

《原子核物理评论》

www.npr.ac.cn Nuclear Physics Review



Started in 1984

核安全中的辐射成像方法与智能化技术

魏龙 孔令钦 帅磊 梁秀佐 胡选侯 张译文 王晓明

Radiation Imaging Methods and Intelligent Technology in Nuclear Safety

WEI Long, KONG Lingqin, SHUAI Lei, LIANG Xiuzuo, HU Xuanhou, ZHANG Yiwen, WANG Xiaoming

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC82

引用格式:

魏龙, 孔令钦, 帅磊, 梁秀佐, 胡选侯, 张译文, 王晓明. 核安全中的辐射成像方法与智能化技术[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(1):94-108. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC82

WEI Long, KONG Lingqin, SHUAI Lei, LIANG Xiuzuo, HU Xuanhou, ZHANG Yiwen, WANG Xiaoming. Radiation Imaging Methods and Intelligent Technology in Nuclear Safety[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):94-108. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC82

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

核电厂数字化化学与容积控制系统上充功能的可靠性分析

Reliability Analysis of Charging Function of Digital Chemistry and Volume Control System in Nuclear Power Plant 原子核物理评论. 2020, 37(4): 924-934 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020072

HIRFL人身安全联锁系统的设计与实现

Design and Implement of HIRFL Radiation Safety Interlock System 原子核物理评论. 2021, 38(3): 293-300 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020060

基于FCNN-NSGA-Ⅲ的反应堆辐射屏蔽设计智能优化研究

Research on Intelligent Optimization of Reactor Radiation Shielding Design Based on FCNN-NSGA-III 原子核物理评论. 2023, 40(4): 572-578 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022118

直线加速器超导段故障补偿的人工智能算法研究

Research on Segmented Failure Compensation of Superconducting Section in Linear Accelerator by Artificial Intelligence Algorithm 原子核物理评论. 2022, 39(1): 37-44 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2021045

电离辐射诱导组蛋白乙酰化引起的染色质结构解聚研究

Histone Acetylation Induced by Ionizing Radiation Causes Chromatin Decondensation 原子核物理评论. 2022, 39(4): 497-504 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022006

铅铋堆瞬态安全分析程序MPC_LBE换热器模块开发

Development of a Heat Exchanger Module for a Transient Safety Analysis MPC_LBE Program for Lead-bismuth Reactors 原子核物理评论. 2023, 40(4): 660-667 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022125

Vol. 41, No. 1 Mar., 2024

文章编号: 1007-4627(2024)01-0094-15

编辑推荐

核安全中的辐射成像方法与智能化技术

魏龙^{1,2,3,4}, 孔令钦^{1,2,4}, 帅磊^{1,3,4,†}, 梁秀佐^{1,3,4}, 胡选侯^{1,3,4}, 张译文^{1,3,4}, 王晓明^{1,3,4}

(1.中国科学院高能物理研究所,北京市射线成像技术与装备工程技术研究中心,北京 100049;
2.中国科学院大学核科学与技术学院,北京 100049;
3.济南中科核技术研究院,济南 250131;
4.国家原子能机构核技术(核探测与核成像)研发中心,北京 100049)

摘要:辐射成像是核辐射测量的一项重要内容。在辐射安全领域中典型的辐射成像方法主要包括针孔成像、 (空间)编码孔径成像、时间编码成像和康普顿散射成像等,各有其优缺点与适用场景。基于现有成像技术方 法上的积累以及先进成像设备研制经验,针对在"更快速、更准确、更大范围内"进行辐射探测(成像)的实际 需要,本研究探讨了对辐射热点进行三维定位的三种可行性方案、人工智能在辐射热点动态成像、核素识别 方面的应用以及辐射成像智能化平台。在辐射热点三维定位的研究方面,通过四目立体成像系统实现了远距 离成像场景中放射源100m距离下小于20%的测距精度,在室内场景中通过三维场景建模和辐射场构建实现 了4枚放射源的三维定位。在人工智能算法的应用方面,实现了移动辐射热点的实时定位,可对25m远处 以36 km/h速度移动的14 mCi¹³⁷Cs放射源进行动态定位追踪。在神经网络核素识别算法研究方面,提出了 一种基于先验能量信息的特征增强卷积神经网络,可在低计数和多核素混合的环境下,实现核素的快速识别。 在辐射成像智能化平台研制方面,研制了可实现辐射热点检测的加速器隧道环境巡检机器人,并开发了一套 车载式辐射应急监测平台,搭载有无人机载、车载、便携式γ相机等多个探测终端,可在辐射应急情况下实 现城市区域的快速机动测量。本文所给出的诸多辐射成像智能化技术使得人们可以更快、更精确地获取放射 源的空间三维分布与核素信息,为辐射环境评估、辐射防护、核应急演练和决策提供了先进高效的辐射探测 技术手段。

关键词: 核安全; 辐射成像; 智能化 中图分类号: TL812⁺.1 文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC82

0 辐射监测的背景和意义

放射性物质探测,特别是核材料走私拦截和威胁探测,对国家安全至关重要^[1]。根据国际原子能机构(International Atomic Energy Association, IAEA)的事件和贩运数据库(Incident and Trafficking Database, ITDB)报告,仅在2022年内,就发生了146起涉及核材料和其他放射性材料的非法或未经授权的活动事件。此外,IT-DB表明,自1993年以来,在运输核材料或放射性材料期间发生的盗窃几乎占所有报告案件的52%,而这一比例在过去十年中则涨到了62%,凸显了加强安全运输措施的重要性^[2]。我国是放射性同位素应用大国,据国家核安全局2022年年报,截至2022年底,国内目前在

用放射源达164 028 枚,其中 I 类放射源为15 746 枚^[3], 放射源的管理、运输、储存和使用是一项庞大且复杂的 工作,而辐射监测的技术伴随着放射源从生产到最后回 收处理的整个生命周期。

辐射测量可以分为放射性污染控制 (Radioactive Pollution Control) 和紧急辐射监测 (Emergency Radiation Monitoring, ERM) 两类^[4],如图1所示,对于核电厂等核设施的日常持续的监测属于放射性污染控制,而对于核事故造成的辐射污染评估等则属于 ERM 的范围。辐射测量按任务还可以细分为活度测量、辐射场量的测量、辐射能量 (或能谱测量)、辐射剂量的测量、时间的测量以及辐射的空间分布测量与辐射成像等,辐射成像经过近几十年的迅猛发展,目前已成为独立学科^[5]。核辐

