

传感器技术如何赋能智慧医疗？

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

在人口老龄化加速、慢病率攀升及居家养老难等多重因素驱动下，医疗健康正在由“疾病治疗”向“健康管理”的主动医学方向转型，催生了医疗检测技术的革命。很多颠覆性创新技术与产品充实于精准医学、个性化医疗，实现了“精准预测、智能干预”的跨越式升级和极限突破，“检测-诊断-治疗”三位一体全流程智能化对感知技术提出更高的要求。

作为数字技术基础和核心器件，医疗传感器承担着生理信号采集、病理标志物识别、环境参数监控，以及健康大数据模型形成等关键任务，决定着医疗诊断数据的效率、效益、效果。量子传感技术探测极微弱生理信号将检测精度推向新高度；气体传感阵列技术构成多维度感知，实现从单一气体检测到复杂病理特征识别的跨越；脑机接口为神经系统疾病治疗开辟了新路径；人工智能与传感器的深度融合，完成从“数据采集”到“智能决策”的转变，让传感器从信号采集升级为“智能诊断单元”。这些前沿技术的协同作用，让医疗传感器构筑起诊疗数字化的全新底层支撑。

气体传感器阵列技术：从“单一检测”到“多维度诊断”

单一分离气体传感器在医疗检测应用中存在两大痛点：一是检测精度低，受环境温度、湿度、干扰气体等因素影响显著；二是功能单一，无法满足复杂病理状态下多指标同步检测。通过“阵列化设计+模式识别算法”的创新组合，可从根本上破解这些瓶颈。由10-20种不同敏感材料制成传感器阵列，形成类似人体嗅觉系统的“电子鼻”，每种敏感材料对特定气体成分具有独特的响应特性。当混合气体与阵列接触时，各传感器会产生差异化的电信号变化，形成反映气体成分构成的“特征图谱”。通过机器学习算法对这些特征图谱进行分析、识别与匹配，即可实现对混合气体中多种成分的定性及定量检测。其主要具备三大特征：一是抗干扰能力提升50%以上；二是实现多气体同步检测，准确率可达90%以上；三是通过调整敏感材料组合与算法模型，可

适配不同的检测场景，如呼吸诊断、肠道健康评估、传染病筛查等。

从具体来看，在呼吸测癌方面，人体呼出气中含有数百种挥发性有机化合物，这些化合物的成分和浓度变化与人机体的生理病理状态密切相关。研究表明，肺癌患者呼出气中苯乙炔浓度显著升高，胃癌患者呼出气中甲苯含量异常，而结肠癌则与呼出气中吡啶、粪臭素的变化相关。气体传感器阵列技术通过精准捕捉这些细微变化，为癌症早期筛查提供了无创、便捷的新路径。与传统癌症筛查手段相比，呼吸测癌技术具有三大显著落地优势：一是无创性，无须穿刺、抽血或辐射扫描，降低了受检者的心理与生理负担；二是快速高效，整个检测流程仅需10分钟即可出具初步报告；三是成本低廉，提升了癌症筛查的普及性，尤其适用于大规模人群的早筛工作，可大量推广

应用于家庭，具有庞大的市场。

在肠道健康评估方面，肠道菌群的代谢活动会产生大量气体，如氢气、甲烷、硫化氢等，这些气体的成分比例直接反映了菌群的平衡状态。气体传感器阵列技术通过对肠道代谢气体的实时监测，为肠道健康评估提供了无创解决方案。通过肛门贴片式或口服胶囊式气体传感器阵列，连续24小时采集肠道内的代谢气体，传感器阵列实时记录氢气、甲烷、硫化氢等关键气体的浓度变化曲线；AI算法结合受检者的饮食记录、症状描述等信息，对气体浓度数据进行多维度分析，判断菌群失调类型。该技术已成熟应用于多家消化内科专科医院，被纳入肠道疾病辅助诊断体系，并开始向健康管理机构普及。

在新冠病毒快速筛查方面，新冠病毒感染会导致人体代谢紊乱，使呼出气中的挥

发性代谢物图谱发生特征性变化，研究发现，新冠患者呼气中的乙醛、丙酮等化合物的浓度较健康人显著升高，这些变化可通过气体传感器阵列精准识别，为大规模快速筛查提供了有效手段。

不过，气体传感器阵列技术从实验室研发到大规模产业化仍面临两大核心瓶颈：一是传感器阵列的一致性差，由于敏感材料制备工艺的细微差异，不同批次甚至同一批次的传感器在响应特性上存在显著差异，导致检测结果的重复性降低；二是长期稳定性不足，敏感材料在反复与气体接触后易发生老化、中毒等问题，导致传感器性能衰减，无法满足临床长期监测的需求。

