

“主动健康”百花齐放 DOI:10.13406/j.cnki.cyxb.003078

仿生柔性传感器在主动健康领域中的应用研究进展

王 琼¹, 张 冲², 陈晓辉², 于晓婷¹, 杨纪春²

(1. 渤海大学化学与材料工程学院, 锦州 121000; 2. 重庆大学医学院, 重庆 400044)

【摘要】中国社会已正式跨入“大健康时代”, 随着全民健康素养的不断提升, 民众的健康意识已逐渐从以治疗为中心的“被动健康”转化为以预防为主的“主动健康”模式, 人们越发注意对多种疾病的早期监测与干预。仿生柔性传感器作为一种由“仿生-纳米-传感-信息”多学科交叉衍生的新型设备, 具有轻薄便携、灵敏度高、生物安全性好、电学性能优异、集成度高等特点, 可充分发挥智慧医疗在疾病监测预警中的作用, 俨然已成为未来医疗服务工作的重点。本文从仿生柔性传感器的种类、作用方面概述其在主动健康领域的应用现状, 分析仿生柔性传感器在该领域的发展前景及存在瓶颈问题, 以期为其未来研发提供参考。

【关键词】仿生; 柔性; 传感器; 主动健康; 时实监测

【中图分类号】R392.5

【文献标志码】A

【收稿日期】2022-06-29

Research progress for the biomimetic flexible sensor in the field of active health

Wang Qiong¹, Zhang Chong², Chen Xiaohui², Yu Xiaoting¹, Yang Jichun²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Bohai University; 2. School of Medicine, Chongqing University)

【Abstract】Chinese society has officially entered the great health era. With the continuous improvement of the health literacy, the public's health awareness has gradually changed from passive health to active health, and people begin to pay more attention to the early intervention for diseases. Biomimetic flexible sensor, as a new equipment derived from the interdisciplinarity of bionic-nano-sensing-information, displays slimmer, portable, well biological safety, excellent electrical performance, and high integration. Biomimetic flexible sensor plays an important role in disease monitoring and early warning, and it has obviously been the focal points for future health services. This paper has summarized the types and functions of biomimetic flexible sensors, and concluded its applications and bottlenecks in the field of active health, hoping that this paper may provide the guidelines for the future research of biomimetic flexible sensor.

【Key words】biomimetic; flexible; sensor; active health; real-time monitoring

随着我国人口老龄化问题的日益严重^[1-2], 人民对健康的要求不断提升。《健康中国 2030 规划纲要》明确指出:“全民健康是建设健康中国的根本目的。立足全人群和全生命周期 2 个着力点, 提供公平可及、系统连续的健康服务, 实现

作者介绍:王 琼, Email:joa0416@163.com,

研究方向:电化学分析。

通信作者:杨纪春, Email:yangjichun@cqu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年资助项目(编号:22105029); 中央高校医工融合资助项目(编号:2021CDJYGRH-005); 辽宁省教育厅青年育苗资助项目(编号:LQ2020014); 辽宁省博士启动资助项目(编号:2021-BS-253)。

优先出版:[\(2022-09-14\)](https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1046.R.20220913.1641.002.html)

更高水平的全民健康”。纲要提出关注全民健康及系统连续的健康服务, 这意味着未来的医疗系统既要关注病患的临床治疗, 更应加强对健康人群的健康维护, 这便是主动健康。主动健康的核心在于疾病的预防和早期诊断。因此, 整合数字化医疗, 通过对多种疾病的诱因进行早期实时的监测及干预, 打造“治未病”的全周期主动健康新理念成为未来医疗卫生工作的重点。不同于传统医疗对已经患病人群的诊断与治疗, 健康维护更倾向于探寻疾病在早期与某种生理指标信息之间的微弱关系, 并对其进行连续性的动态监测和干预, 以实现对某种可能发生的疾病的预警及早期干预治疗^[3-5]。

可穿戴设备也称为可穿戴传感器, 作为一种便携式的健康信息获取装置, 不仅可以对脉搏、心率、血糖、表皮温度等生理参数进行连续监测, 还可以记录体能消耗、运动频率、活

