

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)04-0078-06

应急物资成本效应的路径规划模型研究

张新菊

(应急管理部大数据中心,北京 100013)

摘要:针对决策者在短时间内选择救援队伍与路径的复杂挑战,研究应急物资供应中的路径规划问题,提出一种结合层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)与Dijkstra算法的成本效应路径规划模型。首先,通过AHP方法对应急情景中的多类准则进行系统化排序,确定各因素权重;其次,综合考虑物资分布地理坐标与突发事件信息,构建融合多源数据的风险成本图模型,运用改进DIJKSTRA算法迭代生成总风险成本最低的救援路径;最后,通过仿真实验对比不同路径在风险成本与计算时间方面的表现。实验结果验证了模型在动态应急环境中的可行性与有效性,能够在保证计算效率的同时显著降低路径风险成本,为应急资源调度与路径优选提供了一种科学、实用的决策支持工具。

关键词: AHP; Dijkstra 算法; 应急物资; 成本效应; 路径规划; 救援路线

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)04-0078-06

Research on path planning model of cost effect of emergency materials

ZHANG Xinju

(Emergency Management Department Big Data Center, Beijing 100013, China)

Abstract: This paper focuses on the path planning problem in emergency material supply. In response to the complex challenges faced by decision-makers in selecting rescue teams and routes within a short period of time, a cost-effectiveness path planning model combining the analytic hierarchy process (AHP) and Dijkstra algorithm is proposed. Firstly, using the AHP method, the various criteria in the emergency scenario are systematically quantitatively ranked to determine the weights of each factor. Secondly, considering the geographical coordinates of material distribution and emergency event information, a risk cost graph model integrating multiple data sources is constructed, and the improved Dijkstra algorithm is used to iteratively generate the rescue path with the lowest total risk cost. Finally, through simulation experiments, the performance of different paths in terms of risk cost and calculation time is compared. The results verify the feasibility and effectiveness of the model in dynamic emergency environments, and can significantly reduce the path risk cost while ensuring computational efficiency, providing a scientific and practical decision support tool for emergency resource scheduling and path optimization.

Keywords: AHP; Dijkstra algorithm; emergency supplies; cost effect; path planning; rescue route

应急管理每天都要处理最多样化的情况。紧急服务机构,如警察、消防和健康服务机构,面临着前所未有的挑战,即社会增加和改变^[1-2]所面临的风险的性质、形式和模式。事件管理的主要目标是尽快向受灾地区^[3]提供应急服务。为了实现这一目标,需要在相对较短的决策期内对许多因素进行评估和考虑。特别是在应急响应中,诸如救援人员、资源和设备的数量以及要遵循的路线和空间属性等问题对于估计响应时间至关重要。在这些情况下,管理层需要配备工具来帮助计划和管理,并促进更好的帮助^[4]。

在应急行动中,救援机构必须根据紧急需要,协调一致地组织工作人员和物资。然而,在几方面使用到地理信息系统(geographic information system, GIS)。在文献[5]

中,将层次分析法AHP方法与GIS相结合来确定洪水风险区域。在文献[6]中,这些方法被结合到催化火灾风险的工厂中。在文献[7]中,一种类似的方法被用来分析山体滑坡,为一个事件规划支持路线。一些研究人员将风险成本图引入无人机路径规划^[5-7]中。文献[6]提出了两种基于风险意识的无人机路径规划算法,以应对操作环境中的动态风险和威胁。文献[7-10]和另一个团队研究了城市环境中无人机操作可能的风险因素。提出了一种基于风险成本图的4G数据传输单元(4G-data transmission unit, 4G-DTU)路径规划方法^[11],使无人机能够沿着具有成本效益的路径进行规划。然而,这些文献关注的是无人机操作规则的设计,而没有模拟与城市特征相关的风险事件。一些研究人员已经研究了闸门、天气预报和其他地

收稿日期:2024-12-23;录用日期:2025-02-10

基金项目:科技创新2030—“新一代人工智能”重大项目(2021ZD0114200)

作者简介:张新菊(1981—),女,博士研究生,高级工程师,研究方向:大数据、人工智能、应急管理。

引用本文:张新菊. 应急物资成本效应的路径规划模型研究[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(4): 78-82, 121. (ZHANG Xinju. Research on path planning model of cost effect of emergency materials[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(4): 78-82, 121.)

