

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514086

镓基液态金属柔性传感器在医疗领域应用进展与挑战*

孙英^{1,2}, 张嘉琪^{1,2}, 田梓烨^{1,2}, 刘卫朋^{1,2}

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300401; 2. 河北工业大学河北省
电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300401)

摘要:在医疗领域中,传统传感器在使用时存在佩戴不适、信号衰减以及侵入性并发症等问题,而镓基液态金属柔性传感器凭借高导电性、柔韧性及生物相容性等独特优势,在医疗检测领域展现出了巨大的潜力。重点介绍了镓基液态金属柔性传感器在医疗检测领域的4种创新应用与技术进展。在生命体征感知方面,可实现对脉搏、呼吸、体表压力等动态生理参数的实时连续监测,为疾病早期预警提供数据支撑;在运动功能感知方面,能精准检测关节运动轨迹、吞咽功能协调性及肌肉力量等,为神经肌肉系统疾病的康复评估提供依据;在体表多参数感知方面,可无创检测体表温度、汗液成分等,为代谢异常等健康问题的早期识别提供新的技术路径;在深层电生理参数感知方面,突破了传统体内神经、脑电等微弱信号的采集瓶颈,为神经疾病诊疗提供了新型工具。深入剖析了镓基液态金属柔性传感器在疾病预警、术后监护、康复管理及个性化诊疗中的实际效果。总结了实际应用面临的封装可靠性、多物理场信号串扰及微弱信号采集等挑战,并探讨了相应的优化策略。最后,对镓基液态金属柔性传感器在医疗领域中的研究前景进行了展望。

关键词: 镓基液态金属;柔性传感器;医疗领域;无创检测;可穿戴设备

中图分类号: TP212 TH772 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Progress and challenge of gallium-based liquid metal flexible sensor in the medical field

Sun Ying^{1,2}, Zhang Jiaqi^{1,2}, Tian Ziyi^{1,2}, Liu Weipeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Key Lab of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In the medical field, traditional sensors often face challenges such as discomfort during wear, signal attenuation, and complications arising from invasiveness. Gallium-based liquid metal flexible sensors, with their exceptional advantages including high conductivity, flexibility, and biocompatibility, have shown great potential in medical diagnostics. This paper focuses on four innovative applications and technological advancements of gallium-based liquid metal flexible sensors in medical monitoring: in terms of vital sign sensing, these sensors enable real-time continuous monitoring of dynamic physiological parameters such as pulse, respiration, and surface pressure, providing data support for early disease warning; for motor function sensing, they can accurately detect joint motion trajectories, swallowing coordination, and muscle strength, serving as a basis for rehabilitation assessment in neuromuscular disorders; in multi-parameter surface sensing, the sensors allow non-invasive detection of skin temperature and sweat composition, offering new technical pathways for early identification of health issues such as metabolic disorders; in deep electrophysiological signal sensing, they break through the limitations of traditional methods in collecting weak internal signals such as neural and EEG signals, offering new tools for the diagnosis and treatment of neurological diseases. This paper provides an in-depth analysis of the practical applications of gallium-based liquid metal flexible sensors in early disease warning, postoperative monitoring, rehabilitation management, and personalized medicine. It also summarizes the key challenges in real-world applications, including packaging reliability, multi-physics field signal

收稿日期: 2025-05-26 Received Date: 2025-05-26

* 基金项目: 河北省省级科技计划(E2022202067)项目资助

crosstalk, and weak signal acquisition, and explores corresponding optimization strategies. Finally, the paper discusses the future research prospects of gallium-based liquid metal flexible sensors in the medical field.

Keywords: gallium based liquid metal; flexible sensor; medical field; non-invasive detection; wearable devices

0 引 言

在医疗领域中,传感器具有重要作用^[1-6],主要表现在患者监测、疾病诊断和治疗过程等方面,常见的传感器包括压力传感器、温度传感器和心电图传感器等。其中,压力传感器主要用于监控血压和输液泵流速^[7];温度传感器用于测量人体体温^[8];心电图传感器用于记录心脏的电信号特征;血氧传感器用于测定血液中的氧气饱和度^[9];血糖传感器帮助糖尿病患者监控血糖指标^[10];可植入传感器用于长期监控人体内的生理指标^[11]。但这些传统传感器存在不易贴合人体、成本高、便携性差、操作复杂、响应速度与精度低、数据传输稳定性差等不足。

镓基液态金属(gallium-based liquid metal, Ga-LM)柔性传感器凭借其高电导率^[12-13]、热导率^[14]以及优异的生物相容性,有效解决了传统传感器刚性设计导致的佩戴不适、侵入式监测引发的并发症等传统传感器存在的问题。镓基液态金属还具备出色的表面张力和优异的机械形变^[15-16],这些特性使其在生理参数监测领域展现出独特优势。镓基液态金属传感器技术的发展^[17],为医疗保健领域带来了更高的便捷性与安全性,显著提升了医疗检测设备的性能和患者舒适度。

基于镓基液态金属的重要特性,综述了其在医疗领域中应用进展,从生命体征、运动功能、体表多参数和深层生理信号 4 个方向出发,深度探讨了传感器在术后监护、慢性病管理和康复评估等情况下的实际应用效果。经研究发现,目前在镓基液态金属传感器的实际应用中仍面临一些问题,并针对这些问题总结了相应的优化策略。最后对镓基液态金属柔性传感器在医疗领域的发展前景进行了展望与思考。

1 在医疗领域测量中的应用

在医疗领域,根据生理信号的采集深度和临床应用目标,可将医疗测量分为生命体征、运动功能、体表多参数及深层生理参数 4 类场景。将镓基液态金属柔性传感器应用于上述 4 类场景,其主要检测的生理指标如表 1 所示。

研究表明镓基液态金属柔性传感器在实际应用中表现出独特优势,尤其在疾病预警、康复评估及个性化医疗等方面起到了关键作用。

表 1 镓基液态金属传感器在医疗领域的 4 类创新应用
Table 1 Four types of innovative applications of gallium-based liquid metal sensors in the medical field

医疗应用场景	主要检测生理指标
生命体征感知	脉搏、呼吸、体表压力
运动功能感知	关节运动、吞咽功能、肌肉力量
体表多参数感知	体表温度、汗液
深层生理参数感知	神经、脑电信号

1.1 生命体征感知型应用

在医疗健康检测领域,连续动态检测生命体征是精准医疗的关键。镓基液态金属柔性传感器凭借其独特优势,能够实时连续检测脉搏、血压、呼吸及体表压力分布,在生命体征检测领域发挥着重要作用。

1) 脉搏与血压

实时检测脉搏与血压^[18],可有效评估心血管系统的健康状态,及时发现异常情况,如高血压或低血压、心律不齐等疾病,为疾病预防、诊断及治疗效果评估提供客观依据。

通过检测颈动脉、指尖脉搏和手腕动脉等脉搏跳动时的压力变化,可实现对心率和血压的检测。2024 年 Xu 等^[19]将镓基液态金属柔性传感器集成于可穿戴设备中,通过检测血管波动的微小形变和压力变化,实现对脉搏波形、心率及血压的连续检测。2023 年 Chen 等^[20]开发了一种可适应湿润环境的新型电子皮肤,通过多层纤维结构与镓铟合金(eutectic gallium-indium, EGaIn)电极结合,解决了传统电子皮肤在湿润环境中透气性差、粘附性弱的问题。该电子皮肤可在剧烈出汗或水下稳定记录心电信号(如图 1 所示),并且连续佩戴一周对人体皮肤无刺激,为长期健康检测和虚拟现实的应用提供了新方案。

通过改进微通道结构,也可使镓基液态金属传感器实现对脉搏的测量。2023 年 Luo 等^[21]开发了一种基于镓基液态金属的柔性微流体应变传感器,采用 Peano 分形结构设计微通道来提升性能。在实际医疗应用中,该传感器通过贴合皮肤检测脉搏,辅助心血管疾病诊断;未来还可拓展至微创手术工具或植入式传感器,为个性化医疗提供动态生理数据支持。2024 年 Wang 等^[22]开发了基于 EGaIn 和碳纳米纤维复合材料的可拉伸纤维应变传感器,通过纳米纤维构建的微通道传感器具有良好的粘附性,通过将其贴敷于在手腕上,可以实现运动过程中的无线脉搏检测,如图 2 所示。

