

人工智能算法在核应急中的应用综述

许 鹏, 刘梦雅, 范新峰, 王佳帅

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为了促进人工智能算法与核应急领域深度结合, 综述了近年来人工智能算法在放射源搜寻、环境污染监测、路径规划和核应急处置决策领域的应用现状, 分析了各领域的研究进展, 提出了各种人工智能算法在核应急领域存在的问题, 展望了核应急人工智能算法研究的重点方向。

关键词: 核事故; 核应急; 人工智能算法

中图分类号: TL732

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)03-104-007

Overview of Application of Artificial Intelligence Algorithms in Nuclear Emergency

XU Peng, LIU Mengya, FAN Xinfeng, WANG Jiashuai

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: To enhance the combination of artificial intelligence algorithm and nuclear emergency, recent applications of artificial intelligence algorithms in fields such as radiation source search, environmental pollution monitoring, path planning, and nuclear emergency disposal decision were summed up. Additionally, study progress of these applications were analyzed. Accordingly, problems and priority research fields of artificial intelligence algorithms in nuclear emergency were proposed.

KEYWORDS: nuclear accident; nuclear emergency; artificial intelligence algorithm

随着对核科学的不断深入探索研究, 核技术在工业生产、核能发电、生物医药、无损检测、核动力等领域得到广泛应用, 发展核技术成为各国研究热潮^[1]。虽然核技术给人类社会带来了新的清洁、高效的能源, 但是核技术的开发利用仍然存在很大的风险, 历史上的3个重大核事故(切尔诺贝利、三哩岛和福岛)的发生, 让人们深刻认识到核安全与核应急的重要性。核应急是为了控制核事故、缓解核事故、尽量减小核事故后果而采取的不同于正常工作程序的紧急行为^[2], 对维护国家安全、保持社会稳定、保护生态环境等方面具有重要的意义。国内外对核应急管理体系

和技术装备开展了大量研究, 传统的核应急体系往往依赖操作人员的现场操作和处置经验, 作业效率低, 人员受辐照剂量高, 难以满足核应急不断发展的需求^[3-5]。

人工智能是一种模仿人类智能做出响应的技术, 可以模仿人类思维对信息进行分析研判。人工智能与核应急领域的深度结合, 为核应急智能化、无人化提供了更多可能性, 能够加强威胁检测、提供积极主动的安全措施、减少人为干预的依赖性和实现快速事件响应等。智能控制、路径优化、故障监测等智能技术的应用, 可使核应急具备智能决策、自适应处置的能力, 能够有效降

收稿日期: 2024-03-12

第一作者: 许鹏(1976—), 男, 教授, 主要从事核技术及应用研究。E-mail: xupeng76345@163.com

引用格式: 许鹏, 刘梦雅, 范新峰, 等. 人工智能算法在核应急中的应用综述[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(3): 104-110.

低操作人员在高辐射环境中的受照射剂量, 提高工作效率^[6]。

近年来人工智能算法在放射源搜寻、环境污染监测、路径规划、核应急处置决策等领域的应用热度不断提升, 常用智能算法有粒子滤波、神经网络等 (如图 1 所示), 人工智能与核应急的交叉融合成为核技术研究的新方向。基于此, 本文围绕这些领域的前沿进展进行分析, 对人工智能算法在核应急领域的下一步发展提出了建议。



图 1 核应急各领域常用人工智能算法

Fig. 1 Artificial intelligence algorithms commonly used in fields of nuclear emergency

1 放射源搜寻方面

放射源被广泛应用于医疗、科研、检测等领域, 如辐照消毒、医疗诊断等, 放射源失管失控的事故也在不断发生, 威胁人类生命健康和环境安全。放射源搜寻是对失管失控放射源的位置和状态估计, 在核事故后果预测控制和应急决策中发挥着重要作用。1995 年, 国际原子能机构 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 发布的 IAEA-TECDOC-804 文件^[7]提出了废放射源的鉴别和定位方法, 包括人工徒步和车载测量 2 种探测方式, 搜寻人员受照射和被污染的风险较高。相较于传统探测寻源的方式, 采用智能寻源技术能够利用辐射场边缘的少量数据定位放射源位置, 尽量减少人员在辐射场内的受照射时间, 降低受照射剂量。粒子滤波算法和神经网络是放射源搜寻领域中常用的 2 种算法。