面^[12]车辆作为可能的威胁。然而,在城市环境中,基于风险及成本的路径必须考虑到额外的威胁。其他研究人员对无人机路径规划的紧急着陆^[13]、种群风险和可能成本风险^[14]之间的权衡进行了种群相关风险评估,路径规划方面研究更是层出不穷^[15-17]。然而,很少有研究人员考虑到无人机撞击地面车辆、无人机进入可控空域并与载人飞机碰撞的威胁,或结合所有这些风险来生成复杂城市环境的风险成本地图。

本研究以不同的方法与GIS结合起来,使用一个关注事件呼叫动态情况的模型。在紧急情况下,指挥决策人员迅速决定满足事件的要求,并确定哪个应急物资路线是最合适的援助,将AHP与Dijkstra算法相结合,利用多迭代方法的灵活性和鲁棒性,使用并比较了路径规划算法来生成低风险成本的路径,评估了它们的强度和与弱本质无关的场景。

1 模型研究

1.1 分析层次结构过程(AHP)

AHP在构建之后,配对判断阶段之后,专家知识基于经验、直觉和专业来确定一个标准的相关性,而不是关注主要目标,使用数字量表将语言评估转化为数字,来自判断的值被用来构造比较矩阵。因此,A可以表示为 $n \times n$ 个矩阵,即

$$A = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, n 为待估计的准则的数量, C_i 为准则 i 的数值, a_{ij} 为准则 i 对准则 j 的权重。

从判断矩阵中,准则的重要性或相对权重可以通过归一化计算为

$$w_{cn_i} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

归一化产生了对判断^[13]基础的比例尺度的单一估计,决策者可能存在不确定性。在这种情况下,引入了一致性指数来衡量判断的一致性^[14]。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中,CI为一致性指数, n 为评价准则的个数, λ_{\max} 为 a 的特征值,还提出了一个一致性关系CR来确定CI的值是否合适。

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.1 \quad (4)$$

式中,CR的可接受限值为0.1。如果CR超过这个值,应重复评估程序,以提高一致性。当CR在预期范围内时,该方法导致决策者优先级的近似。

1.2 GIS和Dijkstra算法

应急响应的空间性质是建设有效路线的基础。城市地区的道路网络偶尔会受到阻塞,无论是由于道路阻塞、交通堵塞或其他类型的逆境,导致交通阻塞^[11-13]。在这种情况下,与Dijkstra算法相关联的GIS提供的数据层可以用于创建新路径。考虑一个加权图 G , n 个从1到 n 的垂直点编号。设 $d[v]$ 是当前从源顶点 s 到顶点 v 的距离,而 $w(u,v)$ 是连接 u 和 v 的边的权值。该算法保持一组 S 个顶点,其距离空的最短距离已知。该算法可理解为

1) 初始化

① 加载GIS数据。首先,从GIS系统中加载道路网络数据,包括节点(如交叉路口、城市地标等)和路段(如街道、高速公路等)等多信息情况。每个路段都有一个权重,可以是距离、时间、费用等。

② 构建图结构。根据加载的GIS数据,构建一个加权图 G ,其中节点对应GIS中的节点,边对应GIS中的路段,权重对应路段的权重。

③ 初始化距离数组。创建一个数组 d ,用于存储从起点 s 到图中每个节点的最短距离。将 $d[s]$ 设置为0,表示起点到自身的距离为0;将其他所有节点的距离初始化为无穷大(或某个足够大的数)。

④ 初始化优先队列。创建一个优先队列(最小堆),用于存储所有未处理的节点及其当前已知的最短距离。将起点 s 及其距离0加入优先队列。

2) 主循环

① 选择当前最短距离的节点:从优先队列中取出当前最短距离的节点 v 。

② 更新邻接点的距离。对于与节点 v 相邻的每个节点 u ,检查通过节点 v 到达节点 u 的路径是否比当前已知的最短路径更短。如果是,则更新 $d[u]$ 为 $d[v] + w(v,u)$,并将节点 u 及其更新后的距离加入优先队列(如果它尚未在队列中)。