动轨迹等指标,在主动健康领域更新、发展迅速^[6-9]。目前,可穿戴设备种类繁多,仿生柔性传感器作为可穿戴设备中的一类,是通过模仿自然界生物的特性或生命现象,在柔性衬底上进行特异性传感的一种新型可拉伸设备^[10-13]。它能够实现人机互连,对疾病早期不易察觉的身体变化、生理指标等健康数据进行连续性获取,并实时上传至云端进行分析,及时发现生理指标的细小变化,实现主动健康的目的^[14]。与常规的可穿戴设备相比,仿生柔性传感器具有集成度更高、更加便携、使用寿命更长、佩戴更加舒适等特点,同时还兼具仿生皮肤功能,人体亲和度良好。仿生柔性传感器作为一种多学科交叉而衍生出的新兴产物优势显著,且近年来发展迅猛,但在健康管理特别是主动健康方面的应用仍处于起步阶段,加之主动健康的核心又在于疾病的早期预警,而疾病的早期预警也一直是临床上的痛点问题,想要短时间运用发展初期的技术去解决医学上长久存在的困难实属不易^[15]。因此,有关仿生柔性传感器在主动健康领域的应用报道比较稀少。本文仅从仿生智能柔性传感器的分类及瓶颈问题 2 个角度出发,对其在主动健康监测领域的应用作简单综述,并对其未来发展方向作出总结与展望,希望能够引发大家思考,激发读者对仿生柔性传感器用于主动健康监测领域研究的热情,快速推动仿生柔性传感器在主动健康领域的研究进展。

1 仿生柔性传感器的分类

仿生柔性传感器的分类见仁见智,可按照仿生人体的五官(触觉、听觉、嗅觉、视觉及味觉)分类,可按照人体佩戴部位不同(头部、眼部、颈部、腕部、腰部、腿部等)分类,亦可按照仿生来源的不同(人、动物、植物)进行分类。考虑到目前仿生柔性传感器在主动健康领域的应用较少,本文仅从仿生柔性传感器在人体内部与外部的穿戴方式进行分类,分为外部接触型与内部植入型 2 种。

1.1 外部接触型仿生柔性传感器

接触型仿生柔性传感器是通过物理固定或化学固定的方式将传感设备附着在皮肤表面,利用传感器与人体皮肤间的紧密接触,从而获取一系列的健康信息并进行分析。事实上,与临床上的组织活检、血液分析等疾病诊断金标准相比,对皮肤表面一系列生理信息(如温度、压力、pH、汗液等)的变化进行实时监测,更能起到疾病早期预警的效果,体现出主动健康的价值。例如,汗液作为皮肤表面的直接分泌物,含有丰富的生理信息,能够第一时间反映出皮肤的健康状况,使用外部接触型仿生柔性传感器对佩戴者汗液进行监测,能够实现对多种皮肤性相关疾病早期阶段的及时预警。Shen H 等^[16]受到人体产生静电原理的启发,研发了一种基于接触分离摩擦纳米发电机和电介质电润湿效应的柔性人体汗液监测传感设备,利用高压电改变交互界面的润湿性,实现了对汗滴运动的主动控制,在汗滴与 pH 指示剂混合并反应后,成功完成了对佩戴者汗液 pH 的精准分析检测,该传感

设备有望应用于皮炎、痤疮的早期监测。Li H 等^[17]受到人体自身能量转化过程的启发,研制了一种佩戴于人体关节处的柔性自能量汗液传感贴片(图 1),利用压电效应产生极化电荷和电场,并将人体运动过程中产生的机械能作为传感设备电力来源,在无需外界电力供给的情况下,实现了对汗液中离子及 pH 的同时测定和无线数据传输,为囊性纤维化、荨麻疹等疾病的早期预警提供了有价值的参考。而 Dagdeviren C 等^[18]则把监测目标从汗液转移到皮肤组织的弹性上,将可伸缩的机械驱动器网络与含有锆钛酸铅的纳米带相结合,制备出一种能够与皮肤良好相容的接触型类皮肤压电纹身传感器,通过空间映射功能来测量表皮上软组织弹性及压力的改变,进而实现对基底神经节瘤、纤维上皮息肉和组织细胞瘤等皮肤相关疾病的早期监测。相较于临床上的病理诊断,该传感器不仅简单、便捷,更能对疾病起到早期预警效果,体现主动健康的意义。

