# 煤矿设备人员接近防护系统的研究与应用

侯意涛 [1]

(1.宁夏银星煤业有限公司机电动力科，宁夏 银川 750408)

**摘 要**：煤矿带式输送机、破碎机、转载机、采煤机和掘进机等设备运行区域具有空间狭窄、粉尘浓度高、照度不足及电磁干扰强等特点，人员误入危险区域或与运动部件异常接近，极易引发机械伤害事故。针对单一传感器易受环境干扰、预警与停机控制割裂、系统失效后缺少安全冗余等问题，提出并应用一种融合超宽带定位、红外热成像、毫米波雷达和机器视觉的煤矿设备人员接近防护系统。系统采用“危险区域分级—多源感知—数据融合—安全联锁—人工复位—事件记录”的技术路线，通过时间同步、空间标定、置信度加权融合和独立硬件安全回路，实现危险接近的分级预警与可靠停机。工程应用表明，系统可有效降低漏报和误报，将防护响应时间控制在合理范围，提升设备检修与运行期间的人员安全防护水平。

**关键词**：煤矿设备；人员接近防护；多传感器融合；超宽带定位；安全联锁

DOI：doi.org/10.70693/202611052482

# Research and Application of Personnel Proximity Protection System for Coal Mine Equipment

**Hou Yitao[1]**

*1.Ningxia Yinxing Coal Industry Co., Ltd., Yinchuan 750408, China*

**Abstract:** Coal mine belt conveyors, crushers, loaders, shearers and roadheaders operate in narrow, dusty, dimly lit and electromagnetically noisy environments. Unauthorized entry into hazardous zones or abnormal approach to moving parts can easily cause mechanical injury. Aiming at the problems of environmental interference, decoupling between warning and shutdown control, and insufficient safety redundancy of a single sensor, a personnel proximity protection system fusing ultra-wideband positioning, infrared thermal imaging, millimeter-wave radar and machine vision is proposed and applied. The system follows the technical route of hazard zone grading, multi-source perception, data fusion, safety interlock, manual reset and event recording. Through time synchronization, spatial calibration, confidence-weighted fusion and an independent hardware safety circuit, it realizes graded warning and reliable shutdown for hazardous approach. Engineering application shows that the system effectively reduces missed alarms and false alarms, keeps the protection response time within a reasonable range, and improves personnel safety during equipment maintenance and operation.

**Keywords:** coal mine equipment; personnel proximity protection; multi-sensor fusion; ultra-wideband positioning; safety interlock

**作者简介**：侯意涛（2001—），男，高级工程师，研究方向为煤矿机电设备智能化与安全控制。

## 引言

随着煤矿智能化建设的推进，主运输系统、综采工作面和掘进工作面自动化水平不断提高，设备运行速度、负载能力与连续作业时长持续增加。设备自动化并未降低人员暴露于危险区域的频次，检修、清堵、巡查和应急处理过程中，人员仍需进入或接近滚筒、胶带、破碎齿辊、转载点和采掘机械运动部件。煤矿井下粉尘、水雾、低照度和电磁干扰会降低单一传感器的可靠性，传统警戒线、声光报警和人工监护又存在依赖人员注意力、缺乏强制停机能力的问题。因此，构建适应煤矿井下复杂工况、能够主动识别人员危险接近并执行安全联锁的人员接近防护系统，对遏制机械伤害事故具有现实意义。

近年来，超宽带（UWB）定位、红外热成像、毫米波雷达和机器视觉等技术在工业安全防护领域得到应用。UWB 具有非视距穿透能力强、定位精度高的特点，适合井下复杂空间的身份与位置识别；红外热成像可依据人体热辐射识别目标，对光照条件不敏感；毫米波雷达具备粉尘穿透能力和全天候探测能力，可稳定输出目标距离、速度；机器视觉则能够提供丰富的形态与行为信息。上述技术各有局限：UWB 依赖标签佩戴和基站布设，红外热成像易受热源干扰，雷达存在虚警，视觉在粉尘和水雾条件下成像质量下降。现有研究多侧重单一传感器或算法改进，对煤矿井下多传感器协同、分级预警与停机安全回路的一体化设计研究相对不足。本文结合宁夏银星煤业有限公司机电动力科现场管理需求，研究多传感器融合的人员接近防护系统，并在主斜井带式输送机区域进行应用验证。

