

液态金属的仿生智能柔性传感器及其应用

王一帆

北京工商大学，北京，102445；

摘要：随着可穿戴设备、健康监测与人机交互的飞速发展，对智能传感器的需求正从刚性、笨重向柔性、仿生、智能化方向演进。基于液态金属的仿生智能柔性传感器应运而生，它代表智能材料在前沿交叉领域的最新成就。文章从仿生学原理出发，深入剖析了其在结构仿生与功能仿生方面的特色与个性化设计。进一步详细阐述其卓越的使用性能，并对比解决传统刚性传感器与早期柔性传感器在舒适性、耐用性、灵敏度与生物相容性等方面的固有瓶颈。最后，文章展望其与大数据、人工智能融合后，在构建高度个性化、智能化生活图景中的革命性潜力。

关键词：液态金属；仿生智能材料；柔性传感器；个性化健康；人机交互

DOI：10. 64216/3104-9672. 25. 03. 020

前言

我们正处在一个由技术深度赋能生活的时代，个性化需求的爆发式增长对传统材料与器件提出了前所未有的挑战。智能材料作为一类能够感知环境变化，并据此做出主动、适度响应的先进功能材料，是实现这一转变的核心物质基础^[1]。从形状记忆合金在血管支架中的自适应展开，到电致变色玻璃根据光照调节透光率，智能材料正悄然重塑着医疗、建筑、交通乃至日常生活的每一个角落^[2]。

1 液态金属仿生智能柔性传感器的特色与个性化

1.1 仿生学理念的深度融合

1.1.1 结构仿生：模拟皮肤的多级感知网络

人体皮肤是一个复杂的多层感知器官，由表皮、真皮和皮下组织构成，内部嵌藏着迈斯纳小体、环层小体等多种触觉感受器，分别对不同类型和频率的机械刺激敏感，形成了分布式、多级化的感知网络^[3]。

液态金属柔性传感器的结构仿生主要体现在以下三方面：

第一，仿生多层结构。传感器设计常模拟皮肤的三层结构。底层为柔软的封装基材，模拟皮下组织，提供缓冲与支撑；中间层为图案化的液态金属通道网络，模拟真皮层中的神经末梢和血管网络，负责信号传导与分配；顶层有时会设计具有微结构（如金字塔、圆顶）的敏感层，模拟表皮指纹和触觉小体，增强对压力的敏感度^[4]。

第二，仿生神经网络布局。利用液态金属易于图案

化的特性，可以将其加工成仿照人体体感神经分布的树状、网状或螺旋形电路。例如，在智能手套的每个指关节处布设蛇形液态金属导线，完美模拟指部神经的分布，实现对每个关节弯曲角度的独立、精准监测。这种布局不仅提高了感知覆盖率，还实现了信息的空间编码^[5]。

第三，仿生微通道设计。受生物体内毛细血管网络的启发，研究者构建了具有多级分形结构的液态金属微流道。这种结构在宏观拉伸下，应力分布更均匀，避免了局部应力集中导致的失效，从而显著提升了传感器的可拉伸范围和疲劳寿命^[6]。

1.2 材料的特色与个性化体现

1.2.1 类生物性能：与人体组织的力学相容

其弹性模量与人体软组织（如皮肤、肌肉）高度匹配，避免传统硬质材料因模量不匹配引起的异物感、局部应力屏蔽甚至组织发炎等问题。这种“柔软”的特性确保了与人体长期、舒适、安全的共形接触，是实现无感化、长期化健康监测的前提。

1.2.2 动态智能响应性能：多物理场感知

除了对应变的卓越响应，通过材料复合与结构创新，该传感器可实现对多种环境刺激的动态响应。例如，在液态金属复合材料中引入热敏高分子，可使传感器电阻随温度变化，实现体温监测；将液态金属与磁性颗粒复合，可制备出对外界磁场敏感的器件，用于运动追踪和虚拟现实交互。这种多模态感知能力，使其能更全面地捕捉环境与人体状态信息。