此外,接触型仿生智能柔性传感器还可以通过与皮肤的紧密接触对心血管相关疾病(如心力衰竭、冠状动脉心脏病等)进行早期监测。近年来,心血管疾病已成为我国居民死亡的首要原因。截至 2020 年,我国仅心血管疾病患者人数就达 3.3 亿,对心率、血压等健康信息的长期监测是早期预防心血管疾病的关键。如何实现传感设备与皮肤的紧密接触,通过皮肤表面极微弱的物理指标变化准确获取心率、血压等生理信息仍是困扰科研人员的难题。鉴于此, Zhu Y 等^[19]从人体皮肤表面纹理的微观结构及功能获取灵感,制备出一种基于铜掺杂的石墨烯核壳纳米线仿生压力传感器(图 2),该传感器与真实皮肤类似,具有良好的柔韧性和亲肤性,可以直接粘贴在人体的任何部位,敏锐地感应到由血压、心跳异常而引起的微小皮肤压力改变,对心血管相关疾病的早期预警具有潜在的应用价值。

1.2 内部植入型仿生柔性传感器

外部接触型仿生柔性传感器作为一种无创的监测设备,能够灵敏地获取人体皮肤层及外部的多种信息参数,但显然不能满足主动健康“全方位、全周期”的要求,人们一直在追求多维度、系统性、精准的健康评估体系,如何获取人体内部更深层次的健康信息仍然是个难题。内部植入型仿生柔性传感器不仅具有无创监测的优势,利用微创手术或注射的方法将传感器植入人体特定部位,实现对人体内部局域范围分子物质的持续追踪,能够更加准确、多方位、实时地揭示使用者的健康状况^[20]。例如, Mannoor MS 等^[21]在牙釉质模拟自组装抗菌肽的杀菌过程,将石墨烯层打印到水溶性的丝绸上,使石墨烯材料与生物质紧密接触,从而研制了一种可植入的柔性电子薄膜(图 3),将其植入牙釉质表面后,利用配备的无线检测共振线圈,实现了对唾液中单细胞水平上幽门螺杆菌的检测。该仿生柔性传感器通过对幽门螺杆菌长期的监测,具有对胃癌及十二指肠溃疡等疾病的提前预警功能。