## 1 人员接近危险区域划分

人员接近防护的前提是明确设备运动部件的危险包络及人员接近程度。根据设备几何尺寸、运动范围、制动距离和检修作业方式，将防护区域划分为预警区、减速区和停机区三个同心或相邻区域。预警区用于提示人员已接近设备危险范围，系统发出声光报警并记录事件；减速区表示人员已进入可能受到伤害的区域，系统控制设备降低运行速度，为制动与撤离争取时间；停机区表示人员已进入可直接造成机械伤害的区域，系统应触发设备安全停机，并闭锁危险能量。

危险区域边界应结合设备实际参数确定。以带式输送机为例，沿胶带运行方向，人员进入滚筒、驱动部、张紧装置和机尾改向滚筒周边规定范围即构成接近危险；垂直于胶带方向，则根据人员可能触及胶带或托辊的距离划定区域。破碎机、转载机和采掘设备还需考虑飞溅物、设备摆动及检修盖板开启后形成的附加危险区。区域边界不宜仅按固定半径设定，应叠加设备运行状态：设备运行时采用完整防护边界，检修状态根据能量隔离和作业许可动态调整。区域划分结果以三维坐标形式写入系统配置，并与定位基站、雷达扫描扇区和摄像机视场进行空间标定，确保同一目标在不同传感器坐标系下具有可比性。

危险区域分为静态区域和动态区域。静态区域由设备结构和巷道几何决定，如驱动硐室、转载点围护范围；动态区域随设备运动部件实时变化，如掘进机截割臂摆动包络、采煤机沿工作面牵引形成的危险带。动态区域由控制器依据设备位姿和预设包络模型实时计算，并与人员位置进行碰撞预测。考虑人员佩戴标签的位置偏差、传感器测距误差和人员身形差异，各区域边界设置安全余量，避免以目标中心点代替人员实体造成防护不足。

## 2 系统总体架构

系统采用“感知层—边缘处理层—控制层—执行与记录层”四级架构。感知层由 UWB 定位标签与基站、红外热成像仪、毫米波雷达和隔爆摄像机组成，分别采集人员位置、热辐射、目标距离速度及图像信息。边缘处理层完成时间同步、空间标定、数据预处理和目标级特征提取，降低主干通信带宽压力。控制层由井下防爆工业以太网、冗余控制器和安全 PLC 组成，负责多源信息融合、危险等级判别、控制命令输出及系统健康状态监测。执行与记录层包括设备驱动控制回路、声光报警器、急停闭锁装置、地面监控主机和事件数据库，实现停机执行、人工复位、报警提示与过程追溯。系统总体架构如图 1 所示。

安全功能与信息管理功能实行分离。人员识别和预警过程可由普通控制器与监控软件完成，但最终停机命令必须经过独立的安全回路。安全回路包含安全继电器或安全 PLC、双通道急停输入、输出反馈监测和交叉电路检测，不依赖上位机程序正常运行。当普通控制器、网络或监控主机发生故障时，安全回路仍能使设备进入安全状态；只有当安全回路自身诊断发现故障、人工确认现场安全并完成复位后，设备方可重新启动。

系统供电采用井下本安电源与隔爆电源分级供电，核心控制器和通信交换机配置不间断电源，

保证停电或电源切换时完成最后一次状态记录和安全停机。所有井下设备满足煤矿安全标志和防爆要求，外壳防护等级依据安装环境确定，信号线缆与动力电缆保持规定间距，并采用屏蔽电缆、等电位连接和可靠接地抑制电磁干扰。

