灾害救援生命信息探测技术研究进展

张 彪[1,2,3],丁 文[1,2,3],郑学召[4],卢 猛[1,2,3],康玉国[1,2,3],赵炜楠[1,2,3],黄 渊[4],刘盛铠[5]
(1. 北京大地高科地质勘查有限公司,北京 100040; 2. 国家矿山应急救援大地特勘队,北京 100043;
3. 矿山钻探救援应急管理部重点实验室,河北 涿州 072750; 4. 西安科技大学 安全科学与工程学院,
陕西 西安 710054; 5. 中国矿业大学 计算机科学与技术学院/人工智能学院,江苏 徐州 221116)

摘要: 灾害事故发生后,如何实现被困人员生命信息的快速、高效探测,成为提升救援效率与成功率的关键. 为此,本文阐述了地震灾害、矿山灾害与坍塌灾害等主要灾害类型在救援过程中面临的关键问题及相应解决方案,在此基础上剖析了音视频探测技术、红外探测技术、气体探测技术和雷达探测技术4种生命信息探测技术的研究进展. 进而又系统地梳理了各相关技术的发展历程,明析了其在发展过程中面临的技术难题及关键技术节点,最后展望了其未来研究工作中应重点关注的方向,并且从救援需求的角度出发对灾害救援与探测技术的发展方向进行了整体探讨和论述. 本文的梳理研究为高性能、多模态生命信息探测救援技术与装备的研制指明了方向.

关键词: 灾害救援;生命信息探测;音视频探测技术;红外探测技术;气体探测技术;雷达探测技术
中图分类号: TD77 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2026)02-0370-21

Research progress of life information detection technologies for disaster rescue

ZHANG Biao[1,2,3], DING Wen[1,2,3], ZHENG Xuezhao[4], LU Meng[1,2,3], KANG Yuguo[1,2,3], ZHAO Weinan[1,2,3], HUANG Yuan[4], LIU Shengkai[5]
(1. Beijing Dadi Hi Tech Geological Exploration Co., Ltd., Beijing 100040, China; 2. National Mine Emergency Rescue; Daditekan Team, Beijing 100043, China; 3. Key Laboratory of Drilling Technology in Mine Rescue, Ministry of Emergency Management, Zhuozhou, Hebei 072750, China; 4. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 5. School of Computer Science and Technology/School of Artificial Intelligence, University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: After the occurrence of a disaster, how to achieve the rapid and efficient detection of life information of trapped individuals becomes the key to improving rescue efficiency and success rates. To this end, this paper elaborates on the critical issues and corresponding solutions encountered in the rescue processes of major disaster types such as earthquakes, mining accidents, and collapses. On this basis, it further analyzes the research progress of four life information detection technologies—audio-video detection, infrared detection, gas detection, and radar detection—and systematically reviews the developmental trajectories of these technologies, clarifies the technical challenges and key technological milestones faced in their evolution, and finally outlines the direc-

收稿日期: 2025-09-04 **修回日期:** 2025-11-13 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250357
基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3015705)
第一作者: 张 彪(1984—),男,安徽省萧县人,教授级高级工程师. E-mail:zb556@163.com
通信作者: 郑学召(1977—),男,新疆维吾尔自治区焉耆县人,教授,博士生导师. E-mail: zhengxuezhao@xust.edu.cn
引用格式: 张 彪,丁 文,郑学召,等.灾害救援生命信息探测技术研究进展[J].中国矿业大学学报,2026,55(2):370-390.
ZHANG Biao, DING Wen, ZHENG Xuezhao, et al. Research progress of life information detection technologies for disaster rescue[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 370-390.

tions that future research should prioritize. Meanwhile, from the perspective of rescue needs, this paper conducts a comprehensive analysis and discussion on the development directions of disaster rescue and detection technologies. The review presented herein points out the direction for the development of high-performance, multimodal life information detection technologies and equipment for rescue operations.

Key words: disaster rescue; life information detection; audio-video detection technology; infrared detection technology; gas detection technology; radar detection technology

由于地震、矿山事故、山体滑坡、隧道与建筑物坍塌等自然灾害与人为灾害的频繁发生，致使人员的生命与财产安全面临严峻威胁[1]. 当灾害发生后极易出现人员被困于复杂、危险环境的情况，极大地增加了现场救援难度；对此，如何根据不同灾害类型的特点，针对性地开展快速、高效、准确的被困人员生命信息探测行动，成为提升救援效率、降低被困人员伤亡的关键[2-3].

为满足灾害救援现场对生命信息探测的迫切需求，科研人员依据光波、声波、电磁波等物理学原理，研发了多种生命信息探测技术与装备，并在灾害救援实践中将音视频探测技术、红外探测技术、气体探测技术、雷达探测技术作为探测生命信息的主要技术手段，且多次在灾害救援现场中成功实战应用，取得了良好的生命搜救效果[4-6]；但以上生命信息探测技术仍存在不足之处，亟需进一步融合人工智能、传感器、机器人等前沿技术，推动其在灾害救援领域的集成化发展及智能化转变，进而提升其在复杂多变灾害救援场景的适应性及探测能力.

鉴于此，本文介绍了各类灾害救援现场面临的关键问题；进而更深入地明析了前文所述4种生命信息探测技术在灾害救援中的关键研究进展，梳理了各生命信息探测技术在发展过程中面临的难题与关键技术节点，并展望了其未来的重点研究方向；同时，从救援需求的角度出发对未来灾害救援与探测技术的发展进行了整体性的探讨；旨在为各类高性能、多模态救援技术与装备的研发提供理论参考，以及为生命信息探测技术在各种灾害救援行动中的高效运用提供借鉴与指导.

1　灾害救援中面临的关键问题

不同的灾害类型面临的救援场景不同、存在的干扰因素不同，进而影响救援时所采取的救援方式、运用的探测技术与装备也不尽相同. 因此，明析不同灾害类型存在的关键问题及特点，可为制定科学的救援方案、选取最优的救援方式及配套的技术装备提供针对性依据.

1.1　地震灾害救援面临的关键问题及解决方案

地震灾害通常会造成大规模的建筑物、道路及其他基础设施的严重破坏，形成瓦砾堆积. 其内部空间狭小、结构失稳、通道堵塞等复杂且可能随时二次坍塌的环境条件，制约了救援行动的高效展开. 同时，地震灾害还可能伴随火灾、危险化学品（气体）泄漏及余震等多源次生灾害，对人员的生命安全及身体健康构成持续威胁. 此外，地震受灾区域通常面临交通道路中断、电力供应中断、通信网络中断等极端情况，极大地限制了通信、指挥调度等应急保障能力，严重影响救援行动；面对“三断”等极端情况时，搭建“空-天-地一体化”应急通信网络成为有效的技术保障及解决方案，其架构如图1所示[7]，其可为救援指挥人员提供可靠的第一手现场资料，以保证所做决策的正确性. 当下

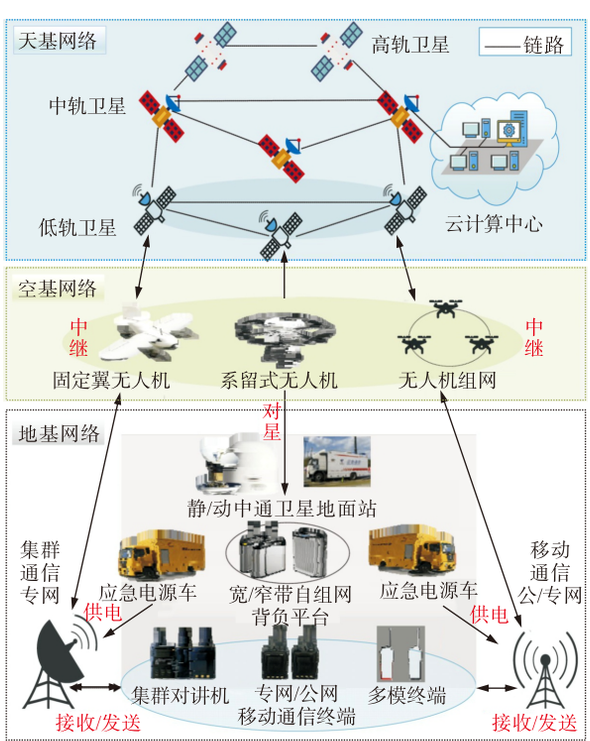


图1　“空-天-地一体化”应急通信网络架构[7]

Fig. 1　“Air-space-ground integrated” emergency communication network architecture

地震救援主要利用生命信息探测与物理清障相配合的方式营救被困人员，此也决定了其对生命信息探测装备的体积、灵活性、抗干扰能力及穿透能力等有较高要求.

1.2 矿山灾害救援面临的关键问题及解决方案

矿山发生爆炸、透水、坍塌等事故后，通常会造成巷道严重堵塞、氧气含量明显降低、有毒有害气体大量涌出、井下生存空间急剧缩减，同时供电系统的瘫痪，又会进一步引发通风、通信、照明等系统失效，造成极度恶劣的井下环境，需采用现场部署多个中继器(电池供电)接力的方式传输信息，使救援难度增大、要求及危险性增高. 同时，灾后矿井下不稳定的地质结构容易造成冒顶、塌方等二次事故的发生，制约着水平巷道救援技术的效率与安全性；利用垂直钻孔救援技术开展救援行动，可有效避免救援人员伤亡，但其仍存在大直径钻孔速度慢、终孔位置易偏移且易坍塌等技术缺陷，影响整体救援进程[8]；综合运用垂直钻孔救援与水平巷道救援相结合的立体式矿山救援体系(其示意如图2所示)，可提高矿山救援效率及成功率. 矿山救援多采用生命信息探测与构筑救援通道相结合的方式营救被困人员，使其在救援过程中面临的问题更为复杂，导致其对技术与装备的安全性、适应性及探测性能提出了更加严苛的要求；特别是在煤矿灾害救援中要求所用装备需为本质安全型，并需取得煤矿矿用产品安全标志认证.

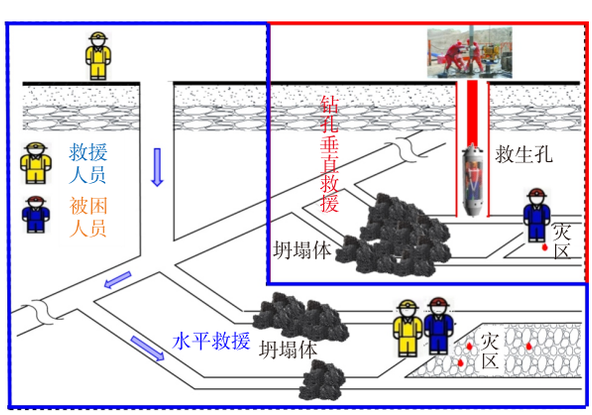


图2 立体式矿山救援示意

Fig. 2 Schematic diagram of three-dimensional mine rescue

1.3 建筑物、隧道坍塌及山体滑坡等坍塌灾害救援面临的关键问题及解决方案

坍塌灾害的救援环境特征及技术需求与地震救援类似，但救援难度依旧巨大；其主要体现为结构失稳、空间复杂、残骸堆积形态多变等不稳定特征，需耗费较长的清理时间且在清理过程中易造成二次垮塌，严重威胁人员生命安全. 同时，坍塌体内部空间更为狭小、空气流动性差，极易造成有害气体聚集及氧气含量减少，恶化被困人员的生存条件. 由于其与地震灾害面临的救援特征较为相似，致使其对生命信息探测技术与装备的需求与地震灾害救援相同. 当面对特大山体滑坡、泥石流等灾害救援场景时，可参照地震救援的模式，同步开展应急通信网络构建、生命信息探测、坍塌体清理、被困人员营救等救援行动，以保证救援现场的通信顺畅、指挥高效、处置及时，从而最大限度的提升救援速率与被困人员生还率.

结合表1各主要灾害类型的特性，可推理获得：未来应推动救援、探测技术与装备趋于小型化、轻量化，同时应全面提高各类探测技术与装备的灵活性、适应性、抗干扰性、安全性、生命信息探测能力及信息智能处理能力等综合水平，并增强灾区多源信息的实时监测能力与智能分析深度，以更好地适应各类复杂多变的灾害救援环境.

