~80%患者在发病早期会体现出预警特征,该特征可通过可穿戴物联网设备进行监测。例如,Apple Watch 的心电图 (ECG, electrocardiograph) 功能先后通过了 FDA 和中国国家药品监督管理局的批准,正式成为一种严格意义上的医疗器械^[9,30]。苹果心脏研究计划对 419 297 名参与者进行了房颤检测筛查试验,结果表明,Apple Watch 可以在监测到重复不规则心率后自动触发医院警报,对房颤诊断的阳性预测值高达 84%。此外,国内华为、小米等公司开发的可穿戴设备也获得了国家及地方药品监督管理局医疗器械批准,其研发的心电图监测设备通过全天候收集用户心电图数据,绘制心电图并作洛伦兹散点图分析,与国内医疗机构合作对多类型心脏疾病风险进行筛查。

监测呼吸、脉搏、血氧饱和度等生理信号的可穿戴物联网设备,如睡眠监测仪,可以有效针对睡眠障碍疾病进行及时预警。英国学者 Stevner^[60]等应用可穿戴式呼吸暂停监测装置与常规监测装置分别对 10 名睡眠呼吸暂停患者和 20 名健康对照者的呼吸暂停情况进行分析对比,可穿戴式呼吸暂停监测装置的灵敏度和特异度分别为 88.6%与 99.6%,而常规监测装置只具有 14.3%的灵敏度和 99.3%的特异度。此外,研究人员开发了一款可以固定在手腕和胸部的柔性可穿戴电子设备进行呼吸与脉搏监测,检测到异常数值进行实时预警,可作为生命体征和疾病早期诊断的手段之一^[61]。这些可穿戴与可植入的人体健康物联网设备在重大疾病筛查方面发挥着重大作用,可有效提高患者的治愈率。

2.3 疾病实时监控与治疗

慢性疾病或其他无法根治的疾病,如糖尿病、癫痫、心脏病等,当前医疗手段只能在一定程度上对其控制缓解,患者在感到不适时或身体异常时及时服药避免极端情况^[62]。但该类疾病的病情发作往往是突发性的,易危及患者生命安全,迫切需要构建微型物联网系统对相关生理参数进行实时监控与调控^[63]。

心脏起搏器是一种典型的植入式健康数据管理设备,通过脉冲发生器放电刺激心肌收缩,从而对心脏功能障碍进行调控,自 1958 年第一台心脏起搏器植入人体以来,技术不断迭代,挽救了成千上万心脏病患者的生命^[47,64]。糖尿病在老龄人群中是一种典型的难以根治的疾病,目前结合动态血糖监测 (CGM, continuous glucose monitoring) 与胰岛素泵 (CSII, continuous subcutaneous insulin infusion) 打造双 C 结合的闭环系统是糖尿病综合管理的发展方向^[30]。目前临床上主要使用皮下微针探头对血糖进行实时监测,提示血糖变化规律,进而对胰岛素泵的输注量进行实时调整,使患者的血糖水准保持平稳。脑深部电刺激 (DBS, deep brain stimulation) 俗称脑起搏器,对帕金森病、肌张力障碍、原发性震颤等精神类疾病有显著疗效。DBS 可以通过手术被植入大脑特定位置,提供恒定或间断电流进行刺激从而达到治疗或抑制效果。对于不适合病灶切除手术的患者,在大脑皮层部署监测电极,同时在丘核脑或海马体区域部署刺激电极,可以监测大脑异常放电,实时施加闭环刺激以抑制癫痫发作。

物联网技术与可穿戴系统相结合可在日常活动中持续监测多种生物标记物实现疾病的实时监控与远程医疗。Tehrani^[65]等研究了一种小型化、全集成、无线操作的微针技术,用于持续监测人体的皮肤组织间液 (ISF, skin interstitial fluid) 生物标记物。该微针传感器系统由多个传感探头和定制电子器件组成,插入皮肤上皮后,可持续选择性地收集来自佩戴者 ISF 的分子级电化学信号。该信号通过电子器件的低噪、可重复使用的传感器-器件物理接口无线传输到佩戴者的移动应用程序并进行可视化分析,可以实时监测葡萄糖、乳酸和酒精,其结果与标准测量结果密切相关。物联网技术在该系统中将生物信号转换为可实时观测的可视化测量结果,完成电子设备与智能手机应用程序的无线通信,实现了全集成的无线化操作的器件实时连续监测人体 ISF。物联网技术与可穿戴设备的结合可以加速以患者为中心的远程监控可穿戴传感器的发展,实现疾病的实时监控与治疗,助力数字医疗的改革。