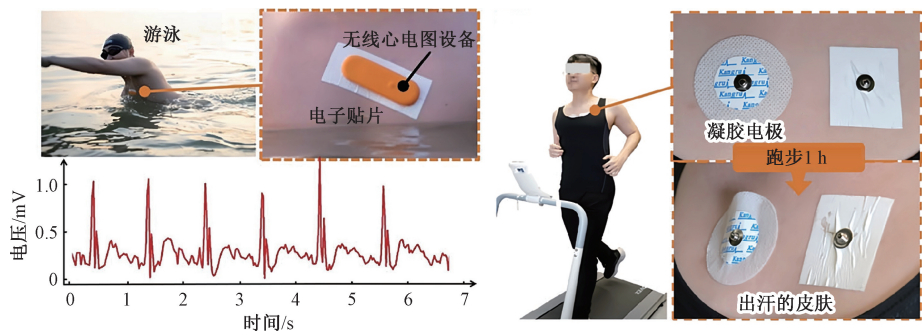


图 1 游泳跑步时依旧可以检测心电图
Fig. 1 ECG detection while swimming and running

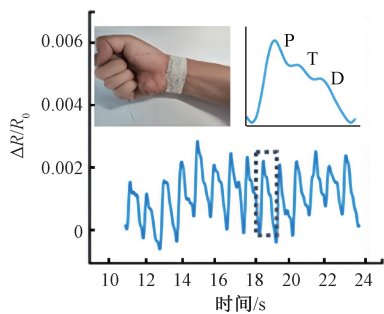


图 2 纤维应变传感器贴敷于手腕上对脉搏的检测
Fig. 2 Pulse detection using fiber strain sensor on the wrist

对血压测量的另一经典应用是将镓基液态金属传感器阵列化,实现精准测量。2025 年 Dong 等^[23]提出了一种基于镓基液态金属液滴的柔性触觉传感器,通过外部压力改变液滴与微通道的接触状态,从而调控电阻信号。该传感器可贴附于手腕皮肤检测动脉脉搏波形,实时获取脉搏率,将其阵列化并结合电阻抗断层成像技术,实现多点脉搏和血压测量的可视化。同时,韩国科学技术院利用 3D 打印技术^[24],制作出结合镓基液态金属与微凸块组的压力传感器阵列(如图 3 所示),可准确测量脉搏、血压,并且在保证性能的同时降低了成本。

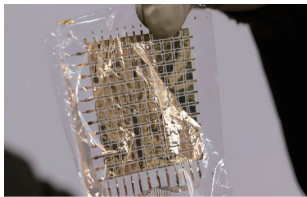


图 3 测量血压的传感器阵列
Fig. 3 Sensor array for blood pressure measurement

2) 呼吸检测

呼吸检测作为评估人体生命体征和健康状况的重要指标,能够实时反映呼吸系统的功能状态。通过呼吸节律、深度及气体成分的细微变化,间接检测心血管功能、

代谢异常甚至神经系统疾病。镓基液态金属柔性传感器凭借高导电性与形变适应性,可以无创贴合皮肤实时捕捉呼吸的微弱起伏,实现对呼吸信号的高灵敏度检测。

2024 年 Ma 等^[25]提出了一种基于镓基液态金属和导电墨水集成的高灵敏度的各向异性应变传感器。通过正交堆叠两个传感器,实现了对复杂多维运动的精确检测和控制,实时检测人体运动和呼吸状态,并成功集成于口罩和手套,用于健康监测和人机交互,如图 4 所示。

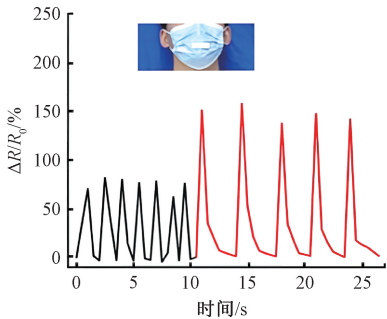


图 4 集成到口罩中检测
Fig. 4 Detection integrated into a mask

将传感器集成到织物中,可实现对呼吸的实时连续检测。2023 年 Bie 等^[26]通过探索镓基液态金属的独特物理和化学特性,设计了基于镓基液态金属的纺织品,用于呼吸检测等领域,为智能服装的多功能集成提供材料与技术支撑。文献[22]设计可拉伸纤维应变传感器,解决了液态金属流动性高与纤维基底粘附性差的矛盾,可以稳定地测量呼吸,如图 5 所示。

镓基液态金属传感器可在日常活动中检测人体呼吸。2023 年 Lazzari 等^[27]将 EGaIn 和聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 的混合,制备了一款轻量化结构的可穿戴传感器,如图 6 所示,通过检测胸部的扩张和收缩来定性分析呼吸模式,区分深呼吸、正常呼吸和浅呼吸,适用于非临床环境中的呼吸检测。该传感器结构简单且具有较好的抗干扰性,能够在复杂的环境中稳

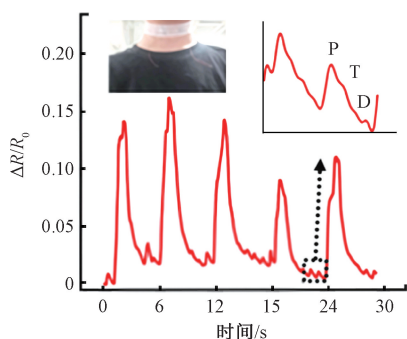


图5 应变传感器检测喉部信号

Fig. 5 Strain sensor detect throat signals

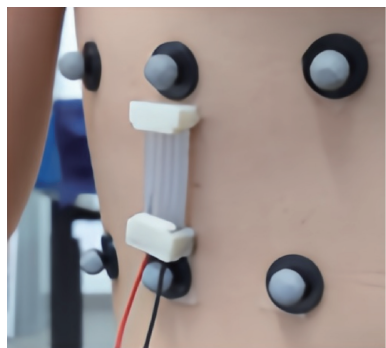


图6 传感器连接到胸部进行呼吸检测

Fig. 6 Sensor connected to chest for respiratory monitoring

定采集信号,实现对呼吸异常的实时检测,为严重病情的早期预警提供有效手段。

3) 体表压力

体表的压力检测可以通过检测人体接触面的压力分布而测得,在预防褥疮、优化康复辅具适配性及矫正异常步态等方面发挥关键作用。镓基液态金属柔性传感器可贴合在关节、足底等部位,通过实时检测体表压力分布,可为医疗护理和运动科学提供数据支撑。

2024年Zhou等^[28]开发了一种基于毛细管纤维的镓基液态金属压力传感器,提升了压力传感器的测量范围和线性度。该传感器可以实时追踪卧床患者的体位压力,及时根据压力信号来检测患者体位,有效预防压疮;将传感器微型化后可集成到手术器械或血管导管中,能提供触觉反馈或实时检测颅内压,可提升手术安全性和诊断精度。2024年Yi等^[29]通过将镓基液态金属与多壁碳纳米管集成开发出多孔柔性压阻式传感器来进行低压检测。该传感器具备高灵敏度、快速恢复响应及良好耐久性,能贴合复杂曲面,可以对体表压力进行监测,为未来开发具备多种传感功能的可穿戴设备提供了新的思路和技术基础。

将多模态信号处理与系统集成技术用于体表压力检测。2024年Mao等^[30]开发了一种基于镓基液态金属的

高分辨率、高弹性及多应用场景的电感式应变传感器,用于人体运动的无线监测。该传感器能够精确捕捉人体各种复杂运动,并实现无线传输数据,可将其应用于慢性病患者的长期健康跟踪和术后康复监控。同年,Gul等^[31]提出了一种基于镓基液态金属的软压力传感器,采用液态金属微通道阵列和穹顶结构设计,能够实时检测来自多个方向的压力,结合卷积神经网络算法实现了对压力方向和大小的实时预测(如图7所示),这种技术在软体机器人领域具有重要应用前景,特别是在需要精确感知和响应多向压力的场景中。

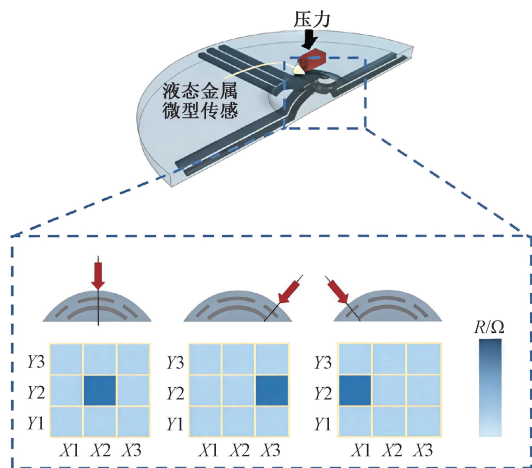


图7 液态金属软传感器进行多向压力识别示意图

Fig. 7 Schematic diagram of multi-directional pressure recognition using liquid metal soft sensor