表1 主要灾害类型特性对比

Table 1 Comparison of the characteristics of major disaster types

灾害类型	救援环境特征	次生危害	救援方式	可采用探测技术
地震灾害	受灾范围大，坍塌体内部空间狭小、结构不稳定、通风不畅，存在“三断”极端情况	余震、有害化学品泄露(燃气管道破裂等)、二次坍塌	生命信息探测，地面清理障碍物及建立临时通道	音视频、气体、红外及雷达探测技术
矿山灾害	巷道堵塞，通风、通信、照明、供电系统等瘫痪，灾区温湿度异常、氧气含量下降	有害气体涌出、涌水、巷道坍塌、爆炸、火灾	生命信息探测，疏通巷道及打通地面救援通道	音视频、气体、红外及雷达探测技术
坍塌灾害	坍塌体内部空间更为狭小、结构不稳定且可能存在流动性，通风不畅	二次坍塌、有害气体聚集	生命信息探测，地面逐次清理障碍物	音视频、气体、红外及雷达探测技术

综上可知，各类灾害救援现场均会开展生命信息探测，并将音视频、气体、红外、雷达等生命信息探测技术作为现阶段有效提升救援效率的关键手段；因此，可为本文后续进行4种生命信息探测技术的系统分析提供了研究基础. 同时，无人机在

矿山(主要为井下等遮蔽环境)救援领域中的潜力也日益突出;未来应加大具备自主巡航、自主避障等自主决策功能且可搭载多种信息探测仪器完成自主侦测的井下救援无人机的开发,以弥补常规及钻孔救援设备对井下灾区信息探测范围、灵活性等受限的不足,图 3 展示了无人机在井下救援侦测的运用示意.

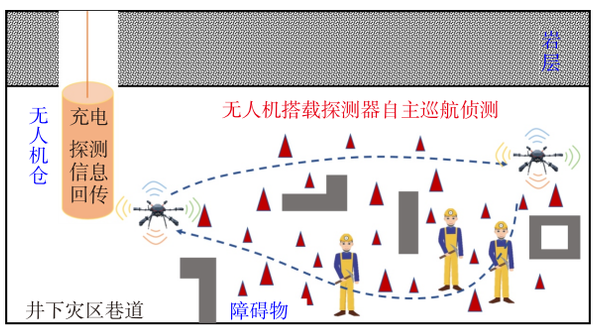


图 3　井下救援无人机自主侦测示意

Fig. 3　Underground rescue UAV autonomous detection diagram

2　音视频探测技术研究进展

音视频探测技术因具有直观性强、部署灵活、成本相对较低等优势,被最早且广泛用于灾害救援领域,其经过了不断的技术攻关、融合升级,以及对编码正交频分复用(COFDM)、对称数字用户线路(SDSL)、数据交换(Data Exchange)等技术的综合运用,逐渐形成了较为成熟且完善的音视频探测体系;音视频探测系统原理架构,如图 4 所示[9].

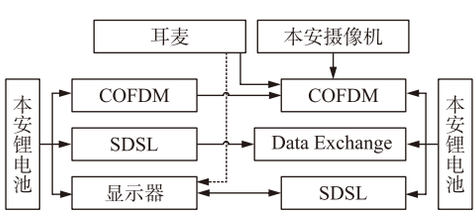


图 4　音视频探测系统原理架构[9]

Fig. 4　Schematic architecture of audio-video detection system

2.1　音视频探测技术起源及发展

音视频探测技术基础源于传统声学监测与工业视频监控系统. 后因声频放大、电信号处理、彩色显示等技术的发展,以及驻极体麦克风等高灵敏拾音器的研发、应用,逐渐使音视频探测技术具备了彩色显示、数据存储、高灵敏度拾音的能力. 至 20 世纪末,随着计算机技术与通信技术的快速发展,推动了多媒体处理技术、电子技术、编解码器技术的融合应用,完成了其向数字化感知的转变,实现了其对音视频数据的实时采集、压缩、存储及同步远程传输;并通过改变音视频探测器的承载(大小、形态)与传输方式,逐步将其在灾害救援领域以缝隙探测、钻孔探测的方式进行人员定位与生命识别的应用,且为满足救援场景的应用需求将其逐渐趋于小型化与便携化[10],如蛇眼视音频生命探测仪、钻孔救援视音频生命探测装置等. 近年来,由于人工智能、深度学习、快速通信等技术的突破,使音视频探测技术进入了主动感知、协同分析、智能识别与预警的发展新阶段,提升了其在救援过程中的环境适应性与实际探测性能和效果,为构建下一代智能化灾害应急救援系统装置提供了坚实基础.

总体而言,音视频探测技术从起源到应用于灾害救援领域,主要经历了由模拟化向数字化、再到智能化的转变. 最终实现了本阶段集高灵敏度麦克风阵列、红外补光模块、人工智能识别芯片和远程通信单元于一体的音视频探测系统的研发,且实现了小型化与轻量化,使其具备了在复杂、遮蔽、低照度等恶劣环境中,完成对被困人员生命信息的精准、快速感知,并已成为地震、坍塌、矿山事故等各类灾害救援现场中不可或缺的搜救装备.

2.2　音视频探测技术难题与关键技术节点

1)抗干扰能力弱、鲁棒性及安全性较低. 由于灾害救援现场环境复杂,常面临较强噪声(机械运转声、风噪)、极端光照(低照度、浓烟遮蔽)、可能存在易燃易爆气体等的干扰,严重制约了当时技术的生命探测效果与灾区适应能力. 为此,早期科研人员在音频处理方面,提出了谱减法、维纳滤波器等频域分析技术、自适应滤波方法,提升了在强干扰环境中其对噪声的抑制能力以及所获信号的鲁棒性;在视频处理方面,引入了红外补光技术,弥补了其在低照度条件下对目标识别、空间感知性能低的不足,利用双码流网络视频服务技术和边缘计算方法,缓解了多视频数据远程同步、实时传输带宽受限的难题;在音视频同步处理方面,提出了编码节奏同步网络(EPS-Net,其架构和机制如图 5 所示)的视听语音分离模型,实现了音频、视频的独立编码,使其都能以各自匹配的速度模式处理信号,进而建立了基于编码步调同步的音视

频信息融合算法，促进了多信息处理的逐步融合，并保留了每种信息的独特特征，其提升了对音视频信号处理的有效性、鲁棒性[11]. 同时，有学者依据放电形式及安全火花电路控制原理，利用双重多级限压与限流技术，且结合机械隔离、电气隔离等方法，设计了符合易燃易爆气体环境应用要求的本质安全型电源与电路，实现了短路关断时间小于160 ns、火花能量低于40 μJ的性能，提高了设备运用的安全性，可有效避免救援时引发二次危害[12].

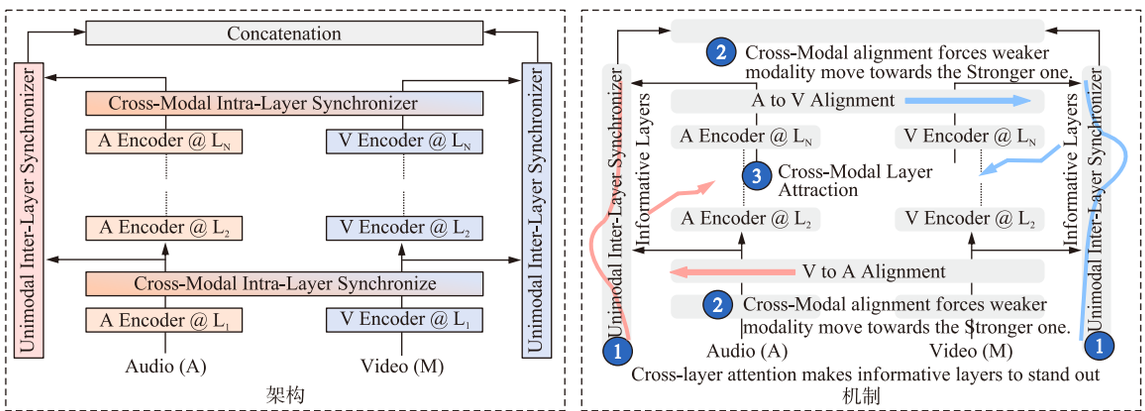


图5 编码节奏同步网络架构与机制[11]

Fig. 5 The neural architecture and mechanism of EPS-Net

2)遮蔽空间探测范围与性能受限. 当面对地震、矿山及建筑物坍塌等灾害造成人员长时间被困的救援场景时，人体可能处于昏迷、极度虚弱或低代谢的状态，此时仅存在微弱的生命体征且易被坍塌物遮挡；因音视频探测技术依赖声波和视线(直线传播)的表达原理，影响了其探测范围，也极易出现信号漏检、误判等情况. 为此，贝尔实验室、国际商业机器公司等多家机构研究阵列麦克风结合波束形成技术、高灵敏度麦克风阵列技术，实现了声波的定向捕捉、目标方位的准确识别[13]；微软研究院率先将深度神经网络(DNN)用于语音识别模型，且结合传统隐马尔可夫模型(HMM)，显著提高了复杂语音信息的提取与识别精度且错误率降低约7%[14]；同时，随着深度学习与目标检测技术的快速发展，进一步推动了卷积神经网络(CNN)、YOLOv5等算法在处理视频信息中的应用，提升了在动态环境中对人体轮廓、动作与姿态等图像信息实时显示、识别的准确率[15-17]. 西安科技大学研究团队通过改进长距离信号传输方式，优化音视频探测装备承载方式与结构，设计电源专用保护IC主控芯片，研发了国内首套台用于钻孔救援的音视频生命信息探测装置，其孔内传输距离大于1 000 m、井下有效探测距离大于10 m、续航时间达到12 h、防水性能达到IP68等级，可有效实现生命信息探测、灾区环境监测及孔壁状态侦测，并在山东平邑石膏矿坍塌事故、山东笏山金矿爆炸事故、新疆丰源煤矿透水事故等多次实战救援行动中成功应用，取得了多名被困人员被成功营救的实战效果[18]，不同功能的前端探测器如图6所示. 该探测装置扩大了矿井下空间的探测范围、提升了探测性能、填补了国内垂直钻孔救援领域信息探测的技术空白. 此外，音视频探测技术的不可穿透性，凸显了发展可穿透障碍物进行生命信息有效探测技术与装备的紧迫性，进而推动了雷达和红外等可穿透探测技术的快速发展.

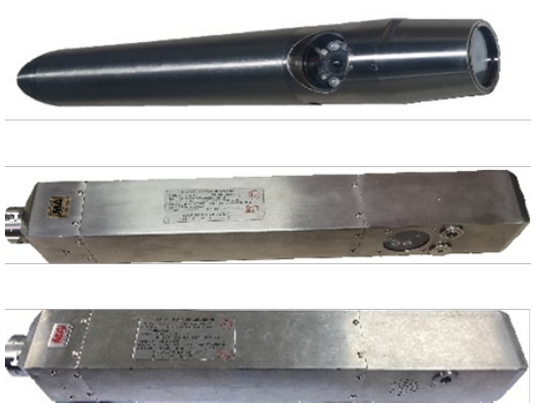


图6 音视频生命信息前端探头

Fig. 6 Audio-video life information front-end probe

3)自动化分析与实时智能预警机制匮乏. 采用人工监控的音视频探测设备，在面对大范围、多目标、高强度的探测任务时，无法快速、高效地判别有效信息，进而影响其救援效率与准确性. 为了

提高对人类活动识别的智能化程度，通过引入注意力机制与 Transformer 架构，将音频、图像与空间数据等信息进行协同处理，从而在一定程度上实现了自动预警、动态风险评估与异常行为检测，可强化复杂场景下的特征提取与跨模态信息融合能力，但其结构化处理与自动化分析能力依然较弱[19-20]，体现为：数据传输和处理的时效性易受带宽、延时及算力限制，对弱信号、目标边界以及异常事件识别的稳定性不足，难以满足极端灾害救援环境下对高可靠性的应用需求．未来如何在保障低延时、高鲁棒性、安全性与探测能力的前提下，构建具备更强泛化能力、可持续学习和自适应推理机制的智能化分析与预警系统成为研究重点．

2.3　音视频探测技术发展趋势

1）提升数据传输与智能感知能力．利用 5G、6G 超低时延通信技术提升数据传输效率与链路稳定性，以实现高清音视频数据的稳定、快速回传及远程实时共享；通过引入超高灵敏度拾音器阵列、亚分贝信号增强算法以及深度融合神经网络技术，以提高在强干扰环境中对低声求救、微弱呼吸心跳与肢体微动等信号的提取、检测精度以及实现对异常事件的智能甄别．