③ 标记节点为已处理。在某种实现中,可能需要一个额外的数据结构来跟踪哪些节点已经被处理过,以避免重复处理。然而,在使用优先队列的情况下,由于已经处理过的节点会从队列中移除,因此通常不需要额外的数据结构。

④ 重复步骤1)至步骤3),直到优先队列为空,即所有节点都已处理完毕。

通过将其与GIS连接,道路网可以通过将GIS提供的信息(街道结构、绿化的类型、绿化和流量)附加到算法中用来构建理想的事件访问路径的权重属性来适应源-目的地问题。该算法突出以下创新点:

1) 实时交通信息集成。在GIS中,可以集成实时的交通信息(如路况、交通事故、交通管制等),并动态地调整路段的权重。这样,Dijkstra算法就可以根据实时的交通状况来计算最短路径。

2) 多模态路径规划。在GIS中,除了道路网络外,还可以包含其他交通方式(如公共交通、步行、骑行等)的数据。通过为每种交通方式分配不同的权重,Dijkstra算法

可以计算出多模态的最短路径。

3) 路径可视化与交互。GIS 平台提供了强大的可视化功能,可以将计算出的最短路径以直观的方式展示给用户。此外,用户还可以通过交互操作来修改起点、终点或算法参数,从而获得不同的最短路径方案。

4) 并行与分布式计算。对于大型的道路网络和复杂

的交通网络,Dijkstra 算法的计算量可能非常大。通过利用 GIS 平台的并行与分布式计算能力,可以加速算法的执行速度,提高计算效率。

1.3 提出的模型

该模型是一种集成的 GIS 方法和 Dijkstra 算法模型,如图 1 所示。

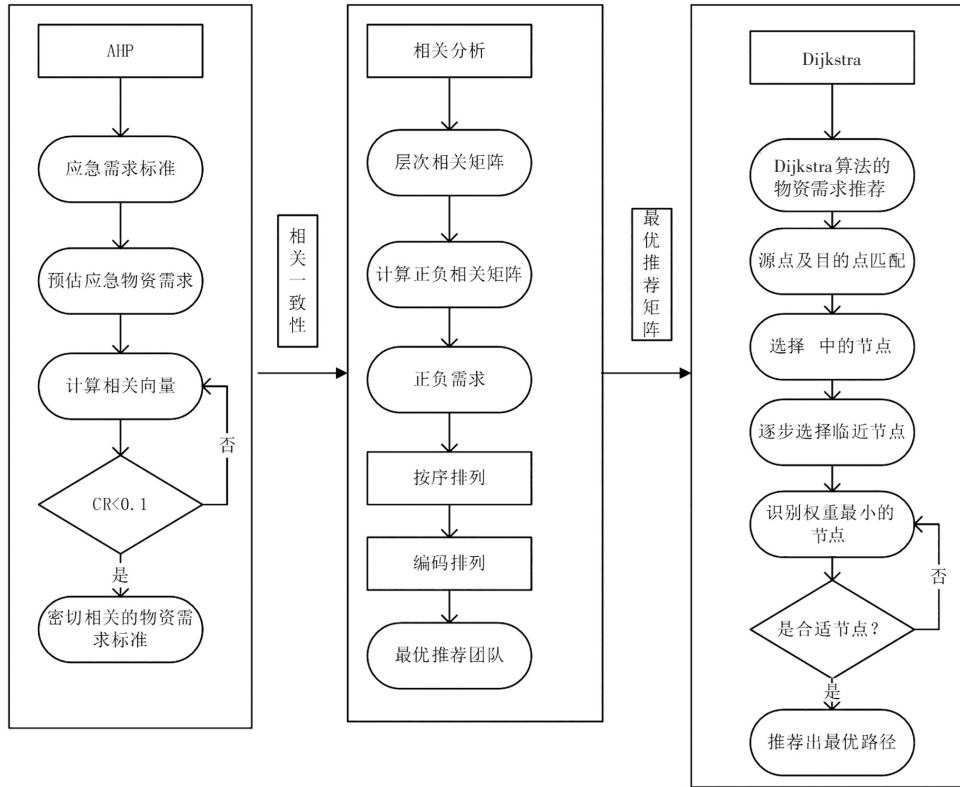


图 1 提出的模型

Fig. 1 The proposed mode

首先,使用 AHP 方法确定了最相关的事件准则,在这个阶段,经理的经验有助于确定每个标准的重要性,生成一个最重要的标准排名。这些标准的值被用作决策矩阵中的权重,它决定了最愿意准备得到支持的路线,当考虑该规划路径的坐标及其在 GIS 中的出现时,可以使用 Dijkstra 算法来计算访问路由。