1.2 运动功能感知型应用

在神经康复与肌肉骨骼系统的评估中,核心要求是对运动功能的精确检测。通过对关节运动轨迹、吞咽活动协调性及肌肉收缩力量的多参数协同分析,全面揭示运动功能障碍的病理机制,为脊髓损伤康复、吞咽障碍等复杂病症提供了精准的诊疗方案。

1) 关节运动

在骨科手术后的康复过程中,对关节活动度的测量比较依赖人工量角器或光学动作捕捉系统^[32],难以实现对患者术后日常活动中膝关节屈曲角度、肩关节外展幅度的连续测量。利用镓基液态金属柔性传感器超薄的结构贴附于皮肤表面,可精准捕获关节运动过程中皮肤的实时应变特征^[33],为患者的术后恢复和医生的诊断提供支撑。

新型材料与结构技术发展为关节运动检测提供了支撑。2022年荀元皓等^[34]通过3D打印技术,设计的传感器能够将物体的弯曲变形转化为镓基液态金属的电阻变化,实现高灵敏度的弯曲检测。如图8所示,该传感器能够实时检测人体关节的弯曲运动,适用于健康检测和运

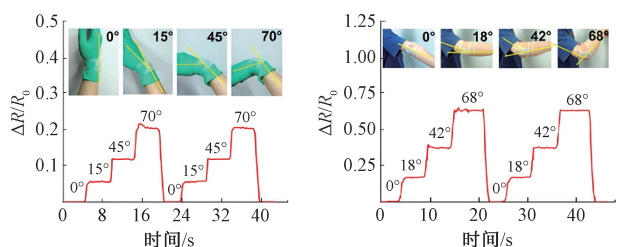


图8 传感器在手腕和手肘上高度弯曲检测

Fig. 8 High-flexion detection on wrist and elbow by the sensor

动追踪等场景。文献[21]设计的分形结构传感器除了

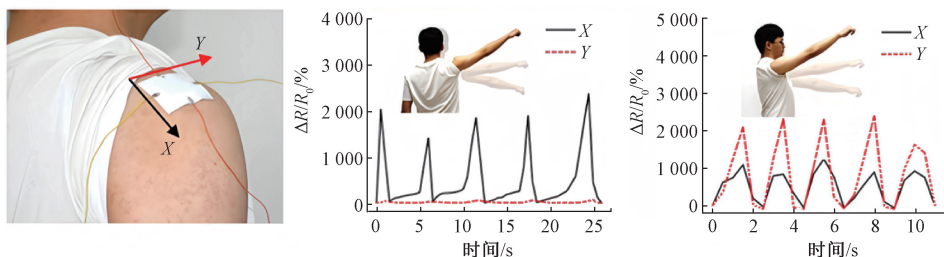


图9 在肩部的大范围检测的高灵敏度

Fig. 9 High sensitivity for large-area detection on the shoulder

2) 吞咽功能

对脑卒中患者吞咽障碍的临床评估,传统的视频透视检查存在辐射风险,且无法实时检测。将镓基液态金属传感器集成于柔性电子贴片贴在喉咙处,可实时提取喉结表面肌电信号且无刺激,通过分析这些数据,医生能够准确了解患者的吞咽功能状态,从而调整治疗策略,帮助患者更快康复。

2024年Li等^[36]通过调控弹性模量与介电常数,制备一款基于镓基液态金属的混合弹性体,该弹性体不仅支持光热响应调控与循环再生,还可以改变其微结构,进一步提升灵敏度和响应速度,使其可以检测喉部的肌电信号,对喉部肌肉在说话过程中的振动检测,如图10所示。结合深度学习对喉咙肌肉的振动信号进行分析,实现语音识别,该研究对咽喉疾病的治疗有着重要的意义。



图10 传感器对喉部的检测

Fig. 10 Detection of the larynx by the sensor

能检测脉搏,也能用于手腕和肘部进行实时的弯曲信号检测,为个性化医疗提供了动态生理数据支持。

对关节大范围运动检测的应用是,2023年Lu等^[35]提出了一种基于螺旋多层微流控纤维的镓基液态金属应变传感器,具有超宽的检测范围、可高度拉伸、出色的柔软性和弹性,能适应复杂的变形情况,非常适合用于人工关节或辅助下肢瘫痪患者行走的外骨骼等需要高灵活性和耐用性的场合。文献[22]所提到的可拉伸纤维应变传感器和文献[25]集成到口罩中的各向异性应变传感器也可以对关节进行大范围的检测,如图9所示。

镓基液态金属传感器用于喉部吞咽检测的经典应用是,2022年Li等^[37]通过将镓基液态金属与掺杂氮的石墨烯纳米片复合形成一种高灵敏度的多孔海绵结构的压力传感器,通过实验测试可以得到喉结吞咽运动过程中的肌电变化,该传感器在10 000次循环加载后仍保持稳定输出。该研究为可穿戴医疗监测与电子皮肤开发提供了低成本、高灵敏度的解决方案。

1.1节所介绍的一些生命体征感知型传感器也可用于吞咽动作的检测,如文献[21-22]均可利用传感器优异的柔韧性和灵敏度,捕捉皮肤表面的微小形变,进而识别喉部吞咽时的生理信号(如图11所示)。

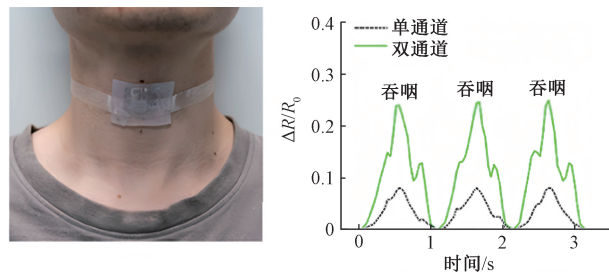


图11 传感器在吞咽过程中的相对阻值变化

Fig. 11 Relative resistance value change of the sensor during swallowing

文献[25]中的各向异性应变传感器也可用于吞咽检测,通过将其贴附在喉部,可捕捉吞咽时的微小应变变

化,能够有效区分不同的吞咽强度及频率,可实现对吞咽动作与语音信号的识别,为吞咽功能评估和语音辅助技术提供了高稳定性、高信噪比的检测手段,为健康监控系统和医疗诊断设备的发展提供了新的可能性。

3) 肌肉力量

对肌肉力量的实时检测评估,为神经肌肉疾病的诊断、康复效果监测以及个性化治疗方案的制定提供了数据支持。该过程还能通过分析肌肉状况实现功能障碍的预警,有助于提高治疗方案的针对性。

肌肉力量检测在日常健康和运动科学领域有着广泛的应用。2024 年金皓等^[38]设计了一种将镓基液态金属与 PDMS 结合的电容式柔性压力传感器,采用牺牲模板法制造出了具有不同尺寸孔隙的三维多孔结构的介电层,通过集成这些介电层,可使传感器具有高灵敏度、低迟滞性、循环耐久性和稳定性。该传感器可有效应用于人体活动监测,如步频检测和自行车踏频检测(如图 12 所示)。

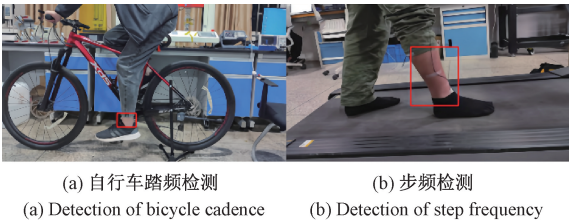


图 12 对人体活动的检测
Fig. 12 Detection of human activity

该传感器在运动分析和健康监测领域发挥重要作用,可以辅助护士调整患者的运动姿势,对于病人的术后恢复有很大的帮助。2023 年 Rice 等^[39]通过对比镓基液态金属传感器提出一种基于导电纤维的新型柔性可拉伸传感器,用于可穿戴设备对肌肉萎缩的检测。该传感器成本低、可集成至衣物,且无需专业人员操作,解决了镓基液态金属在拉伸性、安全性和耐久性上的局限,为肌肉萎缩的长期检测提供便捷检测方案。

对肌肉力量的检测也可用于假肢控制,2024 年 Chen 等^[40]提出一种基于镓基液态金属复合材料的高灵敏度压力传感器手环,通过检测前臂肌肉运动产生的压力信号,结合支持向量机分类算法,实现对 7 种复杂手势的实时准确识别。该系统设计了一款压力集中结构,显著增强了信号采集效率,可区分不同肌肉群的运动模式,支持对前臂肌肉张力的动态检测。这种传感器手环已成功应用于假肢的主从控制,帮助手部功能障碍者通过前臂肌肉运动远程操控假肢完成动作(如图 13 所示),也可以帮助工人在危险环境中实现安全的远程操作。