2）构建多方位自主监测系统．基于 OpenVINO 技术，加大环境自主感知、任务自主规划、路径自主修复的嵌入式通信模块研发力度，同时与搭载于穿戴式终端、机器人与无人机等异构地空平台嵌入式复合模块相融合，实现多承载方式的视音频自主探测装备构建；研制具备多角度旋转探测功能的探测器，以完成全方位信号捕捉、采集；形成可满足复杂灾害救援现场对无人部署、全域覆盖、动态调整等智能需求的自主监测系统．

3）加大智能辅助决策系统建设研究力度．通过深度融合大数据、数字孪生（DTS）、虚拟现实（VR）等前沿技术，将音视频信息与灾害现场空间模型同步映射，实现灾害态势可视化、生命目标可追踪、救援任务可模拟的智能指挥体系；同时，联合人工智能辅助决策系统与人机交互界面，构建出三维、实时、可交互的虚拟救援空间，为救援指挥人员提供全景式、高精度的信息显示与指挥决策平台．

3　红外探测技术研究进展

红外探测技术主要包括红外夜视技术与红外热成像技术．其中，红外夜视技术与音视频探测技术结合，以弥补可见光摄像仪在低照度环境下的成像不足；红外热成像技术则依靠人体发出的热辐射与周围环境的差异进行热成像[21]，能够在无光、遮蔽或烟尘等环境中实现对被困人员位置、轮廓与活动状态的有效探测[22]，其探测示意如图 7 所示；人体不同体温红外辐射波长如表 2 所示，因此，现有研究主要选取 8～14 μm 波段的波长作为设计探测人体信息红外热成像仪的重要技术参数[9]．



图 7　红外探测示意

Fig. 7　Schematic diagram of infrared detection

表 2　人体不同体温红外辐射波长

Table 2　Infrared radiation wavelengths of the human body at different temperatures

体温/℃	28	32	37	40
中心波长范围/μm	8.5～11.0	8.3～10.8	8.0～10.5	7.7～10.1
中心集中波长/μm	9.6	9.5	9.4	9.2

3.1　红外探测技术起源及发展

红外热辐射最早于 1800 年，由英国科学家威廉·赫歇尔（William Herschel）在研究太阳光热效应的棱镜实验中发现[23]，且说明自然界高于绝对零度的物体均可向外发射红外热辐射．后续学者于 20 世纪中前叶相继研制出了红外变像管、热电偶与热释电等红外传感器，实现了红外光谱观察与热源探测[24]．随着半导体科学理论、光电成像技术、制冷技术、热成像探测器材料（碲镉汞三元化合物等的发明）的不断突破，使红外探测技术在 20 世纪 60 年代进入了飞速发展阶段；因此，美国率先于 1959 年、1964 年分别成功研制了第 1 台红外热像仪、第 1 台实时显示视频图像的红外热成像系统，具备图像呈现与空间定位能力，且均最先投入军用领域[25]．至 20 世纪 90 年代，非制冷红外焦平面阵列技术（UFPA）实现了关键性突破，推动了红外探测设备向小型化、便携化、低成本、低功耗等方面演进．在此基础上，将红外传感器安装在可弯曲、可延伸的线缆上，逐步研制出了用于坍塌灾害救援领域的蛇眼热成像生命探测仪，以显示黑暗

狭小灾区环境中的热辐射生命信息[23]，为救援人员提供快速检查的依据；再将其与无人驾驶车辆结合，开展在矿井救援行动中的应用研究[26]. 由于近年来人工智能技术等的爆发，使各领域的红外探测装备迈入了智能化、集成化、多光谱一体化的新发展阶段，进一步增强了在各类灾害救援中的应用效果.

总体而言，红外探测技术经历了从热感知与成像、到非制冷普及、再到智能融合识别的发展过程，以及从军用到民用的运用阶段. 最终实现了红外探测仪的灵敏度高、重复性好、响应波长可调控，并逐步构建出具备前端感知、实时处理、协同分析的应用体系，为地震、坍塌、矿山事故等复杂灾害救援提供了更加高效、可靠的生命信息探测技术与装备.

3.2 红外探测技术难题与关键技术节点

红外探测技术(器)从第一代的单元器件发展到第四代的高分辨率焦平面阵列[27]，主要经历了以下的技术难题与关键技术节点.

1)成像对比度、灵敏度、精度等不足. 红外探测技术受背景热辐射、环境温度变化及目标热特征强度等因素影响，易出现成像模糊、边缘不清、误报与漏报频发等现象，难以满足生命信息高精度探测需求. 为此，在材料方面英国皇家信号与雷达研究所的研究人员发明了HgCdTe(碲镉汞)三元化合物，提高了红外探测器的灵敏度、重复性与精度[23]；文献[28]在此基础上通过调控能带结构与材料杂质，进一步提升了探测灵敏度；并有研究人员开展了非制冷VOx器件低噪声微结构优化设计，有效增强了弱热信号的提取能力[29]；且不同红外热成像仪的主要运用材料如表3所示. 在算法方面，基于时空图像矩阵变换开发了红外动态背景抑制模型(IR-BGS)、基于残差检测算法探测热显著区域的信息、基于多帧热图累积增强方法提升动态弱信号成像质量，实现了系统鲁棒性的增强，以及对灾害救援环境中弱信号提取准确性和稳定性的提升[30]；通过引入2个候选滤波单元以降低虚警发生的概率、改进基于亮度和梯度幅值方法以增强对头部的识别、多帧批准匹配规则以获得更高的检测率，进一步提高了红外探测技术对行人检测的实时效率与精度[31].

表3 不同红外热成像仪的主要运用材料

Table 3 Main materials used in different infrared thermal imagers

类型	短波红外热成像仪(SWIR)	中波红外热成像仪(MWIR)	长波红外热成像仪(LWIR)	
	制冷型为主	制冷型为主(性能高)	制冷型	非制冷型
使用材料	铟镓砷(InGaAs)	碲镉汞(HgCdTe)、锑化铟(InSb)	碲镉汞(HgCdTe)	非晶硅(α-Si)、氧化钒(VOx)

2)热穿透识别能力受限. 在面对人员被困于高密度废墟、钢筋混凝土、隔热层等介质环境中时，人体辐射的红外热辐射往往无法穿透障碍物至其表面，再加之人体代谢微弱、体温相对较低，进一步造成热盲区现象，致使红外探测技术无法实现有效的生命信息探测. 为此，科研人员们融合了红外与可见光技术，通过同步融合2个波段的信号提高了目标边界清晰度与热源可信度；基于空间图推理的多光谱图像拼接方法实现了不同方向的成像拼接与重构，以提高遮挡环境下的信息识别覆盖率[32]；在传统强度信息的基础上引入偏振信息形成了红外偏振成像探测技术，其具有较高的信噪比、抗伪装和抗干扰性能，可有效提升探测信息的识别能力[33]；基于布尔地图的自适应显著模型增强了人体与背景的热像辨识度[34]，并结合卷积神经网络实现了不同天气条件下夜间行人识别的准确性[35]. 此外，由于超帧技术及先进电路技术的发展，使红外探测的高动态成像范围得以拓宽[36]；基于超大视场红外成像技术具有的空域容纳性强、时域实时性高、目标识别准和环境适应性好等优势，实现了热穿透探测性能的有效提升，且在极端气候、复杂电磁或伪装遮蔽环境中，都能够保持成像稳定，展现出在复杂灾害救援环境中广阔的应用前景，其扫描型、多镜头拼接型、凝视型3种技术系统对比如表4所示[37].

3)智能化程度较低. 传统红外探测技术仅具备温度分布识别与目标识别的能力，缺乏对生命状态、行为姿态等深层信息的理解、判断，制约了其在多目标动态识别与智能预警中的应用. 由于边缘人工智能芯片和轻量化深度学习模型等智能化技术的不断进步，使红外探测技术逐渐具备了在现场进行实时计算与智能判断的能力，避免了传统技术对中心服务器的高度依赖性，从而有效降低了数据传输延迟与通信能耗；同时，有学者提出了将边缘条件卷积神经网络(EC-CNN)用于热图像语义分割，提升了对人体轮廓和局部特征的精确识别，增强了探测信息的智能化处理水平[38]；又提出一种基于光增强与特征提取机制的

表 4　三种超大视场红外成像技术系统对比[37]

Table 4　Comparison of three ultra-wide field-of-view infrared imaging systems

类型	机理	优点	缺点
扫描型超大视场红外成像技术	通过扫描机制实现对宽区域的全覆盖	机械扫描结构简单、成本低、成像质量高，多阵列分割式，具有高分辨率和高灵敏度	空间和时间维度丢失，图像拼接需要辅助技术，成像存在延迟和场景限制，组装与调试复杂，且易受外部振动影响
多镜头拼接型超大视场红外成像技术	利用多台摄像机协同工作，通过图像拼接技术实现宽区域成像	解决机械分时成像的振动误差，实时成像、响应速度快，可实现三维场景重建	依赖高级拼接算法，拼接过程可能产生误差，系统复杂，成本高
凝视型超大视场红外成像技术	单镜头基于非相似成像理论进行宽区域探测	可实现连续观测，体积小、响应快、实时性强，避免了机械振动与结构误差对成像的影响	镜头设计难度大，成像畸变严重

SFNET-N网络，通过引入光增强网络和强特征提取网络来高精度分割复杂灾害环境的热图像信息，进而提高了智能感知能力[39]. 此外，利用卷积神经网络可提取热图像特征，对原始红外图像信号进行盲元补偿，可减轻固有仪器缺陷对热图成像的影响，进而提升了多目标的智能感知、追踪与决策能力[40-41]；通过结合多目标检测(MOD)方法和时序特征建模技术，将红外探测技术从单一目标检测扩展到群体行为识别及动态事件预测，实现了对人员行为异常的实时智能预警，为灾害救援中红外探测技术的智能化生命信息探测提供了参考依据.

3.3　红外探测技术发展趋势

1)加强红外材料与器件研究力度. 应加强红外光子晶体、光敏材料与有机光电材料等新型探测材料的研究，并进行基于现场可编程门阵列(FPGA)、硅CMOS技术的本安型集成电路与二元量子点红外探测器(QDIP)等集成器件的设计，以提升设备探测性能，实现低成本、高性能应用，满足不同波段、不同场景下红外探测多样性的需求.

2)加大微弱信号提取、识别研究. 应通过结合惯性测量单元(IMU)与空间建图技术，构建支持穿戴式、无人机与地面机器人等多类型搭载平台，建立多模态融合感知体系，并研究其在高热背景、遮蔽与烟尘等复杂灾害环境下对微弱生命体征识别、提取的速率与准确率的提升效果；同时，应加大红外复眼成像技术在灾害救援场景中的运用研究，以提升微弱信号的探测维度与分辨率.

3)推动智慧化水平终端建设. 应通过融合热图时序建模、注意力机制、卷积神经网络与Transformer结构等前沿技术，开展呼吸心跳、姿态与热分布异常的多维语义理解研究，检验在复杂救援场景下的智能判别精度与可靠性；并进一步开展数字孪生、5G/6G通信、大数据、边缘计算与嵌入式智能算法的推理及集成研究，以提升设备的自主化与智能化运行水平.

4　气体探测技术研究进展

气体探测技术可实现CO_2，CO，O_2，CH_4，H_2S，NH_3等人体代谢性气体、挥发性有机化合物(VOCs)的实时监测，并依据气体浓度变化，综合评估通风不畅的狭小封闭灾区环境是否具备人员生存条件；如：检测CO_2浓度是否升高至$1\,100\times10^{-6}$，进而判断探测区域是否可能存在幸存人员[8,15]，且探测示意如图8所示.

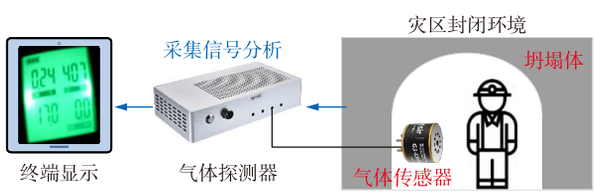


图8　气体探测示意

Fig. 8　Schematic diagram of gas detection

4.1　气体探测技术起源及发展

气体探测技术最早于19世纪检测煤矿中的CH_4，CO等灾害气体，且采用简单化学反应；进入20世纪后，由于电子工程、材料科学和自动化技术的进步，逐渐形成了以金属氧化物半导体型、热催化型、电化学型为代表的气敏元件技术体系，使此阶段的传感器实现了气体浓度的定量测量和超限报警功能，且灵敏度、响应时间及稳定性获得提升. 至21世纪初，由于早期提出的朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律在应用层面的深入发展，推动了光谱吸收技术(HITRAN数据库中部分气体的吸收谱线如图9所示[42])、非分光红外技术(NDIR)、光声光谱(PAS)等光学无损检测技术的发展，且光学气体检测技术是推动气体探测快速

发展的关键技术，其分类如表5所示[43]. 再加之电子鼻等微型化电化学传感器的出现，使气体探测技术进入了灵敏度高与多组分检测的快速发展阶段，在此基础上，日本国际救援队在2008年汶川地震救援中首次实战运用气体探测技术[9]；近年来，通过不断融合人工智能、深度学习、微系统制造(MEMS)、边缘计算与大数据等先进技术，进一步推动了光学检测、电子鼻传感器等气体探测技术与装备向高性能、多模态融合、多终端嵌入的智能化方向发展.

