

传感器如何赋能可穿戴设备？

九三学社中央科技委副主任、中国传感器与物联网产业联盟常务副理事长 郭源生

在全球科技革命与产业变革纵深演进以及我国“十五五”规划战略目标的确立下，可穿戴传感器作为连接物理世界与数字智能的核心枢纽，正以微型化、低功耗、高集成的技术特质，成为践行健康中国战略、推动产业智能化升级的关键支撑。其兼具民生属性与产业价值的双重特质，不仅重塑着个人健康管理的范式，更深度融入工业安全防护、公共服务优化等多领域场景，驱动生活方式与生产模式的系统性变革。

随着主动健康理念普及与制造业数字化转型提速，传统监测手段已难以满足实时化、精准化、场景化的多元需求。市场追求更精准的状态感知与更长续航，医疗领域亟须突破无创检测与实时干预瓶颈，工业与特种场景则对防护等级与抗干扰能力提出严苛要求。这些差异化需求正成为可穿戴传感器技术创新的核心驱动力，而可穿戴传感器凭借微型化、低功耗、多参数监测的技术优势，恰好能精准匹配各类需求，既能对个人提供全天候健康数据追踪，推动主动健康管理理念普及，又能为工业场景搭建“人一机一环境”协同监测体系，实现生产安全与效率的双提升。这种技术与需求的深度耦合，不仅加速了其在敏感机理、材料选择、结构设计上的迭代创新，更让其在多领域的应用从“单点试水”走向“系统渗透”，成为连接民生改善与产业升级的关键纽带。

消费级可穿戴传感器：以舒适性与低功耗为核心需求

消费级可穿戴设备主要面向日常健康监测、运动记录等场景，对佩戴舒适性、续航能力和成本敏感度较高，因此传感器需具备柔性化、低功耗、小型化的特点，大多采用电容式、电阻式或光电式敏感机理。

在材料选择上需平衡性能与成本。柔性基底多采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚酰亚胺(PI)等高分子材料，具有良好的柔韧性和生物相容性，可贴合皮肤佩戴，成本也较低，适合大规模量产；心率传感器常用硅基光电二极管，加速度传感器则采用MEMS工艺制备的硅基电容结构，既能满足小型化需求，又能将功耗控制在微瓦级，保障设备续航时间达7-14天。

消费场景可穿戴设备以智能手环、手表、耳机为载体，核心需求是满足

用户日常健康监测、运动记录、便捷交互，同时需兼顾佩戴舒适度与续航能力，因此传感器设计需在功能实用性、功耗控制、体积小化之间实现平衡。

常见的传感器种类包括：心率监测传感器针对静息心率追踪和中高强度运动监测场景；加速度传感器为实现步数统计和运动模式识别，确保步数计数无漏计、多计，静态时低速率降低功耗，运动时高速率保证数据连续性；骨传导传感器针对运动时清晰通话、避免耳道堵塞需求，同时支持低频振动过滤参数，抑制风噪、衣物摩擦等环境干扰。

传感器结构需小型化、贴合人体，同时配合设备整体形态实现隐蔽集成。例如，智能手环/手表传感器模块采用贴片式封装，心率传感器尺寸控

制在 $3 \times 3 \times 1\text{mm}$ 以内，与加速度传感器、环境光传感器集成于同一PCB板；布局于设备背部贴近皮肤的凸起区域，周围环绕黑色硅胶遮光胶圈，防止环境光从侧面干扰光电检测。PCB板采用4层板设计，顶层布置传感器元件，底层接地，中间层传输信号，减少电磁干扰。

多传感器参数融合算法方面，生理参数融合针对可穿戴设备对人体生理状态的精准监测需求，采用心率、血氧、体温等协同工作模式，通过优化卡尔曼滤波算法，对多源生理数据进行动态融合。

具体来说，利用卡尔曼滤波的预测-更新机制，消除单一传感器因运动干扰、环境光线变化导致的测量误差，例如在运动场景下，心率传感器易

受手臂晃动影响，结合血氧传感器的脉搏波信号进行修正，可将心率测量精度误差控制在 $\pm 2\text{bpm}$ 以内，同时提升血氧饱和度测量的稳定性，确保生理参数输出的连续、可靠；运动参数融合为实现对人体姿态、运动状态的准确识别，整合加速度、陀螺仪、地磁传感器的数据，采用Mahony算法进行姿态解算。通过加速度传感器获取线性加速度，陀螺仪提供角速度数据，地磁传感器确定方向基准，Mahony算法通过对三者数据的加权融合，实时计算出设备佩戴者的俯仰角、滚转角、航向角，解决单一传感器在静态时漂移、动态时精度不足等问题，使姿态识别误差 $\leq \pm 1^\circ$ ，支持跑步、骑行、游泳等多种运动模式的自动识别，以及跌倒、失衡等危险姿态的快速判断。