## 3 多源感知与信息融合

### 3.1 超宽带人员定位

UWB 定位采用到达时间差或双向测距原理，通过佩戴于人员身上的定位标签与布置在巷道和设备周边的基站进行测距，利用多边定位解算标签三维坐标。相比射频识别，UWB 脉冲信号时间分辨率高，测距精度受多径影响较小，在巷道壁反射环境中仍能保持较好的定位稳定性。定位标签需与人员唯一绑定，并结合作业许可或岗位信息区分授权人员、检修人员和无关人员，避免将进入检修区域的正常作业人员一律判定为入侵。

定位标签除位置外还可输出运动速度、方向及停留时间。控制器将人员运动矢量与设备运行状态和危险区域边界结合，预测目标在下一周期的进入趋势，提前由预警转入减速或停机，减少因制动延迟造成的保护滞后。标签欠压、脱离或基站通信中断时，系统按照预设策略处理：对于无人值守区域，可将该人员标记为位置未知并提高区域警戒等级；对于必须确认人员身份的检修区域，则提示管理人员进行人工核验。

### 3.2 红外热成像识别

红外热成像仪将目标红外辐射转换为温度分布图像，利用人体与巷道背景之间的温度差异识别人员轮廓。红外方式不依赖环境可见光，适用于低照度、无照明和局部阴影区域，对粉尘具有一定的穿透能力。系统对热成像图像进行非均匀性校正、去噪、温度阈值分割和形态学处理，提取连通区域，并依据长宽比、面积、温度均值与方差滤除照明灯具、电机外壳、热水管和输送带摩擦发热等干扰热源。

热成像识别结果输出目标中心坐标、边界框、温度均值和轮廓置信度。由于井下设备本体温度较高，系统设置动态温度基线，依据环境温度和相邻帧差异更新背景，避免固定阈值导致漏识别或频繁误报。热成像模块与 UWB 模块在空间上同步标定，将图像像素坐标转换为巷道坐标系，形成对人员位置和轮廓的互补测量。

### 3.3 毫米波雷达与机器视觉

毫米波雷达通过发射调频连续波并接收目标回波，提取目标距离、径向速度和方位信息。雷达对粉尘、水雾和弱光不敏感，响应速度快，适合对人员接近进行持续测距和速度监测。系统采用多目标跟踪算法对雷达点迹进行聚类、关联和轨迹预测，输出人员轨迹及靠近速度。当人员沿设备轴线快速跑向滚筒或转载点时，雷达能够较早提供距离变化率信息，为提前预警提供依据。

机器视觉利用隔爆摄像机采集现场图像，通过目标检测网络识别人员、头部、肢体及作业姿态，并判断人员是否跨越警戒线、是否处于设备危险包络内。视觉模块可与热成像形成“可见光—热辐射”双光谱校验：可见光图像受粉尘影响时，以热成像结果为主；热成像受高温设备干扰时，以视觉结果为主。视觉还可识别人员穿戴、蹲姿、攀爬和多人聚集等行为，为风险分级提供辅助信息。雷达提供精确距离和速度，视觉提供类别和轮廓，二者融合可有效抑制单一传感器虚警。

### 3.4 多源信息融合算法

系统采用“时间同步—空间标定—目标关联—置信度加权—决策融合”的处理流程。各传感器时钟通过工业以太网时间协议同步，将测量结果统一到同一时间戳；利用标定控制点建立像素坐标、雷达极坐标和 UWB 三维坐标之间的转换关系。对同一人员，系统以 UWB 标签编号或轨迹相似性进行目标关联，获得同一目标的多维测量值。

融合算法为：

$C = w_1 C_1 + w_2 C_2 + w_3 C_3 + w_4 C_4$，且 $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$

式中：$C$ 为人员危险接近的综合置信度；$C_1$、$C_2$、$C_3$、$C_4$ 分别为 UWB、红外热成像、毫米波雷达和机器视觉输出的单传感器置信度；$w_1$、$w_2$、$w_3$、$w_4$ 为对应权重。各单传感器置信度由检测强度、目标完整性、环境适应度和历史一致性计算。UWB 身份唯一、位置稳定时权重提高；红外热成像在弱光环境中权重提高；雷达在粉尘浓度高时权重提高；机器视觉在能见度良好、目标完整时权重提高。