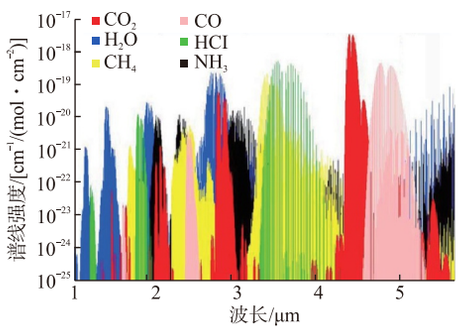


图9 部分气体的吸收谱线[42]

Fig. 9 Absorption spectra of selected gases

表5 气体光学检测技术分类[43]

Table 5 Classification of gas optical detection technologies

分类	名称	提出时间	提出学者
主动式	可调谐激光吸收光谱技术(TDLAS) 差分吸收激光雷达技术(DIAL) 差分吸收光谱技术(DOAS)	20世纪70年代 20世纪60年代 20世纪70年代	HINKLEY E D(美国) SCHOTLAND R M(美国) PLATT U(德国)
被动式	被动式遥感傅里叶变换红外光谱技术(RS-FTIR) 光谱成像技术(SI)	20世纪90年代 20世纪80年代至90年代	GRIFFITH D W T(澳大利亚) GOETZ A F H(美国)

整体而言，气体探测技术经历了由人工化学检测到电子定量识别，到光学遥测，再到多源融合与智能感知的发展过程；但其存在易受空气流动性干扰的缺陷，且主要用于工业领域(特别是对光学遥测技术的应用)，而单独应用于灾害救援领域的情况相对较少，多为将气体传感器集成、搭载于其他物探设备上辅助探测运用.

4.2 气体探测技术难题与关键技术节点

1)灵敏度、选择性、稳定性等性能差. 早期气体探测技术依赖人工判断，且对温湿度、气压变化极为敏感，致使对人体信息探测效果极差，难以满足实际救援需求. 为提高技术灵敏度、选择性、稳定性等探测性能，研究人员主要从材料方面入手，首先研制了金属氧化物半导体(MOS)材料的气体传感器，但选择性、稳定性依然较差[44]；又进一步开发了石墨烯、纳米材料和金属有机框架材料(MOFs)等新型敏感材料(常见气体传感器材料优缺点对比，如表6所示)，显著提升了技术设备的灵敏度和选择性，同时运用掠射角沉(GLAD)技术等研究敏感材料制备，有效解决了多设备数据协同的冲突问题，并实现了稳定性的增强[45-47]；此外，将金属硫属化合物作为制作NO_2传感器的主要材料，实现了灵敏度、选择性、稳定性、检测限和运行温度的显著提高[48-49]. 在处理技术方面，融合了光谱探测技术，集成了智能阈值控制与动态补偿算法，设计了基于MEMS技术的气味探测系统[50]，提出了基于对抗学习的漂移补偿算法[61]，进一步提高了在复杂救援环境中的探测稳定性、灵敏度和响应速度等性能. 同时，利用多模态学习技术将温度、湿度数据与气体数据同步呈现，提升了气体探测技术在复杂灾害救援环境中的鲁棒性. 在设备研制方面，大连理工大学研制了干涉式光纤声波传感器，极大的提升了多组分气体探测灵敏度，获得CH_4，C_2H_2，CO，CO_2的检测极限分别为87×10^{-6}，1.3×10^{-9}，4.6×10^{-6}，5.5×10^{-6}[52].

表6 常见气体传感器材料优缺点比较[44-47]

Table 6 Comparison of advantages and disadvantages of common gas sensor materials

材料	优点	缺点
MOS	灵敏度高，检测限与成本低	特异性、耐温性、稳定性差，响应慢，漂移明显
MOFs	选择性、热稳定性高，孔径和化学性质可调	制备工艺复杂，成本高
石墨烯	导电性、气体吸附性、灵敏度、机械稳定性和复合性高	选择性差，制备工艺复杂，易氧化
碳纳米管(CNTs)	灵敏度高，吸附能力强，制备工艺简单	选择性差，重复性差
化合物材料	可设计性、柔性强	耐热性与复现性差，响应慢
电化学材料	灵敏度与特异性高，响应快	受温、湿度影响大，寿命短

2)气体探测精度低且种类单一. 在高湿、高温与多种气体共存的灾害救援环境中，易造成传感器响应漂移与交叉干扰，导致微量气体探测精度不足、误报率高且探测种类有限. 为此，研究人员设计了集成微加热器的气体传感器阵列，实现了100×10^{-12}的检测精度[47]，再将其与机器学习技术

结合获得了81%的平均准确率；提出了新型交流噪声分析技术，完成有用信号与背景噪声的分离，进一步提高了气体探测的精度[53]；提出了基于循环神经网络（RNN）的时间序列预测技术，有效解决了漂移问题，进而提高了气体探测的可靠性[54]. 为增加气体检测种类，开发了基于高阻值半导体气体传感器的多组分、宽量程的气体探测系统，以提升了多组分气体环境中的探测精度[55]；并利用长光程差分吸收光谱（LP-DOAS）痕量气体分析技术研制了首台可探测30多种气体的车载应急救援快速遥感仪[56]；进一步依据光声光谱技术（其探测原理如图10所示）的无波长选择性、零背景干扰等显著优势，采用多路复用技术和干涉型傅里叶变换红外光谱等多种光声光谱手段探测多组分气体，又将其与计算机控制和数据处理技术结合，拓展了气体探测种类及实时检测性能[57]；但光学检测技术对光源要求较高，在存在易燃易爆气体环境中应用危险性大. 同时，基于生物生理构造提出电子鼻探测技术（设备）后，快速成为研究热点，推动了灾害救援中的气体探测技术向更高的探测精度、更多的探测种类及智能化方向发展，且电子鼻工作原理如图11所示[58].

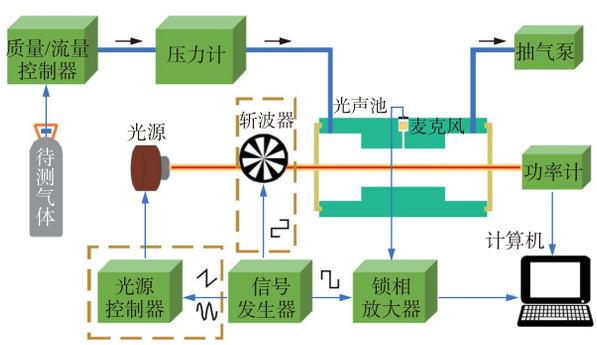


图10　光声光谱技术探测原理[57]

Fig. 10　Principle of gas detection using photoacoustic spectroscopy

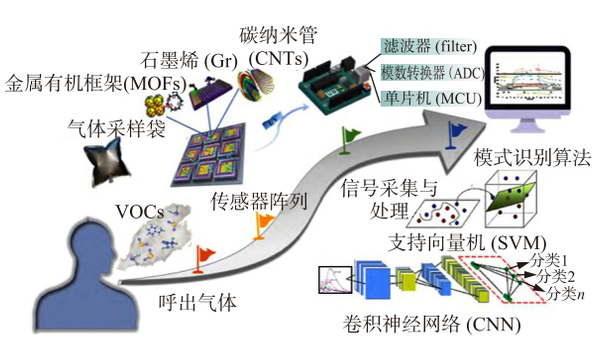


图11　电子鼻工作原理示意图[58]

Fig. 11　Schematic diagram of electronic nose working principle

4.3　气体探测技术发展趋势

1）提高设备信息处理及探测性能. 应依托卷积神经网络和深度神经网络等技术，进一步提升高维数据和多模态信号的实时处理能力；基于先进通信技术开展复杂灾区环境中低延时、高带宽的数据回传机制研究；加快推动光学气体遥测技术在灾害救援领域的实际运用，加强3～4 μm波段中红外激光器的关键技术攻关，拓展光学气体检测的种类与精度，为其在复杂灾害救援领域中应用提供思路；同时，依据信息论和计算机模拟等技术，系统性开展具备高灵敏度、高信噪比、高长期稳定性、高选择性、高安全性、强抗干扰能力、广测量范围、低检测限、低功耗等高性能、可实时检测的传感器研究，以适应复杂多变的灾区救援环境需求.

2）深入夯实多模态与智能化发展. 应加大微纳传感技术、柔性电子技术、大数据及人工智能算法在气体探测领域的融合力度，以实现探测设备趋于小型化、智能化，进而更好地完成搭载于多模态移动终端的目标；通过引入跨模态学习、迁移学习、多任务学习等先进手段，开展参数自适应校准、浓度动态追踪与实时感知的智能设备研发；同时，继续加大嵌入式电子鼻探测技术的研究力度，并保证其本质安全型供电系统设计，提升气体探测技术在多模态数据融合、识别精度与智能决策方面的智能化水平及应用安全.

5　雷达探测技术研究进展

雷达探测技术因具备非接触式的穿透探测性能，且不受光照和气候等条件的影响，进而相较于视音频探测技术、红外探测技术和气体探测技术，其可穿透煤岩体、混凝土等非金属障碍物实现人体运动等生命信息的有效探测，已成为近年来的新兴生命信息探测手段，并在地震救援、矿山救援等多个坍塌灾害救援领域广泛应用[59]，其探测示意如图12所示；同时，雷达系统按波段、体制分类的比较如表7所示. 进一步结合表7中的特点与不

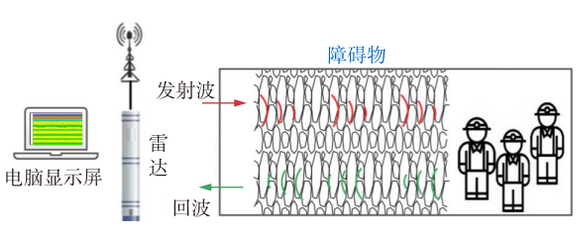


图12　雷达探测示意

Fig. 12　Schematic diagram of radar detection

表7 雷达系统主要类型对比

Table 7 Comparison of major types of radar systems

分类特性	按工作波段分类			按波形体制分类		
	超宽带雷达(UWB)	毫米波雷达(mm Wave)	微波雷达(Microwave)	连续波雷达(CW)	调频连续波雷达(FMCW)	脉冲雷达(Pulse)
特点	穿透能力强、时间分辨率高、抗干扰能力强、信息容量大	波长短、成像精度高、穿透烟尘等障碍能力强	探测距离远且范围大、抗干扰能力强、成本低	结构简单、低功耗、微弱信号探测能力强、可测速	可同时测距与测速(动态目标追踪)、分辨率高	穿透能力强、环境适应性强、三维成像能力高
不足	远距离探测精度不足、计算量大	穿透能力弱、成本高、灾区运用效果差	分辨率低、精度低、不适用于微信号探测	无法测距及定位、抗干扰能力弱	信号处理复杂、对硬件性能要求高、穿障能力弱	成本高、抗干扰能力低于FMCW和UWB
应用领域	灾害救援、道路检测	安检反恐、车载雷达	军事侦查、动态监测	医疗健康、生命体征监测	交通测速、车载与机载避障雷达	灾害救援、地质探查、军事侦查

足,可知:超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)雷达具备穿透能力强、抗干扰能力强、分辨率高、信息容量大等诸多特点[60],脉冲雷达具有穿透能力强、分辨率好等特点;进而综合实际需求考虑穿透能力与分辨率,研究人员将脉冲体制的超宽带雷达作为灾区救援中主要运用的探测雷达,其可实现穿透能力与时间分辨率之间矛盾的有效平衡,最大程度地完成灾害救援领域中对被困人员生命信息的高性能探测. 接下来,将对UWB雷达的研究现状进行阐述和说明.