肌肉力量检测的另一种经典应用场景是用于肌肉活动检测。2025 年 Ding 等^[41]通过集成 5 个镓基液态金属传感器制备了一款下肢运动捕捉系统“数据护膝”,可测

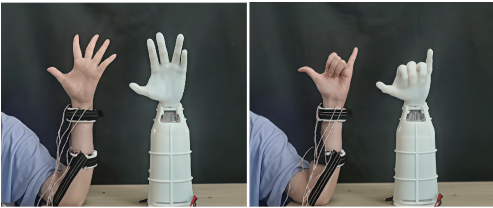


图 13 危险实验远程作平台
Fig. 13 Remote operation platform for dangerous experiments

量膝关节弯曲角度,并同步捕获肌肉活动信号(如图 14 所示),在检测肌肉收缩时表现出耐用性和可靠性,该数据护膝为肌电测量方案提供了新的思路。

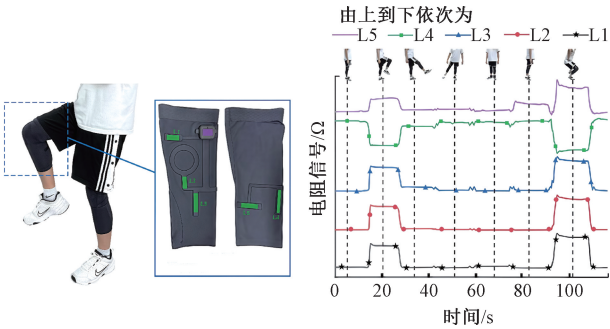


图 14 数据护膝对肌肉活动的检测
Fig. 14 Detection of muscle activity by data knee brace

2023 年 Yang 等^[42]把镓基液态金属与高粘附性 TPP 电极结合,设计了一款可测量拉伸表面肌电信号的电极阵列贴片(如图 15 所示),实现了对肌肉活动的多维度监测,其高灵敏度和稳定性可使其在复杂运动中实时捕捉肌电信号,通过频率变化量化肌肉疲劳程度,并结合 RMS 振幅实时分析肌肉负荷状态。

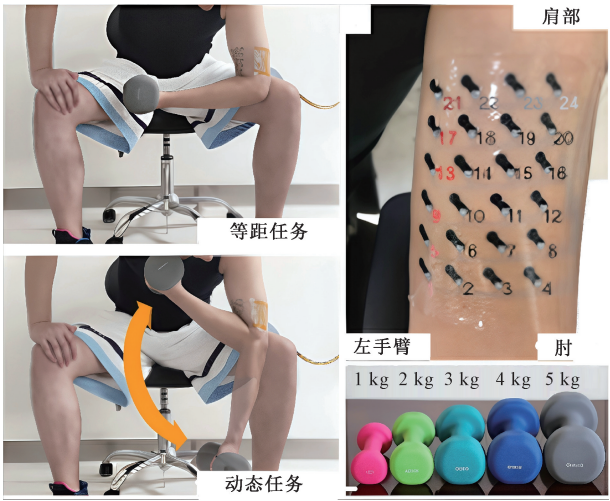


图 15 电极阵列贴片在运动过程中检测肌肉状态
Fig. 15 The electrode array patch monitors muscle activity during motion

使用该电极阵列贴片测量与肌肉损伤有关的多种参数,可为运动训练中的科学评估和损伤预警提供保障,同时其生物相容性和可长期穿戴性使其适用于日常健康监测和临床应用。

1.3 体表多参数感知型应用

随着生物医学工程的进步,对非侵入式、连续性健康监测技术的需求日益增加。体表温度与汗液成分作为反映人体代谢状态与电解质稳态的重要生理指标,其动态数据检测对疾病预警和健康管理具有重要意义。镓基液态金属柔性传感器可紧密贴合皮肤曲面,实现温度场的动态检测和汗液成分分析,为体表多参数的无创感知提供了高精度、低刺激的测试方案。

1) 体表温度

体表温度场的分布可以反映局部组织代谢、微循环状态及病理特征等生理信息。镓基液态金属柔性传感器优异的生物相容性与超薄柔性结构,使其能够无创贴合皮肤表面,实现长期、动态的体温检测,尤其适用于烧伤、慢性炎症等会影响体温的疾病检测。

体表温度检测可用于临床监护,精准定位体温异常区域。2025 年 Hu 等^[43]通过 3D 打印技术制备了具有优异机械性能,且自修复效率高达 99.5% 的新型镓基液态金属传感器,良好的柔韧性和自粘附性使其能够紧密贴

合皮肤,并通过多层电路的设计实现了对温度的精确检测。如图 16 所示,该传感器可以在检测手指、肘部和腕部等弯曲运动的同时检测体表温度。



图 16 传感器用于日常活动检测
Fig. 16 Sensors for daily activity detection

2024 年 Menke 等^[44]提出了一种新型的丝状镓基液态金属电极,通过将电纺蜘蛛丝与镓基液态金属结合,使其能够紧密贴合皮肤表面,减少传感器与皮肤之间的热阻,从而捕捉局部温度差异。该电极良好的透气性,可有效减少汗水积聚,避免因汗液影响温度测量的准确性。

体表温度检测在手术过程中具有重要意义。2023 年 Zhang 等^[45]开发了一种基于 EGaIn 的可拉伸双参数传感器,可同步检测 0℃~60℃ 的温度变化和 22.5% 的关节弯曲应变,可以在测量范围内有效减少信号串扰,如图 17 所示。

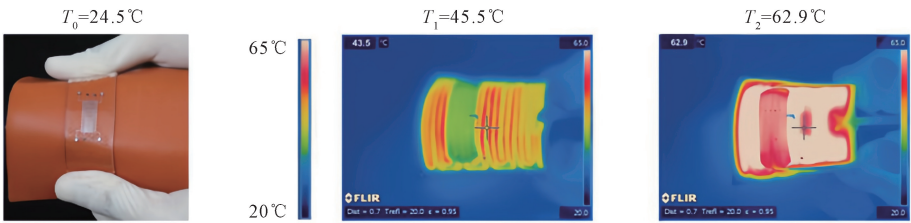


图 17 温度加载期间传感器的红外热图像
Fig. 17 Infrared thermal imaging of the sensor during temperature loading

通过嵌入 EGaIn 微电极,传感器能够将变形和温度刺激分别转化为电容和电阻信号,从而实现对 2 种信号的同时测量。该传感器在微创手术或复杂外科手术期间,可以实时提供身体的运动数据和体温变化信息,帮助医生实时调整手术方案。

在日常生活中,体温检测可以帮助人们实现无创健康管理。2023 年 Chen 等^[46]通过将镓基液态金属集成到电离凝胶纤维中,制备了一个能够检测压力和温度的传感器,可以检测微小的生理活动如脉搏跳动和手腕运动,并且对冷热源具有良好的温度感应能力(如图 18 所示),为未来人体热代谢评估及血管功能诊断等医学场景提供技术支持。

同样的,Wang 等^[47]开发了一种基于镓基液态金属的可穿戴触觉传感器,也能够同时独立地测量体表温度

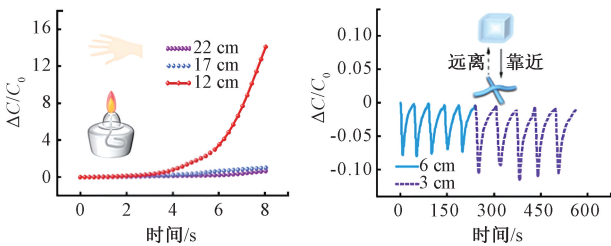


图 18 传感器抓取物体时对温度和压力的测量
Fig. 18 Measurement of temperature and pressure as the sensor grabs the object