可植入仿生柔性传感器虽然能够直接植入手内进行深度的健康监测与分析,但作为一种外源性的物质,当传感器进入人体后,难以与监测部位组织粘连形成稳定的交互界

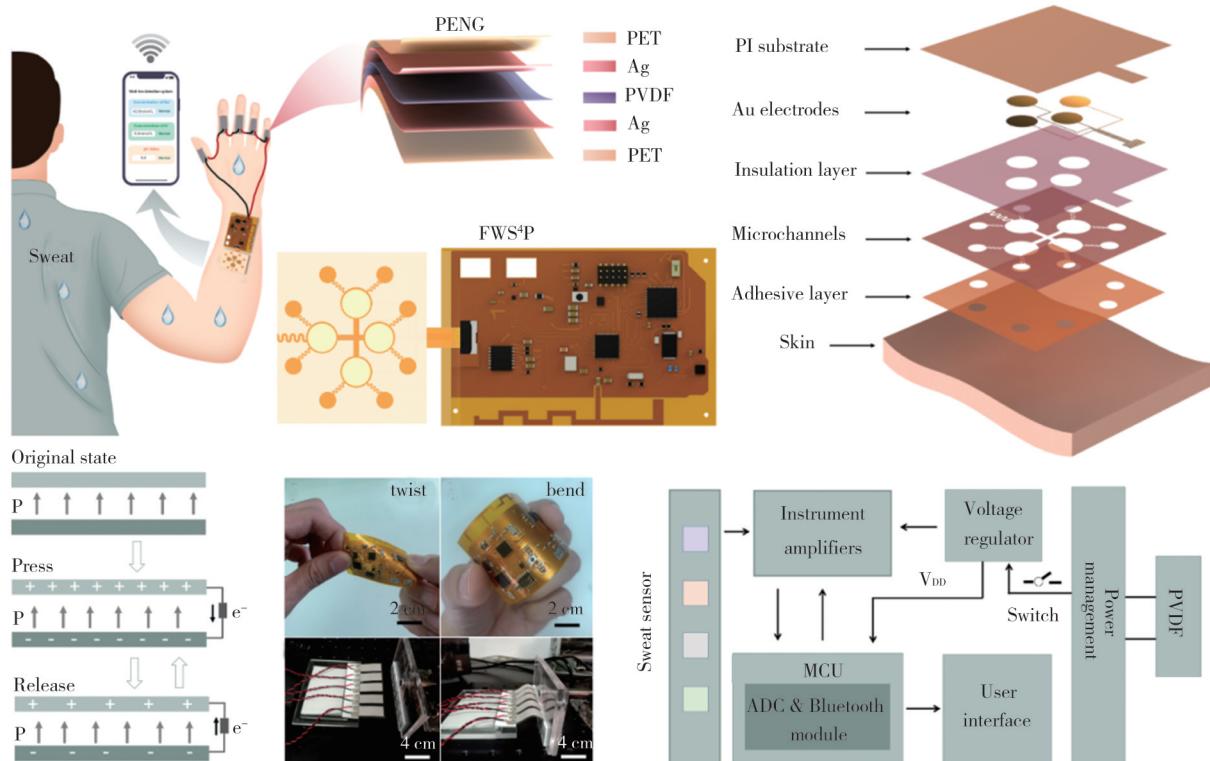


图1 基于能量转化的仿生柔性自驱动汗液传感器系统结构及工作原理图

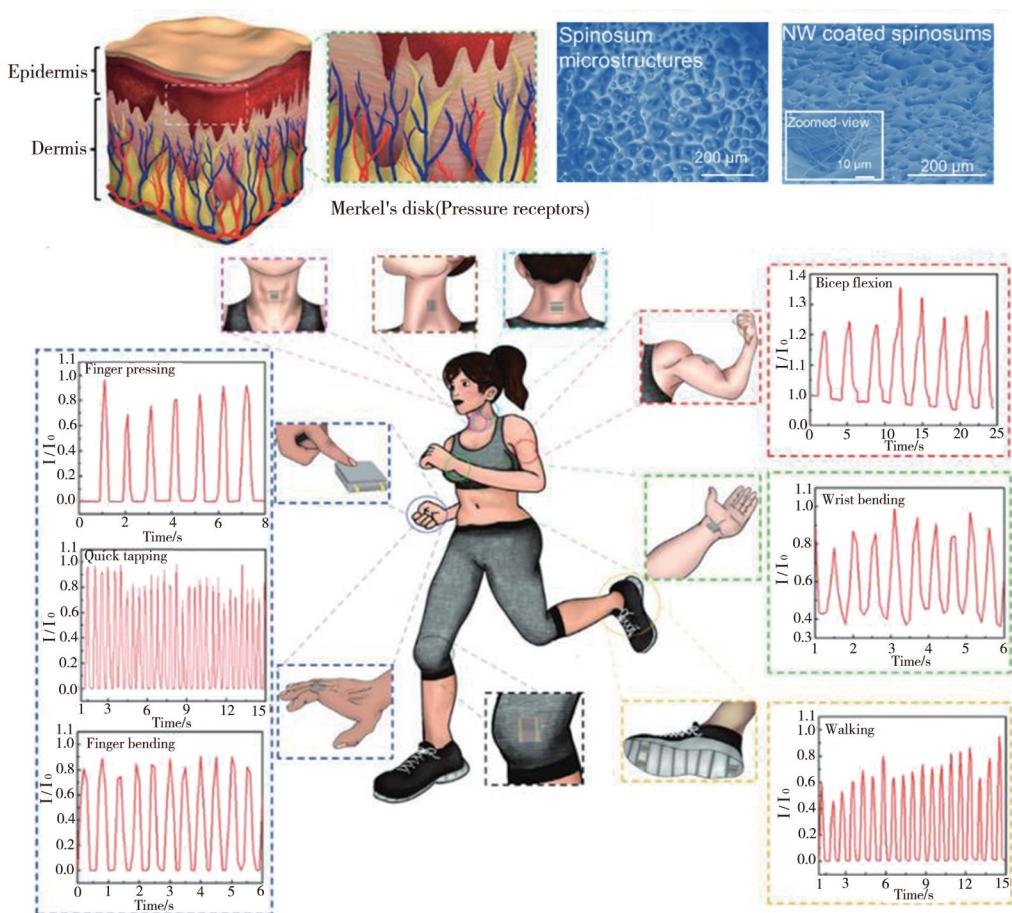


图2 基于人体皮肤学的仿生智能柔性传感器用于人体运动过程中心率的监测

面,从而无法实现长期精准的动态监测。因此,Wang L 等^[22]受肌肉结构的启发,在仿生肌肉结构中混合多种纤维状材料,设计出一种多级螺旋结构的柔性传感材料,解决了界面固定及生物相容性的问题。将其注入体内后,传感器如毛发般稳定黏附,实现对体内多种化学物质的长期、实时监测,有望应用于多种癌症的早期诊断(图 4)。