5.1 超宽带雷达探测技术起源及发展

自1887年赫兹证实了电磁波的存在开始,超宽带雷达探测技术进入起源发展阶段,并于1989年由美国国防部首次提出超宽带(Ultra Wide Band, UWB)的概念;同时,随着固态电子和光电器件的快速发展,晶体管、激光驱动半导体开关和微波功率模块等在UWB雷达电源制造中的应用,以及采用高斯函数及其各阶导数、Hermite函数及其各阶导与小波函数设计脉冲波形的方式(各脉冲波形如图13所示、优缺点如表8所示),使得UWB雷达逐渐被成功研制,并主要运用在军事领域,此时,UWB雷达的功率与体积较大且无法探测微弱生命信息[61]. 至2002年2月,美国联邦通信委员会批准超宽带可民用,并为了防止对其他通信频段造成干扰,便将UWB雷达的工作频率和发射功率做出了限制,要求:工作频率为3.1~10.6 GHz,发射带宽大于500 MHz,发射功率(有效全向辐射功率)小于−41.2 dBm/MHz[62];同时,随着微多普勒频移、干涉相位、回波时延等原理的深入研究,使得UWB雷达实现了人体微弱生命信号的探测[63],由此拉开了其在灾害救援领域的运用帷幕. 国内第四军医大学的王健琪教授团队首先研制了可用于应急救援的UWB生命探测雷达;随后湖南华诺星空电子技术有限公司于2010年4月研发出了警用UWB雷达生命探测仪,并通过了国家地震局的测验,且在玉树地震救援中实战运用,发挥了重要作用[64]. 由于恒虚警率检测(CFAR)、信号解耦算法与三维建模等高分辨率电磁回波处理技术的发展,推动了UWB雷达实现多目标探测与空间定位功能[65];再进一步地,融合人工智能与深度学习等前沿技术,使其向主动智能识别推进,增强了对复杂灾害救援环境的适应性.

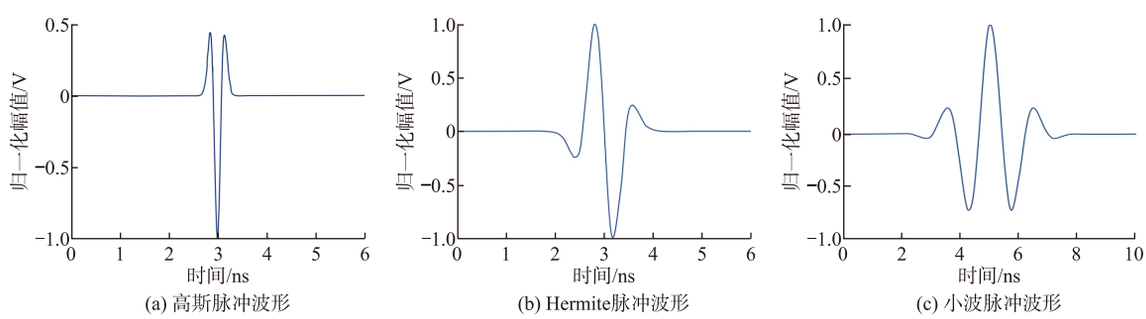


图13 高斯、Hermite、小波脉冲波形

Fig. 13 Gaussian, Hermite, and wavelet pulse waveforms

表 8　高斯、Hermite、小波函数设计脉冲优缺点

Table 8　Advantages and disadvantages of gaussian, Hermite, and wavelet functions for pulse design

脉冲类型	优点	缺点
高斯脉冲	数学形式简单、时频局域性强、抗干扰能力强、频谱平滑连续	频带受限、无零均值、非平稳或瞬态信号处理能力弱
Hermite脉冲	正交性完备、波形灵活、可自适应脉冲设计	时间局域性差、能量分布扩散、计算复杂
小波脉冲	灵活性高、具备多分辨率分析能力、非平稳或瞬态信号处理能力强	实现过程复杂、需优化和调试参数、需满足特定通信约束

综上而言，UWB雷达探测技术主要经历了从低分辨率的穿障探测到高精度的生命信号识别，再到近年来的智能化电磁回波信号处理的演进过程，体现出硬件驱动、算法及技术牵引的发展历程. 随着前沿技术的不断发展与深入融合，UWB雷达在未来灾害救援、智能安防、医疗健康等领域仍存在巨大的发展空间与潜力，是未来的常备灾害救援装备.

5.2　超宽带雷达探测技术难点与关键技术节点

1)回波波形杂乱，杂波滤除困难. 由于灾害救援现场环境复杂，背景噪声及电磁干扰严重；同时存在直达波、耦合波、多径回波等杂波干扰，致使UWB雷达回波信噪比低、波形杂乱，难以实现有效地杂波滤除、抑制，进而影响后续的有效特征提取与量化识别[66]. 起初，为了有效滤除杂波，各国学者们通过调解特定阈值设计了滤波器，实现了特定频率和噪声干扰的滤除，但其依赖大量的数据验证且对动态环境的适应性差；进一步地运用统计分析原理，将滤波器与小波变换联合，利用小波域分解信号、特定滤波器滤除杂波，改进了对复杂雷达回波的处理能力，但实时性差且非平稳信号处理效果不佳[67]. 通过动态调整滤波器的阈值参数来适应动态、非平稳的回波信号处理，进而形成了自适应滤波技术(自相关运算)，有效地去除了回波中的干扰信号，但其动态调整的特性也导致了其实时性、稳定性的降低；而利用神经网络模型来处理雷达回波信号，则实现了高效的杂波分离与抑制[68]. 此外，还提出了消除静止杂波的相邻相减法、基于正切函数的小波阈值去噪方法[69]、基于优化变分模态分解(VMD)和粒子群优化算法(PSO)的方法以及基于自适应噪声集合经验模态分解(ICEEMDAN)和小波包分解联合的方法[70]等滤波方法，逐步克服了发展过程中不同技术方法的局限性，实现了滤波效果与信噪比的大幅提升.

2)有用生命特征被淹没，难以有效提取. 在实际救援场景中，被困人员的生命体征(呼吸心跳)均较为微弱，极易淹没在背景干扰及噪声中，加之不能完成有效地滤波，造成有用生命信息难以提取的困境. 研究人员从时间分析的角度出发，提出了时域分析方法，其可直观获得UWB雷达回波信号随时间变化的参数，进而快速获取目标距离，且利于非线性、不平稳信号的提取以及可有效克服呼吸与心跳信号之间的相互干扰，但对存在复杂频率干扰环境的提取效果不佳[71]；为此，从频率分析的角度处理雷达回波信号形成了频域分析方法，其可弥补呼吸心跳信号在时域上偏移、混叠的不足，但无法消除呼吸对心跳的干扰，整体而言其频谱精度高、计算量小且不利于非线性、不平稳信号的处理[72]. 同时，傅里叶变换(FT)可实现信号在时域、频域角度处理的相互转换，推动二者的优势整合，进而构建出时频分析方法，弥补了二者对振幅、相位和频率等参数分析不足的缺陷，进一步提高了对非线性、不平稳及瞬时信号的处理能力，增强了雷达回波中的生命信息；时频分析方法中的小波变换(WT)、傅里叶变换系列算法(FFT、STFT、DFT等)、模态分解系列算法(EMD、EEMD、CEEMD、VMD等，其可根据信号自身特性分解生成自适应的固有模态函数)以及与希尔伯特变换(HT)结合的相关算法，促进了对复杂、低信噪比环境中呼吸心跳信号提取准确率的提升，时域、频域和时频域分析方法的比较请参考文献[63]；因此，时频分析方法也是主要的呼吸心跳等有用生命特征提取方法[63,73].

3)生命信息量化识别艰难. 因被困人员的数量未知、运动形式多变，致使UWB雷达难以实现不同人体的准确区分与轨迹解耦；因此，对雷达回波进行滤波、有效信息提取后，能否有效识别信息类型及生命体数量是检验UWB雷达探测性能的关键因素. 为识别静止状态下的胸腔起伏运动，研究人员通过优化天线发射功率、频率及阵列形式实现了穿障条件下人体静止时的呼吸心跳运动探

测;并将定位方法与功率谱估计方法融合,完成了雷达对障碍物后方2个静止目标的精准识别与定位[74]. 为识别人体运动状态下的肢体运动,基于短时状态空间法实现了人体躯干与双脚运动的准确识别[75],基于自主和相互注入锁定雷达架构的生命体征探测系统,降低了身体伪影对生命特征探测识别的影响[76],并提出了融合全局与局部特征的人体肢体运动识别算法,获得了95.63%的平均识别准确率. 此外,在相似性度量方法及雷达回波和时间-距离-多普勒图像等特征的基础上,采用支持向量机(SVM)分析信号可获得90%以上的单、多目标识别率;第四军医大学研究团队基于重现量化分析(RQA)的方法,实现了UWB雷达对多目标人体的有效识别;中国科学院空天信息创新研究院提出了一种基于分布式UWB雷达的多目标自动检测方法(其运算流程如图14所示),实现了多目标的快速、自动检测及定位,运算效率(运算时间为0.95 s)与智能化水平获得提升[77];还有频谱分析、时域自适应滤波及生命体呼吸信号提取方法、聚类算法与多重信号分类算法、基于对数方法的相位算法等均实现了很好的不同距离下多目标的量化识别效果[67];以上难点的突破及技术的进步,不断提升了UWB雷达在实际复杂灾害救援环境中的探测性能.

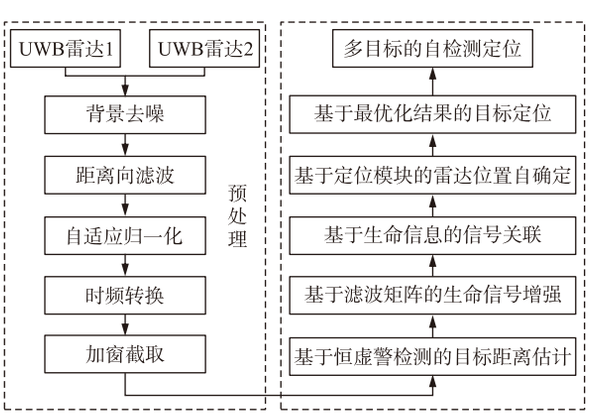


图14 文献[77]所提检测方法运算流程

Fig. 14 Operational flow of the detection method proposed in reference [77]

4)雷达系统硬件的环境适应能力不强. 由于灾害救援现场的特殊性及高危性,使得对UWB雷达的形态、功率及探测方式提出了更高的要求. 学者们相继开展了UWB电磁波信号产生、雷达系统构建、雷达天线设计、波形选取、阵列天线布置及阵列波束形成(分布式)等一系列的相关研究,以提高其对复杂灾害救援环境的适应性与可靠性[61]. 基于此,湖南华诺星空电子技术有限公司研制了多款用于地震与坍塌灾害救援领域下探测被困人员生命信息的UWB雷达,取得了较高的探测性能与应用效果,主要形态如图15所示,其结构与工作模式不适用于钻孔探测;为此,西安科技大学郑学召教授研究团队响应了矿山钻孔救援领域的生命信息探测需求,自主研制了如图16所示的圆柱形UWB雷达探测系统装置(直径120 mm,高1.2 m),其穿透探测距离达20 m,弥补了UWB雷达在钻孔救援领域的应用空白[18,78],拓宽了雷达的应用领域;同时,利用环氧浇封技术保证了UWB雷达的本质安全型电路与电源,提升了其在煤矿等存在易燃易爆气体场景的适应性及安全性.

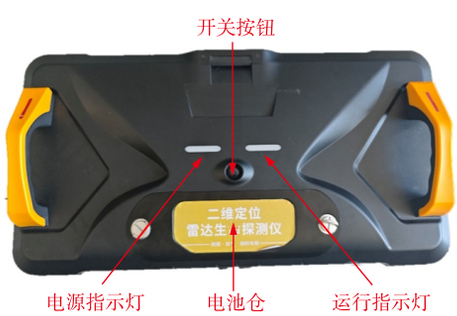


图15 华诺星空电子技术有限公司雷达主要形态

Fig. 15 Main radar configurations of huanuo xingkong electronic technology Co., Ltd.