2.4 健康数据数据管理与疾病防治物联网系统发展展望

新兴的可穿戴与可植入物联网系统将以智能化、连续监测、远程医疗等方式彻底改变医疗行业的面貌,可以精准、定制化地满足个人的健康数据

管理与疾病防治的需求。但在该数字医疗领域还有很多问题需要解决。例如,在患者家庭中采用摄像机等技术会面临着道德问题;物联网系统涉及的信息传递必须严格符合安全和隐私法规;物联网设备在疾病管理中产生设备故障以及信息中断等问题。因此,需要研发具有强大的自调试和诊断协议的物联网系统,以避免设备问题影响健康数据管理。此外,在疾病管理过程中需要新型医疗体制,明确责任机制,为用户和医生提供保障。只有解决上述问题,才能实现让患者使用可穿戴与可植入人体健康物联网系统进行远程监测和疾病管理,简化医疗流程。

3 结束语

基于可穿戴与可植入技术打造面向个体的人体健康物联网系统,推动医疗窗口前移,降低重大疾病发病率,节省国家医疗资源支出,是新一代医疗健康发展的大趋势。对传感器的电学性能、机械性能、生物相容性进行研究优化,面向体液和生物电信号监测应用研发可穿戴与可植入传感器,可进一步提升与人体的兼容度和信息采集的可靠性,是下一阶段核心研究热点,对健康数据管理与疾病防治等具有重要意义。

参考文献:

- [1] SHEN Y Z, SHEN S G, WU Z D, et al. Signaling game-based availability assessment for edge computing-assisted IoT systems with malware dissemination[J]. *Journal of Information Security and Applications*, 2022(66): 103140.
- [2] LEMUS-ZÚÑIGALG, FÉLIXJM, FIDES-VALEROA, et al. A proof-of-concept IoT system for remote healthcare based on interoperability standards[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022, 22(4): 1646.
- [3] TAWALBEH L, MUHEIDAT F, TAWALBEH M, et al. Edge enabled IoT system model for secure healthcare[J]. *Measurement*, 2022(191): 110792.
- [4] IM T H, LEE J H, WANG H S, et al. Flashlight-material interaction for wearable and flexible electronics[J]. *Materials Today*, 2021(51): 525-551.
- [5] LEUNG C M, CHEN X Q, WANG T, et al. Enhanced electromechanical response in PVDF-BNBT composite nanofibers for flexible sensor applications[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2022, 15(5): 1769.
- [6] ZHOU Z X, LIU K, BAN Z, et al. Highly adhesive, self-healing, anti-freezing and anti-drying organohydrogel with self-power and mechanoluminescence for multifunctional flexible sensor[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022(154): 106806.
- [7] MCSHAN D, RAY P C, YU H. Molecular toxicity mechanism of nanosilver[J]. *J Food Drug Anal*, 2014, 22(1): 116-127.
- [8] TU Z Y, MA Z, LI J A, et al. Prospective on doping engineering of conductive polymers for enhanced interfacial properties[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(15): 150504.
- [9] HEIKENFELD J, JAJACKA, ROGERS J, et al. Wearable sensors: modalities, challenges, and prospects[J]. *Lab on a Chip*, 2018, 18(2): 217-248.
- [10] VILELA D, ROMEO A, SÁNCHEZ S. Flexible sensors for biomedical technology[J]. *Labona Chip*, 2016, 16(3): 402-408.
- [11] ZHANG H L, YANG Y HOU T. Triboelectric nanogenerator built inside clothes for self-powered glucose biosensors[J]. *Nano Energy*, 2013, 2(5): 1019-1024.
- [12] LIM Y W, JIN J, BAE B S. Optically transparent multiscale composite films for flexible and wearable electronics[J]. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla)*, 2020, 32(35): e1907143.
- [13] KARTHIKEYAN V, SURJADI J U, WONG J C K, et al. Wearable and flexible thin film thermoelectric module for multi-scale energy harvesting[J]. *Journal of Power Sources*, 2020(455): 227983.
- [14] PRUNRT G, PAWULA F, FLEURY G, et al. A review on conductive polymers and their hybrids for flexible and wearable thermoelectric applications[J]. *Materials Today Physics*, 2021(18): 100402.
- [15] HU G S, YI Z R, LU L J, et al. Self-powered 5G NB-IoT system for remote monitoring applications[J]. *Nano Energy*, 2021, 87: 106140.
- [16] FANG Y, TANG T Y, LI Y F, et al. A high-performance triboelectric-electromagnetic hybrid wind energy harvester based on rotational tapered rollers aiming at outdoor IoT applications[J]. *iScience*, 2021, 24(4): 102300.
- [17] DE D, BHARTI P, DAS S K, et al. Multimodal wearable sensing for fine-grained activity recognition in healthcare[J]. *IEEE Internet Computing*, 2015, 19(5): 26-35.
- [18] 王昭昭, 沈小清, 何细飞, 等. 微信教育结合运动手环监测在心肌梗死患者康复运动的应用[J]. *护理学杂志*, 2017, 32(15): 8-10.
- [19] 杨梅, 丛扬帆, 李雪瑞. 融合 FAHP 和 TOPSIS 的适老化产品综合评价与优选方法: 以老年智能手环为例[J]. *图学学报*, 2020, 41(3): 469-479.
- [20] YANG M, CONG Y F, LI X R. Comprehensive evaluation and optimization method of products for the elderly based on FAHP and TOPSIS—a case study on the smart bracelet for the elderly[J]. *Journal of Graphics*, 2020, 41(3): 469-479.
- [20] LIN P H, SHEU S C, CHEN C W, et al. Wearable hydrogel patch with noninvasive, electrochemical glucose sensor for natural sweat detection[J]. *Talanta*, 2022(241): 123187.
- [21] LI G, WANG K, WANG D, et al. Noninvasive blood glucose detection system based on dynamic spectrum and M+N theory[J]. *Analytica*