2 仿生柔性传感器在主动健康领域应用的瓶颈问题

目前,仿生柔性传感器在主动健康监测领域仍处于实验室研究阶段,还未真正走入临床和市场进行规模化应用,主要有以下 3 点原因。

2.1 材料研发不足

仿生柔性传感器在材料选择上依然存在挑战。仿生柔性材料的研发是制备传感器的核心环节。高性能的仿生柔

性材料需要同时兼具优异的信号(生理指标)响应能力、良好的生物相容性^[23]、机械强度及准确的信号传输能力,并与人体柔软的皮肤或内部组织紧密集成,以准确获取微小的生理信号改变,从而用于系统的健康管理^[24]。目前用于制备仿生柔性传感器的材料主要包括有机材料、无机纳米材料、半导体材料和纸基材料(表 1)。它们各自具有独特的物理化学性能,优缺点显著。有机材料机械强度和温度稳定性相对较好,但在信息传输方面通常不尽如人意。而无机纳米材料与半导体材料虽然具有优异的信息存储与传输性能,但在生物相容性方面仍需与其他材料进行复合改性。纸基材料具有成本低、吸水性强和柔韧性好等优点,然而较差的机械强度在很大程度上降低了其传感设备的使用寿命。因此,如何制备全新的复合型生物传感材料,实现优异性能的集成化,仍是仿生柔性传感器研发的重点与难点。