图16 面向矿山救援的UWB雷达系统装置

Fig. 16 UWB radar system device for mine rescue

5.3　超宽带雷达探测技术发展趋势

1)深化自适应杂波滤除方法研究.将电磁波传输衰减原理与灾害环境噪声生成机理相结合,深入剖析不同杂波的统计特性,以推动从根源探寻更加高效且适应能力强的杂波滤除技术;同时,基于小波变换、模态分解等自适应方法,强化灾害救援中实时性高的自适应杂波滤除算法研究,并开展微多普勒原理与时频分析方法联合的杂波滤除性能研究,以及融合人工智能、神经网络、深度学习等先进处理技术,以提升UWB雷达在实际救援现场对动态信息的自适应能力以及对实时滤波的泛化能力与鲁棒性.

2)加强高精度生命特征提取研究.应运用VMD算法加强对UWB雷达回波的处理力度;利用Kullback-Leibler(K-L)相对熵完成对VMD算法的改进、优化,将改进后的算法与独立成分分析算法(ICA)联合,分析联合算法对呼吸心跳、肢体微动等生命特征的提取性能与准确率;利用二维变分模态分解(2D-VMD)特征提取算法进行呼吸心跳信号的多尺度提取研究;此外,应引入Transformer模型、多维尺度变换算法、最小二乘法等方法,以进一步全面提升复杂灾害救援场景下对生命信息提取的精度、速率及智能化程度.

3)深入不同状态、数量的目标识别研究.通过深度剖析人体生理学构造、运动学规律,明确不同人体状态及数量的电磁回波关键表征参数与各生命运动信息之间的映射关系、响应特征,且结合大数据技术进行相应数据集的构建与训练,为后续信息的精准识别提供数据支撑、为算法的优化升级提供顶层设计思路;同时,可利用多维域算法融合的多人体目标识别方法开展多目标识别(去模态混叠)研究,并基于多发多收技术设计、优化天线阵列排布,以增强UWB雷达对不同人体数量及运动状态的目标辨识能力.

4)开展雷达硬件系统升级研究.引入改进型跳时二进制相移键控调制方式设计发射信号,以增强信号的抗干扰能力;利用拓扑网络搭建自组网络体制,以提高雷达网络的覆盖范围和响应速度;基于GprMax数值模拟试验探究与不同灾害救援环境中UWB雷达探测生命信息相对应的最佳中心频率与电磁波波形;基于半导体技术研制CMOS的微型与低功耗UWB雷达芯片;基于嵌入式等效技术设计可搭载于多移动终端平台的UWB雷达,并保证雷达的本质安全型供电系统设计,以增强雷达在不同救援环境的适应性及探测能力.

6　整体发展探讨

通过对以上4种生命信息探测技术的梳理、总结,可发现:四者的发展存在相似性与交互性,对采集信号的处理呈现出一致性且相辅相成,四者的比较如表9所示;四者主要经历了由模拟化到数字化再到智能化的发展历程,并获得了巨大的研究进展与运用效果、实战价值,但四者之间缺乏有效的联合使用及融合集成,致使整体综合探测性能不佳.未来应进一步基于OpenVINO边缘AI框架、跨模态接口协议、多源数据融合框架与决策模型、时空编码和索引技术等技术的研发,构建集成音视频显示及全双工通信、红外热成像、环境参数检测、雷达穿障探测等多源异构数据的一体化生命信息探测智能系统装置,以满足在复杂多变灾害救援现场中对高效探测生命信息的实际需求,进而实现探测效率、救援成功率、人员存活率的提升,其整体架构可参考图17所示内容;此为未来灾害救援领域的研究热点与必然发展趋势.

表9　各生命探测技术的比较

Table 9　Comparison of various life detection technologies

探测技术	工作原理	探测方式	干扰因素	适用灾害场景
音视频探测技术	直观显示所采集的音频与视频数据	非接触式、被动式	照度过低或过高、噪声过大、存在物体遮挡	可视、非遮蔽环境的灾害救援及检测
红外探测技术	探测人体辐射热量和周围环境的差异	非接触式、被动式	背景温度过高	不存在热害的灾害救援及检测
气体探测技术	检测人体代谢性气体的浓度	非接触式、被动式	环境原有气体异常	空气流动性小的灾害救援及检测
UWB雷达探测技术	分析反射回电磁波的表征参数	非接触穿透式、主动式	金属及磁性介质、湿度过大(水)	低湿度、非金属介质阻挡的灾害救援

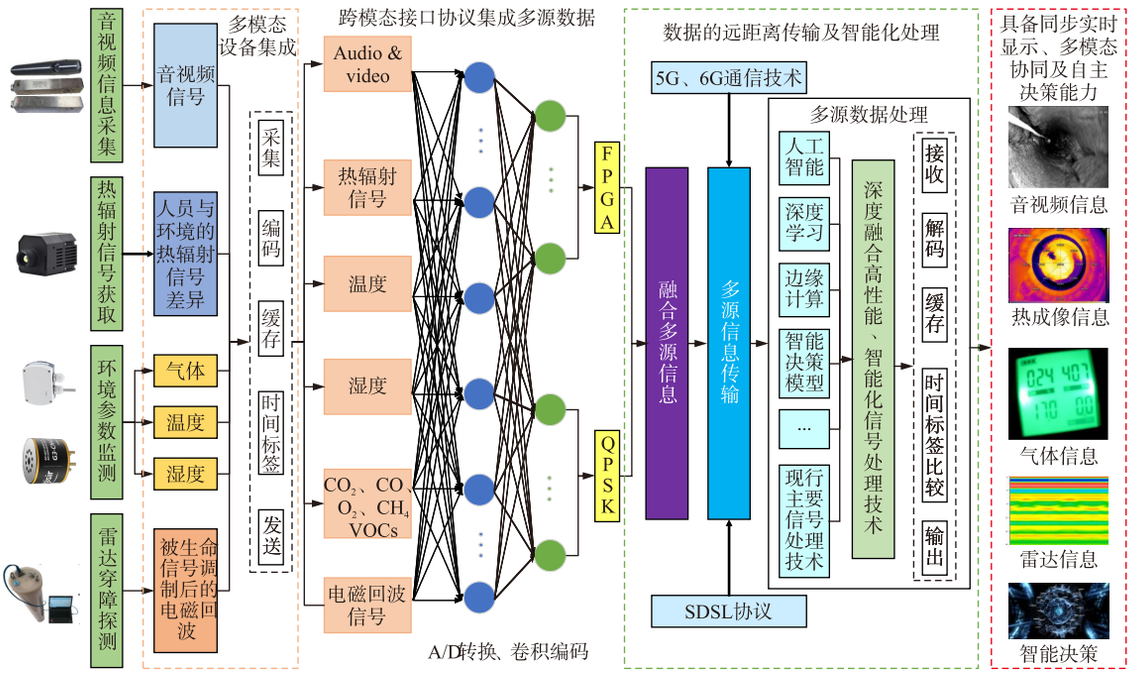


图 17　多源异构数据一体化生命信息探测智能系统装置架构

Fig. 17　Architecture of the intelligent system device for integrated life information detection based on multi-source heterogeneous data

无人机作为可快速、高效的实现大范围灾害区域及救援人员无法到达危险、复杂受灾区域的信息侦查工具，未来应在加强同步定位与地图构建技术（SLAM）研究的基础上，深度融合多源信息探测仪器搭载与传输技术，尤其是突破矿井下救援无人机对未知区域的自主巡航及多源信息自主侦测的关键技术难题，其设计技术架构如图 18 所示．

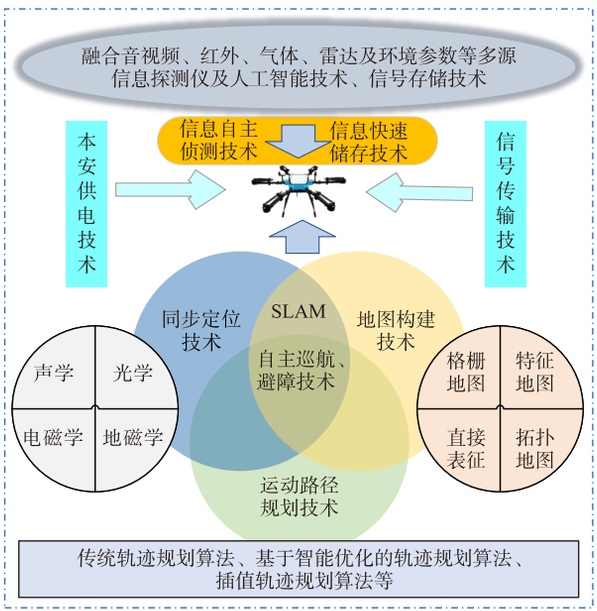


图 18　矿井救援无人机自主巡航及侦查技术架构

Fig. 18　Architecture of autonomous navigation and reconnaissance technology for mine rescue UAVs

大数据技术可有效解决灾害救援中多部门、跨区域协作障碍，降低联动成本、优化资源配置；未来可将图 19 展示的大数据技术模型与人工智能技术相结合，进一步完善灾害预警、快速反应、资源配置优化和灾后流程恢复等救援过程中的关键环节，以增强数据的实时处理与决策支持能力．未来可基于 DeepSeek 人工智能模型在语义理解、知识推理与开源部署等方面的优势，并在明确灾害模拟、多源数据融合、智能决策等方向的前提下，将其应用于灾害救援领域，构建如图 20 所示的多类灾害预防和应急响应智能辅助系统框架（参考），从而以新思路和新方法强化灾害救援技术与装备在灾害知识图谱构建、智能决策、应急响应等全流程救援的应用与管理水平[79]．

同时，应在充分应用新一代信息技术的基础上，构建完整的矿井现场救援环境数字孪生系统（图 21）．

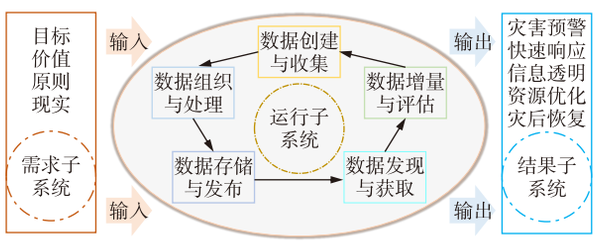


图 19　支持灾害救援的大数据技术模型

Fig. 19　Big data technology model supporting disaster rescue

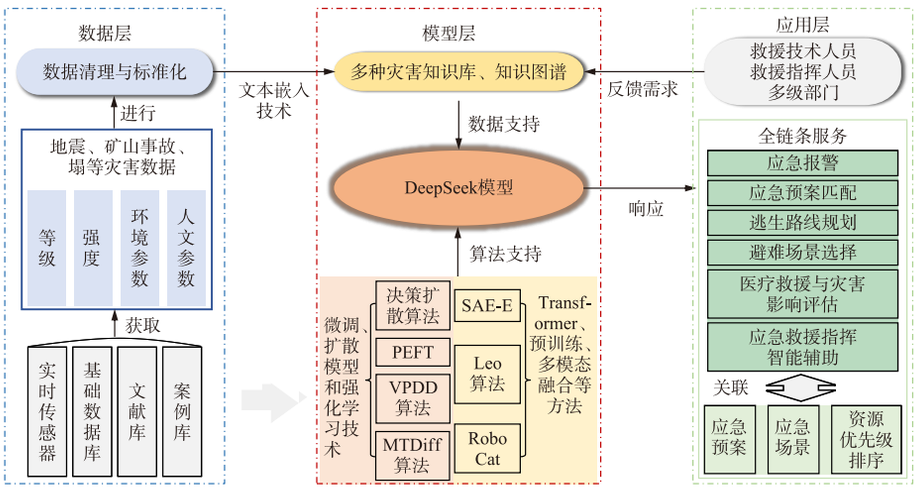


图 20　基于 DeepSeek 模型的灾害预防和应急响应智能辅助系统框架

Fig. 20　Framework of an intelligent decision support system for disaster prevention and emergency response based on the DeepSeek model