当前，多技术融合正成为气体传感器阵列技术的发展新趋势。例如，用MEMS技术可实现传感器的微型化与低功耗，为开发可穿戴式呼气检测设备奠定基础；将光谱技术与传感器阵列融合，可通过光谱数据与电信号数据的互补，进一步提升检测的特异性与准确率。这些技术创新正推动气体传感器阵列从专用医疗设备向家用健康监测产品延伸，市场应用空间持续扩大。

以三大路径提升中国企业竞争力

近年来，中国医疗传感器产业在政策支持、市场需求与技术驱动下，实现了快速发展。目前，中国医疗传感器产业已形成“长三角、珠三角、环渤海”三大产业集群：长三角地区以技术研发与高端制造为主；珠三角地区聚焦消费级医疗传感器的规模化生产；环渤海地区在前沿技术研发方面具有优势。

政策支持是中国医疗传感器产业发展的重要保障。国家层面，《“健康中国2030”规划纲要》提出加强健康监测技术研发，推动医疗传感器在慢性病管理、老年健康服务等领域的应用。地方层面，各产业集群所在地纷纷出台配套政策，如上海市设立医疗传感器专项基金，给予企业研发补贴与融资支持；广东省推动“医疗传感器+智能制造”融合发展，建设产业园区为企业提供生产配套服务。这些政策形成了从研发、转化到产业化的全链条支持体系，为产业发展创造了良好环境。

市场需求是中国医疗传感器产业增长的核心动力。中国拥有全球最大的医疗健康市场，人口老龄化加速、慢性病患者基数庞大、健康管理意识提升，共同催生了对医疗传感器的巨大需求。在临床领域，三级医院对高端医疗传感器的需求旺盛，如量子磁传感器、AI影像传感器等；在消费领域，家用健康监测设备市场快速增长。同时，基层医疗机构的标准化建设也为中低端医疗传感器提供了广阔市场。

中国医疗传感器企业也需要通过“技术攻坚”“产业链整合”“国际化布局”三大路径提升全球竞争力。

政策红利机遇体现在国家对高端医疗装备的重点支持。随着医保控费政策的实施，医疗机构对性价比高的国产医疗传感器需求增加，为国产企业提供了市场切入点；医疗器械创新通道的开通则加速了国产创新产品的上市进程，帮助企业抢占市场先机。

市场升级机遇源于中国医疗健康市场的结构性变化。从“疾病治疗”向“健康维护”的转型推动了健康监测、慢性病管理等新场景的出现，这些场景对医疗传感器的微型化、可穿戴化、智能化提出了新要求，为中国企业提供了差异化竞争的机会。

技术融合机遇来自多学科技术交叉带来的创新空间。中国在AI、5G、物联网等领域的技术优势，为医疗传感器的创新提供了支撑，AI+传感器、物联网+传感器等融合技术成为中国企业的突破口。

在突围路径方面，技术攻坚是核心，需聚焦核心零部件与前沿技术两大方向。针对核心零部件依赖进口的问题，企业应联合高校与科研机构建立产学研合作平台，重点攻关传感器芯片、敏感材料、封装工艺等“卡脖子”技术，实现自主可控。

产业链整合是提升产业整体竞争力的关键。中国企业应发挥产业链完整的优势，构建“材料-设计-制造-应用”协同产业链体系。国际化布局是中国企业拓展市场空间、提升全球竞争力的必然选择。企业应采取“差异化进入”与“技术合作”相结合的国际化策略：在发展中国家市场，凭借性价比优势推广中低端医疗传感器产品，抢占市场份额；在发达国家市场，通过与当地企业合作、设立研发中心等方式，融入全球创新体系，提升技术水平。医疗传感器作为医疗健康产业的核心感知单元，其技术发展将深刻影响着医疗诊断的精度、健康管理的效率与医疗服务的可及性。通过气体传感器阵列、量子传感器、脑机接口传感器以及AI与传感器融合四大前沿技术路径的系统解析，结合全球典型产业案例与格局分析，清晰展现了医疗传感器领域的技术发展脉络与产业变革趋势，即多学科技术融合正驱动医疗传感器从“基础信号采集”向“精准智能决策”跨越，迈入以“精准化、智能化、微纳化、集成化”为核心特征的全新发展阶段。