1.2.3 高效的生物相容性与安全性

以镓为基础的液态金属，其生物毒性远低于汞，且当其被完全封装在生物相容性良好的硅橡胶或聚氨酯等弹性体中后，与人体组织直接隔离，确保了使用的安全性。这使得它能够直接与皮肤接触，甚至在未来有望应用于可植入式设备中。

2 液态金属仿生智能柔性传感器的使用性能以及问题解决

2.1 卓越的使用性能

2.1.1 极致的力学适配性

该传感器最引人瞩目的性能是其超高的拉伸性和压缩回弹性。其力学性能可通过选择不同的封装基材和液态金属图案化结构进行精确“裁剪”，从而适配从柔软内脏到承重关节等不同力学环境的组织。例如，用于喉部吞咽监测的传感器需要极高的柔软度和微小应变灵敏度，而用于膝关节活动度监测的传感器则需要更宽的应变范围和更好的抗疲劳性。液态金属传感器体系可以满足这些多样化的需求。

2.1.2 先进的加工与集成性

该传感器与现代增材制造技术具有天生的亲和力。主要分为以下三个方面。

1. 直写 3D 打印：可将液态金属墨水直接打印到弹性基底上，快速形成复杂电路。

2. 嵌入式 3D 打印：将液态金属打印到未固化的弹性体浆料中，实现完全嵌入式、保护性更好的三维电路。

3. 4D 打印：打印的传感器结构可在特定刺激（如热、磁）下发生预编程的形变，从而动态调整其感知特性或与环境的接触状态。

这些技术使得快速原型制造和个性化定制成为可能，极大地推动其从实验室走向实际应用的进程。

2.2 解决传统传感器问题的效能

2.2.1 解决舒适性贴合度不足

传统金属应变片或刚性 PCB 电路板无法与人体柔软的、动态变化的曲面保持共形接触，不仅产生不适感，更会导致信号失真甚至脱落。液态金属传感器以其“柔软如肤”的特性，完美贴合身体，穿着舒适，实现了“无感监测”，用户依从性大幅提高。

2.2.2 解决耐用性与可靠性差

早期的碳基或导电聚合物柔性传感器，在大变形或循环载荷下，导电填料容易发生不可逆的分离或断裂，

导致电阻急剧增加、信号不稳定甚至完全失效。液态金属凭借其流动性，在形变时通过流动适应新的几何形状，而非断裂，因此具有天生的抗过载能力和极长的疲劳寿命，解决了可靠性的核心难题。

2.2.3 解决功能单一与集成度低

传统的传感器通常“一器一用”，测量应变、压力和温度需要分别使用不同的传感器，系统复杂、臃肿。液态金属平台作为一个多功能载体，通过单一材料体系和巧妙的结构设计，即可实现多种物理量的同步测量，极大地简化了系统架构，降低了功耗和体积，为设备的小型化、轻量化奠定了基础。

2.2.4 解决生物相容性与安全性隐患

某些纳米材料（如碳纳米管、银纳米线）的生物长期安全性仍在评估中，存在潜在风险。液态金属，特别是镓基合金，在充分封装后已被证明具有可靠的生物安全性，为长期、甚至未来的植入式应用打开了大门，这是传统材料难以企及的。

3 液态金属仿生智能柔性传感器的价值及与传统传感器性能对比

3.1 在个性化生活中的核心价值

3.1.1 颠覆性的使用体验

第一，个性化健康管理。传统 Holter 心电图机导线繁多，佩戴不适，且只能短期监测。而贴在胸口的液态金属柔性心电贴片，轻薄柔软，可连续数天监测心电图，捕捉偶发性心律失常。结合 AI 算法，可为用户提供个性化的心脏健康风险评估与预警。同样，用于睡眠监测的柔性胸带和腹带，无任何硬物感，可精准分析睡眠分期和呼吸暂停事件，极大地改善了用户体验。第二，康复医学。为中风患者定制的、集成液态金属传感器的康复手套，可以实时、精确地监测手指关节的运动轨迹和力度，并将数据反馈给医生和治疗师，用于远程评估康复进度并调整个性化治疗方案，使康复训练更具趣味性和科学性。