收稿日期: 2024-02-10; 修改日期: 2024-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12375307,12005234,12105116)

作者简介:魏龙(1965-),男,山东济南人,研究员,博士,从事核分析技术、核成像技术及其应用研究; E-mail: weil@ihep.ac.cn

[†]通信作者:帅磊, E-mail: shuail@ihep.ac.cn



射测量仪器按技术特点可以分为报警仪、剂量仪、能谱 仪、成像仪等。

其中报警仪,如门式辐射监测系统、个人辐射剂量 仪等,通常只能简单判断辐射剂量是否超标。剂量仪则 能够以数值方式实时显示辐射剂量,但不能区分辐射来 源与核素种类;能谱仪则能够显示辐射能谱,判断核素 种类与剂量。图 2(a)展示了Kim等^[6]应用CsI(TI)晶体 配合SiPM(silicon-photomultiplier)开发的辐射探测背包 所得到的多种放射源混合能谱,但其不能判断核辐射的 来源。以上几种核辐射探测仪器,都需要通过近距离接 触的方式进行探测,属于典型的"接近探测器 (proximity detectors)"。辐射成像技术是随着探测器与成像算法的 发展而产生的新技术,该技术采用"拍照"的方式,在短时间内远距离给出视野范围内放射性物质分布情况的二维 图像。图2(b)展示了应用康普顿成像技术配合光学图像对 放射源进行二维成像的结果^[7]。图中直观指示了热点的 位置,通过进一步的解析放射性物质能谱与图像重建算 法优化,可以确定放射源的种类,实现核素识别的功能。

辐射成像技术不仅可用于核事故应急响应时的"未 知"放射源搜寻和排查,还可应用于核电站、核废料处 理厂等的现场远距离放射性物质检测和分布评估,大大 减少工作人员近距离接触放射性物质可能受到的各类辐 射。如核电站例行检修时,将不同厂房按辐射剂量水平 进行分类,对房间内的放射性热点进行定位以及有针对 性的屏蔽,并对屏蔽效果进行评价。在做核设施的去污 及退役的测量时,辐射成像技术能更加直观地对核设施 退役时拆除的部件及核废料容器进行放射性残留测量, 确定其辐射水平及放射性物质的分布情况,以最大限度 地减少辐射暴露。



1 辐射成像技术简介

在核安全领域中,对于所有需要γ射线(或中子)成 像的核不扩散应用场景,一般有两类成像系统:一类是 基于遮挡的成像系统 (occlusion-based imaging systems), 此类成像系统应用了射线沿直线传播的特点,通过准直 器的遮挡实现对射线束流进行空间或时间调制成像,如 针孔成像系统、编码孔径成像系统、时间编码成像系统 等;另一类则是基于散射的成像系统 (scatter-based imaging systems),也称为散射相机 (scatter cameras),依赖 于散射物理来定位辐射源。对于γ射线,散射相机依赖 于康普顿散射原理;对于快中子,则依赖于弹性散射^[8-9]。

1.1 针孔成像技术

针孔成像于20世纪中期运用于辐射成像领域,属

于早期的核辐射成像技术^[10-11],也称为"暗室(dark chamber)",其基本成像原理与"小孔成像"相同,如图3(a) 所示,目标放射源发出的射线通过针孔(准直器),在像 平面(位置灵敏探测器)上形成与物体点对点对应的倒立 像。为了获得γ放射源图像,需要在探测器上包裹一层 重金属材料屏蔽层,放射源产生的γ射线只能通过针孔 到达探测器,因此针孔γ相机的灵敏度(探测效率)较低。针孔的尺寸还直接影响了针孔γ相机的角分辨率和信噪 比(Signal-to-Noise Ratio, SNR),针孔直径越小,角度分 辨率越好,信噪比越差^[11],理想的单针孔相机需要一 个无限小的针孔来获得最高的角度分辨率^[12],因此,必须对这两个性能参数进行折中^[11]。由于针孔γ相机 一般具有厚实的屏蔽层,使得它可以适用于高剂量率环 境。如在福岛第一核电站反应堆安全壳内,其辐射剂量



图 3 (a) 针孔 γ 相机结构示意图^[14] (b) 针孔 γ 相机 680 Sv/h 环境下对 ⁶⁰Co 的成像结果^[13]

率高达 530 Sv/h,其他类型的γ相机可能会因信号堆积 而无法工作^[11,13]。图 3(b)展示了 Koki Sueoka 等研发的 针孔γ相机在 680 Sv/h 剂量率环境下对⁶⁰Co 的成像结果。

1.2 (空间)编码孔径成像技术

针孔成像是编码孔径成像的前身,多孔径编码成像方法于1968年被Dicke和Ables提出^[15-16],开发编码孔径成像的主要动机是在不降低系统分辨率的情况下增加射线的通量^[17]。编码孔径成像的技术原理如图4所示,在视野张角内的放射源以球面光的方式发

出γ射线或者中子,射线束流经过编码码板的空间调制,在探测器平面的晶体阵列上得到编码图案的投影 (即投影矩阵),理想状况下,编码投影为射线源分布 与编码函数(编码图案)的卷积。编码的本质其实是数 学变换在成像中的物理表现形式,投影矩阵与解码矩 阵经过直接反卷积(direct deconvolution)或迭代算法进 而得到重建图像^[18-19]。编码孔径成像技术因其成像 灵敏度高,图像信噪比高,近年来在核安全领域的诸 多涉核场所中已经成为一种应用最广泛的辐射成像 技术。



图 4 编码孔径成像技术的成像原理

在编码孔径成像中,编码图案通常被选择为最小化 相关性(minimize correlations)^[20],按照编码图案和系统 点扩展函数的不同,编码图样可分为均匀冗余阵列编 码(URA、MURA、PNP、M-P)和随机编码(RANDOM) 这两种编码方式^[18]。均匀冗余阵列编码需要特定排列 的方形编码矩阵,编码维度数值必须为素数,它的系统 点扩展函数为理想的δ函数,能够通过互关联解码实现 快速图像重建。随机编码的编码维度数值可以为任意值, 适应于对编码板的大小有特殊要求且不方便设计维度数 值为特定素数的应用情况,因其系统点扩展函数有固有 的本底噪声涨落,采用的图像重建算法多为极大似然期