医疗级可穿戴传感器：以高精度与生物相容性为核心需求

医疗级可穿戴设备主要用于慢性病管理、术后监测等场景，需满足临床级检测精度，同时长期佩戴不能引发皮肤过敏或组织损伤，因此高精度、高稳定性和生物相容性是核心要求。

在材料选择上对生物相容性要求严苛。基底材料需选用经过生物相容性认证的医用级硅橡胶、聚乳酸(PLA)等，避免引发皮肤刺激；敏感元件方面，CGM传感器的工作电极常采用金、铂等贵金属，表面修饰纳米级碳材料(如碳纳米管、石墨

烯)以提高电子传导效率，同时包裹生物相容性膜层防止酶活性降低；无创血压传感器的压力敏感单元则多采用硅基压阻式MEMS结构，搭配医用级聚氨酯袖带材料，确保长期使用的稳定性。此外，医疗传感器还需具备抗干扰能力，例如通过屏蔽层设计减少电磁干扰对检测信号的影响，保障在医院复杂电磁环境下的检测准确性。

医疗场景对传感器的性能要求远高于消费级，需在稳定性、生物相容性、抗干扰能力上达到医疗设备标

准。高稳定性方面，在 $35^\circ\text{C}\sim 42^\circ\text{C}$ 人体正常体温范围内，CGM传感器的血糖测量误差漂移 $\leq \pm 5\%$ ，连续工作14天内精度衰减不超过10%。

在生物相容性要求方面，与皮肤直接接触需通过ISO 10993生物相容性测试，CGM传感器的皮下探针采用医用级不锈钢或聚酰亚胺材质，表面涂覆肝素涂层，降低组织排异反应和炎症风险；心电图的电极片采用银/氯化银凝胶材质，既保证导电性能，又避免长时间佩戴导致皮肤过敏或刺激；传感

器封装材料需使用医用级硅胶或聚氨酯，具备透气、防水特性，减少皮肤闷湿问题。

在强抗干扰要求方面，CGM传感器需抵抗汗液、组织液的腐蚀，同时过滤运动导致的探针微位移干扰，采用双电极差分检测技术降低环境电磁噪声；心电图内置工频滤波器和肌电滤波器，剔除市电干扰和肌肉收缩产生的噪声；智能血压计采用脉搏波振荡法结合柯氏音法，通过算法过滤袖带松动等因素导致的测量误差。

工业与特种可穿戴传感器：以耐极端环境与高可靠性为核心需求

与消费场景和医疗场景相比，工业与特种场景对可穿戴传感器的要求最为严苛。

工业场景存在易燃易爆、高温高湿、电磁干扰强、机械冲击频繁等复杂工况，因此传感器设计需严格遵循工业安全标准，在防爆性能、抗冲击能力、宽温工作范围、耐化学腐蚀等方面达到工业级要求。而特种场景所用的可穿戴设备更为特殊，多用于军事作战、消防救援、深海潜水、极地科考等极端环境，核心需求

是在高温、高压、强冲击、强辐射等恶劣条件下，实时监测人员生命体征、环境危险因子，并具备快速预警、应急通信等功能。因此，传感器设计需突破常规性能极限，满足极端环境下的耐受性、可靠性和响应速度要求，同时兼顾设备的轻量化和对人员行动的无干扰性，确保在关键时刻为用户提供安全保障和决策依据。

在材料选择上，工业与特种传感器需优先满足环境适应性。基底

材料多采用耐高温、耐化学腐蚀的工程塑料或金属合金，部分极端场景甚至会使用陶瓷材料，确保传感器在 $-40^\circ\text{C}\sim 125^\circ\text{C}$ 的温度范围内正常工作；敏感元件方面，气体传感器的检测电极需采用耐中毒的贵金属合金，避免长期暴露在含硫、含硅气体中失效；冲击传感器的压电元件需选用高机电耦合系数的PZT陶瓷，搭配耐冲击的封装材料，防止振动导致元件损坏。此外，工业与特种传感器还需具备高防护等级，通

