

传感器如何赋能家庭健康检测？

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

近年来，随着全球人口老龄化加剧与慢性病发病率攀升，个人及家庭对健康与医疗需求观念产生重大变革，且呈现爆发式增长。国家卫健委数据显示，2024年，我国60岁以上老年人口超3.1亿人，其中，患有高血压、糖尿病等慢病的老人占比超过75%；同时，亚健康人群规模突破3亿人，定期监测生理指标成为日常健康管理的刚需。

医疗传感器作为生物医学工程领域的核心器件，正逐渐从医院专属的“精密仪器”，转变为“居家健康守门者”，走进普通家庭，重塑医疗健康格局。通过将人体生理信号（如脉象、心电、血压、皮电、步态、体温、呼吸气体、尿液成分等）转化为可量化的电信号，实现对健康状态的实时监测、疾病预警与康复评估，成为连接生物医学与工程技术的关键桥梁。从智能床垫监测睡眠呼吸，到智能马桶分析尿液成分，再到柔性心电贴片跟踪心脏健康，医疗传感器正以多样化的形态，渗透到家庭生活的吃、睡、厕、动等全场景中，成为慢病管理和科技助老的“排头兵”。

然而，大众对医疗传感器的认知仍存在“专业壁垒”：知道智能手环能测心率，却不了解其背后的光学传感器原理；使用智能马桶进行健康检测时，不清楚不同检测结果对应的医学意义；面对市场上琳琅满目的家用医疗设备，难以判断其传感器精度是否达标、是否适合自身健康需求。



医疗传感器的技术分类、指标及功能

敏感机理与材料分类

医疗传感器的核心材料，直接影响其灵敏度、生物相容性、使用寿命和成本。不同材料对应不同的应用场景，具体可分为硅基材料、柔性材料、生物活性材料三大类。

硅基材料传感器精度高、集成度高，适合专业医疗设备和高端家用设备。硅基材料（单晶硅、多晶硅）是MEMS（微机电系统）技术的核心，通过微加工工艺可制造出体积小、精度高的传感器元件，特点是稳定性强、寿命长，但柔韧性差，不适合贴敷皮肤或植入体内，适合需要高精度监测的场景，如医院监护仪、高端智能床垫。

柔性材料传感器柔韧性好，生物相容性高，适合可穿戴设备和体表监测。柔性材料（聚酰亚胺、石墨烯、碳纳米管、水凝胶）具有良好的柔韧性和拉伸性，能贴合皮肤表面或随人体运动变形，同时具备较好的生物相容性（不易引起皮肤过敏），适合制造可穿戴手环、心电贴片、智能绷带等。不过，柔性传感器的长期稳定性较差，传统柔性材料在反复拉伸后，容易出

现疲劳断裂。近年来，国内科研机构通过在柔性材料中添加纳米纤维，如纤维素纳米纤维，提升材料的抗疲劳性能。

生物活性材料传感器含生物分子，适合即时检测（POCT）和家用试纸。生物活性材料（固定化酶、单克隆抗体、DNA探针、生物膜）是生物传感器的核心，能特异性识别目标物质，特点是检测速度快、样本需求量少，适合制造家用检测试纸、便携式检测仪等即时检测设备。生物活性材料的特异性强，能在复杂样本（如血液、尿液）中准确识别目标物质，无需复杂的样本预处理，适合家庭用户自行操作。不过，生物活性材料对温度、湿度敏感，如血糖试纸开封后需在3个月内用完，避免受潮；新冠抗原试纸需存放在2~30℃环境中，避免阳光直射，使用前需将试纸从包装中取出，放置室温10分钟后再次取样，避免温度过低影响反应速度。

敏感元件与传感器分类

医疗传感器的敏感机理是指它运用敏感材料把人体生理信号转化

为电信号，具体可分为物理、化学、生物三大类。

物理传感器依靠物理特性变化检测生理指标信号。利用人体生理活动中的电学、力学、光学等物理变化，将其转化为可测量的电信号，特点是响应速度快、稳定性强，适合实时监测生命体征。包括心电传感器、血压传感器、血氧传感器。

化学传感器靠化学反应检测信号，适合测体液/气体成分。通过敏感材料与人体体液（血液、尿液、唾液）或气体（呼气、肠道气体）中的化学物质发生反应，产生电信号，特点是检测精度高、特异性强，适合慢性病指标和代谢产物监测。包括血糖传感器、气体传感器、呼气酒精传感器、肠道气体传感器、血气传感器。