1.1 粒子滤波算法

粒子滤波算法是一种近似于贝叶斯理论的蒙特卡罗方法, 很好地满足了渐进搜索的行为模式, 最早应用于目标跟踪领域, 近年来因其在解决非线性非高斯问题上的优越性能, 在放射源搜寻问题上受到广泛关注。

2020 年, 张秤等^[8]利用粒子滤波算法估计放射源坐标位置和辐射计数率, 通过增加粒子数目和重采样的方法解决粒子多样性缺失问题。同年, 刘浩杰等^[9]基于递推贝叶斯模型提出了一种改进粒子滤波算法, 对粒子权值进行归一化, 对满足收敛条件的粒子加权求和, 估计放射源位置及状态, 在无屏蔽物干扰时, 定位结果位置误差可以达到 0.04 m。但是该算法在有屏蔽物的情况下预测误差明显增加, 且对放射源数量和大小未知的问题没有讨论。2021 年, 高文锐等^[10]提出了一种峰值抑制粒子滤波算法, 引入峰值抑制模型, 对预测强度明显大于测量值的粒子权重进行校正, 可实现最多对 6 个放射源的状态估计。2022 年, 滕明波^[11]基于方向角大小改进了标准粒子滤波算法, 以提高粒子采样的收敛速度, 仿真实验表明算法改进后在无障碍物环境中放射源位置估计结果误差可以小于 0.1 m, 在有障碍物的环境中位置误差小于 0.2 m。该研究主要针对单点放射源位置估计展开, 对多点放射源的整体估计问题没有涉及。同年, 刘益洲^[12]对比了 3 种优化方法改进粒子滤波算法的效果, 仿真结果显示无迹粒子方法虽然运算时间更长, 但误差值更小, 结果准确性更高。

粒子滤波算法的单峰维持特性使其不易进行多放射源的同步状态预测, 因此, 该算法主要应用于对单一放射源状态进行估计, 在多点放射源的整体预测中存在低强度放射源预测遗漏的问题。此外, 由于不同障碍物对射线的衰减作用不同, 造成辐射场内的障碍物对放射源的定位精度有明显影响, 但目前对场景中不同材质障碍物的研究还比较少。

1.2 神经网络

神经网络是模仿人脑处理信息的方式而设计的一种非线性网络系统, 具有并行处理、自适应学习等功能, 能够在没有融合函数模型的前提下, 通过训练数据集的大量训练得到相适应的神经网络结构和映射关系, 实现对数据的非线性映射, 在放射源寻源问题上具有广泛应用前景。2018 年, 张云鹏^[13]设计了一种基于地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 和反向传播神经网络 (Back Propagation Neural Network, BPNN) 的寻源算法。GIS 将位置信息和辐射剂量值表现为散列点, 摆脱了传统算法对区域网格划分的依赖性; BPNN 经训练后预测数据分布图与

实际辐射场热力图对比,半数以上的放射源位置坐标结果误差在 20% 以内,提高了寻源效率,且对分布轮廓有一定程度的还原。2022 年,刘英杰^[14]改进了张云鹏提出的 BPNN,新 BPNN 的激活函数通过增加网络计算量来减少欠拟合,实验显示,超过 60% 的预测结果误差在 0.6 m 以内,更符合放射源搜寻时采集数据,更靠近放射源外围的实际情况。此外,针对双源预测问题,文献^[14]还对比了 BPNN、支持向量机和公式逆推法 3 种预测算法,从误差累计分布图发现 BPNN 在双源预测上的效果较差。

神经网络能够较为准确地预测出单点放射源位置,但需要大量数据训练才能得到合适的神经网络模型。在实际强放射源搜寻过程中,工作人员往往难以深入放射源周围区域,数据点大多在距离较远的安全区域,因此,神经网络的精度受到影响。在多放射源预测中,神经网络的预测结果并不理想,误差较大。