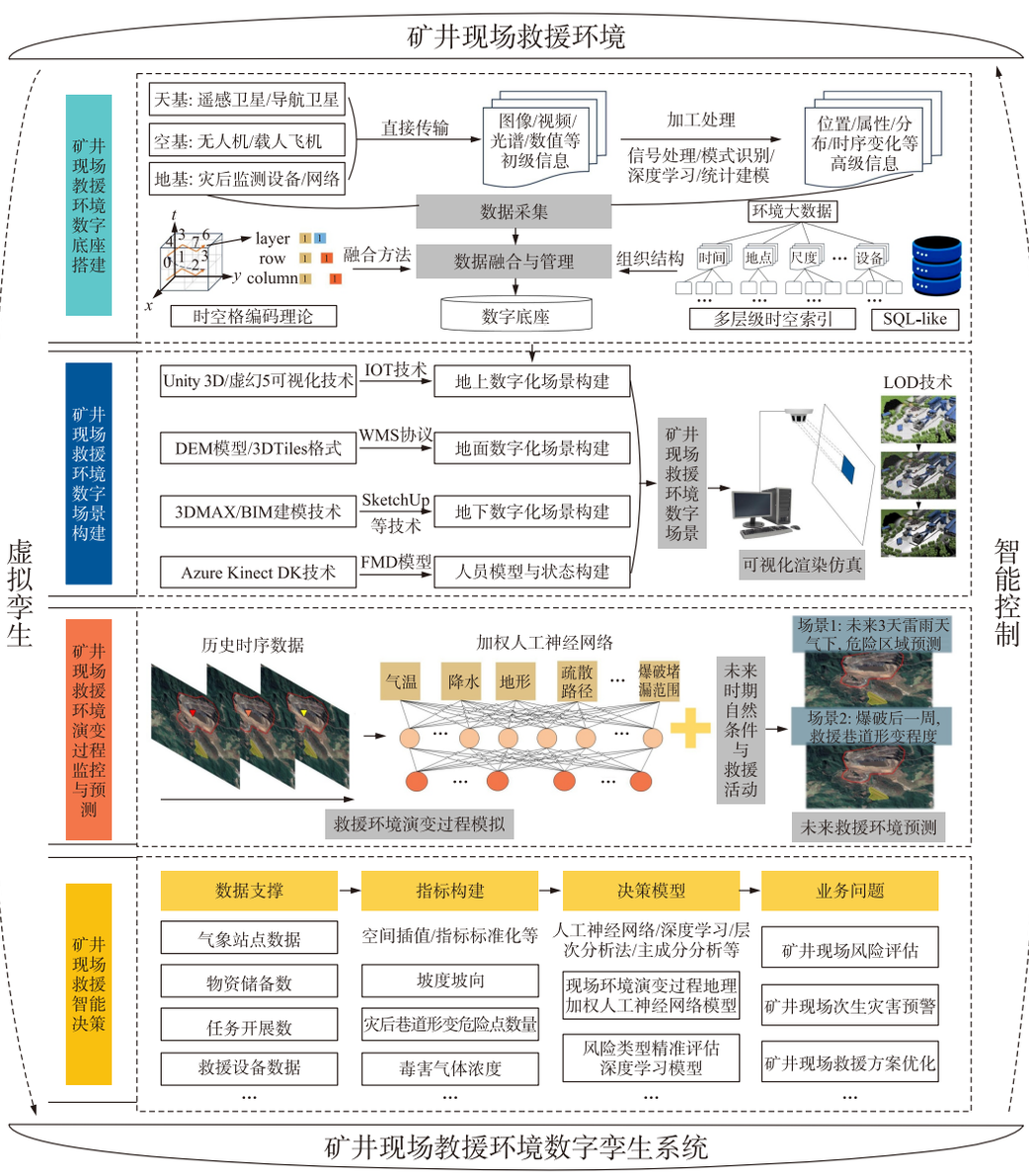


图 21　矿井现场救援环境数字孪生系统技术架构

Fig. 21　Technical architecture of the digital twin system for mine site rescue environment

该系统支撑灾害应急救援全过程治理的监测、模拟、仿真、联调、预测与控制，进而完成对不同物理灾害救援环境的实时三维重建、虚拟孪生与智能决策，其总体技术架构可参考图21所示内容[80-81]. 此外，还应深入划分各类救援技术与装备的通用性、专用性，使其在不同灾害救援中的运用更具有强针对性，进而提升救援技术与装备的利用效果及救援效率.

综上，推动各类生命信息探测技术的综合集成与高效应用，强化其在多种移动平台上的模块化搭载与协同能力，提升其智能化信息处理、实时预警及辅助决策水平，将成为未来研究工作的重点方向与趋势.

参考文献：

[1] 李 娟，李 睿，苟 扬. 专利文献计量视阈下的灾害救援技术发展态势[J]. 中国发明与专利，2022，19(10)：5-11.
LI Juan, LI Rui, GOU Yang. Development trend of disaster rescue technology from the perspective of patent bibliometrics[J]. China Invention & Patent, 2022, 19(10): 5-11.

[2] 李世银，杨瑞鑫，杨 磊，等. 煤矿井下智能超表面非视距无线覆盖技术综述[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(3)：613-622.
LI Shiyin, YANG Ruixin, YANG Lei, et al. Survey of the non-line of-sight wireless coverage technology by reconfigurable intelligent surfaces in underground coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 613-622.

[3] 郑学召，李诚康，文 虎，等. 矿井灾害救援生命信息探测技术及装备综述[J]. 煤矿安全，2017，48(12)：116-119.
ZHENG Xuezhao, LI Chengkang, WEN Hu, et al. Summary of mine disaster rescue life information detection technology and equipment[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(12): 116-119.

[4] 文 虎，唐 瑞，刘名阳，等. 矿山生命信息探测仪在事故救援中的应用[J]. 煤矿安全，2022，53(4)：162-166.
WEN Hu, TANG Rui, LIU Mingyang, et ai. Application of mine life information detector in accident rescue[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(4): 162-166.

[5] CHEN K M, HUANG Y, ZHANG J P, et al. Microwave life -detection systems for searching human subjects under earthquake rubble or behind barrier[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2000, 47(1): 105-114.

[6] 王书伟，张 晗，张 鸣. 人体生命信息探测系统中的传感器技术[J]. 红外，2008，29(12)：24-26.
WANG Shuwei, ZHANG Han, ZHANG Ming. Sensor techniques in human life information detection systems[J]. Infrared, 2008, 29(12): 24-26.

[7] 文 虎，刘一丹，郑学召，等. 极端条件下应急通信系统关键技术[J]. 西安科技大学学报，2025，45(2)：224-235.
WEN Hu, LIU Yidan, ZHENG Xuezhao, et al. Key technologies for emergency communication systems under extreme conditions[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(2): 224-235.

[8] 刘洪涛，韩子俊，韩 洲，等. 三维应力场中不同空间角下钻孔稳定性研究[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(5)：925-942.
LIU Hongtao, HAN Zijun, HAN Zhou, et al. Study on borehole stability under different spatial angles in three-dimensional stress fields[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 925-942.

[9] 文 虎，张 铎，郑学召. 矿山钻孔救援生命探测技术研究进展及趋势[J]. 煤矿安全，2017，48(9)：85-87.
WEN Hu, ZHANG Duo, ZHENG Xuezhao. Research progress and trend of life detection technology of drilling and rescue in mine[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(9): 85-87.

[10] 郑学召，杨卓瑞，郭 军，等. 灾后救援生命探测仪的现状和发展趋势[J]. 工矿自动化，2023，49(6)：104-111.
ZHENG Xuezhao, YANG Zhuorui, GUO Jun, et al. The current status and development trend of post-disaster rescue life detectors[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 104-111.

[11] XU X M, TU W P, YANG Y H. Efficient audio - visual information fusion using encoding pace synchronization for audio-visual speech separation[J]. Information Fusion, 2025, 115: 102749.

[12] 郑学召. 矿井救援无线多媒体通信关键技术研究[D]. 西安：西安科技大学，2013.
ZHENG Xuezhao. Research on key technology of wireless multimedia communication for mine rescue[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.

[13] 罗金玉，刘建平，张一闻. 麦克风阵列信号处理的研究现状与应用[J]. 现代电子技术，2010，33(23)：80-84.

LUO Jinyu, LIU Jianping, ZHANG Yiwen. Study status and application of microphone array signal processing[J]. Modern Electronics Technique, 2010,33(23):80-84.

[14] HINTON G, LI D, YU D, et al. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: the shared views of four research groups[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012,29(6):82-97.

[15] 任青阳,王彦丁,施　俭.卷积神经网络目标检测算法研究进展[J].科学技术与工程,2024,24(32):13665-13677.
REN Qingyang, WANG Yanding, SHI Jian. Advances in target detection algorithms for convolutional neural networks[J]. Science Technology and Engineering,2024, 24(32):13665-13677.

[16] 喻柏炜.基于卷积神经网络YOLOv5模型的图表识别方法[D].南昌:南昌大学,2021.
YU Baiwei. Chart recognition method based on convolutional neural network YOLOv5 model[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021

[17] CHAUDHURI N, INDRANIL B. Application of image data analytics for immediate disaster response [C]// Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing and Networking, 2020.

[18] 郑学召,孙梓峪,郭　军,等.矿山钻孔救援多源信息探测技术研究与应用[J].煤田地质与勘探,2022,50(11):94-102.
ZHENG Xuezhao, SUN Ziyu, GUO Jun, et al. Research and application of multi-source information detection technology for drilling rescue of mine[J]. Coal Geology & Exploration,2022,50(11):94-102.

[19] KIM J H, WON C S. Audio-visual action recognition using transformer fusion network[J]. Applied Sciences, 2024; 14(3):1190.

[20] AIDAROVA S, NURMAAKHAN T, MYRZAKHAN R S, et al. Advancing activity recognition with multimodal fusion and transformer techniques[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(11): 19632-19649.

[21] 石国安,商文忠,张　晗.生命探测中的红外技术[J].红外, 2008(11):12-16.
SHI Guoan, SHANG Wenzheng, ZHANG Han. Infrared techniques in survival detection[J]. Infrared, 2008(11):12-16.

[22] 姚振静,高　韬,张　军,等.震后生命探测技术研究综述[J].传感器与微系统,2011,30(12):8-10.
YAO Zhenjing, GAO, Tao, ZHANG Jun, et al. Research overview of post-earthquake life detection technique[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011,30(12):8-10.

[23] 苏君红,郑为建.红外线的二百年:从科学探索到技术创新[J].红外技术,2001(1):1-2.
SU Junhong, ZHENG Weijian. Two hundred years of infrared rays: From scientific exploration to technological innovation[J]. Infrared Technology, 2001(1): 1-2.

[24] 尹世敏,张海兵,南　赛,等.基于近红外光谱技术的人体低频振荡信号研究[J].燕山大学学报,2018,42(5):416-421.
YIN Shimin, ZHANG Haibing, NAN Sai, et al. Study on low frequency oscillation signal of human body based on near infrared spectroscopy[J]. Journal of Yanshan University, 2018,42(5):416-421.

[25] 孙黎明.基于红外成像的生命探测仪设计与研究[D].秦皇岛:燕山大学,2012.
SUN Liming. Design and research of life detection based on infrared imaging[D]. Qinhuangdao: Yanshan University,2012.

[26] JAROSLAW S, RADOSLAW Z, JACEK W, et al. Application of the infrared thermography and unmanned ground vehicle for rescue action support in underground mine: The amicos project[J]. Remote Sensing, 2020,13(1): 69.

[27] 胡　洋,王　霄,乔　俊,等.基于FPGA的红外成像系统[J].信息技术, 2025,(6):23-29.
HU Yang, WANG Xiao, QIAO Jun, et al. The infrared imaging system based on FPGA[J]. Information Technology, 2025,(6):23-29.

[28] MCCREIGHT C R. Proceedings of the second infrared detector technology workshop [C]//National Aeronautics and Space Administration, Moffett Field, CA (USA). Ames Research Center, 1986.

[29] DU K K, LI Q, ZHANG W C, et al. Wavelength and thermal distribution selectable microbolometers based on metamaterial absorbers[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-8.

[30] MA J K, GUO H R, RONG S H, et al. Infrared dim and small target detection based on background prediction [J]. Remote Sensing, 2023, 15 (15): 3749.

[31] WANG G H, LIU Q. Far-infrared based pedestrian detection for driver-assistance systems based on candidate filters, gradient-based feature and multi-frame approval matching[J]. Sensors, 2015, 15: 32188-32212.

[32] JIANG Zhiying, ZHANG Zengxi, LIU Jinyuan, et al. Multi-spectral image stitching via spatial graph

reasoning[C]//Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia. 2023: 472-480.

[33] 王 煜,刘海峥,史泽林,等.红外偏振成像探测技术研究进展[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2025,53(4):67-81.
WANG Yu, LIU Haizheng, SHI Zelin, et al. Research progress on infrared polarization imaging detection and applications[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2025, 53(4):67-81.

[34] HEO D, LEE E, CHUL K B. Pedestrian detection at night using deep neural networks and saliency maps[J]. Electron. Imaging 2018: 060403-1.