2.2 监测数据的稳定性及可信性问题

要想实现疾病的早期监测预警,将仿生柔性传感设备用

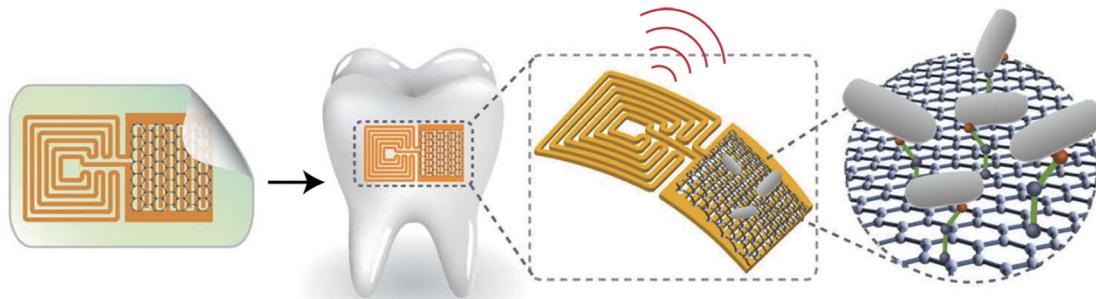


图 3 基于石墨烯柔性材料的植入型仿生传感器

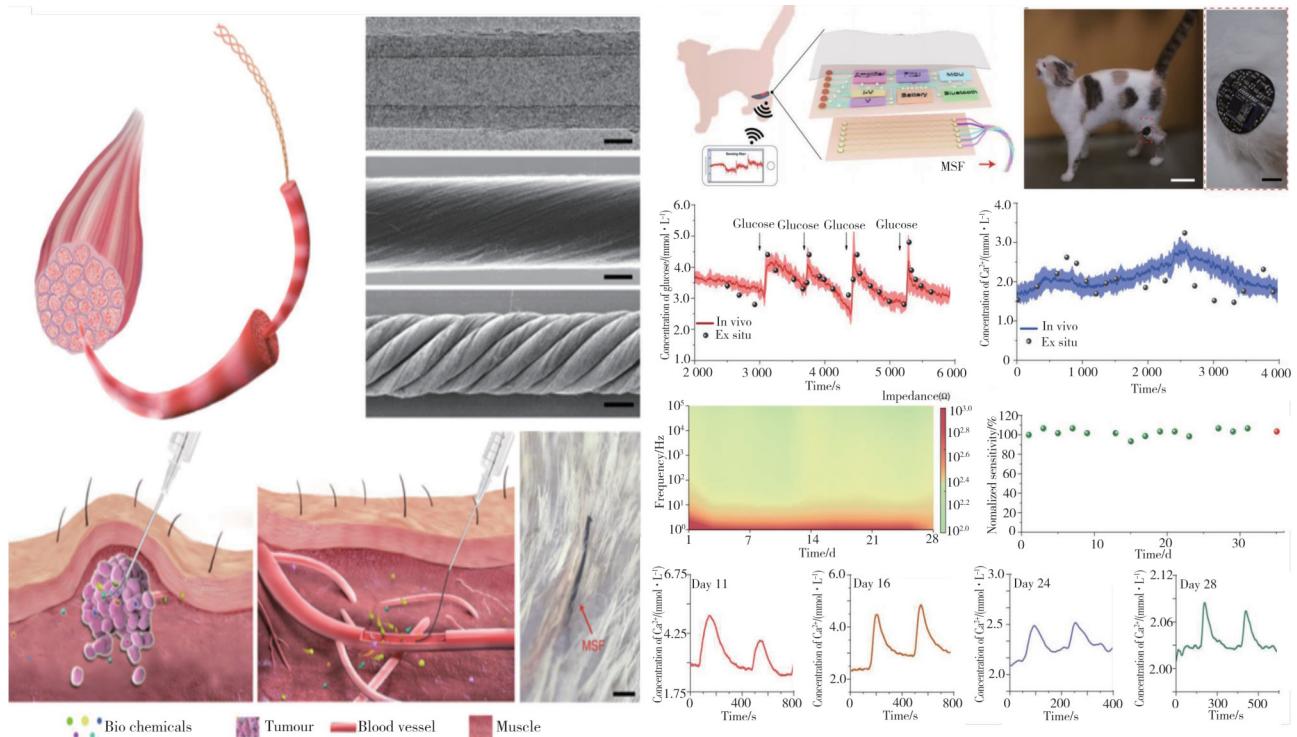


图 4 基于仿生肌肉结构的可植入型柔性传感器

表 1 不同传感器材料性能对比

类别	组成	优点	缺点
有机材料	聚偏二氟乙烯 ^[25] 、聚苯胺 ^[26] 、聚二甲基硅氧烷 ^[27] 、气凝胶 ^[28] 等	机械强度强、稳定性好	信息传输弱
无机纳米材料	金属 ^[29] 、金属氧化物 ^[30] 、碳材料 ^[31-34] 等	信息存储与传输性能强	生物相容性弱
半导体材料	二氧化钛 ^[35] 、MXene ^[36] 等	机械强度强	柔韧性差
纸基材料	薄纸 ^[37] 、纤维素纸 ^[38] 、滤纸 ^[39] 等	成本低、吸水性强和柔韧性好	机械强度差

于主动健康领域,对微弱生理信号的长期、实时、精准检测是关键^[40],通过仿生柔性传感器获取的生理信号在稳定性和准确度方面仍存在明显不足。对于外部接触型仿生柔性传感器,其传感设备需与人体皮肤进行紧密接触,才能实现数据的有效获取。然而每位使用者的佩戴习惯与运动规律都不尽相同,无论是物理还是化学的固定方法都难以保证设备与皮肤间接触的紧密性。因此,由于贴合度欠佳的原因常常会导致健康监测数据稳定性及精确度下降。而对于内部植入型仿生柔性传感器,传感器需从体内环境复杂的血液、组织、器官中获取信息,背景干扰极大,同样会影响监测数据的稳定性及准确性。此外,由于平台软件的兼容性、数据传输方式不同等问题的存在,在一定程度上影响了监测数据的准确性^[41-42]。就目前而言,仿生柔性传感器对人体健康指标的监测准确性仍不能与临床上的金标准检验法相比,较大的监测结果差异严重限制了柔性仿生健康监测装备在临床诊疗领域的应用发展。

2.3 个人隐私安全性问题

仿生柔性传感器的实质是一个对使用者健康信息进行传感、存储、分析的系统,记录着使用者的个人医疗信息。然而目前我国仍缺少针对性的政策法规来对个人健康信息进行标准化、规范化的管理,导致用户信息泄露风险增大^[43]。如何制定医疗信息的隐私标准、建立系统的管理办法成为亟待解决的难题。

3 总结与展望

整体来看,仿生柔性传感器目前仍处于发展的初期阶段,主动健康也是近年来新兴的理念,想要真正地将仿生柔性传感器应用于主动健康领域仍需很长一段时间。随着材料科学与信息科学不断发展、我国医疗事业不断进步、主动健康理念深入人心,这必将成为一种大的趋势,也极具推广应用价值。个人认为,在解决上述 3 个瓶颈问题后,未来仿生柔性传感器在主动健康管理领域的应用发展可能主要集中在以下 2 个方面:①全方位健康监测管理。随着我国健康事业的发展,人们对主动健康管理的要求也是全方位、多维度的,而就当前仿生柔性医疗设备而言,由于传感器材料本身功能的单一性问题,直接导致监测数据的单一性。如何进行功能化整合,赋予一个传感器多种疾病的监测预警能力,是一个极具挑战性和应用价值的工作。②监测+治疗,形成闭环健康管理。在国家大力倡导“全周期闭环健康管理”的背景下,显然仅具有疾病早期诊断预警功能的仿生柔性医疗