望最大化 (Maximum Likelihood Estimation Maximization, MLEM) 的迭代重建算法。

1.3 时间编码孔径成像技术

时间编码孔径成像技术的概念最早于 1965年由 Minoru Oda提出并用于空间科学^[21-22],1974年应用于 核医学成像^[23]。但直到 2010年,有人通过构建圆柱形 时间编码成像(Cylindrical, Time-Encoded Imaging, c-TEI) 系统对快中子进行了初步成像^[9,24-25],时间编码成像 技术才引起辐射安全研究者们的重视。在发射成像 (emission imaging)领域,时间编码是指根据先验测量或 已知的时变模式,调制从某一方向入射的射线的通量, 在探测器上将得到随时间波动的计数率曲线,该计数率 曲线与已知的时变模式相关,这种关系满足了辐射成像 的基本要求:将测量与来自特定方向或空间位置的粒子 强度联系起来^[25]。典型的时间编码成像方式为旋转调 制(rotational modulation),如图5所示,成像系统由一 个探测器和一组栅条准直器构成,当两个准直器旋转时, 栅条构成的"通孔"大小会发生变化,引起探测器内计 数(率)的涨落(即时间调制),从而反推出放射源的分布 信息。搭配具有脉冲形状辨别(pulse shape discrimination, PSD)功能的闪烁体探测器,可以构建γ射线/中子 双粒子成像系统^[26]。

基于时间编码的成像系统具有诸多优点,首先

是成像系统只需要较低的通道计数,甚至是单通道 计数,可以简化系统集成和校准过程,减少系统的 不确定性,降低成本,提高系统稳定性。其次,重 建图像的角分辨率主要取决于准直器的设计,角分 辨率和能量分辨都可以独立优化,从而可以提高γ射 线的探测效率和晶体选择的灵活性。此外,相对于 空间编码孔径成像系统,时间编码成像系统的设计 更加灵活多样,目前已有多种时间编码的准直器设 计方案,如图6所示,包括具备360°视野的圆柱形旋 转准直器 (cylindrical, rotating collimator)^[20, 27–28]、半 球旋转调制准直器 (hemispherical Rotational Modulation Collimator, H-RMC)^[29–31]、旋转散射码板 (rotating scatter mask, RSM)^[32–33]等。





图 6 多种时间编码准直器设计方案 (a)~(b)圆柱形时间编码成像; (c)半球旋转调制准; (d)旋转散射码板。

1.4 康普顿成像技术

康普顿成像技术利用康普顿散射效应来定位放射源 位置,是辐射成像领域中较为复杂的成像技术,出现时 间也最晚,于1973年由Schönfelder等^[34]提出,用于 伽马射线天文学的观测;1974年,Todd等^[35]提出了 现代意义上康普顿相机,明确了散射-吸收的物理过程 及反投影重建算法。康普顿成像的基本原理如图7所示, 入射能量为 E_0 的 γ 光子在散射点中发生康普顿散射,沉 积能量为 E_1 ;散射光子在吸收点被吸收,沉积能量为 E_2 ,对于用于成像的"一次散射事例", E_1+E_2 即为入射 光子能量 E_0 ; m_ec^2 为电子的静止能量(其中 m_e 为电子的 静止质量,c为真空光速),以散射点与吸收点连线的延 长线为轴线,通过式(1)计算出散射角 θ_r :

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_{\rm e}c^2 E_1}{(E_1 + E_2)E_2},\tag{1}$$

由此得到"康普顿圆锥",圆锥与成像空间相交即可 得到一个圆环,通过多个事例的交叠,即可在成像空间 中构建出放射源的位置,图中Δθ,为圆环的展宽,即康 普顿散射角的不确定度,其主要的影响因素包括探测器 能量分辨率、探测器空间分辨率、多普勒展宽效应^[36-37]。 在成像系统中,一般需要预置多种核素的全能峰范围, 成像时根据所测得的能谱情况,选择最大概率能量范围 内的事例作为对应核素的成像事例,即在康普顿成像的 重建算法中,入射γ射线的能量需要是已知的。

典型康普顿成像系统的探测器为双层结构,如 图 8(a)所示,光子的散射、吸收过程分别发生在两层探 测器内。在此基础上,为了提高成像系统的探测效率、



图 7 康普顿成像原理^[36,38]

扩大成像视野,研究人员开发了多层探测器结构、三维 位置灵敏探测器结构的康普顿成像系统,如图8(b)所示, 为通过激光内雕和双端读出技术构建的三维位置灵敏探 测器,由此构建的康普顿相机具备4π全空间成像的功 能^[39]。此外,还有一种追踪反冲电子径迹 (electrontracking)的康普顿相机^[40],如图 8(c)所示,通过将"康 普顿圆锥"的限制为"康普顿圆弧",提高放射源定位精 度,但技术复杂性也大大增加。康普顿成像则具有视野 范围广的突出优点,但受限于系统的能量分辨与空间分 辨,导致重建图像的角分辨率较差。



图 8 典型康普顿相机类型 (a) 双层探测器结构^[7]; (b) 三维位置灵敏探测器结构^[39]; (c) 反冲电子迹型结构^[40]。

1.5 小结

± ·

表1对不同类型辐射成像系统的优缺点进行了总结^[9,11]。

不同米刑桓针武侮系统的伏劫占

	衣1 不同关至福州风像示机的优畎点					
类型	优点	缺点				
	角度分辨率高(1.9°~6.7°)	设备重				
针孔成像	成像能量范围宽(²⁴¹ Am到 ⁶⁰ Co)	灵敏度低				
	具有良好的线性剂量率	视场小(30°或者50°)				
	信噪比高					
	抗噪能力强					
编码孔 径成像	设备紧凑	视场较小(45°~50°)				
	灵敏度高	能量分辨率一般				
	角度分辨率高(2.5°~6°)					
	剂量率线性可达10 Sv/h					
时间编码成像	结构简单	灵敏度低				
	稳定性高					
	角分辨率和能量分辨可以独立优化					
康普顿成像	设备紧凑	灵敏度低				
	视场可达4π	角度分辨率差(10°~30°)				
	能量分辨率高					

上述成像技术手段在方法和原理上奠定了辐射成像 的基础。除了上述几种典型的核辐射成像方法,近年来, 清华大学提出了一种新型的自准直辐射成像技术,该技 术不需要重金属准直器,通过优化探测器单元的空间排 布,使得投影(光子事件密度分布)对入射伽马射线的方向 敏感,目前已实现4π视场内对伽马射线进行成像^[41-42], 具有极大的发展前景。然而,现有辐射成像应用场景的 复杂性对成像方法提出了更多的需求,比如测量放射源 的距离信息(三维定位)、辐射热点的动态跟踪成像、源 项的核素分析以及各种智能化平台的应用等,这些均需 要对现有技术方法做改进和提升。