[35] CHEN Y, SHIN H. Pedestrian detection at night in infrared images using an attention-guided encoder-decoder convolutional neural network[J]. Applied Sciences. 2020, 10(3): 809.

[36] 粟宇路,李泽民,王 鑫,等.高动态范围红外成像技术研究进展及发展趋势[J].激光与红外,2025,55(1):10-17.
SU Yulu, LI Zemin, WANG Xin, et al. Research progress and development trends of high dynamic range infrared imaging technology[J]. Laser & Infrared, 2025, 55(1):10-17.

[37] 史冬冬,邹 骏,刘利民,等.超大视场红外成像技术的研究现状与展望[J].激光与光电子学进展,2025,62(10):60-70.
SHI Dongdong, ZOU Jun, LIU Limin, et al. Research progress and prospect of super-large field-of-view rared imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025,62(10):60-70.

[38] LI C L, XIA W, YAN Y, et al. Segmenting objects in day and night: Edge-conditioned CNN for thermal image semantic segmentation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 32(7): 3069-3082.

[39] WANG H, CHEN Y Y, CAI Y F, et al. SFNet-N: An improved SFNet algorithm for semantic segmentation of low-light autonomous driving road scenes[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(11):21405-21417.

[40] 于俊庭,李少毅,谢邦荣.红外成像跟踪系统智能化技术研究综述[J].红外与激光工程,2025,54(5):20240567.
YU Junting, LI Shaoyi, XIE Bangrong. Review of intelligent technology in infrared imaging tracking systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(5): 20240567.

[41] 金 蒙.基于生成式对抗网络的红外图像盲元补偿和超分辨率重建算法研究[D].南京:南京信息工程大学,2020.
JIN Meng. Research on infrared image blind-pixel compensation and super-resolution reconstruction algorithm based on generative adversarial networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020.

[42] 聂 伟,阚瑞峰,杨晨光,等.可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J].中国激光,2018,45(9):9-29.
NIE Wei, KAN Ruifeng, YANG Chenguang, et al. Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018,45(9):9-29.

[43] 沈 英,邵昆明,吴 靖,等.气体光学检测技术及其应用研究进展[J].光电工程,2020,47(4):3-18.
SHEN Ying, SHAO Kunming, WU Jing, et al. Optical gas detection: Key technologies and applications review[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(4):3-18.

[44] ZHANG Z C, ZHENG Z C, HE X X, et al. Electronic nose based on metal oxide semiconductor sensors for medical diagnosis[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2024,34(1):74-88.

[45] TANG W Y, CHEN Z S, SONG Z L, et al. Microheater integrated nanotube array gas sensor for parts-per-trillion level gas detection and single sensor-based gas discrimination[J]. ACS Nano, 2022, 16(7):10968-10978.

[46] TRAN A T T, HASSN K, TUNG T T, et al. Graphene and metalorganic framework hybrids for high-performance sensors for lung cancer biomarker detection supported by machine learning augmentation[J]. Nanoscale,2024,16(18): 9084-9095.

[47] GAIDAMAVICHUTE V, KNYAZEVA M, KHOZINA E, et al. A LA-BTC MOF as a sensor element of an electronic nose for selective adsorption of biomarkers of diseases: Molecular dynamics simulations of adsorption[J]. Materials Today Communications, 2024,38:107787.

[48] LI S L, YU L M, ZHANG C T, et al. Controllable synthesis of hetero structured CuO-ZnO microspheres for NO_2 gas sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical,2024,417:13679.

[49] KODAN S, KUMAR A, SANGER A, et al. Vertically aligned MoSe2-WS2 nanoworms heterojunction towards room temperature NO_2 gas sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical,2024,407:135481.

[50] DENNLER N, DRIX D, WARNER T P A, et al.

High-speed odor sensing using miniaturized electronic nose[J]. Science Advances, 2024, 10(45): eadp1764.

[51] 陶　洋,黎春燕,梁志芳,等.基于对抗学习的电子鼻传感器漂移补偿算法[J].传感器与微系统,2022,41(6):109-113.
TAO Yang, LI Chunyan, LIANG Zhifang, et al. Electronic nose sensor drift compensation algorithm based on adversarial learning[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022,41(6):109-113.

[52] WANG J W, ZHANG W, LIANG L R, et al. Tunable fiber laser based photoacoustic spectrometer for multi-gas analysis [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 160(1): 1268-1272.

[53] YE H X, SHI C, LI J, et al. New alternating current noise analytics enables high discrimination in gas sensing [J]. Analytical Chemistry, 2020, 92(1): 824-829.

[54] WANG Q F, QI H Q, LIU F. Time series prediction of e-nose sensor drift based on deep recurrent neural network[C]//2019 Chinese Control Conference (CCC), 2019:3479-3484.

[55] 王　乐,李　龙,段秋阳,等.高精度电子鼻采样电路设计与检测系统开发[J].仪表技术与传感器,2023(9):58-63.
WANG Le, LI Long, DUAN Qiuyang, et al. Design of high-precision electronic nose sampling circuit and detection system development [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(9):58-63.

[56] 姚建铨,李润宸,赵　帆,等.基于DOAS的消防应急救援多气体快速遥感仪[J].光电子激光,2018,29(3):314-317.
YAO Jianquan, LI Runchen, ZHAO Fan, et al. Fast multi-gas remote monitor based on DOAS for fire emergency rescue[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2018, 29(3): 314-317.

[57] 邵晓鹏,张　乐,刘丽娴,等.基于光声光谱技术的多组分气体探测研究进展[J].数据采集与处理,2021, 36(5):850-871.
SHAO Xiaopeng, ZHANG Le, LIU Lixian, et al. Review of multicomponent gas sensors based on photoacoustic spectroscopy technology [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2021, 36(5): 850-871.

[58] 曾　睿,李明强,赵　斌,等.电子鼻在疾病呼气诊断中的最新研究进展[J].传感器与微系统,2025,44(4):1-7.
ZENG Rui, LI Mingqiang, ZHAO Bin, et al. Latest research progress of electronic nose in disease breath diagnosis [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2025,44(4):1-7.

[59] 郑学召,丁　文,蔡国斌,等.面向钻孔救援的UWB雷达回波信息处理关键问题研究进展[J].煤矿安全,2023, 54(10):219-225.
ZHENG Xuezhao, DING Wen, CAI Guobin, et al. Research progress on key issues of UWB radar echo in-formation processing for borehole rescue [J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(10): 219-225.

[60] 肖明国,张　彪,康玉国,等.面向钻孔救援的UWB雷达探测技术研究进展[J].煤炭技术,2024,43(6):174-177.
XIAO Mingguo, ZHANG Biao, KANG Yuguo, et al. Research progress of UWB radar detection technology for drilling rescue [J]. Coal Technology, 2024,43(6):174-177.

[61] 陶海峰.丛林环境下无载波超宽带雷达目标散射特性和识别技术研究[D].南京:南京理工大学,2023.
TAO Haifeng. Research on target scattering characteristics and recognition techniques of carrier-free ultra-wideband radar in jungle environments [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.

[62] 罗　朋,胡振峰,田世伟,等.UWB雷达芯片的研究现状与发展[J].电子与信息学报, 2022, 44(4): 1176-1192.
LUO Peng, HU Zhenfeng, TIAN Shiwei, et al. The status and trends of UWB radar integrated circuit [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(4): 1176-1192.

[63] 郑学召,丁　文,黄　渊,等.不同领域下超宽带雷达探测呼吸心跳信号研究综述[J].雷达学报(中英文),2025, 14(1): 204-228.
ZHENG Xuezhao, DING Wen, HUANG Yuan, et al. A review of UWB radar detection of respiration and heartbeat signals in different scenarios[J]. Journal of Radars, 2025, 14(1):204-228.

[64] 严珊珊.用于雷达式生命探测仪的信号处理系统的设计[D].长春:长春理工大学,2012.
YAN Shanshan. Design of signal processing system for radar-based life detector[D]. Changchun: Chanfchun University Science and Technology, 2012.

[65] LIANG Zhihuan, JIN Yanghao, YANG Degui, et al. Two-step accuracy improvement for multitarget detection in complex environment using UWB radar [J]. Remote Sensing, 2024, 16(5):877.

[66] 薛旭升,覃一晗,杨星云,等.基于注意力机制与生成对抗网络的煤矿巷道数字建模优化方法[J].中国矿业大学学报,2025,54(2):304-315.

XUE Xusheng, QIN Yihsn, YANG Xingyun, et al. Digital modeling optimization method of coal mine roadway based on attention mechanism and generative adversarial network [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025,54(2):304-315.

[67] 郑学召,马 扬,黄 渊,等.面向矿山救援的UWB雷达生命信息识别研究现状与展望[J].工矿自动化,2024, 50(7):12-20.
ZHENG Xuezhao, MA Yang, HUANG Yuan, et al. Research status and prospects of UWB radar life information recognition for mine rescue [J]. Journal of Mine Automation, 2024,50(7):12-20.

[68] 郑学召,孙朝阳,黄 渊,等.面向矿山救援的UWB雷达回波信号处理技术研究现状与展望[J].煤矿安全,2025, 56(7):205-213.
ZHENG Xuezhao, SUN Chaoyang, HUANG Yuan, et al. Research status and prospect of UWB radar echo signal processing technology for mine rescue [J]. Safety in Coal Mines, 2025, 56(7): 205-213.

[69] 刘际松,郎利影,庞亚军,等.基于改进小波阈值的生命雷达去噪方法[J].光电技术应用,2023,38(2):55-61.
LIU Jisong, LANG Liying, PANG Yajun, et al. Life radar denoising method based on improved wavelet threshold[J]. Electro-Optic Technology Application,2023, 38(2): 55-61.

[70] 余慧敏,朱姣姿.基于新模态-小波包分解的超宽带雷达生命体征信号去噪算法[J].电子测量与仪器学报,2024, 38(3):143-151.
YU Huimin, ZHU Jiaozi. Ultra-wideband radar vital signs signal denoising algorithm based on new mode-wavelet packet analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(3): 143-151.

[71] YAN M H, LUO Z T, HE Z S, et al. The five-domain-six-map method for signal analysis in over-the-horizon radar[C]//2021 IEEE Radar Conference (RadarConf21), Atlanta, USA,2021:1-6.

[72] LU Lian, REN Weixin, WANG Shidong. Fractional fourier transform: time-frequency representation and structural instantaneous frequency identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022,178: 109305.

[73] TOMA R N, KIM C H, KIM J M. Bearing fault classification using ensemble empirical mode decomposition and convolutional neural network[J]. Electronics,2021,10(11):1248.

[74] KOCUR D, NOVÁK D, DEMČÁK J. A joint localization and breathing rate estimation of static persons using UWB radar [C]//2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE,2017: 1728-1733.

[75] REN L, TRAN N, FOROUGHIAN F, et al. Short-time state-space method for micro-doppler identification of walking subject using UWB impulse doppler radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2018,66(7):3521-3534.

[76] TANG M C,KUO C Y,WUN D C,et al. A self and mutually injection-locked radar system for monitoring vital signs in real time with random body movement cancellation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2016,64(12):4812-4822.

[77] 梁 啸,叶盛波,宋晨阳,等.基于分布式穿墙雷达的多目标自动检测方法[J].雷达学报(中英文),2025,14(1):28-43.
LIANG Xiao, YE Shengbo, SONG Chenyang, et al. Automatic multitarget detection method based on distributed through-wall radar[J]. Journal of Radars, 2025, 14(1):28-43.

[78] ZHENG X Z, HUANG Y, SUN Z Y, et al. Post-collapse mine rescue using ultra-wide band radar: electromagnetic-wave attenuation mechanisms and key inffuencing factors in coal, rock, and stratiffed composite media [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 198: 107114.

[79] XIE C C, GAO H R, HUANG Y D, et al. Leveraging the DeepSeek large model: A framework for AI-assisted disaster prevention, mitigation, and emergency response systems [J]. Earthquake Research Advances, 2025: 100378.

[80] 黄炳香,韩晓克,赵兴龙,等.采动岩层多相多场耦合运动数字孪生方法构想[J].中国矿业大学学报,2024,53(6): 1037-1052.
HUANG Bingxiang, HAN Xiaoke, ZHAO Xinglong, et al. Research framework of digital twin construction method for mining induced strata movement under multiphase and multifield coupling[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2024, 53(6):1037-1052.

[81] WEN H, LIU S K, ZHENG X Z, et al. The digital twins for mine site rescue environment: Application framework and key technologies[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 186: 176-188.

(责任编辑 仝 腾)