设备已不能满足人们对智慧医疗服务的需求,整合诊断与治疗功能的智慧医疗设备必将成为未来医学研究的热点。

参 考 文 献

- Vogelsang EM, Raymo JM, Liang J, et al. Population aging and health trajectories at older ages[J]. J Gerontol Ser B, 2019, 74(7):1245-1255.
- Morley JE, Sanford AM. Population health and aging[J]. J Nutr Health Aging, 2019, 23(8):683-686.
- Roy S, Orazem PF. Active leisure, passive leisure and health[J]. Econ Hum Biol, 2021, 43:101053.
- Helal S, Jain R. Digital health technologies are expanding rapidly and could potentially transform the current health-care paradigm[J]. Computer, 2019, 52:14-17
- Yetisen AK, Martinez-Hurtado JL, Ünal B, et al. Wearables in medicine[J]. Adv Mater, 2018, 2018:e1706910.
- Sana F, Isselbacher EM, Singh JP, et al. Wearable devices for ambulatory cardiac monitoring[J]. J Am Coll Cardiol, 2020, 75(13):1582-1592.
- Jayathilaka WADM, Qi K, Qin YL, et al. Significance of nanomaterials in wearables: a review on wearable actuators and sensors[J]. Adv Mater, 2019, 31(7):1805921.
- Li P, Lee GH, Kim SY, et al. From diagnosis to treatment: recent advances in patient-friendly biosensors and implantable devices[J]. ACS Nano, 2021, 15(2):1960-2004.
- Gao W, Yu C. Wearable and implantable devices for healthcare[J]. Adv Healthc Mater, 2021, 10(17):e2101548.
- Yu QY, Wang B, Zhong RZ, et al. Application research of wearable sensors and actuators in biomechanics of lower limbs[J]. J Ambient Intell Humaniz Comput, 2021:1-13.
- Hu Y, Qi K, Chang LF, et al. A bioinspired multi-functional wearable sensor with an integrated light-induced actuator based on an asymmetric graphene composite film[J]. J Mater Chem C, 2019, 7(23):6879-6888.
- Lv Z, Liu JZ, Yang X, et al. Naturally derived wearable strain sensors with enhanced mechanical properties and high sensitivity[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(19):22163-22169.
- Li L, Zhang JY, Yang CY, et al. Stimuli-responsive materials from ferrocene-based organic small molecule for wearable sensors[J]. Small, 2021, 17(46):2103125.