2 环境污染监测方面

源项估计和放射性烟云扩散是一个复杂而多变的过程,受地形、环境因素、监测数据难以获得等影响,传统的简单数学或物理模型难以对源项和放射性烟尘进行准确、实时的预测和判断,将智能算法引入源项估计和放射性烟云扩散范围预测,能够提高模型预测的准确度,实现对核事故现场状态的实时预测。

2020 年,Yue^[15]构建了 BPNN 分类器,利用事故短期监测数据确定核素释放类别,使用遗传算法和模拟退火算法将 BPNN 预测准确率提高至 99.10%。该文献还针对伽马剂量监测数据不足的情况使用粒子群优化保证分类器正常工作。2022 年,刘虹^[16]提出了一种用于核应急监测的数据融合系统设计方案,对核监测数据采用高斯多烟团模型进行扩散预测,并采用卡尔曼滤波的方法同化监测数据,修正预测结果以降低误差,并实现对环境辐射剂量分布的可视化展示。2023 年,郑炆^[17]采用遗传算法、粒子群优化算法和卡尔曼滤波算法 3 种数据同化方法进行源项参数反演,能够结合实时监测数据不断修正源项参数,预测准确度达到 90% 以上,改善了因系统模型分析误差引起的预测精度问题。

由于现场环境和气象变换的复杂性和多样性

以及其他干扰因素的存在,观测点分布不均匀,会使预测结果存在较大误差,不利于准确预测放射性烟云的扩散情况。因此,如何修正观测误差、减少噪声影响,仍是当前智能算法需要解决的主要问题。

3 路径规划方面

路径规划问题是指在规定环境中从初始位置找到目标位置之间的无碰撞运动^[18]。在核应急中,路径规划问题可以划分为人员疏散路径规划和核应急机器人路径规划 2 个方面,常用的智能算法主要有 Dijkstra 算法、A* 算法和蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO) 等。

3.1 Dijkstra 算法与 A* 算法

Dijkstra 算法是典型的最短路径算法,基于贪心算法思想进行全局搜索,以起始点为圆心进行无序扩张,直到遍历所有点后抵达终点。A* 算法由 Dijkstra 算法改进而来,是启发式搜索算法,通过估计节点到目标节点的距离来选择下一个扩展节点,在小空间中搜索路径速度快^[19-20]。Dijkstra 算法与 A* 算法具有场景普适性,因此,在路径规划中具有良好的应用效果。

在人员疏散路径规划方面,2015 年,Liu 等^[21]基于 A* 算法进行最小剂量路径规划,规划的路径累积剂量计算误差小,路径选择更自由。2018 年,陶龙龙等^[22]提出一种辐射环境下改进的 A* 路径规划方法,考虑辐射场剂量率、累积剂量、障碍物、最短距离的约束条件,规划的路径虽较传统 A* 算法距离增加,但受照射剂量明显降低。该研究基于二维环境背景展开,在有起伏地形环境的应用效果还有待验证。2020 年,Pei 等^[23]提出了一种集体剂量最小化的路径规划方法,采用基于累积剂量的 Dijkstra 算法规划最佳疏散路径,搜索得出从起点到终点的累积剂量最小的最优路径。Pei^[24]在 2021 年又设计开发了一款核事故应急响应撤离决策支持软件系统,采用了基于通行累积剂量的 Dijkstra-Dose 算法进行最优撤离路线搜索,舍弃实际通行时间大于规定撤离时间的路线,寻找次优解,直到满足撤离规定时间。

在核应急机器人路径规划方面,2021 年,Huang 等^[25]提出了一种考虑辐射和不平坦地形的核应急机器人路径规划算法。该算法采用启发式 A* 算法计算起始节点到目标节点的估计成本,得

到最短路径和最小移动次数。该方法很好地填补了缺失的地形高度信息和辐射场信息, 路径规划结果能够尽可能减少累积辐射剂量, 避开复杂地形和高强度放射源。2022 年, 邱朦文等^[26]引入人工势场思想来改进 A* 算法的评价函数, 搜索效率明显提高, 规划的路径总剂量代价降低, 且可远离障碍物。