和接触力,该传感器利用惠斯登电桥电路,实现了力信号和温度信号的解耦及独立测量(如图 19 所示)。该传感可改善假肢使用者的操作体验和康复训练的效果。

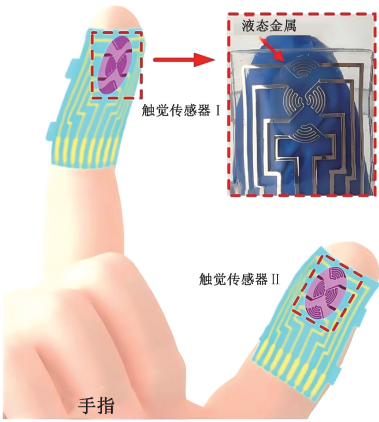
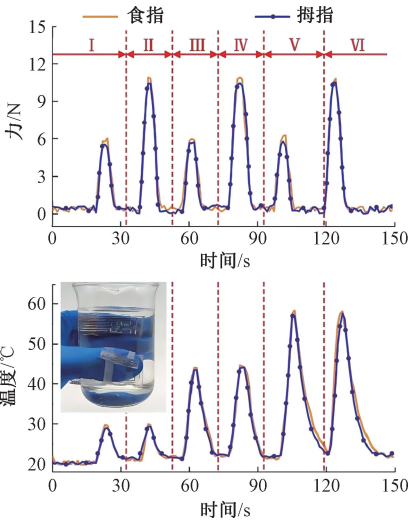


图 19 传感器的接近感应与温度感知性能

Fig. 19 Proximity and temperature sensing performance of the sensor



开发能够在极端环境下稳定检测体温的传感器是至关重要的。2023 年 Zhang 等^[48]开发了一种可拉伸的镓基液态金属水凝胶,可在-25℃~80℃极端环境下稳定工作,如图 20 所示。

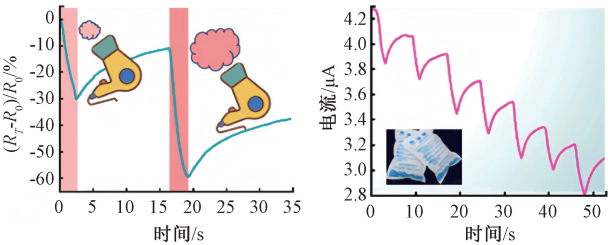


图 20 水凝胶传感器对冷源和热源的响应

Fig. 20 Hydrogel sensor response to cold and heat sources

该水凝胶被用作多功能传感器,能够实现温度检测和对人体运动的检测,且具备良好的机械强度和抗疲劳特性,这对于持续检测病人的体温变化有着重要意义,特别是在重症监护病房或手术过程中,准确的体温监控有助于及时发现并处理可能出现的问题。

2) 汗液分析

汗液检测作为一种非侵入性、动态化的生物监测手段,通过分析汗液中的电解质、代谢物及相关疾病的检测物,在健康状态评估和疾病早期预警中展现出重要意义,未来有望推动临床诊断,为个性化医疗和健康管理提供了新的思路。

2025 年 Peringeth 等^[49]设计了一款自供电汗液传感系统,能够有效收集和分析汗液。使用镓基液态金属可进一步优化系统性能,提升对汗液中电解质检测的灵敏度,并在潮湿环境下能保持稳定。Ma 等^[50]通过将 EGaIn

涂覆到电纺弹性纤维毡上,使其贴敷在衣服上作为汗液传感器的电容电极,如图 21 所示。用该电极制备的传感器能够实时检测汗液的体积变化和溶质浓度,有助于医护人员实时对病人的出汗率和汗液成分进行检测。

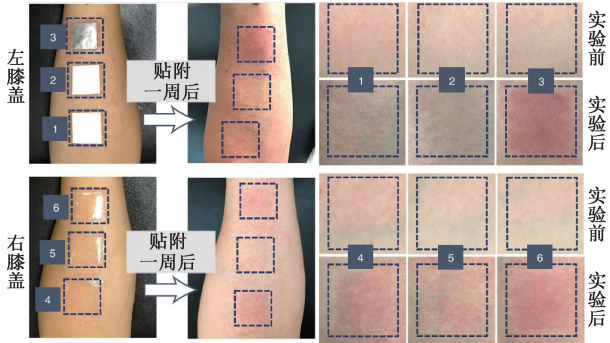


图 21 传感器具有优良的透气性方便进行汗液的采集

Fig. 21 Sensor with excellent breathability for sweat collection

镓基液态金属传感器可通过检测汗液来分析血液中的葡萄糖浓度。2022 年 Chen 等^[51]提出一种基于镓基液态金属的双层电化学传感系统,利用液态金属的流动性和导电性,在织物上制造了柔软、透气且贴合皮肤的微型电化学检测系统,用于检测汗液中的葡萄糖,该系统在不同浓度的葡萄糖溶液中均能检测到稳定的信号,且不受汗液的影响。通过检测汗液中的葡萄糖,可以提供一种无创、连续的血糖监测方案,帮助患者更好地管理病情。

1.4 深层生理参数感知型应用

随着生物医学工程技术的不断进步,对体内深层组织的微弱电生理信号进行精确监测,成为科研和临床实践医学的重要目标之一。深层次的信号检测不仅能够揭

示心脏、脑部及其他重要器官的功能状态,而且对于早期疾病诊断、治疗效果评估以及基础生物学研究具有不可替代的意义。

1) 深层肌电

镓基液态金属柔性传感器通过高导电性和柔性贴合性,可以显著提升深层肌电信号检测的灵敏度与信噪比,突破传统传感器在信号衰减、运动伪影及贴合稳定性方面的局限。其生物相容性和自修复能力支持长期穿戴,可推动深层肌肉活动检测向动态化、高精度方向发展。

2023 年 Shang 等^[52]开发了一种基于镓基液态金属的电子外神经,用于增强体感系统的传感能力。该设备可直接贴附于皮肤,通过电阻变化实时检测微弱肌电信号,无需复杂的信号滤波处理,可在剧烈运动和长期使用中保持稳定。相比传统光学动作捕捉系统和惯性测量单元,该传感器在运动员膝关节弯曲违规检测、脊柱姿态量化评估等场景中表现出高精度和抗干扰性(如图 22 所示),并已应用于奥运选手的训练监测。其生物相容性和透气设计进一步推动了其在医疗康复和运动科学领域的应用。

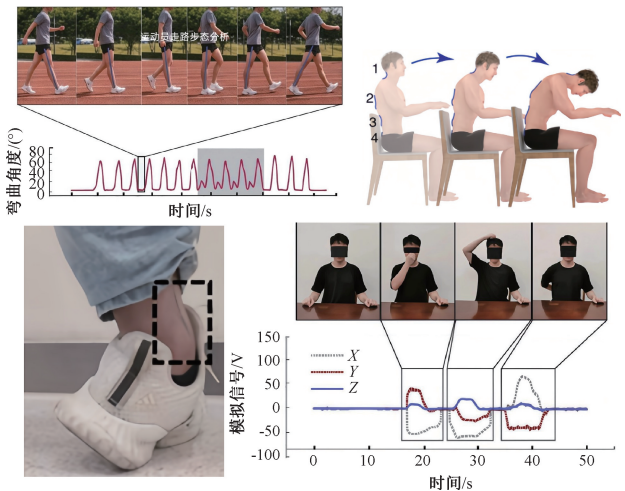


图 22 在生活中对深层肌电信号的检测
Fig. 22 Detection of deep EMG signals in daily life

在深层肌电测量中,对脑电信号的测量是必不可少的。2023 年 Zhang 等^[53]开发了一种基于 EGaln 合金的 20 通道柔性神经电极阵列。在大鼠实验中,该电极阵列成功采集到麻醉状态下的高信噪比(80:1)脑电信号(如图 23 所示),并利用源定位技术解析了声音刺激引发的丘脑后内侧膝状体的信号。该电极通过镓基液态金属的流动性实现了与颅骨的动态共形接触,解决了传统刚性电极因力学性能不匹配导致的信号衰减问题,为脑机接口和神经疾病诊疗提供了新型工具。

深层肌电检测的另一关键信号是心电信号。2018 年 Wang 等^[54]开发了一种基于镓铟合金的液态金

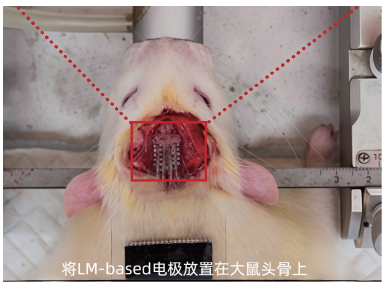


图 23 传感器对脑电神经信号的检测
Fig. 23 Detection of EEG nerve signals by sensors

属柔性电子皮肤。该器件直接印刷在皮肤表面,能够紧密贴合人体轮廓的细微纹理。通过动物实验(如图 24 所示)表明镓铟合金在心电信号检测中表现出低接触电阻、高信号稳定性,并在模拟除颤治疗中实现了均匀的电场分布和能量传递效率,该技术为深度微弱心电信号检测提供了新的设计思路。