生物传感器靠生物分子识别检测信号，适合测“特异性强”的生物标志物。利用抗原-抗体、DNA-核酸、酶-底物等生物分子的特异性结合反应，检测人体中的肿瘤标志物、病毒、激素等生物标志物，特点是特异性高达95%以上，适合疾病早期筛

查和精准诊断。包括免疫传感器、DNA传感器、酶传感器。

结构与功能分类

医疗传感器的器件结构，决定了其如何采集信号、处理信号和与其他设备连接，从组件到系统可分为核心敏感元件、信号转换模块、医用封装与接口三部分，三者协同工作实现完整的检测功能。

核心敏感元件是“感知”信号的“触角”，可直接接触被测对象。负责将人体生理信号转化为物理、化学变化，是检测的基础。分为物理传感器的敏感元件、化学传感器的敏感元件、生物传感器的敏感元件。

信号转换模块可将物理、化学变化转为标准化电信号。主要组件包括放大器、滤波器、AD转换器、微控制器等。

医用封装与接口是保障医疗传感器安全和可靠的关键。医疗传感器直接接触人体（如皮肤、血液、体液），且需与主机、手机、医院系统连接，封装须确保生物相容性、防水性、耐用性；接口则负责传输数据，确保兼容性和稳定性。

家庭健康场景中的传感器应用实践

医疗传感器在家庭中的应用，早已超越了“测心率、量血压”的基础功能，深度融入到日常起居、慢性病管理、术后康复等场景，成为“居家健康管家”。通过不同传感器的组合使用，家庭用户可实现从“被动就医”到“主动健康管理”的转变。

日常健康监测场景覆盖“吃、睡、动、厕”，实时捕捉健康信号。日常健康监测的核心是“高频、无创、便捷”，通过在饮食、睡眠、运动、如厕等生活场景中部署传感器，及时发现身体的细微变化（如睡眠呼吸暂停、肠道菌群失衡、运动过量），提前预警健康风险。

从具体来看，睡眠监测采用压力、光学、毫米波传感器，可精准分析睡眠质量。睡眠问题往往是心血管疾病预防的早期信号，家用睡眠传感器可通过非侵入式方式，连续监测睡眠状态，无需佩戴设备，不影响睡眠体验。这类设备主要分为两种类型：一种是接触式睡眠传感器，例如智能床垫和睡眠枕，通过压力传感器捕捉体动、呼吸、心率；另一种是非接触式睡眠传感器，通常结合毫米波雷达和智能手环，可穿透床单、薄被，无需佩戴任何设备进行呼吸心率监测和离床预警，适合独居老人夜间安全监护。

运动监测结合光学、惯性、压力传感器，能够科学指导运动强度。不恰当的运动方式，如过量跑步导致膝盖损伤、力量训练姿势错误导致肌肉拉伤，反而危害健康，家用运动传感器可实时监测运动类型、强度、姿势，提供个性化指导，避免运动伤害。具体应用包括跑步监测，如智能跑鞋、运动手表，可捕捉步频、步幅、着地方

式；力量训练监测，如智能健身镜/智能手环，可纠正动作、监测肌肉负荷；训练计划个性化，根据用户历史动作数据，调整训练强度，并推荐针对性训练；运动后恢复建议，根据心率恢复速度，推荐恢复方式。

如厕监测采用气体、尿液、压力传感器，主要用于早期筛查消化系统疾病。如厕是反映消化系统健康的重要窗口，通过智能马桶、尿液分析仪等设备中的传感器，可无创检测肠道气体、尿液成分，提前发现胃炎、肠炎、糖尿病等问题。智能马桶盖通过分析氢气、甲烷、硫化氢浓度肠道气体监测进行肠道健康评估，预警肠道炎症、肠道细菌分解蛋白质能力评估等；采用光学传感器（试纸条显色法）可检测血糖、尿蛋白、尿酸、尿潜血等11项指标进行糖尿病筛查与控制、肾脏健康监测、减脂人群监测的尿酸体阳性分析等。