在应用智能算法进行核应急路径规划问题研究中, 大多将路径累积剂量作为约束条件, 而缺少路径中平均剂量率和最大剂量率的约束条件。此外, 撤离路线上人员达到一定数量时会造成拥堵, 但如果延长撤离时间会导致累积剂量增加, 因此, 如何合理规划大基数人员的撤离路线也是下一步需要解决的问题。

3.2 蚁群算法

蚁群算法模拟蚁群觅食的行为, 通过迭代来发现最短路径, 其正反馈的特点使算法具有很好的收敛特性, 最终逼近最优解^[27]。蚁群算法广泛应用于机器人控制和路径规划领域, 因此, 在核应急路径规划问题中具有独特优势。

在人员疏散路径规划方面, 2013 年, 魏强等^[28]采用蚁群算法解决辐射场中路径规划问题, 计算节点之间的有效剂量, 建立时间和剂量的约束条件, 静态规划的路径能够有效减少行程和辐射剂量, 但动态路径规划效果还有待改进。2024 年, Sun 等^[29]建立了以公交车为主要载体的核电站应急疏散策略, 改进基于自适应蚁群算法的路径选择模型, 防止出现拥挤漂移现象, 结果显示可以很好地反映路网的实时动态变化。

在核应急机器人路径规划方面, 2022 年, Zhou 等^[30]提出一种改进的大象群-蚁群混合算法 (Improved Elephant Herding Optimization-ACO, IEHO-ACO), 将 IEHO 优化得到的最短路径转化为 ACO 初始信息素分布的增量, 以提高算法收敛速度。在含凹形障碍物的环境中, 应急机器人搜索性能更好。2023 年, Zhang 等^[31]提出一种基于改进 A* 算法的改进蚁群算法 (Improved ACO modified A*, IACO-A*), 优化核应急机器人运动路径, 使机器人运动的路径长度、累计辐射剂量和能量消耗最小, 同时避免接近高剂量放射源。仿真对比结果表明, IACO-A* 算法比 ACO 和 IA-CO 结果质量更好, 稳定性更高。

在路径规划问题中, 蚁群算法在缺乏初始信息的情况下, 初始搜索路径时有一定的盲目性,

若初始结果为次优解, 正反馈的作用会使得次优解优势不断扩大。如何平衡累积辐射剂量、路径距离和能耗是路径规划中需要解决的重要问题。且实际现场的环境更加复杂, 现有算法针对起伏地形下路径规划问题研究较少, 往往还需要现场环境的准确信息来辅助路径规划。

4 核应急决策方面

核事故发生后, 如何尽快对采集的信息进行分析研判, 提供科学的决策支持, 是核应急决策系统关注的重点问题。在大数据时代, 核事故探测手段多样化, 信息类型也呈现多源化特点, 传统的核应急决策方法难以适应不断复杂、变化的核事故场景, 研究探索新型智能核应急决策系统是大势所趋。

贝叶斯方法可以在核事故初期现场信息匮乏的情况下, 根据经验预测现场状态, 随着现场信息的不断收集完善, 对事故状态进行修正, 因此, 贝叶斯方法在处理决策问题上具有独特优势。2020 年, 刘衍波等^[32]基于博弈理论和贝叶斯法则, 结合核应急处置的阶段性和动态性特征, 采用贝叶斯方法进行核事故等级判断, 建立了核事故场外应急决策序贯博弈模型, 并对日本福岛核事故进行应急决策模拟, 验证了模型的可行性。2021 年, Wu 等^[33]将事件树与故障树模型转换为贝叶斯网络模型, 基于结点数算法利用核电站监测数据来确定事件状态, 对可能发生的事故概率和源项进行估计。