常达到IP67或IP68，通过密封圈、防水透气膜等设计，防止粉尘、液体侵入内部电路。

多传感器参数融合算法方面，环境参数融合面向工业、特种等场景的环境风险监测需求，融合温度、湿度、气体传感器的数据，基于模糊逻辑融合算法构建环境风险评估模型。模糊逻辑算法可有效处理传感器输出的不确定、非线性数据，相比单一传感器报警，可避免因环境参数波动导致的误报，提高环境风险预警的准确性。

未来可穿戴传感器：注重跨学科融合与数据隐私

可穿戴设备系统集成核心技术方案主要包含三种：一是功耗优化技术，该技术主要针对可穿戴设备续航短的痛点，在系统集成阶段采用“边缘计算+动态功耗管理”架构。一方面，将多传感器数据的预处理部署在设备端的边缘计算单元，减少原始数据传输带来的能耗；另一方面，通过动态唤醒机制，根据用户使用场景智能调节传感器工作模式；二是小型化集成设计，该设计为保证可穿戴设备的佩戴舒适性，采用芯片级集成和柔性电路设计技术。在硬件层面，将多传感器与微控制器(MCU)、无线通信模块集成在单一系统级封装(SiP)芯片上，缩小硬件体积30%以上；三是在电路设计层面，

使用柔性PCB板，配合超薄电池和轻量化外壳，使设备厚度控制在5mm以内，可无缝集成到手环、手表、贴片等日常活动；多系统兼容性保障为实现可穿戴设备与手机、工业终端、云端平台的协同工作，在系统集成时采用标准化通信协议和数据接口。

未来可穿戴传感器有四大核心发展趋势。

一是敏感机理的跨学科融合趋势。未来可穿戴传感器将更多借鉴生物医学、材料科学、量子技术等领域的原理，开发新型敏感机制。例如，模仿人体皮肤感知，开发基于离子凝胶的“人工触觉感受器”，实现对

纹理、硬度的精细化识别；利用量子点的荧光特性，开发可检测多种生物标志物的光学传感器，将检测下限降至 pg/mL 级别。

二是制造工艺的微纳集成化趋势。采用MEMS(微机电系统)与柔性电子结合的工艺，实现传感器、信号处理电路、无线传输模块的薄片集成。例如，通过晶圆级封装技术，将6轴IMU、心率传感器、蓝牙芯片集成在0.5mm厚的柔性基板上，器件体积缩小至传统分离式设计的1/10，功耗降低40%以上。预计到2028年，微纳集成式可穿戴传感器在消费电子领域的渗透率将超过70%。

三是能源供给的自主化趋势。摆

脱对锂电池的依赖，开发基于人体能量收集的自供电技术。例如，利用人体汗液中的乳酸进行微生物燃料电池发电，为智能手环传感器供电；通过压电纤维将走路时的机械能转化为电能，为智能鞋垫传感器持续供电。这种自主化能源供给将使可穿戴设备实现“终身免充电”，解决续航焦虑问题。

四是数据安全的内生防护趋势。针对医疗级可穿戴设备的数据隐私问题，开发“端侧加密+联邦学习”技术。传感器采集的生理数据在设备端直接加密，传输过程中不泄露原始数据；在模型训练时，采用联邦学习方式，多个设备的数据分析在本地完成，仅共享模型参数，避免用户隐私泄露。

全球市场规模及应用领域

Markets and Markets及中国电子元件行业协会数据显示，2024年全球可穿戴传感器市场规模达到128.7亿美元，同比增长19.2%；中国市场规模为35.2亿美元，占全球市场的27.3%，同比增速23.5%，高于全球平均水平。预计全球市场将以18.5%的年度复合增长率增长，2030年规模有望突破300亿美元；中国市场年复合增长率将达22.1%，2030年规模将超100亿美元，成为全球最大的可穿戴传感器单一市场。