考虑了 3 个主要的风险:地面人员、车辆和有人驾驶的飞机。风险成本图包含了所有风险。图 2 显示了一个基于风险成本图的路径规划示例。该地图由链接和节点组成。每个链接都有一个根据特定区域内的风险严重程度计算出来的风险成本值。风险成本值以色谱表示,红色表示高风险成本,蓝色表示低风险成本。带有实线的箭头表示从起点到目的地的距离最短的路径。带有虚线的箭头是成本效益路径。这条路径避免了高风险的成本区域,并且其风险成本远低于具有短距离的路径。工作的关键目标是建模和生成风险成本图,然后使用改进的算法生成最有效的路径。

为了评估计算每种类型的风险后的事件,为每个事件 k 引入目标安全水平,定义为 P 目标 k ,不再作为评估标准。风险水平定义为 f_k ,然后可以得到

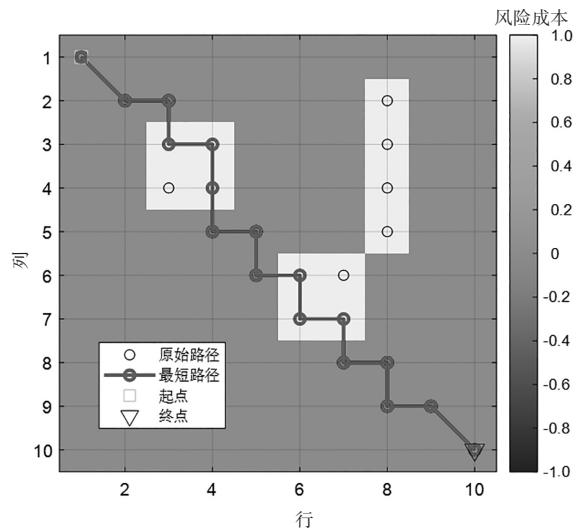


图 2 路径规划及有效路径

Fig. 2 Path planning and effective path

$$f_k = \frac{P_{\text{event}-k}}{P_{\text{target}-k}} \tag{5}$$

调整系数 w_k 用于调整所有风险,每个类别的最终风险成本表示为

$$R_k = w_k f_k = w_k \frac{P_{event-k}}{P_{target-k}} \quad (6)$$

路径规划目标采用了最短的路线,它找到了一条成本效益高的路径,使城市环境中的总体风险成本最小化。通过定义风险成本,风险成本矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} R_{total(1,1)}, R_{total(1,2)}, \dots, R_{total(1,n)} \\ \dots \\ R_{total(m,1)}, R_{total(m,2)}, \dots, R_{total(m,n)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

那么路径的总成本可以计算为

$$R^L = \sum_{(x,y) \in T_L} R^L_{total(x,y)} \quad (8)$$

2 实验验证

为了证明该方法,采用了一个危险化学品紧急事故的例子。在这种背景下,鉴于过去几十年的变化,危险化学品的事故率不断上升,以及相关的不利影响,如人类、环境和经济损失。为了干预这些事故,消防部门提供的服务经常被要求检查和隔离现场点。为了准备模型,考虑了文献[8]中提出的设备、附件和车辆的类别。当考虑到这种事件的必要标准时,可以构建一个基于 AHP 方法的决策建模示例。表 1 显示了层次结构后配对比较的过程的结果,包括判断标准,评估判断的一致性,并使用 AHP 方法综合优先级。