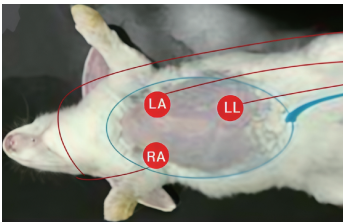


图 24 贴在兔子胸部对肌电与心电的检测
Fig. 24 Detection of electromyography and electrocardiography affixed to the rabbit chest

2) 神经信号

镓基液态金属柔性传感器解决了传统刚性电极与生物组织的刚度不匹配问题,可动态贴合神经组织并减少炎症反应,提升神经信号采集的稳定性,为神经疾病诊疗等领域提供了一种兼具柔性与稳定性的创新技术途径。

文献[55]于 2025 年总结了不同频率电刺激在神经损伤治疗中的作用机制及应用效果,总结得出低、中、高 3 种频率的电刺激对于帮助受损神经的修复各具优势,为未来的研究提供了方向。2022 年 Tang 等^[56]开发了一种中频的基于镓基液态金属的柔性流体袖带电极,用于长期神经刺激和信号记录。该电极可植入大鼠的坐骨神经,在两周内持续记录到高信噪比的神经信号,并通过电刺激触发了皮层体感区的电位响应,如图 25 所示,该电极具备神经信号双向传输能力,为开发新一代神经接口提供了创新方案。

2023 年 Lee 等^[57]开发了一种基于镓基液态金属的柔性可拉伸电子材料。在对神经信号精准检测的基础上解决了氧化和污染问题,成功实现了对多巴胺的高灵敏

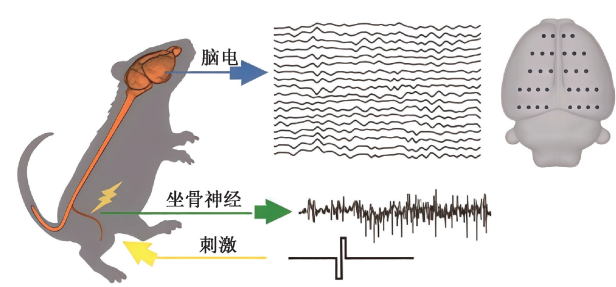


图 25 小鼠受到刺激时的神经信号反应
Fig. 25 Neural signal response in mice under stimulation

度检测、神经动作电位的长期记录以及人体肌电的实时监测,为下一代柔性神经信号检测提供了新的策略。

对神经信号的检测可以帮助恢复视觉神经。2024 年 Chung 等^[58]开发了一种基于镓基液态金属的柔软人工视网膜,用于视觉恢复。该设备能够有效刺激视

网膜神经细胞,并在视网膜退化的小鼠模型中通过光刺激引发神经反应(如图 26 所示),展现了其在视觉恢复中的巨大潜力。该设备能够通过无监督机器学习方法分析神经活动,为视网膜退化患者的神经恢复提供一种新的治疗手段。

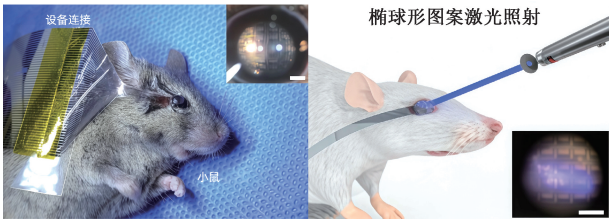


图 26 对小鼠的视网膜进行激光实验
Fig. 26 Laser experiment on mouse retina

综上,镓基液态金属柔性传感器在医疗领域四类创新应用中的主要特点及优势如表 2 所示。

表 2 医疗领域的 4 类创新性应用对比				
Table 2 Comparative analysis of four innovative applications in the medical field				
应用场景	特点	技术突破	临床价值	独特挑战
生命体征感知	高灵敏度、无创、实时连续检测	无线动态检测	术后监护效率 ^[19] 提升 30%	液态金属泄漏与封装失效、抗体液侵蚀
运动功能感知	精准检测复杂运动模式、适用于康复评估	多模态数据融合	康复评估精度 ^[36] 提高 40%	微小形变精确捕捉、长期舒适性
体表多参数感知	实现多参数同时检测、提高健康检测的全面性	自修复封装	代谢异常预警 ^[51] 提前 2 h	温度、湿度交叉干扰、汗液成分复杂
深层生理参数感知	无创、高信噪比、长期稳定性	双向神经信号传输	神经疾病诊断准确率 ^[56] 提升 25%	生物相容性认证、信号串扰抑制

目前,镓基液态金属柔性传感器已在个性化健康监测的临床实践中应用,如广西壮族自治区人民医院^[59]为提升患者的舒适度,采用可穿戴式镓基液态金属传感器测量病人翻身改变体位的效果,降低了压力损伤发病率和病人及医院经济负担。可以预见,镓基液态金属柔性传感器正推动医疗检测向无创化、精准化和智能健康管理方向发展,为未来的智慧医疗奠定了重要基础。

2 技术挑战与传感器优化策略

尽管镓基液态金属柔性传感器在医疗领域展现出巨大的应用潜力,但其实际推广仍面临多重技术挑战。对于本文提出的创新应用,从后文 4 个维度来分析现在存在的问题,并给出优化策略。

2.1 液态金属泄漏与封装失效

镓基液态金属柔性传感器长期穿戴或植入时,汗液、

组织液等体液易侵蚀封装材料,导致液态金属泄漏,严重影响传感器可靠性。此外,反复机械形变可能破坏封装结构,引发传感器性能衰减。

优化策略:1)新型封装材料开发。采用具有自修复功能的聚合物(如动态交联聚氨酯)或仿生多层复合结构,通过化学键重组或物理阻挡增强密封性。如 2024 年 Ding 等^[60]通过重整糖模板法封装镓基液态金属材料来防止泄露。2)原位封装技术。利用光固化或热固化工艺,在液态金属微通道表面直接形成致密保护层,减少界面缺陷。文献^[25]通过形成三明治型传感器,实现高机械强度和抗疲劳特性,并且封装效果良好。

2.2 多物理场耦合干扰

温度变化、机械应变与生化参数间的交叉敏感现象(如温度波动引起电阻式传感器输出漂移),会导致测量精度下降。

优化策略:1)采用多模态信号解耦技术,将信号进行

分开处理,避免信号交叉影响。设计分层传感结构,如文献[45]采用电容-电阻分离的3层架构,结合数学拟合方程解耦形变与温度信号,将平均误差分别降至0.04 mm和0.82℃。2)智能补偿算法。集成差分电路或机器学习模型,实时校正环境干扰。如文献[40]通过结合支持向量机分类算法对复杂手势进行分类,有效排除了环境干扰,实现高精度语音识别。

2.3 微弱生理信号提取

心电、肌电等体表及皮下生理电信号因幅值微弱,在信号采集过程中易受运动轨迹、工频干扰、肌电串扰以及环境电磁噪声的影响,导致信号出现漂移或波形畸变。

优化策略:1)设计低阻抗电极。采用液态金属水凝胶复合电极,水凝胶的离子导电性与液态金属的电子导电性可以协同降低界面阻抗。如2025年Wei等^[61]研究的液态金属水凝胶电极有效减少了运动时电极-皮肤界面分离导致的基线漂移和运动伪影。2)设计抗干扰电路。采用仪表放大器(如AD8221)抑制共模噪声,结合锁相放大电路提取特定频率信号。如2024年Algueta-Miguel等^[62]利用双传感器差分消除干扰,结合有限长单位冲激响应(finite impulse response, FIR)滤波和功率谱密度分析精准提取二次谐波信号,将有效分辨率提升至15.98位。

2.4 长期植入的生物安全性

镓基液态金属的生物降解机制尚不明确,长期植入人体可能引发炎症或金属离子蓄积,阻碍ISO 10993国际医疗器械生物相容性认证。

优化策略:1)加速老化实验。模拟体液环境进行长达12个月的浸泡测试,监测镓基液态金属形貌、离子释放及力学性能变化。如文献[57]通过实验验证了液态金属袖带电极在植入体内的稳定性。2)多物种动物实验。在大鼠、兔、猪等模型中进行急性毒性(7天)、亚慢性毒性(90天)及免疫反应测试。如2024年Wang等^[63]通过实验发现,镓基液态金属接触血液后未引发溶血,红细胞、白细胞、血小板等关键指标保持正常范围。