- [14] Zhong JW, Ma Y, Song Y, et al. A flexible piezoelectret actuator/sensor patch for mechanical human-machine interfaces[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(6):7107–7116.
- [15] Qaiser N, Al-Modaf F, Khan SM, et al. A robust wearable point-care CNT-based strain sensor for wirelessly monitoring throat-related illnesses[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 31(29):2103375.
- [16] Shen H, Lei H, Gu MW, et al. A wearable electrowetting on dielectrics sensor for real-time human sweat monitor by triboelectric field regulation[J]. *Adv Funct Materials*, 2022:2204525.
- [17] Li H, Chang TR, Gai YS, et al. Human joint enabled flexible self-sustainable sweat sensors[J]. *Nano Energy*, 2022, 92:106786.
- [18] Dagdeviren C, Shi Y, Joe P, et al. Conformal piezoelectric systems for clinical and experimental characterization of soft tissue biomechanics [J]. *Nat Mater*, 2015, 14(7):728–736.
- [19] Zhu Y, Hartel MC, Yu N, et al. Epidermis-inspired wearable piezoresistive pressure sensors using reduced graphene oxide self-wrapped copper nanowire networks[J]. *Small Methods*, 2022, 6(1):e2100900.
- [20] Wang LL, Jiang K, Shen GZ. Wearable, implantable, and interventional medical devices based on smart electronic skins[J]. *Adv Mater Technol*, 2021, 6(6):2100107.
- [21] Mannoor MS, Tao H, Clayton JD, et al. Graphene-based wireless bacteria detection on tooth enamel[J]. *Nat Commun*, 2012, 3:763.
- [22] Wang L, Xie S, Wang Z, et al. Functionalized helical fibre bundles of carbon nanotubes as electrochemical sensors for long-term *in vivo* monitoring of multiple disease biomarkers[J]. *Nat Biomed Eng*, 2020, 4(2):159–171.
- [23] Won P, Kim KK, Kim H, et al. Transparent soft actuators/sensors and camouflage skins for imperceptible soft robotics[J]. *Adv Mater*, 2021, 33(19):e2002397.
- [24] Yin RY, Wang DP, Zhao SF, et al. Wearable sensors-enabled human-machine interaction systems: from design to application[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 31(11):2008936.
- [25] Xu LY, Du KY, Liu YG, et al. The fabrication and properties of a flexible sensor based on polyvinylidene fluoride fiber[J]. *Text Res J*, 2022, 2022:004051752210760.
- [26] Seo CU, Yoon Y, Kim DH, et al. Fabrication of polyaniline-carbon nano composite for application in sensitive flexible acid sensor [J]. *J Ind Eng Chem*, 2018, 64:97–101.
- [27] Liu Q, Shi WS, Tian L, et al. Preparation of nanostructured PDMS film as flexible immunosensor for cortisol analysis in human sweat[J]. *Anal Chimica Acta*, 2021, 1184:339010.
- [28] Zeng Z, Wu N, Yang W, et al. Sustainable-macromolecule-assisted preparation of cross-linked, ultralight, flexible graphene aerogel sensors toward low-frequency strain/pressure to high-frequency vibration sensing[J]. *Small*, 2022, 18(24):e2202047.
- [29] Tasaltin C, Basarir F. Preparation of flexible VOC sensor based on carbon nanotubes and gold nanoparticles[J]. *Sens Actuat B Chem*, 2014, 194:173–179.
- [30] Mounasamy V, Mani GK, Tsuchiya K, et al. Preparation of free-standing V_2O_5 nanosheets for ammonia sensing application: a potential candidate for flexible sensors[J]. *J Sci Adv Mater Devices*, 2022, 7(2):100415.
- [31] Li CW, Pan LJ, Deng CH, et al. A flexible, ultra-sensitive strain sensor based on carbon nanocoil network fabricated by an electrophoretic method[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(28):9872–9878.
- [32] Jang Y, Kim SM, Spinks GM, et al. Carbon nanotube yarn for fiber-shaped electrical sensors, actuators, and energy storage for smart systems[J]. *Adv Mater*, 2020, 32(5):e1902670.
- [33] Li Q, Li J, Tran D, et al. Engineering of carbon nanotube/polydimethylsiloxane nanocomposites with enhanced sensitivity for wearable motion sensors[J]. *J Mater Chem C*, 2017, 5(42):11092–11099.
- [34] Choi J, Kwon D, Kim K, et al. Synergetic effect of porous elastomer and percolation of carbon nanotube filler toward high performance capacitive pressure sensors[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(1):1698–1706.
- [35] Yang D, Lee J, Kim D, et al. Flexible ultraviolet and ambient light sensor based on a nanomaterial network fabricated using selective and localized wet chemical reactions[J]. *Langmuir*, 2018, 34(14):4132–4141.
- [36] Wang Y, Yue Y, Cheng F, et al. $Ti_3C_2T_x$ MXene-based flexible piezoresistive physical sensors[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(2):1734–1758.
- [37] Gao L, Zhu C, Li L, et al. All paper-based flexible and wearable piezoresistive pressure sensor[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11(28):25034–25042.
- [38] Gullapalli H, Vemuru VSM, Kumar A, et al. Flexible piezoelectric ZnO -paper nanocomposite strain sensor[J]. *Small*, 2010, 6(15):1641–1646.
- [39] Zhang WY, Wu ZF, Hu JD, et al. Flexible chemiresistive sensor of polyaniline coated filter paper prepared by spraying for fast and non-contact detection of nitroaromatic explosives[J]. *Sens Actuat B Chem*, 2020, 304:127233.
- [40] Wang LR, Xu TL, Zhang XJ. Multifunctional conductive hydrogel-based flexible wearable sensors[J]. *Trac Trends Anal Chem*, 2021, 134:116130.
- [41] Chen S, Qi J, Fan S, et al. Flexible wearable sensors for cardiovascular health monitoring[J]. *Adv Healthc Mater*, 2021, 10(17):e2100116.
- [42] Chung M, Fortunato G, Radacsi N. Wearable flexible sweat sensors for healthcare monitoring: a review[J]. *J R Soc Interface*, 2019, 16(159):20190217.
- [43] Liu J, Liu M, Bai Y, et al. Recent progress in flexible wearable sensors for vital sign monitoring[J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(14):E4009.

(责任编辑:唐秋姗)