医疗传感器的发展是医疗技术从“粗放”向“精准”，从“疾病治疗”向“健康维护”转型的支撑和途径。随着技术的不断进步与产业的持续升级，医疗传感器将在守护人类健康的道路上发挥越来越重要的作用，对于中国企业而言，把握技术融合趋势、攻坚核心技术、整合产业链资源，将成为在全球医疗传感器产业中实现突围的关键，为“健康中国2030”目标注入核心动力。

量子传感器：超高精度监测的“终极武器”

量子传感器的核心工作原理是利用量子系统的叠加态与纠缠态特性：量子系统可同时处于多个状态的叠加中，对外部信号的响应更为敏感；而量子纠缠则使多个量子粒子形成关联系统，通过测量一个粒子的状态即可推知其他粒子的状态，从而实现信号的放大与降噪。在医疗检测中，常用的量子传感器类型包括量子磁传感器、量子光学传感器、量子重力传感器等，每种类型均针对特定的微弱生理信号设计。

与传统传感器相比，量子传感器的性能优势体现在“超高灵敏度”与“超高精度”两大核心维度。总体而言，量子传感器的灵敏度比传统传感器普遍高1-3个数量级，为早期疾病诊断、精准定位提供了可能。量子传感器的另一大优势是“无创性”。无须通过穿刺、植入等侵袭性方式即

可获取深层生理信息。

从具体来看，在早期心脑血管疾病诊断方面，人体心肌细胞在兴奋过程中会产生微弱的生物磁信号，其强度仅为地球磁场的千万分之一。量子磁传感器利用量子纠缠效应放大这一微弱信号，通过阵列化布置实现对心脏磁场的二维成像，形成“心磁图”。心磁图可清晰反映心肌细胞的电生理活动，精准定位缺血区域。与心电图相比，心磁图具有更高的空间分辨率与时间分辨率，可区分不同类型的心律失常，为个性化治疗方案的制定提供依据。

在无创脑功能监测方面，量子点光学传感器利用量子点材料的量子尺寸效应，其荧光光谱可随周围环境的血氧浓度变化而发生特征性偏移。因此，通过分析荧光信号的偏移量，即可计算出大脑皮层不

同区域的血氧饱和度，从而反映该区域的神经元活动状态。与传统脑功能监测技术相比，量子点光学传感器具有三大优势：一是无创便捷，头环式设计佩戴舒适，可实现24小时连续监测，不影响患者正常生活；二是成本较低，适合基层医疗机构与家庭使用；三是实时性强，可捕捉神经元活动的瞬时变化。目前，该技术已在精神科、神经科、康复医学等多个领域开展临床应用，未来有望成为脑科学研究的核心工具。

在精准肿瘤定位方面，量子重力传感器的肿瘤定位原理基于“密度差异效应”：肿瘤细胞的增殖速度远快于正常细胞，细胞密度更高，这种密度差异会导致肿瘤区域的重力场发生微小变化。量子重力传感器通过测量这种微小的重力变化，结合三

维重建算法，即可确定肿瘤的位置与大小。与影像技术不同，量子重力传感器的检测不受组织密度、骨骼遮挡等因素影响，可穿透人体深层组织，实现对腹腔、盆腔等隐蔽部位肿瘤的精准定位。该技术在肿瘤手术中可实时监测肿瘤因呼吸、心跳产生的位置变化，引导手术器械精准切除肿瘤，减少正常组织的损伤；在放射治疗中，可根据肿瘤的实时位置调整辐射剂量分布，避免因肿瘤移位导致的治疗偏差。此外，该技术无须使用造影剂与放射源，对患者无副作用，适合长期随访监测。

随着量子传感器技术的不断突破，全球医疗量子传感器产业已进入加速发展阶段。随着技术的不断成熟与成本的逐步降低，量子传感器的市场前景极为广阔。据市场研究机构Grand View Research预测，全球量子医疗传感器市场规模将从2024年的12亿美元增长至2030年的85亿美元，年复合增长率达38.5%。其中，心脑血管诊断、脑功能监测与肿瘤定位将成为三大核心应用领域，占据市场规模的70%以上。

脑机接口传感器：连接神经与机器的“智能桥梁”

大脑与外部设备之间建立直接的通信通道，实现神经信号与机器指令的双向转化，而脑机接口传感器则是这一通道的核心感知单元，负责采集大脑产生的神经电信号或代谢信号。根据传感器与大脑组织的接触方式，脑机接口传感器可分为非侵入式、半侵入式与侵入式三大技术路径，不同路径在信号精度、佩戴便捷性、侵袭性等方面各有优劣，适用于不同的医疗场景。其选择需综合考虑临床需求、患者耐受性与技术成熟度：非侵入式传感器适用于康复训练、健康监测等非治疗性场景；半侵入式传感器适合癫痫预警、运动功能重建等需要较高信号精度的场景；侵入式传感器则主要用于帕金森病、阿尔茨