饮食监测采用光学、重量传感器，量化营养摄入，避免饮食失衡。饮食不均衡（如高油高盐、蛋白质摄入不足）是慢性病的主要诱因，家用饮食传感器可通过识别食物种类、称量重量，计算热量和营养成分，帮助用户合理搭配饮食。例如智能餐盘、食物秤采用重量+光学传感器，可实现食物种类识别、热量和营养计算、计算、饮食均衡提醒、饮食偏好分析等功能。

慢性病管理场景采用血糖、血压、心率、血氧传感器，推动居家监测替代部分医院随访。慢性病（如糖尿病、高血压、冠心病）需要长期监测指标变化，家用医疗传感器可实现每日高频监测，数据同步至医生端，减少医院往返次数，同时及时发现异常波

动，避免并发症。

从具体来看，在糖尿病管理方面，采用血糖传感器和胰岛素泵，闭环管理血糖。糖尿病管理的核心是“血糖监测-胰岛素注射-饮食运动调整”的闭环，家用传感器可实现实时血糖监测，并与胰岛素泵联动，自动调节胰岛素剂量，降低低血糖风险。其中，动态血糖监测采用光学、酶生物传感器，连续监测血糖波动值；其实时共享功能还可将血糖数据共享给家人、医生，当血糖异常时，家人手机同步收到警报；医生则可通过云端平台查看患者14天血糖数据，远程调整胰岛素剂量。胰岛素泵则采用压力传感器和微电机，精准输注胰岛素。

在高血压管理方面，采用电子血压计和心率传感器，可精准测量血压，并进行波动分析。家用电子血压计通过压力传感器和心率传感器，可实现诊室级精度测量，并帮助用户发现“隐匿性高血压”。例如，上臂式电子血压计采用压力传感器和示波法，可将1个月的血压数据生成PDF报告，通过微信发送给医生，医生根据波动规律调整用药。

在冠心病、心衰管理方面，采用心率、血氧、体重传感器，预警急性发作。冠心病、心衰患者须重点监测心率、血氧、体重变化，家用传感器可实时监测关键指标，及时发现急性发作前兆，降低猝死风险。其中，智能手环和智能手表，采用光学心率、血氧传感器，实时预警异常。智能体重秤采用压力传感器，配合生物电阻抗技术，可实现体重波动监测、体脂率与肌肉量追踪、水肿风险评估、饮水提醒等功能。

居家康复护理场景采用关节活动度、肌肉力量、伤口监测传感器，助力术后或慢病康复。居家康复是术后患者（如关节置换术、骨折）和慢性病患者（如脑卒中后遗症、慢阻肺）恢复功能的关键环节，家用康复传感器可实时监测康复动作质量、肌肉力量恢复情况，避免错误训练导致二次损伤，同时减少康复机构往返次数。

从具体来看，关节康复采用惯性传感器和角度传感器，纠正关节活动度训练。关节术后需要进行关节活动度训练，传感器可捕捉关节角度变化，确保训练幅度达标且不超过安全范围。例如，智能关节康复仪采用高精度角度传感器，配合电动驱动和振动反馈模块，适用于膝关节术后早期康复；提供被动训练模式、主动训练模式、康复进度追踪、动作识别与纠正，以及肩关节常见康复动作（如钟摆运动、前平举、侧平举）、抗阻训练监测、疲劳预警等功能。

肌肉力量康复采用压力传感器、肌电传感器，量化肌肉发力与激活度。肌肉萎缩须进行力量训练，传感器可量化肌肉发力大小、激活程度，帮助患者逐步恢复肌力，避免因发力不足导致动作代偿。包括智能握力器、肌电生物反馈仪等。

伤口监测采用光学传感器和温度传感器，预警术后伤口感染。术后伤口须密切监测红肿、渗液、温度变化，传统肉眼观察易遗漏早期感染信号，智能伤口监测传感器可实时检测异常，降低感染恶化风险。其中，光学传感器、温度传感器和蓝牙模块，适用于慢性伤口和术后缝合伤口，进行愈合进度追踪。

须突破“技术适配场景”与“数据安全利用”双重难关

家庭健康传感器须突破“技术适配场景”与“数据安全利用”双重难关。在核心技术上，通过硬件优化、算法升级、标准统一，解决稳定性、兼容性、精度补偿问题，实现医疗级数据质量；数据安全与隐私上，以“最小必要+分级授权”为核心，既保障用户数据不泄露、不滥用，又能通过电子病历分级共享，让家庭医生、医院、政府在合理范围内利用数据，真正实现“居家监测-专业诊疗-公共防控”的闭环。