人工神经网络方法在核应急决策方面也有很好的应用效果。2012 年, 申君^[34]采用模糊神经网络方法构成专家评价系统, 将观测数据模糊后输入神经网络, 由模糊逻辑判断, 可输出行动建议, 辅助应急决策。2023 年, 李鸣野^[35]基于 UNet 网络改进遥感影像分割方法, 可实现高精度、实时性地地理信息分割, 为核应急决策中的事故结果评估、疏散路径规划提供技术支持。

核应急决策是一个复杂的综合处置问题, 依赖单一类型的算法不能有效分析不同类型的现场信息, 难以解决复杂的核应急决策问题。在接下来的研究中, 可以考虑采用多种智能决策算法, 同时与信息融合方法相结合, 综合分析不同类型的现场信息, 对核事故进行现场态势分析, 评估核事故危害, 评价核事故后果。

5 研究展望

随着核技术的开发和运用,核安全与应急问题受到世界的广泛关注。面对核技术应用不断带来的风险挑战,人工智能算法与核应急的深入结合成为加快核应急体系建设、提升核应急响应能力的必然要求。后续核应急人工智能算法研究可以重点考虑以下几个研究方向。

(1) 目前,放射源搜寻领域的人工智能算法主要针对单点强放射源开展,未来研究可以从多点放射源整体估计进行讨论,进一步探索强辐射场中低强度放射源定位问题。

(2) 放射性烟云预测受天气环境影响大,实时性差,环境污染监测领域中智能算法的研究重点仍是修正观测误差、减少环境噪声、提高实时预测精度。

(3) 在人员撤离路径规划中,可以增加最大剂量率和平均剂量率的约束条件,考虑人员撤离可能产生的拥堵问题,进一步优化路径规划结果;在核应急机器人路径规划中,场景设计可以考虑障碍物与起伏地形的影响,提高复杂环境下自适应路径规划能力。

(4) 统筹各类数据、评估事故危害等级和采取响应行动是核应急决策的关键,未来可以探索利用信息融合方法构建核应急决策系统。

参考文献:

- [1] 邹旻, 邹树梁. 我国核应急发展现状与前沿动态研究[J]. 中国核电, 2020, 13(1): 114-119.
ZOU Y, ZOU S L. Study on the frontier dynamics and development status of nuclear emergency in China[J]. China Nuclear Power, 2020, 13(1): 114-119.
- [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的核应急[M]. 北京: 人民出版社, 2016.
- [3] 潘自强, 陈竹舟, 肖雪夫, 等. 由核事故看核与辐射安全[J]. 中国核工业, 2011(7): 26-31.
- [4] 陈慧玲, 石磊, 马强, 等. 国内外核应急管理体系及相关标准规范研究[J]. 船舶标准化与质量, 2018(2): 4-11.
CHEN H L, SHI L, MA Q, et al. Research on domestic and foreign nuclear emergency management system and related Standards and regulations[J]. Shipbuilding Standardization & Quality, 2018(2): 4-11.
- [5] 夏益华. 国际核应急要求与技术的某些进展[J]. 辐射防护通讯, 2001, 21(3): 3-10.
XIA Y H. Some progresses in nuclear emergency requirements and technology [J]. Radiation Protection Bulletin, 2001, 21(3): 3-10.
- [6] 景奇, 刘凯, 潘永军. 我国核应急领域智能装备现状探讨[J]. 时代人物, 2023(20): 96-99.
JING Q, LIU K, PAN Y J. Discussion on the present situation of intelligent equipment in the field of nuclear emergency in our country[J]. Time Man, 2023(20): 96-99.
- [7] International Atomic Energy Agency. Methods to identify and locate spent radiation sources: IAEA-TECDOC-804[R]. Vienna, Austria: IAEA, 1995.
- [8] 张秤, 肖宇峰, 刘浩杰, 等. 基于粒子滤波和人工势场法的放射源搜寻方法[J]. 原子核物理评论, 2020, 37(4): 867-874.
ZHANG C, XIAO Y F, LIU H J, et al. Search method of radioactive source based on particle filter and artificial potential field [J]. Nuclear Physics Review, 2020, 37(4): 867-874.
- [9] 刘浩杰, 肖宇峰, 张华, 等. 基于改进粒子滤波的未知放射源定位方法[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(11): 2264-2272.
LIU H J, XIAO Y F, ZHANG H, et al. Location method of radioactive source based on improved particle filtering[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(11): 2264-2272.
- [10] 高文锐. 面向核环境的移动机器人多放射源搜索策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022: 49-62.
GAO W R. Research on the mobile robot system and search strategy for multiple radioactive sources under nuclear environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022: 49-62.
- [11] 滕明波. 移动机器人自主搜寻放射源及模拟验证[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023: 28-38.
TENG M B. Mobile robots autonomously search for radioactive sources and simulation verification [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023: 28-38.
- [12] 刘益洲. 基于粒子滤波的放射源搜寻方法研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2023: 27-35.
LIU Y Z. Research on radioactive source search method based on particle filter [D]. Hengyang: University of South China, 2023: 27-35.
- [13] 张云鹏. 放射源移动监测系统的研究与原型实现[D]. 北京: 邮电大学, 2018: 26-31.
ZHANG Y P. Research and prototype implementa-