3 未来与展望

随着液态金属这一前沿研究领域的不断发展,在传感器应用前景方面的创新理念不断涌现,为镓基液态金属柔性传感器在医疗领域的应用奠定了基础。

未来,镓基液态金属柔性传感器的研究热点为:1)开发新型复合封装材料。通过仿生结构设计和动态化学键等方法提升封装材料的自修复效率与机械稳定性,解决液态金属泄漏与长期穿戴稳定性问题。2)多功能集成与智能算法融合通过微型化电路设计与多物

理场解耦技术,降低信号串扰,使传感器可集成检测温度、压力、肌电等多种生理参数,并结合机器学习对多维数据进行实时分析,实现个性化的健康管理。3)低功耗系统开发开发微型化、低功耗的集成系统,实现无创连续检测与实时预警。开发柔性电路与可穿戴设备的无缝集成方案,如智能服装、电子皮肤等,提升患者舒适度与医疗检测的便捷性。4)建立生物安全性评估体系。研究加速老化实验和动物实验,系统评估其长期植入后的生物安全性。5)绿色设计。开发可降解或可回收的镓基液态金属复合材料,减少电子废弃物污染,推动绿色医疗电子产业发展。

综上,镓基液态金属柔性传感器在材料创新、功能集成、临床适配性及经济性等方面具有应用潜力。通过自修复封装与多功能集成设计突破传统传感器的性能瓶颈;借助微型化与低功耗技术降低制造成本,推动其在医疗领域检测的大规模应用。镓基液态金属传感器的生物安全性和材料可降解性将加速其在重症监护、神经信号记录及个性化诊疗中的临床应用,实现医疗服务的智能化与精准化。未来有望在智慧医疗、康复工程及家庭健康管理等场景中,提供高灵敏度、高可靠性测量方案,开启无创化、个性化医疗新篇章。

4 结 论

镓基液态金属柔性传感器在医疗健康检测领域的应用展现了不可忽视的潜力,在生命体征、运动功能、体表多参数和深层生理参数感知领域,凭借高导电性、柔韧性和生物相容性等独特优势,解决了传统传感器佩戴不适、信号衰减及侵入性并发症等问题。通过紧密贴合皮肤实现连续无创检测,并结合算法优化与多模态数据融合,提升了数据采集的准确性和可靠性,为术后监护、慢性病管理、运动健康等个性化健康管理提供了可靠支持。

本研究梳理了镓基液态金属柔性传感器在医疗检测领域中的创新应用,并针对液态金属泄漏、多物理场干扰及长期生物安全性等挑战,提出了一系列对应优化策略。未来,通过多功能集成设计、微型化制造与智能算法融合,该技术将推动医疗检测技术从被动诊断向主动健康管理转型,在提升诊疗精准度的同时,优化患者的就医体验,为精准医疗与个性化诊疗提供核心技术支撑。

参考文献

- [1] ZHANG X H, WANG B, ZHOU B, et al. Recent advances in MXene-based flexible pressure sensors for medical monitoring [J]. *Rare Metals*, 2025, 44 (6): 3653-3685.
- [2] 郑悦,景晓蓓,李光林. 人机智能协同在医疗康复机器

- 人领域的应用[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2373-2380.
- ZHENG Y, JING X B, LI G L. Application of human-machine intelligence synergy in the field of medical and rehabilitation robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2373-2380.
- [3] ZHUANG Y Y, FU Y, HUANG SH, et al. The application of intelligent sensors in medical research: A review [J]. Biomedical Engineering Communications, 2023, 2(3): 38-53.
- [4] XIE H Y, LI H X, ZHENG CH Y, et al. Decomposing and fusing intra-and inter-sensor spatio-temporal signal for multi-sensor wearable human activity recognition[J]. ArXiv preprint arXiv:2501.10917, 2025.
- [5] HALEEM A, JAVAID M, SINGH R P, et al. Biosensors applications in medical field: A brief review[J]. Sensors International, 2021, 2: 100100.
- [6] 孙英, 郭腾蛟, 李笑. 深度与形貌检测的仿生磁致伸缩触觉传感器设计及实验测试[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 214-223.
- SUN Y, GUO T J, LI X. Design and experimental test of the bionic magnetostrictive tactile sensor for depth and shape detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 214-223.
- [7] JENTZSCH M, LECHNER W, WOSZIDLO R, et al. The dynamic response of a pressure transducer for measurements in water [J]. Experiments in Fluids, 2024, 65(8): 125.
- [8] KUDASHEV E B, YABLONIK L R, LIU J H. Acoustic transducer of turbulent pressure fluctuations in a temperature-stratified medium [J]. Acoustical Physics, 2018, 64(1): 99-104.
- [9] TRIANA Y, OGATA G, TOMISAKI M, et al. Blood oxygen sensor using a boron-doped diamond electrode[J]. Analytical Chemistry, 2022, 94(9): 3948-3955.
- [10] 刘静, 房晓峰, 袁振, 等. 有机纳米光学传感器及血糖定量成像研究[J]. 中国激光, 2022, 49(15): 173-181.
- LIU J, FANG X F, YUAN ZH, et al. Organic nano-optical sensors and quantitative glucose imaging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(15): 173-181.
- [11] WEIDENMULLER J, DOGAN O, STANITZKI A, et al. Implantable multi-sensor system for hemodynamic controlling[J]. Technisches Messen: Sensoren, Gerate, Systeme, 2018, 85(5): 359-365.
- [12] 孙英, 刘乃源, 余臻伟, 等. 基于 NFC 的可穿戴传感器中柔性/可拉伸天线的研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 122-137.
- SUN Y, LIU N Y, YU ZH W, et al. Research progress of flexible/stretchable antennas in wearable sensors based on NFC [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 122-137.
- [13] SABORIO M G, CAI SH X, TANG J B, et al. Liquid metal droplet and graphene co-fillers for electrically conductive flexible composites[J]. Small, 2020, 16(12): 1903753.
- [14] BARK H, TAN M W M, THANGAVEL G, et al. Deformable high loading liquid metal nanoparticles composites for thermal energy management[J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11(35): 2101387.
- [15] PARK Y G, LEE G Y, JANG J, et al. Liquid metal-based soft electronics for wearable healthcare [J]. Advanced Healthcare Materials, 2021, 10(17): 2002280.
- [16] WANG Q, YU Y, YANG J, et al. Fast fabrication of flexible functional circuits based on liquid metal dual-trans printing[J]. Advanced Materials, 2015, 27(44): 7109-7116.
- [17] 于佩弘, 郝天煦, 赵一聪, 等. 基于镓基液态金属的柔性传感的研究进展[J]. 丝绸, 2025, 62(2): 45-53.
- YU P H, HAO T X, ZHAO Y C, et al. Research progress on flexible sensing based on gallium-based liquid metals[J]. Journal of Silk, 2025, 62(2): 45-53.
- [18] 曹从军, 赖凯旋, 王旭升, 等. 基于柔性压电薄膜的可穿戴脉搏传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(10): 35-47.
- CAO C J, LAI K X, WANG X SH, et al. Design of wearable pulse sensor based on flexible piezoelectric thin film[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 35-47.
- [19] XU H CH, LU J CH, XI Y K, et al. Liquid metal biomaterials: Translational medicines, challenges and perspectives [J]. National Science Review, 2024, 11(2): nwad302.
- [20] CHEN F, ZHUANG Q N, DING Y CH, et al. Wet-