家庭健康传感器在走向场景化应用和实现医疗级性能的过程中，仍面临多方面的技术瓶颈。这些挑战既源于居家环境的复杂性（如温度波动、电磁干扰、人体运动干扰等）对传感器稳定性的影响，也体现在不同设备间协议差异导致的兼容性问题，更核心的是家庭场景下低成本需求与医疗级数据精度要求之间的矛盾，亟需通过针对性技术创新实现突破。

一是稳定性挑战，传感器可能因长期使用出现信号漂移，并易受环境干扰及电源续航不足的影响，导致数据准确性下降。

二是兼容性挑战。目前，不同品牌传感器数据格式不互通，设备与老旧机型适配差，通信模式互不兼容，多传感器数据融合困难。用户需要手动录入数据，增加操作成本且易出错；家庭医生也无法整合多维度数据，难以全面评估健康状况。

三是精度补偿挑战。传感器精度易受温度、运动干扰，导致数据准确性下降。

针对上述痛点，须从硬件、算法、标准三大维度构建系统化解决方案，精准破解稳定性、兼容性、精度补偿等关键问题。

在稳定性方面，硬件上采用陶瓷压力膜片，增加铜箔电磁屏蔽层；电源管理上，引入低功耗芯片，支持应急供电模式；算法优化上，使用智能基线校准提升精度。

在兼容性方面，统一数据标准，推动华为、小米、苹果等品牌开放接口，实现数据无缝同步至第三方健康平台；同时，开发多端兼容轻量化APP，推出设备联动中间件。

在精度补偿方面，针对环境、运动与个体差异等干扰因素进行技术优化。例如在运动补偿上，通过融合光学传感器和惯性传感器，降低血氧误差，此外还可以结合个体运动模型，针对性消除干扰。

此外，家庭健康传感器的普及伴随着海量敏感生理数据的产生与流转，数据安全与隐私保

护已成为制约行业信任体系构建的关键议题。从具体来看，当前主要面临以下四大问题：

一是数据过度采集，部分APP强制授权通讯录、地理位置等无关权限；厂商出售去标识化健康数据给第三方用于广告推送。

二是传输存储风险，蓝牙2.0传感器未加密，数据易被嗅探还原；小型厂商云端服务器未过等保三级，明文存储导致数据泄露。

三是设备与生命周期安全风险，无身份验证，设备丢失后他人可查看历史数据；二手设备无一键清除功能，缓存可恢复前任数据。

四是电子病历共享隐患，缺乏分级授权机制，可能导致敏感病史过度暴露，侵犯用户隐私。

为应对这些挑战，须在技术和管理层面构建多重保障。在技术方面，数据采集与使用规范仅申请蓝牙、存储等必要权限，链接设备无需获取地理位置、通讯录；对于个人健康分析以及异常预警，不用于商业推广，提供数据共享开关；传输与存储端到端加密；设备须完善绑定验证机制。

在电子病历分级共享机制方面，分级授权架构，心率、血压、体温等基础健康数据，对家庭医生开放全权限，支持日常监测与用药指导；病史、手术记录、心电图、血糖趋势等详细医疗数据，仅对签约医院主治医生开放，须用户二次授权；区域内高血压患病率、糖尿病年龄分布等汇总匿名数据，经用户同意后对政府公共卫生部门开放，用于政策制定与疾病防控。每级共享均需用户明确授权，授权记录留存10年可查；匿名数据去除所有个人标识，仅保留年龄、性别、区域等统计信息，防止逆向识别用户身份。

在电子病历分级授权方面，分为一级授权、二级授权、三级授权，分别适用于日常诊疗授权，跨院治疗授权和公共卫生授权场景。

总之，家庭健康传感器的发展，核心在于平衡技术实用性与数据安全性。通过解决稳定性、兼容性、精度补偿等关键技术挑战，能为居家健康监测提供可靠数据支撑；而以本地加密为基础的三级授权机制，既保障了用户隐私不被泄露，又让健康数据在日常诊疗、跨院治疗、公共卫生等场景中合理流动。未来，随着技术不断优化，这类传感器将更好地衔接家庭与医疗体系，成为科技助老的有力支撑，为居家健康管理筑起坚实的技术后盾。