- tion of radiation source mobile monitoring system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018: 26-31.
- [14] 刘英杰. 放射源移动检测系统的改进与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022: 19-36.
- LIU Y J. Improvement and implementation of radioactive source mobile detection system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022: 19-36.
- [15] YUE Q, JIA W B, HUANG T, et al. Method to determine nuclear accident release category via environmental monitoring data based on a neural network[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 367: 110789.
- [16] 刘虹. 核应急监测中的数据信息融合系统设计[J]. 电子技术, 2022, 51(12): 142-144.
- LIU H. Design of data fusion system in nuclear emergency monitoring [J]. Electronic Technology, 2022, 51 (12): 142-144.
- [17] 郑场. 基于数据同化核爆炸放射性污染预测方法研究[D]. 北京: 军事科学院, 2023: 50-58.
- ZHENG Y. Prediction method of radioactive contamination in nuclear explosions based on data assimilation [D]. Beijing: Academy of Military Sciences, 2023: 50-58.
- [18] GASPARETTO A, BOSCARIOL P, LANZUTTI A, et al. Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview[M]. CARBONE G, GOMEZ-BRAVO F. Motion and Operation Planning of Robotic Systems: Background and Practical Approaches. Cham: Springer, 2015: 3-27.
- [19] NOTO M, SATO H. A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm[C]//2000 IEEE international conference on systems, man and cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000, 3: 2316-2320.
- [20] 张广林, 胡小梅, 柴剑飞, 等. 路径规划算法及其应用综述[J]. 现代机械, 2011(5): 85-90.
- ZHANG G L, HU X M, CHAI J F, et al. Summary of path planning algorithm and its application [J]. Modern Machinery, 2011(5): 85-90.
- [21] LIU Y K, LI M K, XIE C L, et al. Minimum dose method for walking-path planning of nuclear facilities[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 83: 161-171.
- [22] 陶龙龙, 龙鹏程, 郑晓磊, 等. 改进型A星算法引导的核辐射环境路径规划[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2018, 36(6): 56-61.
- TAO L L, LONG P C, ZHENG X L, et al. An improved A* algorithm-guided path-planning method for radioactive environment [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2018, 6 (6): 56-61.
- [23] PEI Q Y, HAO L J, CHEN C H, et al. Minimum collective dose based optimal evacuation path-planning method under nuclear accidents[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 147: 107644.
- [24] 裴秋艳. 核事故应急响应撤离关键技术研究及系统实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021: 51-56.
- PEI Q Y. Study on key technologies of nuclear emergency evacuation and system development [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021: 51-56.
- [25] HUANG Y, ZHOU Y, XIONG Z H. Path planning for nuclear emergency robot in radiation environment with uneven terrain[C]//International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Cham: Springer International Publishing, 2021: 680-690.
- [26] 邱滕文, 张华, 周怀芳. 基于改进人工势场A*算法的核辐射环境路径规划[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, 40(6): 53-61.
- QIU M W, ZHANG H, ZHOU H F. Path planning of nuclear radiation environments based on an improved artificial potential field A* algorithm [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, 40 (6): 53-61.
- [27] BLUM C. Ant colony optimization: Introduction and recent trends[J]. Physics of Life Reviews, 2015, 2(4): 353-373.
- [28] 魏强, 朱波, 谢长记. 核应急多约束条件下人员行动路径规划仿真研究[J]. 核动力工程, 2013, 34 (4): 176-179.
- WEI Q, ZHU B, XIE C J. Simulation research on path planning of nuclear emergency decision with constraints[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34 (4): 176-179.
- [29] SUN Y J, CHAI X, CHEN C Z. Bus based emergency evacuation organization strategy of nuclear power plant planning restricted area[J]. Progress in Nuclear Energy, 2024, 169: 105081.
- [30] ZHOU H F, ZHANG H, QIU M W. Radiation avoiding algorithm for nuclear robot path optimization[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 169: 108948.
- [31] ZHANG D, LUO R, YIN Y B, et al. Multiobjective path planning for mobile robot in nuclear