海默病等神经系统疾病的精准治疗。

从具体来看，非侵入式是中风患者的康复“外骨骼”。传统康复训练依赖物理治疗师的手动辅助，训练效果有限且效率低下，而基于非侵入式脑机接口传感器的康复系统，通过识别患者的运动意图，控制智能外骨骼完成动作，实现“意念驱动”的康复训练，大幅提升了康复效果。

半侵入式是癫痫患者的“预警卫士”。基于半侵入式脑机接口传感器的癫痫预警系统，可通过实时监测脑电异常放电，提前发送预警信号，为患者规避风险争取时间，同时联动神经刺激器抑制发作，大幅降低发作频率。

侵入式是帕金森病患者的“震颤终结

者”。基于侵入式脑机接口传感器的帕金森病治疗系统，通过实时监测大脑深部核团的神经元活动，动态调整刺激参数，可实现精准治疗。

然而，脑机接口传感器在医疗领域仍面临多个核心技术瓶颈：

一是长期稳定性问题。侵入式神经探针传感器植入大脑后，脑组织会产生免疫反应，形成胶质瘢痕包裹探针，导致传感器与神经元的接触不良，信号质量随时间衰减。为解决这一问题，行业内的核心突破方向是开发柔性神经探针，采用聚酰亚胺、水凝胶等柔性生物相容性材料制作探针基底，其弹性模量与脑组织接近，可减少对脑组织的机械刺激，降低胶质瘢痕的

AI与传感器深度融合：从“数据采集”到“智能决策”

提升医疗传感器性能的核心路径包括数据降噪与校准、模式识别与诊断、预测与干预三大方向，形成了完整的“数据处理-分析-决策”闭环。

从具体来看，数据降噪与校准是AI提升传感器性能的基础环节。医疗传感器在采集数据过程中，易受多种干扰因素影响。通过AI算法，对大量“噪声数据-纯净数据”样本学习，可自动识别并分离数据中的噪声成分，实现精准降噪。同时，AI算法还可实现传感器的自动校准。

模式识别与诊断是AI与传感器融合的核心应用环节。通过构建深层神经网络模型，可自动提取数据中的高维特征，实现疾病的精准诊断。

预测与干预是AI与传感器融合的高级应用阶段，其以数据降噪校准的稳定性、模式识别诊断的精准性为基础，实现了从“被动诊断”到“主动健康管理”的转变。

尽管AI与医疗传感器的融合已取得显著成效，但仍面临数据质量、算法可靠性、系统集成等多方面的技术挑战，这些挑战直接制约了技术的大规模普及与深入应用。同时，随着技术的不断发展，新的进化方向也逐渐清晰，为行业发展指明了路径。

系统集成与实时性要求是AI+传感器在临床应用中面临的工程技术挑战。在系统集成方面，不同类型的医疗传感

器接口协议不统一，AI算法与医院现有信息系统的对接难度大，导致数据无法顺畅流转，形成“信息孤岛”。为解决这一问题，行业内正推动医疗设备互联标准的普及，实现传感器数据与医院信息系统的无缝对接；同时，开发模块化的AI算法平台，支持不同传感器数据的快速接入与分析。在实时性方面，部分临床场景对AI算法的响应时间要求极高，需在毫秒级完成数据处理与决策。传统的云端AI计算模式因网络延迟无法满足实时性需求，边缘计算技术应运而生，将AI算法部署于传感器终端或本地服务器，数据在本地完成处理，响应时间从秒级缩短至毫秒级，满足临床实时

干预的需求。

未来，AI与医疗传感器的融合将向“多模态融合”“端云协同”“自主学习”三大方向进化。

多模态融合不仅指不同类型医疗传感器数据的融合，还包括生理数据与临床文本、基因数据等多维度数据的融合，通过AI算法挖掘数据间的深层关联，提升诊断的全面性与准确性。端云协同模式则结合了边缘计算与云端计算的优势：终端设备通过边缘AI实现实时数据处理与快速决策，云端平台则利用海量数据进行模型训练与更新，通过OTA（空中下载）方式将优化后的模型推送至终端，实现系统性能的持续提升。自主学习，算法则具备自我迭代能力，可在临床应用中不断学习新的数据样本，自动优化模型参数，无须人工干预即可适应新的疾病模式与患者群体，大幅降低模型维护成本。