按应用领域划分，2025年全球可穿戴传感器市场已呈现“消费级主导，医疗级、工业级快速崛起”的格局。消费级可穿戴传感器的规模约76.3亿美元，占比59.3%，主要应用于智能手表、智能手环、TWS耳机等设备。其中，2025年心率传感器出货量达8.2亿颗，血氧传感器出货量5.7亿颗，分别同比增长15.1%和28.3%；医疗级可穿戴传感器的规模约32.6亿美元，占比25.3%，增速最快，核心驱动为慢性病管理(如糖尿病、高血压)和居家养老需求；工业与特种可穿戴传感器的规模约19.8亿美元，占比15.4%，同比增长16.8%，主要应用于智能制造、物流仓储、公共安全等场景。2025年，工业智能手

套传感器出货量达210万套，同比增长33.8%；智能安全帽传感器出货量180万套，同比增长27.5%，主要受益于“工业互联网”政策推动下的工厂安全生产改造需求。

产业链方面，全球高端材料中柔性基底PI膜主要由美国杜邦、日本东丽、日本宇部兴产等垄断；石墨烯、纳米金颗粒领域无绝对垄断企业，核心供应商分布于美、日、韩及中国内地。国内企业在石墨烯薄膜、柔性PI膜领域逐步突破，在消费级电子皮肤中的使用率大幅提升，但医疗级高端材料本土化率仍不足10%。

中游传感器制造方面，国际厂商以IDM模式(设计+制造+封装)为主，国内企业多采用Fabless模式(设计+外包制造)，依赖中芯国际、华虹半导体等代工厂的MEMS产线。下游终端应用方面，消费级领域由苹果、三星、华为、小米等品牌主导，合计占全球智能穿戴设备市场的72%，传感器采购倾向“国际龙头+国内配套”模式；医疗级领域由雅培、德康医疗、诺安医疗等企业主导，传感器与终端设备深度绑定；工业级领域则以B端客户为主，传感器厂商需提供“硬件+算法+系统集成”整体方案。

细分领域增长点与区域市场预测

可穿戴传感器作为连接人、设备与场景的核心节点，正凭借技术突破与场景渗透，推动消费、医疗、工业等领域的智能化变革。从市场规模快速扩张到竞争格局持续优化，从技术机理跨学科融合到应用场景不断延伸，可穿戴传感器产业已进入“量质齐升”的发展新阶段。

医疗级可穿戴传感器预计CAGR达29.3%，2030年规模将超120亿美元。核心增长点包括：无创血糖监测传感器随着技术成熟，全球渗透率将从2025年的5%提升至2030年的18%，出货量达1.5亿颗；睡眠呼吸暂停监测传感器集成压力、血氧、噪声传感器的智能枕头/手环，将受益于睡眠障碍人群增长，出货量CAGR达35%；康复医疗传感器如柔性电子皮肤在脑卒中康复中的应用，全球市场规模将从2025年的2.1亿美元增至2030年的8.5亿美元，CAGR达32%。

工业与特种可穿戴传感器预计CAGR达24.5%，2030年规模超60亿美元。主要驱动因素：智能制造2025规划推动下，国内工业企业智能穿戴设备普及率将从2025年的12%提升至2030年的35%，带动工业智能手套传感器出货量达1000万套；公共安全领域，防弹衣冲击、消防员生命体征监测传感器的政府采购量将以20%的增速增长，2030年全球出货量达500万套。消费级可穿戴传感器预计

CAGR达14.2%，2030年规模超120亿美元。增长亮点在于“功能升级”。多模态融合传感器集成心率、血氧、压力、体温、ECG的“五合一”传感器模块，在智能手表中的搭载率将从2025年的25%提升至2030年的60%；元宇宙相关传感器如用于VR/AR设备的眼动追踪传感器、手势识别传感器，全球出货量将从2025年的3000万颗增至2030年的1.8亿颗，CAGR达42%。智能服装传感器如集成温度调节传感器的滑雪服、心率监测运动服，市场规模将从2025年的5亿美元增至2030年的20亿美元，受益于户外运动人群增长。

区域市场方面，中国将继续保持最快增速，2030年市场规模占全球比重将从2025年的27.3%提升至33.5%，主要得益于医疗新基建、工业互联网投资、消费电子创新。

北美市场仍将是医疗级传感器的核心市场，欧洲市场侧重工业安全与环保相关传感器，东南亚市场则受益于消费电子代工转移和制造业升级，成为新兴增长极。

未来，随着政策支持、需求挖掘与供应链本土化，可穿戴传感器将成为提升生活品质、保障生产安全、助力医疗健康的关键工具，更将成为支撑数字经济、智能制造、健康中国战略落地的重要基石，在万物互联的智能时代绽放更大价值。