- accident environment based on improved ant colony optimization with modified A* [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(5): 1838-1854.
- [32] 刘衍波. 基于动态博弈的核电厂核事故场外应急决策研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2019: 38-44.
- LIU Y B. Study on the off-site emergency decision-making of nuclear accident in nuclear power plant based on dynamic game theory [D]. Hengyang: University of South China, 2019: 38-44.
- [33] WU G H, TONG J J, ZHANG L G, et al. Research on rapid source term estimation in nuclear accident emergency decision for pressurized water reactor based on Bayesian network[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2021, 53(8): 2534-2546.
- [34] 申君. 基于模糊神经网络的核应急决策系统的研究与设计[D]. 衡阳: 南华大学, 2012: 32-38.
- SHEN J. Evaluation system for nuclear accident based on fuzzy neural network [D]. Hengyang: University of South China, 2012: 32-38.
- [35] 李鸣野. 面向核应急决策的遥感影像分割方法及应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2023: 27-30.
- LI M Y. Remote sensing image segmentation method and application research for nuclear emergency decision-making [D]. Taiyuan: North University of China, 2023: 27-30.

(上接第 103 页)

- [59] AHMED M F, MASOOD K, FREMONT V, et al. Active SLAM: A review on last decade[J]. Sensors, 2023, 23(19): 8097.
- [60] XIN S M, GENG J H, ZHANG G H, et al. 3D-mapping-aided PPP-RTK aiming at deep urban canyons[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(10): 78.
- [61] WEN W S, WONG D, SUZUKI T, et al. UrbanNav: An open-sourcing localization dataset collected in asian urban canyons, including Tokyo and Hong Kong [C/OL] (2018-12-19) [2024-02-18]. <https://github.com/weisongwen/UrbanNavDataset>.
- [62] TAO X W, ZHU B, XUAN S Y, et al. A multi-sensor fusion positioning strategy for intelligent vehicles using global pose graph optimization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(3): 2614-2627.

本刊被互联网数据库收录的公告

为适应新时代信息传播的规律和特点,促进学术研究成果在更广范围内交融渗透,学报从2024年第1期开始,正式被中国知网(CNKI CAJD)、万方中国学术期刊(Wanfang CSPD)、中国科技论文与引文(CSTPCD)、维普中文期刊(VIP CJD)、超星期刊(CXJD)、长江文库等互联网数据库收录。

为提升学报刊发论文的专业性、权威性、实践性,诚邀您或您的团队撰写学术论文。本刊针对热点前沿问题开设专题,相关文章将以专栏或专刊形式刊发,稿酬优厚,并可为作者及其研究团队研究成果进行宣传和推广。

投稿方式

军网网址: <http://xb.epgc.mtn>

电子邮箱: depbxb@126.com

联系电话: 029-84744009

通信地址: 陕西省西安市灞桥区同心路2号学报编辑部

邮政编码: 710025

网 址: <http://www.epgc.mil.cn/catalog-98.shtml>

《火箭军工程大学学报》编辑部