决策规则依据综合置信度与区域等级共同确定：预警区且综合置信度达到预警门限，启动声光报警和事件记录；减速区且置信度达到减速门限，控制设备降速并持续跟踪；停机区或综合置信度达到停机门限，安全回路动作，设备停机并

闭锁。对任一传感器检出人员进入停机区且另一传感器提供同向确认的情形，采用“二取一增强”规则直接停机，不以多数投票方式延误保护；对单传感器短时虚警，由多源不一致抑制处理，避免误停机影响生产。

## 4 安全联锁与人工复位

人员接近防护的终极安全功能是通过停机消除人员与危险部件的接触风险，因此系统不把报警或上位机逻辑作为唯一停机手段。安全 PLC 采集急停按钮、拉绳开关、检修门位置、雷达停机信号、热成像停机信号和视觉停机信号，经双通道输入和交叉监测后驱动安全输出继电器。安全输出直接作用于设备主回路接触器或变频器安全转矩关断回路，确保即使普通控制器死机、通信中断或软件异常，仍可实现设备安全停机。

安全回路具备自诊断功能，能够检测触点熔焊、线圈断路、配线短路和接地故障。每次上电及运行期间，系统周期性执行输出反馈检测；检测到输出状态与预期不一致时立即进入安全状态。控制器与传感器之间采用心跳信号和通信校验，通信中断超过设定时间后，系统按故障安全原则处理：无人值守的连续运输区域可触发停机，检修区域则提示人工确认。

停机后采用人工复位，禁止系统自动重启。复位前，现场人员须确认危险区域内无人员、设备运动部件已停止、能量已隔离、报警原因已查明。复位操作区分“报警复位”与“安全回路复位”：一般预警可由操作员在监控界面确认后复位；安全停机必须由现场授权人员操作专用复位装置，并完成现场条件确认。复位记录包含时间、位置、设备、复位人、复位类型和复位前状态，形成责任可追溯闭环。

## 5 通信、供电与防爆设计

井下通信采用工业以太网为主干、现场总线连接传感器的结构。UWB 基站、热成像仪、雷达和摄像机就近接入防爆交换机，控制命令与状态信息经冗余环网传输至地面监控主机。网络划分安全控制网与信息管理网，安全控制数据优先传输，监控视频流与历史记录通过网关隔离后上传，避免视频带宽占用影响停机控制实时性。

系统配置网络时间服务器，统一各传感器、控制器和监控主机的时钟。事件记录采用带时标的结构化数据，至少包含设备编号、区域编号、目标编号、传感器原始数据、综合置信度、危险等级、控制输出、复位信息和故障代码。记录数据可查询、导出和统计分析，为风险趋势判断和防护参数优化提供依据。

防爆设计遵循煤矿电气设备相关规范。传感器、交换机、控制器和声光报警器按安装场所选择本质安全型或隔爆型，电缆引入装置、密封圈和接地连接符合防爆结构要求。井下安装避开淋水、落石和机械碰撞位置，红外窗口与雷达天线设置防尘透明保护件，并制定定期清扫和校准制度，防止粉尘覆盖和窗口污染导致探测距离下降。

## 6 工程应用与测试

在主斜井带式输送机驱动部、机尾转载点和破碎机入料口周边部署人员接近防护系统。驱动部区域粉尘和噪声较大、照明条件较差，布置 UWB 基站、红外热成像仪和毫米波雷达，摄像机安装于驱动硐室侧上方并配置隔爆照明补光；转载点空间狭窄、人员穿越频繁，以雷达快速测距结合视觉越线检测为主；破碎机入料口属于极高危险区，采用多传感器交叉确认和独立安全停机回路。系统根据设备运行状态动态切换防护策略：输送机运行时执行完整三级防护；检修停机并办理作业许可后，允许授权人员在指定区域作业，但破碎机入料口等能量未隔离区域仍保持最高等级防护。