3.1.2 前瞻性的智能设计

自然人机交互：传统鼠标、键盘是“人适应机器”的交互方式。液态金属传感器使得“机器适应人”成为可能。例如，集成在衣物袖子上的传感器阵列可以识别复杂的手势，用于控制 AR/VR 场景中的物体，或作为无声的指挥指令。安装在智能家居墙面上的柔性传感薄膜，可

以通过识别不同的敲击模式来控制灯光、音乐，实现“无感不界面”的沉浸式交互。

软体机器人感知系统：液态金属传感器作为软体机器人的“电子皮肤”，赋予其触觉感知能力。这使得护理机器人能够以合适的力度抓取易碎物品，或感知被护理人的体温和压力，提供更安全、更人性化的服务。

3.1.3 生活舒适度的质的提升

智能服饰与鞋履：在运动鞋鞋垫关键压力点植入液态金属压力传感器，可以实时分析用户的步态、足底压

力分布，并通过 APP 给出个性化的鞋具选择和运动姿势建议，预防运动损伤。智能运动衣则可监测肌肉群的激活状态和疲劳程度，指导科学训练。

智能家居环境：将大面积液态金属压力传感阵列嵌入床垫或沙发，可以实时感知人体的压力分布，并动态调节不同区域的气囊或支撑结构，为每位家庭成员提供最符合其生理曲线的睡眠和坐卧支撑，有效缓解腰背疲劳。

3.2 与传统传感器的性能差异对比

表 1 液态金属仿生智能柔性传感器与传统传感器的性能差异对比

性能维度	液态金属仿生智能柔性传感器	传统刚性传感器（如金属应变片）	早期柔性传感器（如碳浆/导电聚合物）
拉伸性	极优（300% - 1000%）	极差（<5%）	中等（通常<100%，易发生不可逆变形）
舒适性与贴合度	优，可与曲面共形，柔软无感	差，刚性，有异物感，易脱落	中等，柔软但贴合度与厚度相关
导电性	极优（~10 ⁶ S/m，与金属相当）	优	较差至中等（10 ⁻¹ - 10 ⁴ S/m）
响应稳定性与疲劳寿命	极优（>10,000 次循环）	优（但在大变形下失效）	较差（循环后导电性下降，易漂移）
功能集成度	高，易于实现多模态感知	低，通常功能单一	中等，集成难度较大
加工与个性化定制	优，兼容 3D/4D 打印，易于定制	差，标准化生产，难以定制	中等，可定制但精度和复杂性受限
生物相容性与安全性	优（良好封装后）	中等（金属离子可能析出）	待评估（纳米材料潜在风险）
成本	目前较高，有下降趋势	低	低至中等

4 结论

展望未来，随着材料体系的进一步优化、制造工艺的不断革新以及与人工智能、云计算技术的深度融合，液态金属仿生智能柔性传感器必将朝着更智能、更集成、更生命化的方向演进。它有望在未来成为我们身体不可或缺“数字外衣”或“电子器官”，持续感知内外环境变化，为实现真正意义上的、以人为中心的个性化智能生活提供坚实的物质基础与技术驱动力。

参考文献

[1] 赵月. 仿生智能高分子水凝胶材料的设计制备及其生物应用[D]. 吉林大学, 2020.

[2] 王宇, 张宇轩, 李梦琪. 仿生触觉传感技术的研究进展与发展趋势[J]. 自动化学报, 2023, 49(5): 945-966.

[3] Dickey M D. Stretchable and Soft Electronics

cs using Liquid Metals[J]. Advanced Materials, 2017, 29(27): 1606425.

[4] 郭小军, 顾洪成, 刘静. 液态金属印刷电子学：从基础到应用[J]. 科学通报, 2020, 65(10): 889-906.

[5] 孙清璐, 胡亚茹, 王莹, 等. 纳米纤维素基智能柔性驱动材料的研究进展[J]. 林产化学与工业, 2025, 45(02): 139-150.

[6] Liu S, Yang D, Wang S, et al. Liquid-metal-based stretchable conductors for wearable electronics[J]. Nature Reviews Materials, 2023, 8(8): 573-591.

作者简介：王一帆，（2005.1-），女，吉林省延吉市人，汉族，本科在读，研究方向：国际经济与贸易。