表 1 成对比较的结果

Tab. 1 Results of pairwise comparison

标准	设备	附件	车辆
设备	1	5	1/3
附件	1/5	1	1/7
车辆	3	7	1

为了评估一致性,计算 CR 为

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0.05 \quad (9)$$

如果 $CR < 0.1$,则认为这些判断是一致的。根据这个过程,为子标准构造成对的矩阵。表 2 显示了一般的分类。

表 2 由 AHP 方法产生的分类

Tab. 2 Classification generated by the AHP method

标准质量	次标准质量	累计质量	分类
设备 $w = 0.283$	标志材料 = 0.266	0.075	4
	化学吸收剂 = 0.734	0.207	3
附件 $w = 0.074$	摄像头 $w = 0.680$	0.053	5
	无线电广播 $w = 0.320$	0.023	6
车辆 $w = 0.643$	C3.1 0.63	0.405	1
	C3.2 0.37	0.237	2

如表 2 所示,在评估标准中,车辆的重量较高,其次是设备和附件。通过排序,可以使用 Dijkstra 的算法确定路线。因此,所示规划路径的空间协调及其发生构成了起源和目的地。在本例中,使用基 Dijkstra 的算法进行了仿真。在这个模拟中,考虑了一个包含 20 个节点的图的区

域,初始节点包含路径规划的地理协调,最终节点包含事件的地理坐标。图 3 显示了可能的访问路由,表 3 显示了使用 Dijkstra 算法的可能路由。根据表 3,最有效的路线是 {B,C,D,I,O},它以最低的成本完成任务。



图 3 规划路线

Fig. 3 Planning route

表 3 可能的访问路线

Tab. 3 Possible routes for visits

路线	代价
B, G, M, N, S	$(1+1+3+3+2+1) = 11$
B, G, H, I, O	$(1+1+5+3+2+1) = 13$
B, C, D, I, O	$(1+3+1+1+2+1) = 9$
B, A, F, L, Q, R, S	$(1+2+6+3+2+4+2+1) = 21$
B, C, H, N, S	$(1+3+4+3+2+1) = 14$

图 5 显示,总成本随着人员风险系数的增加,车辆风险系数的降低而降低,这中间有一个显著的线性关系,它产生了最低的总成本值。

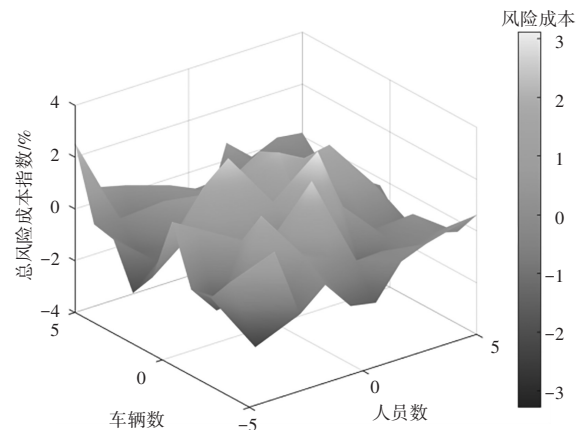


图 4 总风险成本与系数的关系

Fig. 4 Relationship between total risk cost and coefficient

图 5 比较了 3 种不同城市环境下使用改进的 Dijkstra 算法的最优路径和最短路径的总风险成本。在所有环境下,使用改进的 Dijkstra 算法的成本有效路径规划方法生成的路径都优于基于距离的方法得到的路径。改进的 Dijkstra 算法在进行路径规划时考虑了风险成本,避开了高风险成本区域,而基于距离的算法不考虑风险成本,可能会进入高风险成本区域。

