

# 传感器如何赋能矿山场景？

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

智能传感器作为矿山数字化建设的核心基础装备，不仅推动现场监测数据从“零散采集”迈向“联动分析”的质变，更深度融合人工智能算法与多参数联动技术。针对煤矿、金属矿、非金属矿等不同矿种的复杂开采场景，新一代定制化智能传感器精准破解瓦斯超前预警、边坡稳定性监测、设备故障预防等核心难题。在煤矿综采工作面，气体传感器可提前10分钟预判瓦斯浓度异常；在露天金属矿，边坡位移传感器能结合雨量数据预警滑坡风险；在石灰石矿，料位传感器可穿透粉尘实现精准监测。由此，矿山安全管理实现从“被动响应事故”到“主动防控风险”的根本性转变，为矿山数字化转型与安全生产高质量发展注入全新动能。

## 煤矿开采场景智能传感器应用实践

煤矿井下开采面临瓦斯爆炸、顶板垮塌、设备过热等多重风险，传统煤矿传感器存在误报率高、数据孤立、抗干扰能力弱等问题，难以满足智能化综采面“无人作业、精准预警”的需求。新一代智能传感器通过硬件防护升级与AI算法融合，已实现对煤矿核心风险的全流程管控。

采煤界面是井下生产核心区，集聚有煤机、液压支架、输送带等大型设备，空间狭窄、环境潮湿多尘，且存在高瓦斯涌出风险，需针对性部署多个专用智能传感器组成感知集群。

瓦斯浓度传感器：高风险区域的“气体哨兵”。瓦斯浓度是煤矿综采

面的首要监测指标，需在瓦斯易积聚的区域高密度部署；沿综采工作面走向，每50米布置1台；在煤机割煤区域额外增设1台移动瓦斯传感器，随煤机同步移动。智能瓦斯传感器采用“催化燃烧元件+红外光谱检测”双原理设计。催化燃烧元件负责实时监测低浓度瓦斯，红外光谱负责高精度检测高浓度瓦斯，避免单一原理在高浓度环境下出现“量程溢出”或“灵敏度下降”问题。同时，传感器外壳采用矿用防爆材质，具备IP68防水防尘等级，能抵御潮湿、煤尘及机械震动的影响，使用寿命延长至3年以上。

顶板压力传感器：液压支架的

“受力监测仪”。顶板垮塌诱因是液压支架支撑力不足或受力不均，因此需在每台液压支架的立柱上部部署1台顶板压力传感器。采用应变式测量原理，通过贴附在立柱表面的应变片，实时捕捉支架承受的顶板压力变化。当某台支架压力超过设定阈值时，传感器可立即触发预警，提醒远程操控中心调整支架支撑高度。部署时需注意传感器的安装角度：与立柱轴线保持垂直，避免因倾斜导致应变片受力不均，数据误差控制在±1%FS以内；同时，传感器线缆采用耐拉扯的矿用阻燃电缆，防止煤机移动时造成线缆断裂。

矿用红外测温传感器：设备安全的“温度卫士”。煤机电机、输送带滚筒、液压支架泵站等设备长时间高速运行，易因过载或润滑不足导致温度异常，引发火灾或设备损坏。针对不同设备的发热特点定点部署传感器：在煤机电机外壳，每台电机布置2台；在输送带滚筒轴承处，每5个滚筒布置1台；在液压支架泵站，针对油泵、油箱各布置1台。该传感器采用非接触式红外检测，测量距离0.5~3米，避免与高温设备直接接触导致损坏；同时，内置“温度趋势分析”算法，可识别设备温度的“缓慢上升”与“突发飙升”，区分正常发热与故障前兆，减少误报。

## 金属矿多场景传感器应用实践

金属矿开采分为露天矿与井下矿两种主要模式，其风险特征差异显著。新一代智能传感器通过耐候性设计与多参数融合算法，实现了对露天矿与井下矿的全场景适配。

露天金属矿的开采台阶高度通常为10~15米，边坡长度可达数百米，随着开采深度增加，边坡稳定性逐渐下降，同时受暴雨、地震等自然因素影响，易发生滑坡事故。此外，露天矿爆破作业振动与飞石，也需实时安全监测。其核心传感器部署如下：

边坡位移传感器：露天矿的“滑坡预警哨”。边坡位移是判断边坡稳定性的核心指标，需在露天矿主边坡、副边坡及排土场边坡部署；沿边坡走向每50米布置1台表面位移传感器；在边坡高度超过50米的区域，