- Chimica Acta, 2022(1201): 339635.
- [22] ZHU C H, XU Y F, CHEN Q D, et al. A flexible electrochemical biosensor based on functionalized poly(3, 4-ethylenedioxythiophene) film to detect lactate in sweat of the human body[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022(617): 454-462.
- [23] ALORAYNANA, RASSELLS, XU C, et al. A single wavelength mid-infrared photoacoustic spectroscopy for noninvasive glucose detection using machine learning[J]. *Biosensors*, 2022, 12(3): 166.
- [24] HAN Z P, ZHANG X Y, YUAN H, et al. Graphene oxide/graphite fiber microelectrodes for directing electron transfer of glucose oxidase and glucose detection[J]. *Journal of Power Sources*, 2022(521): 230956.
- [25] MA Y J, ZHANG Y C, CAI S S, et al. Flexible hybrid electronics for digital healthcare[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(15): 1902062.
- [26] VORA D, GARIMELLA H T, GERMAN C L, et al. Microneedle and iontophoresis mediated delivery of methotrexate into and across healthy and psoriatic skin[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2022(618): 121693.
- [27] ZHANG P P, ZHU J C, ZHAO B J, et al. Wearable transdermal microneedle patch based on photonic crystal hydrogel for glucose monitoring[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(4): 100054.
- [28] LI X, HUANG X, MO J, et al. A fully integrated closed-loop system based on mesoporous microneedles-iontophoresis for diabetes treatment[J]. *Advanced Science (Weinheim, Baden-Wuerttemberg, Germany)*, 2021, 8(16): e2100827.
- [29] WANG P M, CORNWELL M, PRAUSNITZ M R. Minimally invasive extraction of dermal interstitial fluid for glucose monitoring using microneedles[J]. *Diabetes Technology & Therapeutics*, 2005, 7(1): 131-141.
- [30] CHEN Q Y, ZHAO Y, LIU Y Q. Current development in wearable glucose meters[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2021, 32(12): 3705-3717.
- [31] LEGNER C, KALWA U, PATEL V, et al. Sweat sensing in the smart wearables era: towards integrative, multifunctional and body-compliant perspiration analysis[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019(296): 200-221.
- [32] CHO I J, KANG D, HAN S, et al. Thin, soft, skin-mounted microfluidic networks with capillary bursting valves for chrono-sampling of sweat[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2017, 6(5).
- [33] CUI Y X, DUAN W, JIN Y, et al. Ratiometric fluorescent nanohybrid for noninvasive and visual monitoring of sweat glucose[J]. *ACS Sensors*, 2020, 5(7): 2096-2105.
- [34] LIU Y Q, YU Q, LUO X J, et al. Continuous monitoring of diabetes with an integrated microneedle biosensing device through 3D printing[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2021(7): 75.
- [35] KAMBLEA, GHARE P, KUMAR V. Machine-learning-enabled adaptive signal decomposition for a brain-computer interface using EEG[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022(74): 103526.
- [36] ALLISON B Z, WOLPAW E W, WOLPAW J R. Brain-computer interface systems: progress and prospects[J]. *Expert Review of Medical Devices*, 2007, 4(4): 463-474.
- [37] MCFARLAND D J, WOLPAW J R. EEG-based brain-computer interfaces[J]. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 2017(4): 194-200.
- [38] LIU G, WANG J. EEGG: an analytic brain-computer interface algorithm[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2022(30): 643-655.
- [39] HU H, HUANG H, XIA L, et al. Engineering vanadium carbide MXene as multienzyme mimetics for efficient in vivo ischemic stroke treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022(440): 135810.
- [40] STACK E, AGARWAL V, KING R, et al. Identifying balance impairments in people with Parkinson's disease using video and wearable sensors[J]. *Gait & Posture*, 2018(62): 321-326.
- [41] SALEHZADEH A, CALITZ A P, GREYLING J. Human activity recognition using deep electroencephalography learning[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2020(62): 102094.
- [42] WAGNER J, MARTINEZ-CANCINO R, DELORME A, et al. High-density EEG mobile brain/body imaging data recorded during a challenging auditory gait pacing task[J]. *Scientific Data*, 2019(6): 211.
- [43] LIANG J G, LEE D, YOUNS E, et al. Electroencephalography network effects of corpus callosotomy in patients with lennox-gastaut syndrome[J]. *Frontiers in Neurology*, 2017(8): 456.
- [44] LIANG J G, KIM N Y, KOA, et al. Changes in functional brain network topology after successful and unsuccessful corpus callosotomy for lennox-gastaut syndrome[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 3414.
- [45] PISARCHIK A N, MAKSIMENKO V A, HRAMOV A E. From novel technology to novel applications: comment on an integrated brain-machine interface platform with thousands of channels by elon musk and neuralink[J]. *Journal of Medical Internet Research*, 2019, 21(10): e16356.
- [46] STARR P A. Totally implantable bidirectional neural prostheses: a flexible platform for innovation in neuromodulation[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2018(12): 619.
- [47] KOYDEMIR H C, OZCAN A. Wearable and implantable sensors for biomedical applications[J]. *Annual Review of Analytical Chemistry (Palo Alto, Calif)*, 2018, 11(1): 127-146.
- [48] LANDE R G, POURZAND M. WITHDRAWN: brain computer interface technology: usability and applications in psychiatry[J]. *Technology and Health Care: Official Journal of the European Society for Engineering and Medicine*, 2015: 1-4.
- [49] LE BARS S, CHOKRON S, BALP R, et al. Theoretical perspective on an ideomotor brain-computer interface: toward a naturalistic and non-invasive brain-computer interface paradigm based on action-effect representation[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2021(15): 732764.
- [50] RENTON A I, MATTINGLEY J B, PAINTER D R. Optimising non-invasive brain-computer interface systems for free communication between naïve human participants[J]. *Scientific Reports*, 2019(9): 18705.