2 智能化应用示例

基于现有成像技术方法上的积累以及丰富的先进成 像设备研制经验,作者及其研究团队在辐射成像方面做 了大量的智能化应用实践,本小节在内容上分为三部分 展开具体描述: 1)成像算法的拓展,如辐射热点三维 定位的实现方法; 2)神经网络等人工智能的应用,包 括移动放射源的动态成像、核素识别等; 3)辐射探测 系统与智能化平台的联合应用。

2.1 辐射热点的三维定位(距离的定量化)

对辐射热点的三维定位是近几年辐射成像领域一个 热门的话题^[43-45],由于辐射成像系统获得的图像通常 为表示放射性相对强度的二维图像,但二维辐射热点图 缺乏深度信息(即成像系统与热点之间的距离信息),无 法确定放射源的具体位置^[46]。而在核事故中,通过确 定辐射热点的三维位置,估算辐射热点的活度,对于进 一步减少个人辐射剂量、判断事故后续的影响、调整事 故处理方案有着重要价值。放射源的三维定位有多种方 法,如搭配深度相机法^[45]、两点联合定位法^[43]、多点 定位探测法^[47-48]法等。图9展示了Paradiso等^[45]通 过γ相机搭配深度相机对辐射热点进行测距的实验结果, 但此方法仅在放射源无遮挡情况下有效,尚未完全解决 辐射热点的三维定位问题,以下就三种通过对辐射热点 进行直接测量来获取深度信息的方法进行介绍。

第一种方法基于编码投影放大效应^[49]。如图 10 所

示,在编码孔径成像中,辐射场中的放射性点源产生的 射线,经过编码孔径准直器调制后,在探测器平面上得 到的码板图样投影大小和该点源与探测器平面的距离有 关,即不同的物距对应不同的放大系数。当选取的投影 区域较大或较小时,重建图像的信噪比将会远差于选取 合适大小投影区域时的重建图像,如图11所示,中间 图像即为选取合适投影区域时的重建图像,该图像的伪 影明显少于其他两幅。因此,可以通过对编码投影图像 进行高分辨率精细采样,然后选取不同大小的投影区域 进行图像重建;再对得到的重建图像序列进行图像质量 评价来识别其放大系数,从而确定射线源距离成像系统 的距离。图 12为 Sun 等^[49]分别用 Rank 11和 Rank 19 的 MURA 编码板, 配合 75×75 NaI(TI) 晶体阵列探测器, 对^{99m}Tc 点源 (2.61 mCi) 进行深度提取的测试结果。实 验结果表明,在0.9~8.0m范围内,通过投影放大效应 能正确提取点源的深度信息,并能保持良好的线性度。



图 9 深度相机搭配γ相机成像结果^[45] (a)深度图像; (b)辐射图与热点图融合。





图 11 选取不同区域图像重建结果^[19] (a) 较小区域; (b) 合适区域; (c) 较大区域。



图 12 基于投影放大效应进行放射源三维定位^[49] (a) 实验平台; (b) 估计源与相机距离实验结果。

辐射热点的三维定位的第二种实现方式则是构建多 目相机,利用立体几何非线性逼近的最小面积来估计射 线源到探测器的最大概率距离^[50-51]。基本原理如图13(a) 所示,假设存在4个γ相机模块分别对放射源经行解码 成像,4个成像模块的理论成像顶点分别为*O*₁、*O*₂、*O*₃ 和*O*₄,连接顶点与辐射热点可以得到4条探测线。理论 上,这4条线应在点源处相交;然而,在大多数情况下, 由于重建投影的离散性,它们不会完全相交。此时,利 用 Z = Z'的垂直平面与四条探测线相交可以得到以 Q₁、 Q₂、Q₃、Q₄为顶点的四边形,如图 13(b)所示,横坐标 为不同深度,纵坐标为围成的四边形面积,此四边形的 面积 A(Z')反映了点源到探测器距离估计值 Z'的接近程 度。显然,A(Z')min(即四边形 Q₁Q₂Q₃Q₄面积的最小值) 处可以认为是点源到探测器的最大概率距离。



图 14(左)为Liu等^[50]开发的四目立体成像系统实 验装置,图 14(右)为放射源三维定位能力的测试场景, 实验中,1mCi的¹³⁷Cs点源到探测器的实际距离为 10.0m。成像系统分别在无遮挡、白板遮挡、铅玻璃 遮挡三种情况下得到的估计距离为10.21,10.03和10.37 m。实验结果表明,即使在一定量辐射屏蔽下,利用多 目相机及"最小面积算法"的测距能力依然能保持较好的 测距精度。同时,该三维定位方法在多点源同时存在的 复杂情况下,在更远距离(~100m)下依旧具备较好的 测距能力(例如,对30m内的辐射热点测距精度小于 12%,100m测距精度小于20%)^[50]。上述用到的多目 立体成像系统是基于编码孔径成像实现的,同样,利用 多个康普顿相机从多个角度测量也可以估算出放射源的 距离信息^[46,52-53]。

另一种放射源三维定位方法则是通过应用远程控

制设备,携带剂量仪等辐射探测装置在辐射场中进行 非成像的多点巡测,通过构建所探测空间的辐射场实 现热点的三维定位。如图15所示,以无人车作为载体, 搭载激光雷达、辐射探测器在辐射场中运动,激光雷 达负责三维实物场景的点云采样和空间几何构建,获 取辐射场实物的三维模型,根据探测场景的扫描结果, 定制定点探测方案,规划出无人车的扫描路径,最后 利用无人车辐射场景进行巡测和辐射场重构确定出热 点位置。

场景扫描及热点位置重建结果如图16所示,测试 空间的范围为20.0 m×20.0 m×1.2 m,空间内存在4枚放 射源,巡测过程中的探测点数量为21个。表2展示了 全方向探测器放射源三维定位系统对四个点源辐射剂量 场重建结果,可以看出,在*XY*平面的重建位置偏差均 小于1.2 m。



图 14 (左)四目立体成像系统(右)放射源测距定位能力测试场景



图 15 放射源三维定位方法 (a) 放射源三维定位系统; (b) 探测器实物图; (c) 扫描式激光雷达。

图 16 四点源定位实验场景

表 2 四点源定位结果							
编号	放射源种类	放射源活度	实际位置/m	重构位置/m	偏差/m		
1	Cs-137	1 mCi	(9.3, 11.8, 0)	(9.6, 11.6, 0)	0.36		
2	Cs-137	1 mCi	(16.5, -1.2, 0)	(17.0, -0.2, 0)	1.12		
3	Tc-99m	1.5 mCi	(8.2, 0.6, 0)	(7.6, 0.7, 0)	0.61		
4	Tc-99m	1.5 mCi	(12.8, 9.6, 0.3)	(13.4, 9.8, 0)	0.70		