额外布置钻孔式深层位移传感器，监测深层岩体位移。智能边坡位移传感器采用“GNSS+倾角测量”双原理设计。GNSS模块实现毫米级表面位移监测，钻孔式深层位移传感器实现亚毫米级监测，倾角模块捕捉边坡微小倾斜变化，避免单一GNSS在恶劣天气下信号中断的问题。

矿用雨量传感器：边坡安全的“气象联联仪”。矿用雨量传感器需部署在露天矿边坡顶部及排土场周边，每200米布置1台，采用翻斗式测量原理，能实时监测降雨量与降雨强度。与传统雨量传感器不同，智能雨量传感器可与边坡位移传感器联动。

爆破振动传感器：作业安全的“振动监测仪”。爆破振动传感器需部署在爆破区周边50~500米范围内。在

靠近边坡的区域，每100米布置1台；在邻近工业广场或居民区的区域，每50米布置1台。传感器采用压电式振动测量原理，可提前录入爆破方案，结合距离参数预测理论振动值。

井下金属矿的开采巷道狭窄，通风条件较差，爆破作业后会产生大量一氧化碳、氮氧化物等有毒气体，同时粉尘浓度易超标，长期暴露会导致矿工职业疾病。此外，井下巷道顶板垮塌、设备故障等风险也需实时监测，核心传感器部署如下：

多气体复合传感器：井下空气的“毒气探测器”。针对井下多种有毒气体共存的特点，需部署多气体复合传感器，而非单一气体传感器。在掘进工作面，每50米布置1台；在回采工作面，每100米布置1台；在巷道交

叉口、避灾硐室等关键节点，额外布置1台。智能多气体复合传感器可同时监测4种核心气体，采用抗腐蚀设计。

智能粉尘浓度传感器：呼吸安全的“粉尘卫士”。智能粉尘浓度传感器需部署在掘进工作面、回采工作面、输送带转载点，每台传感器覆盖半径约10米。采用激光散射原理，能区分总粉尘与呼吸性粉尘。

巷道顶板离层传感器：井下支护的“结构监测仪”。岩层之间发生相对位移是垮塌的前兆，需在掘进巷道每50米布置1台顶板离层传感器，在回采巷道每30米布置1台。传感器采用“锚栓式”安装，将深部锚栓固定在稳定岩层，浅部锚栓固定在巷道支护层，通过测量深浅锚栓之间的相对位移，判断顶板离层情况。

## 非金属矿传感器应用实践

石灰石矿、砂石矿等露天非金属矿，需通过爆破、破碎、输送带运输等流程将矿石加工为骨料，作业过程中面临设备磨损、料位失控、输送带断裂等风险；非金属矿地下开采则需应对巷道支护失效、粉尘超标等问题。智能传感器通过结构优化与工况适配设计，实现对开采加工全流程的高效监测。

非金属矿监测需求集中在爆破、破碎、输送、仓储等关键环节，核心传感器部署如下：

雷达料位传感器：仓储与料仓的“料位管家”。智能雷达料位传感器部署在料仓顶部中心位置，采用24GHz高频雷达波技术，穿透料仓内的粉尘环境，实现非接触式料位测量。传感器需采用“抛物面天线”设计，增强雷达波聚焦能力，避免矿石棱角反射导致的信号干扰；同时，内置“粉尘补偿算法”，可根据料仓内粉尘浓度（通过联动粉尘传感器）修正雷达波传播速度，提高料位测量精度。

输送带张力与跑偏传感器：物料运输的“安全防线”。张力传感器安装在输送带驱动滚筒与改向滚筒的轴承座上，每台滚筒布置2台，采用应变式测量原理；跑偏传感器安装在输送带两侧机架上，每50米布置1组，采用摆臂式结构。

破碎系统温度与振动传感器：核心设备的“健康监测仪”。温度传感器安装在破碎机主轴轴承座上，每台破碎机布置2台，采用接触式铂电阻测量原理；振动传感器安装在破碎机

侧面，每台布置1台，采用压电式振动测量原理。

矿用粉尘传感器：环境与设备的“粉尘防护仪”。智能粉尘传感器部署在破碎机进料口、筛分机出料口、输送带转载点等粉尘源附近，每处布置1台，采用激光后向散射原理，具备“抗高浓度粉尘”设计，采样气路采用螺旋式结构，避免高浓度粉尘直接冲击传感器探头，同时内置压缩空气反吹装置，清除探头表面粉尘。