- adaptive electronic skin[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(49): 2305630.
- [21] LUO Y L, FAN H, LAI X J, et al. Flexible liquid metalbased microfluidic strain sensors with fractal-designed microchannels for monitoring human motion and physiological signals[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2024, 246: 115905.
- [22] WANG J Y, REN SH H, JIA X T, et al. Liquid metal and carbon nanofiber-based strain sensor for monitoring gesture, voice, and physiological signals [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(2): 1664-1673.
- [23] DONG SH, MA G, XIONG ZH W, et al. Liquid metal reversible contacts for flexible tactile sensor with high sensitivity and wide detection range [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2025: 2401019.
- [24] KIM K, CHOI J, JEONG Y, et al. Highly sensitive and wearable liquid metal-based pressure sensor for health monitoring applications; Integration of a 3D-printed microbump array with the microchannel [J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2020, 9(7): 202000313.
- [25] MA CH, WANG K, GAO D Y, et al. Highly sensitive and selective flexible anisotropic strain sensor based on liquid metal/conductive ink for wearable applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 281: 111538.
- [26] BIE B L, XU W L, LYU Y G. Liquid metal-based textiles for smart clothes[J]. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(6): 1511-1529.
- [27] LAZZARI F, GAVIATI M, GARAVAGLIA L, et al. A liquid-metal wearable sensor for respiration monitoring: Biomechanical requirements, modeling, design, and characterization [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(6): 6243-6253.
- [28] ZHOU X P, ZHANG Q. A capillary fiber-based liquid metal pressure sensor [J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(10): 105035.
- [29] YI Y, LIU EN Z, DENG H. Porous flexible piezoresistive sensor using liquid metal for low pressure detection[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 375: 115536.
- [30] MAO J, HE Z D, WU Y ZH, et al. Ultra-high resolution, multi-scenario, super-elastic inductive strain sensors based on liquid metal for the wireless monitoring of human movement [J]. *Materials Advances*, 2024, 5(14): 5813-5822.
- [31] GUL O, KIM J, KIM K, et al. Liquid-metal-based soft pressure sensor and multidirectional detection by machine learning[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2024, 9(12): 2302134.
- [32] 李志晗,刘银华,谢锐康,等. 基于关节运动估计的人体行为识别[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(24): 153-160.
- LI ZH H, LIU Y H, XIE R K, et al. Human action recognition based on joint motion estimation[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(24): 153-160.
- [33] 孙英,汪忠晟,韩智昊,等. 镓基液态金属柔性应变传感器的设计优化与实验验证[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(1): 16-26.
- SUN Y, WANG ZH SH, HAN ZH H, et al. Design optimization and experimental verification of gallium-based liquid metal flexible strain sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(1): 16-26.
- [34] 荀元皓,张壮,范炜程,等. 基于液态金属的大变形柔性弯曲传感器设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2022(6): 1-5, 11.
- XUN Y H, ZHANG ZH, FAN W CH, et al. Design of large deformation flexible bending sensor based on liquid metal[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2022(6): 1-5, 11.
- [35] LU S J, JIAO J, LI X, et al. An ultrawide range, highly stretchable liquid metal force and strain sensor based on spiral multilayer microfluidic fibers[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 20(1): 4-11.
- [36] LI W J, WU SH J, ZHOU Q M, et al. Harmonizing elastic modulus and dielectric constant of elastomers for improved pressure sensing performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(25): 32727-32738.
- [37] LI Y, CUI Y G, ZHANG M J, et al. Ultrasensitive pressure sensor sponge using liquid metal modulated nitrogen-doped graphene nanosheets [J]. *Nano Letters*, 2022, 22(7): 2817-2825.
- [38] 金皓,张宇,秦亚飞,等. 基于镓基液态金属的电容式柔性压力传感器[J]. *电子元件与材料*, 2024, 43(4): 402-410.

- JIN H, ZHANG Y, QIN Y F, et al. Flexible capacitive pressure sensor based on gallium based liquid metal[J]. *Electronic Components and Materials*, 2024, 43(4): 402-410.
- [39] RICE A, KIOURTI A. A stretchable, conductive thread-based sensor towards wearable monitoring of muscle atrophy[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2023, 70(8): 2454-2462.
- [40] CHEN Y, TAO ZH, CHANG R ZH, et al. Liquid metal composites-enabled real-time hand gesture recognizer with superior recognition speed and accuracy[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(37): 2305251.
- [41] DING Y, NAN T H, WANG F J, et al. Data knee pads: A lower limb motion capture system based on heterogeneous sensors[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2025, 29(7): 4716-4727.
- [42] YANG SH J, CHENG J H, SHANG J, et al. Stretchable surface electromyography electrode array patch for tendon location and muscle injury prevention[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6494.
- [43] HU M Y, YU J Y, LI W H, et al. 3D printed self-healing, degradable on-skin electronics with liquid metal for multi-functional monitoring[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 505: 159190.
- [44] MENKE M A, LI B M, ARNOLD M G, et al. Silky liquid metal electrodes for on-skin health monitoring[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2024, 13(3): 202301811.
- [45] ZHANG P, FU J H, LIU M Y, et al. Liquid-metal-based stretchable dual-Parameter sensor for simultaneous detection of deformation and temperature[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(5): 2201264.
- [46] CHEN J W, ZHU G X, WANG J, et al. Multifunctional iontronic sensor based on liquid metal-filled hollow ionogel fibers in detecting pressure, temperature, and proximity[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(5): 7485-7495.
- [47] WANG Y CH, LU Y T, MEI D Q, et al. Liquid metal-based wearable tactile sensor for both temperature and contact force sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(2): 1694-1703.
- [48] ZHANG W, WANG P L, HUANG L ZH, et al. A stretchable, environmentally tolerant, and photoactive liquid metal/MXene hydrogel for high performance temperature monitoring, human motion detection and self-powered application[J]. *Nano Energy*, 2023, 117: 108875.
- [49] PERINGETH K, GANGULY A, PAL A, et al. Self-powered microfluidic-based sensor for noninvasive sweat analysis[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2025, 423: 136859.
- [50] MA ZH J, HUANG Q Y, XU Q, et al. Permeable superelastic liquid-metal fibre mat enables biocompatible and monolithic stretchable electronics[J]. *Nature Materials*, 2021, 20(6): 859-868.
- [51] CHEN X Q, WAN H, GUO R, et al. A double-layered liquid metal-based electrochemical sensing system on fabric as a wearable detector for glucose in sweat[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, 8(1): 48.
- [52] SHANG J, TANG L X, GUO K Q, et al. Electronic exoneuron based on liquid metal for the quantitative sensing of the augmented somatosensory system[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2023, 9(1): 112.
- [53] ZHANG X L, LIU B X, GAO J R, et al. Liquid metal-based electrode array for neural signal recording[J]. *Bioengineering*, 2023, 10(5): 578.
- [54] WANG X L, ZHANG Y X, GUO R, et al. Conformable liquid metal printed epidermal electronics for smart physiological monitoring and simulation treatment[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2018, 28(3): 034003.
- [55] 刘敏琦,高明威,褚晓蕾,等. 不同频率电刺激促进周围神经损伤的恢复[J]. *中国组织工程研究*, 2025, 29(14): 3061-3069.
- LIU M Q, GAO M W, CHU X L, et al. Different frequencies of electrical stimulation promote recovery from peripheral nerve injury[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2025, 29(14): 3061-3069.
- [56] TANG R Y, ZHANG CH L, LIU B, et al. Towards an artificial peripheral nerve: Liquid metal-based fluidic cuff electrodes for long-term nerve stimulation and recording[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, 216: 114600.
- [57] LEE J H, LEE Y S, YOO J, et al. Study for the liquid metals enabled stretchable electronics[J]. *Journal of Industrial Technology*, 2023, 43(1): 25-31.

[58] CHUNG W G, JANG J, CUI G, et al. Liquid-metal-based three-dimensional microelectrode arrays integrated with implantable ultrathin retinal prosthesis for vision restoration[J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19(5): 688-697.

[59] 彭婉琳,董旭辉,李蓓,等. 可穿戴式传感器预防医院获得性压力性损伤的研究进展[J]. *护理研究*, 2023, 37(14): 2602-2605.

PENG W L, DONG X H, LI B, et al. Research progress on prevention of hospital acquired pressure injury by using wearable sensor[J]. *Chinese Nursing Research*, 2023, 37(14): 2602-2605.

[60] DING X L, JIANG Y P. Lightweight, highly extensible, and anti-leak liquid metal elastomer composites with an interpenetrating architecture[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2024, 26(23): 2401244.

[61] WEI J J, CHEN H, PAN F, et al. Reusable liquid metal-based hierarchical hydrogels with multifunctional sensing capability for electrophysiology electrode substitution[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(16): 15554-15564.

[62] ALGUETA-MIGUEL J M, BEATO-LOPEZ J J, LOPEZ-MARTIN A J, et al. A lock-in amplifier for magnetic nanoparticle detection using GMI sensors[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024,

73;3470988.

[63] WANG X P, HE Y Y, WU Y D, et al. The biocompatibility of gallium-based liquid metals with blood and serum[J]. *iScience*, 2024, 27(11):111183.

作者简介



孙英(通信作者), 分别于 1994 年、2001 年和 2008 年于河北工业大学获得学士、硕士、博士学位, 现为河北工业大学教授、研究生导师, 主要研究方向为智能材料与器件。

E-mail:sunying@hebut.edu.cn

Sun Ying(Corresponding author) received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees from Hebei University of Technology in 1994, 2001 and 2008, respectively. Now she is a professor and master's supervisor at Hebei University of Technology. Her main research interest is intelligent materials and devices.



张嘉琪, 2023 年于郑州航空航天大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为智能材料与器件。

E-mail: 202331402132@stu.hebut.edu.cn

Zhang Jiaqi received his B. Sc. degree from Zhengzhou University of Aeronautics in 2023. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His research mainly focuses on intelligent materials and their applications in flexible sensors.