2.2 动态成像

辐射测量是高标准差的泊松过程,因此辐射测量常 出现高随机性。在对静态辐射热点成像的过程中,光子 的累积使得探测器对空间放射性分布的测量趋于稳定, 从而能定位静态辐射热点。辐射热点运动则会导致空间 中放射性分布发生变化,探测器获取的投影不再固定, 此时重建图像往往会出现定位偏移或运动模糊^[54],此 种情形也会出现在光子计数率较低时,若探测器采集信 号的有效强度远低于本底辐射或放射源运动速度较快, 探测器无法在一定时间内累积足够的光子从而获得较稳 定的放射性分布,准确定位移动辐射热点将会变得十分 困难。针对上述动态辐射热点问题,提高重建图像的信 噪比与低活度移动辐射源的定位精度。Zou等^[55]在成 像过程中引入了卷积长短时记忆网络(Convolution Long Short-Term Memory network, CLSTM),对互相关解码 法重建的移动放射源辐射图像进行自适应叠加与优化, 减少移动辐射热点的运动模糊,提高了定位精度,在针 对行人等以近似恒定速度移动的核安全探测场景中是可 行的。

移动辐射热点的实时定位追踪算法流程如图 17 所示,主要包括三个步骤:1)使用 CLSTM 结合卡尔曼滤 波方法 (Kalman Filter, KF)优化互相关解码法重建辐射 图像,卡尔曼滤波的作用是对重建图像所获得的放射源 定位进行滤波和平滑,解决放射源定位随机性跳动与定 位不准确的问题;2)引入 YOLOv3 算法^[56]与 DeepSort 算法^[57]定位追踪光学目标;3)使用热点-运动目标匹配 方法确定放射源携带者,在公共场所对行人进行实时放 射性检测的应用场景中,可认为放射源携带者与放射源

的运动是一致的,据此可对光学图像中携带者的定位与 辐射图像中热点定位进行相互匹配,从而确定放射源携 带者,实现对放射源的追踪。图18展示了应用跟踪 算法对注射了¹³¹I的病人进行实时跟踪的效果,成像过 程中,行人以正常速度运动,探测成像系统保持静止 不动。

该跟踪算法除了应用于辐射热点移动的情况,也适

用于成像系统运动而放射源相对静止的场景。刘彦韬等 在行车过程中对放射源实现了对放射源的跟踪测量^[50], 测试场景如图 19(a)所示, 13.45 mCi¹³⁷Cs点源放置于 O点,车辆携带着高灵敏度γ相机以36 km/h的速度从 *M*点运动到*N*点,OH = 25 m,热点从视场右边缘出现 [图 19(b)]到左边缘消失[图 19(d)]的过程中,始终与放 射源实际位置符合得很好。

图 18 移动放射源与行人匹配(某肿瘤医院,注射¹³¹I的病人移动定位)

图 19 行车测量场景与动态成像结果 (36 km/h @ 14 mCi 137Cs @ 25m) [50]

2.3 核素识别

典型核素识别过程为: 探测器获取γ能谱后,将特 征峰与标准核素库中的所有核素相匹配,然后利用峰面 积、相邻峰间距等信息对匹配到的峰位进行排除和验证, 从而确定核素种类。为了准确获取特征峰位信息,还需 要对γ能谱进行平滑、寻峰和扣除本底等预处理。识别 过程中运算量大、效率低,识别的准确率也不高。此外, 放射源的活度、探测距离等也会对能谱的测量造成影 响^[58],特别是在低计数和多核素混合的环境下,不利 于核素的快速识别。神经网络正适用于处理具有一定规 律但不易用直观的数学模型表达的数据,在非线性数据 中的信息提取有着广泛应用前景,自然地适用于能谱 处理。

Li等^[59]开发的基于先验能量信息的特征增强卷积 神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)核素识别 算法已经部署在多款高能所研制的核辐射设备中。该算 法注重于低计数能谱与多核素混合场景下的核素识别问

题,算法结构如图20(a)所示,它由特征增强器以及一 维卷积神经网络两部分组成。其中特征增强器包括了特 征提取和归一化两种操作,实现对放射性核素先验能谱 的信息提取与特征增强;一维卷积神经网络主要包含分 离器(Splitter)和分类器(Classifer),实现对场景中核素 的种类进行确认。分离器的设计主要是对经过特征增强 器的预处理数据进行进一步的特征过滤及信息提取,因 为特征增强器中的归一化操作可能会放大一些通道中来 自本底的计数信息。同时,通过分离器内的分离卷积和 金字塔结构,可有效减少网络的参数数量,加快训练过 程,并实现对能谱进行不同范围的信息提取。最后,分 类器包含一个全连接结构,根据分离器的输出进行归纳, 并给出最终的核素分类情况[59-60]。在经过模拟和实验 生成训练、测试能谱、神经网络参数训练等步骤后,实 现了对多种不同活度放射源的核素识别,混合识别的准 确率达90%以上,图20(b)展示了对多种不同活度的核 素的能谱与识别结果。快速核素识别功能的实现,对于 编码孔径成像、康普顿成像都是非常有利的;尤其是对

图 20 (a) 核素识别算法结构^[59] 及(b) 多核素能谱与识别结果

后者,通过该核素识别算法的应用,理论上能够加快康 普顿成像过程中对核素的判断与选择,提高图像质量 (信噪比)与成像速度。

除了在对动态目标成像与核素识别外,神经网络在 图像重建、部分编码视场 (Partially coded field-of-view, PCFOV) 放射源识别定位、连续晶体定位等方面均用应 用^[61-63]。在成像分析方面,利用机器学习和深度学习 算法,进行噪声抑制和图像增强、智能目标检测和分割、 智能图像重建和恢复、智能数据分析和解释等,实现自 动化的成像分析和定位是一个值得探索的方向。

2.4 智能化平台

智能化平台应具备智能化控制、可跨平台和跨设备 支持、多信使辐射成像、智能化分析等基本功能,具备 综合性探测能力。如在中国散裂中子源的建设过程中, 为了能将隧道内的辐射监测等信息实时传输至主控室, 搭建了专门的轨道,并研制了隧道环境巡检系统,如 图 21(a)所示,巡检系统内部集成了轨道机器人、编码 γ相机、NaI 探测器、红外成像模块、高清光学视相机 等,能对散裂中子源加速器隧道内的环境进行全方位的 监测。如图 21(b)展示了巡检机器人在隧道内的工作场 景,图 21(c)则为其中的伽玛相机对隧道内辐射热点的 成像结果。