## 不同矿种传感器核心性能差异对比

煤矿、金属矿、非金属矿在开采环境、风险特征、设备工况等方面存在显著差异，导致其对智能传感器的核心性能要求各不相同。明确不同矿种的传感器性能差异，既能避免“一刀切”式选型导致的监测失效，也能为跨矿种应用提供适配参考。

不同矿种的环境恶劣程度不同，对传感器外壳防护、防腐蚀、抗振动等性能要求存在明显差异。

煤矿井下传感器：防爆与防水防尘优先。煤矿井下属于高瓦斯环境，传感器需满足ExdIIB防爆等级，外壳材质需采用铸铝或不锈钢，防止碰撞产生火花；同时，井下潮湿多尘，防护等级需达到IP68，气室进气口需配备三级粉尘过滤装置，避免煤尘堵塞导致气体测量误差。

金属矿传感器：露天耐候与井下防腐并重。其中，露天金属矿传感

器外壳需采用聚酯合金或氟碳涂层钢板，防护等级IP66，同时具备抗紫外线老化能力。井下金属矿传感器需抵抗硫化氢、二氧化硫等酸性气体腐蚀，外壳内壁需涂覆聚四氟乙烯涂层，气室元件采用耐腐蚀的贵金属电极，避免酸性气体导致的元件氧化。

非金属矿传感器：抗磨损与防挂料关键。料位传感器天线需涂覆聚四氟乙烯防粘涂层，避免石灰石粉、石膏粉挂料。

不同矿种安全风险与生产效率瓶颈不同，导致功能需求存在侧重。

煤矿：瓦斯与顶板双核心监测。瓦斯传感器需融合风速、温度数据进行多参数校正，避免单一浓度监测误报；顶板压力传感器需支持相邻支架数据对比，识别受力不均隐患。

金属矿：露天边坡与井下毒气协同监测。露天矿传感器需具备“雨

量-位移”联动功能，暴雨时自动提升边坡监测频率；井下传感器需具备“毒气溯源+通风联动”功能，定位泄漏源后自动调整通风机风速。

非金属矿：设备健康与料流稳定双保障。破碎机振动传感器需过滤设备固有振动频率，仅监测异常振动；输送带张力传感器需与驱动电机闭环控制，实时调整张力避免打滑/断裂；雷达料位传感器需具备料位趋势预测功能，提前匹配进料与破碎能力，避免溢料或空仓。

不同矿种传感器采集的数据特征不同，需针对性优化算法。

煤矿传感器：抗干扰算法与短期预测结合。煤矿井下数据受机械振动、电磁干扰影响大，瓦斯传感器需采用“小波变换去噪算法”，过滤煤机、泵站等设备产生的电磁干扰，提高浓度测量精度；顶板压力传感器需

采用“短期趋势预测算法”，识别压力突变前兆，避免长期数据平滑导致的预警延迟。

金属矿传感器：长期趋势分析与多源数据融合。露天矿边坡位移变化缓慢，需采用“长时间序列分析算法”，识别位移速率的缓慢上升趋势；井下多气体传感器需采用“多源数据融合算法”，结合通风量、人员位置数据，判断有毒气体对人员的实际威胁程度。

非金属矿传感器：实时闭环控制与故障诊断结合。非金属矿设备运行速度快，传感器算法需具备“毫秒级实时响应”能力；输送带跑偏传感器触发信号后，算法需在500ms内计算跑偏量并输出调整指令；破碎机温度传感器需采用“故障树诊断算法”，根据温度变化速率、振动值等数据，判断故障类型，推送针对性维护建议。

## 智能化发展趋势

随着矿山行业向“智能化、无人化、绿色化”转型，智能传感器作为矿山感知层的核心，正朝着AI深度融合、多模态感知、自主化运维、绿色低碳四个方向发展。这些趋势不仅提升矿山监测的精准度与实时性，还将推动矿山从“被动监测”向“主动预警、智能决策”升级。

AI算法深度融合：从“数据采集”到“智能预判”。AI算法的深度融合将赋予传感器“数据分析-趋势预测-故障诊断”的全流程能力体现在以下三个层面：

一是基于深度学习的异常模式识别。通过训练大量矿山历史数据，构建深度学习模型，使传感器能自动识别异常数据模式，避免依赖人工设定阈值导致的漏报/误报。

二是端云协同的实时决策。智能多气体复合传感器可同时监测4种核心气体，采用抗腐蚀设计。智能粉尘浓度传感器需部署在掘进工作面、回采工作面、输送带转载点，每台传感器覆盖半径约10米。采用激光散射原理，能区分总粉尘与呼吸性粉尘。