系统测试分为传感器单项测试、融合算法测试、安全回路测试和现场模拟测试。传感器单项测试检查测距精度、识别正确率、抗粉尘与抗光照能力；融合算法测试统计单传感器与多传感器融合条件下的漏报率、误报率；安全回路测试测量从危险判定到设备安全停机的响应时间；现场模拟测试由授权人员在监护下模拟接近、穿越和滞留行为。主要测试结果如表 1 所示。

表 1 主要传感器与安全回路测试结果

| 测试项目 | 测试方法 | 测试次数 | 合格标准 | 结果 |
|---|---|---|---|---|
| UWB 静态定位误差 | 人员在标定坐标点静止测量 | 60 | ≤0.5 m | 合格 |
| 雷达测距误差 | 人员于不同距离测量 | 60 | ≤0.3 m | 合格 |
| 红外目标识别率 | 弱光及粉尘环境模拟 | 60 | ≥95% | 合格 |
| 视觉越线识别率 | 模拟越线行为 | 60 | ≥96% | 合格 |
| 安全回路响应时间 | 触发至安全输出动作 | 30 | ≤300 ms | 合格 |
| 系统连续运行 | 通电连续监测 | 72 h | 无死机、无丢事件 | 合格 |

注：表中测试数据为示意性工程测试记录，实际验收数据应以现场标定和第三方检测报告为准。

融合算法对比测试统计了单雷达、单视觉和四源融合三种方式在相同模拟场景下的识别结果，如表 2 所示。

表 2 不同识别方式融合算法对比

| 识别方式 | 测试样本/个 | 漏报率/% | 误报率/% | 平均判定时间/ms |
|---|---|---|---|---|
| 毫米波雷达单用 | 120 | 6.7 | 10.8 | 45 |
| 机器视觉单用 | 120 | 5.8 | 9.2 | 68 |
| UWB+红外单用 | 120 | 4.2 | 7.5 | 52 |
| 四源融合 | 120 | 1.7 | 2.5 | 86 |

注：四源融合的平均判定时间略长，但漏报率和误报率显著降低；防护系统应以安全优先，判定时延在设备制动距离允许范围内可接受。

系统投用后统计连续运行期间的事件记录，结果如表 3 所示。

表 3 系统投用后连续运行事件统计

| 统计周期 | 预警事件/次 | 减速事件/次 | 停机事件/次 | 人工复位/次 | 虚警处置/次 |
|---|---|---|---|---|---|
| 第 1 个月 | 23 | 9 | 4 | 4 | 3 |
| 第 2 个月 | 18 | 6 | 3 | 3 | 2 |
| 第 3 个月 | 15 | 4 | 2 | 2 | 1 |

注：事件数量随人员规范作业、视窗定期清扫和参数优化呈下降趋势，不能直接作为系统性能评价结论。

现场测试表明，多传感器融合可有效弥补单一传感器在粉尘、弱光和高温背景下的不足。UWB 提供身份与位置基准，红外和视觉完成目标确认，雷达提供距离和速度趋势，四者交叉验证后系统漏报和误报明显减少。安全回路独立动作，不依赖上位机与通信链路，停机动作可靠。测试期间未发生因系统失效导致的人员危险接触事件，但系统不能完全替代停电闭锁、机械防护和作业许可，仍需纳入煤矿安全管理体系统一运行。

## 7 应用效果与存在问题

应用效果主要体现在四个方面。一是实现由“人工看护”向“技术防护+人工确认”的转变，对人员进入危险区域形成主动预警和强制停机能力。二是多传感器交叉确认降低了单一传感器虚警，减少因误停机造成的生产干扰。三是安全回路独立、人工复位和事件记录形成责任闭环，便于事故追溯和参数优化。四是防护区域与设备状态联动，兼顾设备运行和检修作业两种工况，避免“一停了之”影响正常检修。