- [51] JOCHUMSEN M, AL MUHAMMADEE JANJUA T, ARCEO J C, et al. Induction of neural plasticity using a low-cost open source brain-computer interface and a 3D-printed wrist exoskeleton[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 572.
- [52] LUO Z, PENG B, ZENG J, et al. Sub-thermionic, ultra-high-gain organic transistors and circuits[J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 1928.
- [53] LOE M E, MORRISSEY M J, TOMKOSR, et al. Detecting slow narrowband modulation in EEG signals[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2022(378): 109660.
- [54] PRASAD D S, CHANAMALLU S R, PRASAD K S. Optimized deformable convolution network for detection and mitigation of ocular artifacts from EEG signal[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2022, 81(21): 30841-30879.
- [55] LI M M, LIANG Y, YANG L F, et al. Automatic bad channel detection in implantable brain-computer interfaces using multimodal features based on local field potentials and spike signals[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2020, 116: 103572.
- [56] LIMG B. Smart watch detection of left ventricular dysfunction[J]. *Nature Reviews Cardiology*, 2023, 20(2): 75.
- [57] WANG M Q, YANG Y R, MIN J H, et al. A wearable electrochemical biosensor for the monitoring of metabolites and nutrients[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2022, 6(11): 1225-1235.
- [58] YING S, ZHANG J H, YAN K, et al. Self-powered direct-current type pressure sensor by polypyrrole/metal Schottky junction[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(42): 424008.
- [59] LI L L, PAN L J, MA Z, et al. All inkjet-printed amperometric multiplexed biosensors based on nanostructured conductive hydrogel electrodes[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(6): 3322-3327.
- [60] STEVNER A B A, VIDAURRE D, CABRAL J, et al. Discovery of key whole-brain transitions and dynamics during human wakefulness and non-REM sleep[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1035.
- [61] CHEN L Y, TEE B C K, CHORTOS A L, et al. Continuous wireless pressure monitoring and mapping with ultra-small passive sensors for health monitoring and critical care[J]. *Nature Communications*, 2014(5): 5028.
- [62] WANG C, CAI Y Y, ZHOU W, et al. A wearable respiration sensor for real-time monitoring of chronic kidney disease[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(10): 12630-12639.
- [63] SHANFIELD S C, KELLY M N, POSA M. Wearable technology leads to initial workup of Graves' disease in an adolescent female[J]. *The Journal of Adolescent Health: Official Publication of the Society for Adolescent Medicine*, 2022, 71(3): 370-372.
- [64] KOO J H, SONG J K, YOO S, et al. Unconventional device and material approaches for monolithic biointegration of implantable sensors and wearable electronics[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(10): 2000407.
- [65] TEHRANI F, TEYMOURIAN H, WUERSTLE B, et al. An integrated wearable microneedle array for the continuous monitoring of multiple biomarkers in interstitial fluid[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2022, 6(11): 1214-1224.

[作者简介]



梁峻阁（1991-），男，江南大学物联网工程学院副教授、院长助理、射频传感技术实验室负责人，主要研究方向为传感器及检测电路、微波传感与系统。



宋怡然（2000-），女，江南大学物联网工程学院电子工程系硕士生，主要研究方向为生物传感器。



孙杨帆（1986-），男，无锡市中心康复医院、江南大学附属精神卫生中心主治医师，主要研究方向为智能可穿戴装备在健康促进和康复医学领域的应用。



计樱莹（1987-），女，无锡市中心康复医院、江南大学附属精神卫生中心副主任医师，主要研究方向为神经退行性疾病与认知相关疾病的诊断、治疗与康复。



潘力佳（1973-），男，博士，南京大学电子科学与工程学院院长、教授、博士生导师，主要研究方向为导电聚合物、电子皮肤设备。



施毅（1962-），男，博士，南京大学电子科学与工程学院院长、教授、博士生导师，主要研究方向为纳米电子学和纳米光电子。