近年来,使用无人设备进行大范围、区域性辐射探 测也受到越来越多的关注,特别是日本福岛核事故发生 后^[64-68]。沉降物绘制(mapping fallout)、定位(localization)、烟羽跟踪(plume tracking)是针对大范围探测平台 的三大主要任务^[4],同时需要满足能够快速机动与部 署、探测灵敏度高等特点,具备综合性探测能力的智能 化平台是解决此类问题的关键工具。在辐射探测成像与 定位方面,中国科学院高能物理研究所研制了辐射智能 化应急平台,如图 22 所示。其内部搭载了无人机载、 车载、便携式γ相机等探测终端,具备对几公里到百公 里范围内的监测区域实施高灵敏度、高机动的空地一体 化辐射监测能力。图 23 展示了无人机携带小型机载核 辐射成像终端的测试场景与成像结果,图 24 则为无人 机填图测量与热点定位结果。

图 21 (a)~(b) 散裂中子源隧道环境巡检机器人及 (c) 隧道内辐射热点成像

图 22 (a) 辐射应急智能平台及(b) 辐射监测界面

图 23 (a) 无人机载测试场景及(b) 成像结果

图 24 (a) 探测数据可视化填图及(b) 放射源定位结果

辐射成像智能化技术的发展,使得人们可以更快、 更精确地获取放射源的位置与核素信息,帮助人们从二 维到三维、从地面到空中全方位获取感兴趣空间内的辐 射(热点)分布情况,同时提高探测结果的准确性,降低 误报的可能,为辐射环境评估、辐射防护、核应急决策 提供更有效的信息。此外,辐射成像监控的分布式动态 网络的构建同样值得探讨和发展,结合便携式辐射成像 仪、定点通道安检成像仪、小型无人机搭载成像终端、 投放式小球探测器等多种探测手段,通过4G或者5G 通信联合组网,既能进行区域性监测,又能精确定位辐 射热点,实现应急情况下全方位的机动测量。

3 总结与展望

核辐射成像技术在辐射安全监测领域的应用日趋广

泛,随着技术的不断进步,涌现了大量的智能化成像技 术手段。文章分析总结了核辐射成像技术中如空间编码 成像、时间编码成像、康普顿成像等主流成像方法的技 术特点,诸多成像技术能够以可视化的方式对放射源进 行远距离成像定位,结合光学图像可直观地给出放射源 的具体分布位置。然而,现有成像方法只能指示放射源 的方位角信息即射线入射方向,缺乏源项的距离信息, 属于二维成像定位的技术范畴,如何实现放射源的三维 定位成为辐射成像领域的研究焦点。源项监测场景并非 都是静态目标,比如注射放射性药物后未代谢完成的病 人、携带放射性材料的运输车辆或者船只以及核应急演 练中可能出现的移动放射源目标等等,针对动态放射源 目标,需要开发专门的动态辐射成像算法,用以实时追 踪携带放射源的目标。核素识别是对放射性材料做定性 判断的关键技术,尤其涉及到特殊核材料筛查的应用场 景,存在屏蔽的条件下,出射的伽玛射线量往往较少, 而人工智能算法为高灵敏度核素识别技术带来了契机。 辐射场景往往复杂多变,比如大科学装置中的加速器束 流热点、核应急中面临的复杂地势地貌等,多终端、多 信使探测技术的融合互补可实现辐射信息的全方位探测, 辐射探测智能化平台便是通过智能化控制、跨平台和跨 设备应用技术使得辐射探测与成像技术更加高效。

针对上述问题,在智能化辐射探测与成像技术研究 方面,本文系统地介绍了中国科学院高能物理研究所在 远场放射源三维定位、动态辐射热点成像、核素识别与 分析等方面开展的探测方法和优化研究,展示了辐射成 像技术搭载于机器人、车载、无人机载等平台的智能化 应用,实现了针对实际应用场景的辐射热点方测搜寻、 针对一定区域的辐射态势感知及可视化、城市级辐射监 测及地图绘制等功能,实现了诸多先进成像技术的可行 性及其在核与辐射安全监测的行业应用。本文展示了辐 射成像智能化应用中的多个亮点工作,在辐射热点三维 定位的研究方面,通过四目立体成像系统实现了远距离 成像场景中放射源100m距离下小于20%的测距精度, 在室内场景中通过三维场景建模和辐射场构建实现了4 枚放射源的三维定位。在人工智能算法的应用方面,实 现了移动辐射热点的实时定位,可对25m远处以36 km/h速度移动的14 mCi¹³⁷Cs放射源进行动态定位追踪。 在神经网络核素识别算法研究方面,提出了一种基于先 验能量信息的特征增强卷积神经网络,可在低计数和多 核素混合的环境下,实现核素的快速识别。在辐射成像 智能化平台研制方面,研制了可实现辐射热点检测的加 速器隧道环境巡检机器人,并开发了一套车载式辐射应 急监测平台,搭载有无人机载、车载、便携式γ相机等 多个探测终端,可在辐射应急情况下实现城市区域的快 速机动测量。

核辐射成像技术是与科技发展、实际需求紧密结合 的学科,探测器、电子学、人工智能、无人化平台的发 展极大促进了核辐射成像技术的发展,使得辐射成像技 术更加高效、准确和智能化。未来的发展方向可能包括 更高分辨率的探测器、更先进的数据处理算法、更强大 的人工智能模型,以及更完善的三维可视化技术。从实 际应用需求出发,辐射探测与成像领域中未来的研究热 点和方向可能涉及到:1)通过远距离测量实现放射性 材料的量化,结合本文中的放射源三维定位技术,有望 实现远距离测量条件下放射源活度的估算,从而减少近 距离接触测量所带来的辐照损伤;2)三维辐射场的动 态实时构建,通过高灵敏度成像技术以及源项动态重建 算法,可对核设施等场景做辐射水平的三维动态评估, 从而规划辐照最优化工作路径,在核设施大修或者退役 期间有效降低工作人员的受照剂量。这些进步将进一步 提升核与辐射安全管理的水平,此外还可预期在海洋 环境监测、天文学观测、医疗影像等领域发挥重要的 作用。

参考文献:

- ANDERSON D N, STROMSWOLD D C, WUNSCHEL S C, et al. Technometrics, 2012, 48(2): 252.
- [2] IAEA Releases Annual Data on Illicit Trafficking of Nuclear and other Radioactive Material | IAEA[EB/OL]. [2024-02-25] https:// www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-releases-annual-dataon-illicit-trafficking-of-nuclear-and-other-radioactive-material.
- [3] National Nuclear Safety Administration. Annual Report 2022[R]. Beijing: National Nuclear Safety Administration, 2023. (in Chinese)
 (国家核安全局. 国家核安全局 2022 年年报 [R]. 北京: 国家核安 全局, 2023.)
- [4] PRADEEP KUMAR K A, SHANMUGHA SUNDARAM G A, SHARMA B K, et al. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(10): 2151.
- [5] CHEN Boxian. Nuclear Radiation Physics and Detection[M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2021. (in Chinese) (陈伯显. 核辐射物理及探测学[M]. 2版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大 学出版社, 2021.)
- [6] KIM J, BACK H, JOO K. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52: 456.
- [7] KONG L, SHUAI L, LIANG X, et al. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(11): 113103.
- [8] WEINFURTHER K, MATTINGLY J, BRUBAKER E, et al. Nucl Instr and Meth A, 2018, 883: 115.
- [9] SHAH N. Adaptive Imaging with a Cylindrical, Time-Encoded Imaging System[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2020.
- [10] MORTIMER R K, ANGER H O, TOBIAS C A. The Gamma-ray Pinhole Camera With Image Amplifier: UCRL-2524[R]. Berkeley: University of California, 1954.
- [11] AMGAROU K, HERRANZ M. Nuclear Engineering and Technology, 2021, 53(11): 3491.
- [12] CIESLAK M. Development of Scintillator Based Coded-aperture Neutron Imager for Nuclear Decommissioning[D]. Lancaster: Lancaster University, 2019.
- [13] SUEOKA K, KATAOKA J, TAKABE M, et al. Nucl Instr and Meth A, 2018, 912: 115.
- [14] POTAPOV V N, IVANOV O P, SEMIN I A. Method to Improve Angular Resolution of Portable Gamma Camera with Pinhole Collimator[C]//2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD). 2016.
- [15] DICKE R H. Astrophysical Journal, 1968, 153: L101.
- [16] ABLES J G. Publications of the Astronomical Society of Australia, 1968, 1(4): 172.
- [17] BRADY D J. Optical Imaging and Spectroscopy[M]. Washington D C: Wiley, 2009.

- [18] SHUAI L. Research on Data Acquisition and Image Reconstruction System of Coded Aperture Gamma Camera[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese) (帅磊. 编码孔径γ相机数据获取及图像重建系统研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2010.)
- [19] SUN S F. Research on Radiographic Imaging Method Based on Coded Aperture [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

(孙世峰.基于编码孔径的射线成像方法研究[D].北京:中国科 学院大学,2016.)

- [20] BRENNAN J, BRUBAKER E, GERLING M, et al. Nucl Instr and Meth A, 2015, 802: 76.
- [21] ODA M. Applied Optics, 1965, 4(1): 143.
- [22] KIM H S, CHOI H Y, LEE G, et al. Journal of Radiological Protection, 2018, 38(1): 299.
- [23] KORAL K F, ROGERS W L, KNOLL G F. Journal of Nuclear Medicine, 1975, 16(5): 402.
- [24] MARLEAU P, BRENNAN J, BRUBAKER E, et al. Results from the Coded Aperture Neutron Imaging System[C]//IEEE Nuclear Science Symposuim & Medical Imaging Conference. 2010: 1640.
- [25] BROWN S. Time-Encoded Thermal Neutron Imaging using Large-Volume Pixelated CdZnTe Detectors[D]. Ann Arbor: The University of Michigan, 2017.
- [26] KIM H S, YE S J, SHIN Y, et al. Journal of the Korean Physical Society, 2016, 69(11): 1644.
- [27] MARLEAU P, BRUBAKER E. An Implementation of Zero Knowledge Confirmation Using a Two-dimensional Time-Encoded Imaging System[R]. Livermore: Sandia National Lab, 2016.
- [28] LIANG X Z, PANG X Y, CAO D Q, et al. Nucl Instr and Meth A, 2020, 951: 162964.
- [29] BAO V L, KIM G. A Journal of Instrumentation, 2017, 12(03): C03013.
- [30] NA M, LEE S, KIM H S, et al. Journal of Instrumentation, 2017, 12(12): C12050.
- [31] KIM H S, NA M, OK J G, et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(9): 2114.
- [32] OLESEN R J. Low-Information Radiation Imaging using Rotating Scatter Mask Systems and Neural Network Algorithms[D]. Montgomery: Air University, 2020.
- [33] OLESEN R J, HOLLAND D E, BRUBAKER E M, et al. Radiation Measurements, 2020, 137: 106441.
- [34] SCHÖNFELDER V, HIRNER A, SCHNEIDER K. Nucl Instr and Meth, 1973, 107(2): 385.
- [35] TODD R W, NIGHTINGALE J M, EVERETT D B. Nature, 1974, 251(5471): 132.
- [36] LIANG X Z. Research on Key Imaging Techniques based on Coded Aperture and Compton Scattering Method[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)

(梁秀佐.基于编码孔径与康普顿散射方法的关键成像技术研究 [D].北京:中国科学院高能物理研究所, 2022.)

[37] WU C P, LI L. Nuclear Technology, 2021, 44(5): 50403. (in Chinese)

(武传鹏,李亮.核技术, 2021, 44(5): 50403.)

[38] POITRASSON-RIVIÈRE A, MAESTAS B A, HAMEL M C, et al. Progress in Nuclear Energy, 2015, 81: 127.