三是自进化算法的持续优化。传感器内置自进化算法，可根据矿山实际工况动态调整模型参数，避免固定算法在工况变化时失效。

多模态感知融合：从“单一监测”到“全面感知”。通过集成多种传感元件，实现对同一监测对象的多维度数据采集，再通过数据融合算法提升监测精度与可靠性，具体应用场景包括矿山设备多健康参数融合监测、矿山

环境多风险因子融合预警和跨场景多传感器数据联动。

自主化运维能力：从“人工维护”到“自诊断自修复”。矿山传感器部署环境恶劣，人工维护成本高、难度大，自主化运维将成为降低运维成本、提升传感器可靠性的关键，具体发展方向包括自诊断与故障预警功能、自校准与漂移补偿技术和模块化设计与热插拔功能。

绿色低碳技术：从“高能耗”到“长续航、低排放”。响应矿山绿色发展要求，传感器将采用低功耗设计、清洁能源供电技术，减少能源消耗与碳排放，具体技术路径包括低功耗传感元件与通信协议、清洁能源与能量回收结合供电和环保材料与可降解设计。

矿山智能传感器的智能化发展面临三大挑战：一是AI算法训练需大量高质量矿山数据，但矿山数据存在“碎片化、隐私性强”问题；二是多模态传感器融合需统一数据接口与通信协议，但目前矿山传感器存在“协议不兼容、数据格式多样”问题；三是自主化运维与低功耗技术增加传感器成本，中小矿企难以承担。

应对建议包括：一是由国家矿山安全监察局牵头建立“矿山传感器数据共享平台”，制定数据共享标准，鼓励矿企匿名共享历史数据，用于AI算法训练；二是制定矿山智能传感器统一通信协议标准，强制新部署传感器兼容标准协议；三是推出“智能化传感器补贴政策”，对中小矿企购买具备AI、低功耗功能的传感器给予30%~50%补贴，降低落地门槛。

## 市场规模现状

2025年，全球矿山智能传感器市场规模达到46.2亿美元，同比增长8.5%。从区域需求来看，主要集中在美国、澳大利亚、加拿大、俄罗斯等矿产资源大国和地区，合计占全球市场的75%以上。

从技术驱动来看，AI算法融合、多模态感知等技术趋势对市场增长拉动明显。2025年，全球具备AI异常识别功能的矿山设备传感器市场规模同比增长13%，高于整体市场增速，主要因为这类传感器能提前3~5天预警设备故障，降低矿山停机损失。

从矿种需求结构来看，煤矿是全球矿山智能传感器最大的应用领域，占比达40%，主要需求集中在瓦斯传感器、顶板压力传感器、人员定位传感器等。

2025年，中国矿山智能传感器市场规模达到17.2亿美元，同比增长12.4%，增速高于全球平均水平。从矿种细分来看：煤矿市场规模最大，达6.9亿元，占比45%，其中瓦斯传感器占煤矿传感器市场的35%；顶板压力传感器占25%；金属矿市场规模4.6亿元，占比30%；边坡位移传感器和井下多气体传感器合计占金属矿传感器市场的60%；非金属矿市场规模3.2亿元，占比21%，料位传感器和输送带张力传感器是主要需求产品，合计占比达70%；其他矿种市场规模0.6亿

元，占比4%。

中国矿山智能传感器市场的增长主要由三大因素驱动，且均与技术趋势深度绑定。

一是煤矿智能化改造政策持续推动，带动AI类、多模态类传感器需求爆发。国家矿山安全监察局要求2025年年底前全国大型煤矿基本实现智能化，截至2025年年底，全国大型煤矿智能化率已达92%，超额完成阶段目标。中小型煤矿加快智能化改造，单座煤矿传感器部署量从2023年的500台提升至2024年的1000台以上，其中AI瓦斯传感器、多模态环境传感器占新增部署量的60%。

二是金属矿边坡监测与井下安全需求提升，拉动多模态、高精度传感器增长。随着金属矿开采深度增加，边坡失稳、井下有毒气体泄漏风险加剧，矿山企业对“高精度+多参数”传感器需求迫切。2024年，中国金属矿边坡位移传感器市场中，精度达±0.1mm的产品占比从30%提升至45%，多模态井下气体传感器采购量同比增长35%。

三是非金属矿设备升级需求增加，带动低功耗、易维护传感器需求。为应对建材建材行业对骨料质量的高要求，非金属矿企业加快破碎、输送设备智能化升级，需传感器具备长期稳定运行、维护成本低的特点。