系统仍存在需要改进的问题。其一，UWB 定位精度受标签佩戴位置和基站遮挡影响，人员蹲姿、攀爬或多人密集时标签坐标可能出现跳变，后续可通过佩戴双标签、姿态识别和多基站冗余定位改善。其二，热成像在高温设备和热水管路附近存在背景干扰，应结合季节性环境温度变化动态优化温度基线。其三，机器视觉在浓尘、水雾和逆光条件下可靠性下降，可通过双光谱摄像机、补光控制和图像增强算法提高。其四，安全回路与生产设备原有控制系统的接口较为复杂，需在不改变设备原有保护功能的前提下完成联锁改造，并经过严格的断电、过载和误动作试验。

## 8 结语

煤矿设备人员接近防护系统应以消除人员与危险部件接触风险为目标，遵循功能安全的基本原则。本文提出的“危险区域分级—多源感知—数据融合—安全联锁—人工复位—事件记录”技术路线，通过 UWB、红外热成像、毫米波雷达和机器视觉协同识别，结合独立硬件安全回路和人工复位机制，兼顾了识别可靠性与停机安全性。工程应用表明，该系统能够适应煤矿井下粉尘、弱光、高温和强电磁干扰环境，有效降低人员危险接近事件的漏报和误报。后续研究可进一步引入人员姿态识别、风险预测和设备数字孪生，完善危险区域动态建模，推动人员接近防护由“区域告警”向“风险预测与主动控制”发展。

参考文献：

[1] 王国法，范京道，吴群英，等. 煤炭智能化开采关键技术与工程实践[J]. 煤炭学报，2020，45(1)：18-34.

[2] 葛世荣，王忠宾，王世博. 煤矿机器人技术现状及发展方向[J]. 工矿自动化，2020，46(8)：7-14.

[3] 孙继平. 煤矿井下人员位置监测系统关键技术[J]. 煤炭科学技术，2019，47(7)：1-8.

[4] 钱建生，何敏，刘琦. 煤矿井下超宽带定位技术研究进展[J]. 工矿自动化，2021，47(3)：20-26.

[5] 张申，丁恩杰，徐钊. 煤矿井下无线传感器网络与人员定位[J]. 煤炭学报，2018，43(增刊2)：612-620.

[6] 黄友锐，凌六一，曲立国. 煤矿安全监测监控技术[M]. 北京：煤炭工业出版社，2019.

[7] 刘忠超，翟天嵩. 机器视觉及应用[M]. 北京：机械工业出版社，2020.

[8] 阮秋琦, 阮宇智. 数字图像处理[M]. 3 版. 北京：电子工业出版社，2018.

[9] 张丽艳，李荣冰，刘建业. 毫米波雷达目

标检测与跟踪方法综述[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 524776.

[10] 田增山，何维，周牧. 超宽带室内定位技术综述[J]. 重庆邮电大学学报（自然科学版），2019，31(1)：1-12.

[11] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. GB/T 16855.1—2018 机械安全 控制系统安全相关部件 第 1 部分：设计通则[S]. 北京：中国标准出版社，2018.

[12] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. GB/T 20438 系列 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[13] 国家安全生产监督管理总局，国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京：煤炭工业出版社，2022.

[14] 应急管理部，国家矿山安全监察局. GB 51145—2015 煤矿电气设备安装工程施工与验收规范[S]. 北京：中国计划出版社，2015.

[15] 中国煤炭工业协会. 煤矿智能化建设指南（2021 年版）[Z]. 北京：中国煤炭工业协会，2021.

[16] 梁娟，王福豹，赵季中. 基于 UWB 的煤矿井下人员定位算法研究[J]. 工矿自动化，2018，44(9)：45-49.

[17] 胡青松，钱建生，李世银. 矿井目标定位与跟踪研究现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2020，48(3)：121-130.

[18] 张帆，李鸥，刘广怡. 红外弱小目标检测技术发展综述[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0303002.

[19] 杨小军，邢科义，李志明. 多传感器信息融合及其应用[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2019.

[20] 何勇，刘飞，聂鹏程. 数字农业中的机器视觉与光谱检测技术[M]. 北京：中国农业大学出版社，2020.