- [39] ZHANG J, WEI L, SHUAI L, et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 67: 1691.
- [40] FRANDES M, ZOGLAUER A, MAXIM V, et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57: 144.
- [41] YE Q, FAN P, WANG R, et al. Nucl Instr and Meth A, 2019, 937: 31.
- [42] HU Y, FAN P, LYU Z, et al. Nucl Instr and Meth A, 2022, 1023: 165971.
- [43] PARADISO V, AMGAROU K, DE LANAUTE N B, et al. Nucl Instr and Meth A, 2018, 910: 194.
- [44] RATHNAYAKA P, BAEK S H, PARK S Y. Introducing a New Radiation Detection Device Calibration Method and Estimating 3D Distance to Radiation Sources[C]//KIM K J. Information Science and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015: 335.
- [45] PARADISO V, CRIVELLARO A, AMGAROU K, et al. Nucl Instr and Meth A, 2018, 886: 125.
- [46] SATO Y. IApplied Radiation and Isotopes, 2023, 195: 110739.
- [47] MIHAILESCU L, VETTER K, CHIVERS D. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(2): 479.
- [48] CHIN J C, RAO N S, YAO D K Y, et al. ACM Transactions on Sensor Networks, 2010, 7(3): 50.
- [49] SUN S F, ZHANG Z M, SHUAI L, et al. Applied Radiation and Isotopes, 2016, 107: 177.
- [50] LIU Y T, SHUAI L, LI D, et al. AIP Advances, 2022, 12(8): 085317.
- [51] YU Y, LIU S, ZHANG Z, et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2022, 69(8): 1931.
- [52] TAKEUCHI K, KATAOKA J, NISHIYAMA T, et al. Nucl Instr and Meth A, 2014, 765: 187.
- [53] SATO Y, TERASAKA Y, OZAWA S, et al. Journal of Instrumentation, 2017, 12(11): C11007.
- [54] ZOU Y. Research on Real-time Location and Tracking Algorithm of Mobile Radioactive Source Based on Coded Aperture Imaging[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
 (邹艺. 基于编码孔径成像的移动放射源实时定位追踪算法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.)
- [55] ZOU Y, LIU S Q, SUN X L, et al. Radiation Detection Technology and Methods, 2021, 5(2): 228.
- [56] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: An Incremental Improvement. arXiv: 1804.02767, 2018. DOI:10.48550/arXiv.1804.02767.
- [57] WOJKE N, BEWLEY A, PAULUS D. Simple online and realtime tracking with a deep association metric[C]//2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2017: 3645.
- [58] ZHANG J M, REN J S, LI P P et al. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2016, 36(8): 856. (in Chinese)
 (张江梅, 任俊松, 李培培, 等. 核电子学与探测技术, 2016, 36(8): 856.)
- [59] LI C, LIU S, WANG C, et al. Applied Radiation and Isotopes, 2022, 185: 110219.
- [60] LI C M. Research on Three-dimensional Location Algorithm of Multiple Radioactive Sources Based on count-type Omnidirectional Detection[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)

(李春苗.基于计数型全方向探测的多放射源三维定位算法研究 [D].北京:中国科学院大学, 2022.) · 108 ·

- [61] ZHANG R, GONG P, TANG X, et al. Nucl Instr and Meth A, 2019, 934: 41.
- [62] LIU Q, CHENG Y, TUO X, et al. Applied Radiation and Isotopes, 2021, 170: 109637.
- [63] WEN H, WANG Y, XIUZUO L, et al. Review of Scientific Instruments, 2021, 92: 013106.
- [64] VETTER K, BARNOWSKI R, CATES J W, et al. Sensors, 2019, 19(11): 2541.
- [65] CHIERICI A, MALIZIA A, DI GIOVANNI D, et al. The European Physical Journal Plus, 2021, 136(3): 314.
- [66] WHITE S R, MEGSON-SMITH D A, ZHANG K, et al. Frontiers in Robotics and AI, 2020, 7. DOI:10.3389/frobt.2020.499056.
- [67] CONNOR D T, WOOD K, MARTIN P G, et al. Frontiers in Robotics and AI, 2020, 6: 00149..
- [68] MARQUES L, VALE A, VAZ P. Sensors, 2021, 21(4): 1051.

Radiation Imaging Methods and Intelligent Technology in Nuclear Safety

WEI Long^{1,2,3,4}, KONG Lingqin^{1,2,4}, SHUAI Lei^{1,3,4,†}, LIANG Xiuzuo^{1,3,4}, HU Xuanhou^{1,3,4},

ZHANG Yiwen^{1,3,4}, WANG Xiaoming^{1,3,4}

(1. Beijing Engineering Research Center of Radiographic Techniques and Equipment, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Jinan Laboratory of Applied Nuclear Science, Jinan 250131, China;

4. CAEA Center of Excellence on Nuclear Technology Applications for Nuclear Detection and Imaging, Beijing 100049, China)

Abstract: Radiation imaging is an important aspect of nuclear radiation measurement. In the field of radiation safety, typical radiation imaging methods mainly include pinhole imaging, (spatial) coded aperture imaging, time-coded imaging, and Compton scattering imaging, etc, each with its own advantages, disadvantages, and applicable scenarios. Based on the accumulation of existing imaging technology methods and the experience in the development of advanced imaging equipment, this article explores three feasible schemes for the three-dimensional positioning of radiation hotspots, the application of artificial intelligence in the dynamic imaging of radiation hotspots, nuclear identification, and the intelligentization of radiation imaging platforms. It addresses the actual needs of radiation detection (imaging) that is "faster, more accurate, and covers a larger range." In the research on the three-dimensional positioning of radiation hotspots, a four-eye stereo imaging system has achieved a distance measurement accuracy of less than 20% for radioactive sources at a distance of 100 meters in long-distance imaging scenarios. In indoor scenes, three-dimensional positioning of four radioactive sources has been achieved through three-dimensional scene modeling and radiation field construction. In the application of artificial intelligence algorithms, real-time positioning of moving radiation hotspots has been realized, capable of dynamically tracking and positioning a 14 mCi ¹³⁷Cs radioactive source moving at a speed of 36 km/h at a distance of 25 meters. In the research on neural network nuclear identification algorithms, a feature-enhanced convolutional neural network based on prior energy information has been proposed, which can quickly identify nuclear substances in environments with low counts and mixed nuclear species. In the development of intelligent radiation imaging platforms, an accelerator tunnel environmental inspection robot capable of detecting radiation hotspots has been developed, and a vehicle-mounted radiation emergency monitoring platform has been created. Equipped with multiple detection terminals such as unmanned aerial vehicle (UAV) mounted, vehicle-mounted, and portable gamma cameras, it can quickly mobilize measurements in urban areas during radiation emergencies. The various intelligent radiation imaging technologies presented in this paper enable people to obtain the three-dimensional distribution and nuclear information of radioactive sources more quickly and accurately, providing advanced and efficient radiation detection technical means for radiation environmental assessment, radiation protection, nuclear emergency drills, and decision-making. Key words: nuclear safety; radiation imaging; intelligence

Received date: 10 Feb. 2024; Revised date: 01 Mar. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (12375307, 12005234, 12105116)

[†] Corresponding author: SHUAI Lei, E-mail: shuail@ihep.ac.cn