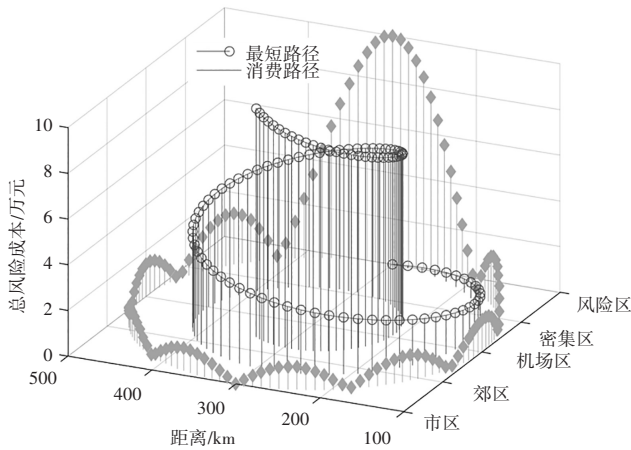


图5 利用改进的Dijkstra算法比较总风险成本

Fig. 5 Comparison of total risk cost using the improved Dijkstra algorithm

为了进一步了解风险对风险成本图和路径规划的影响,在相同的受灾区域进行了不同风险类型组合的模拟。在模拟中研究了4条路径:1)路径A考虑车辆和机场;2)路径B考虑人员和机场区域;3)路径C考虑人员和车辆;4)路径D考虑所有3种风险。图6和表4给出了4种路径的仿真结果。路径D考虑了所有3种风险类型,是最具成本效益的路径。总风险成本为855.29。路径A最差,总风险成本比路径D高79.04%。由于路径A在路径规划中没有考虑人员风险,无人机进入人口密集地区,风险成本非常高。路径B和路径C的风险成本相似;路径B的总风险成本比路径C高5.95%。为了进一步了解这些路径在风险成本方面的差异,研究了每个路径下的风险成本。结果如表5所示。以路径C为例。这条路径没有考虑与机场相关的风险。无人机路径进入机场区域,导致机场风险成本为98.60。相反,路径D规划使用了包含机场风险的风险图,从而避免了这个高风险成本区域,导致机场风险成本为0。路径A和路径B没有分别考虑人员风险和车辆风险,导致两个被忽略的风险类别的风险都很高。

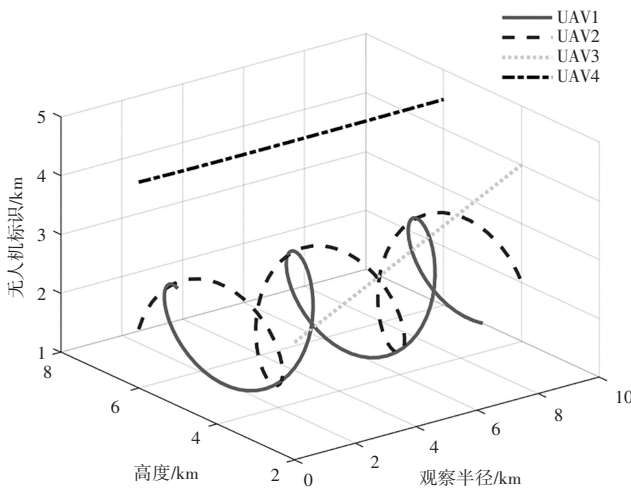


图6 考虑不同组合或风险的规划路径

Fig. 6 Planning paths considering different combinations or risks

表4 不同路径的总风险成本

Tab. 4 Total risk costs of different paths

路线	路径 A	路径 B	路径 C	路径 D
总风险成本	1 531.30	974.64	919.88	855.29

表5 不同路径的平均风险成本的比较

Tab. 5 Average risk costs for different paths

路径	风险成本	比例/%
路径 A	1440.40	45.84
路径 B	234.20	83.31
路径 C	98.60	0
路径 D	0	—

3 结论

本文提出了一种基于两种多准则方法和 Dijkstra 算法的数学计算模型。与以往的研究相比,该方法在事件支持过程中的动态方法中表现突出,提出了一种将多标准方法的鲁棒性和 Dijkstra 算法的效率相结合的安排。本研究的目的之一是将决策者的经验纳入一个模型,该模型将他们的经验与应对事件的空间动态相结合。为了实现这一点,使用了一种多标准方法,使复杂决策问题中经验值的转换能够实现。由于事件的复杂特征,AHP 寻求解决给定事件的特定值的重要性,在决策矩阵中,增加了该方法的权重,用于确定给定情况下最重要的标准,提供了一种更好的方法来选择最适合的路径。修改后的 Dijkstra 算法数学计算模型在合理的计算时间框架内寻找风险成本最低的路径,寻找相对低风险的路径,因此它可以用于时间敏感性的应急事件。

参考文献

- [1] MURPHY P, WANKHADE P, LAKOMA K. The strategic and operational landscape of emergency services in the UK[J]. International Journal of Emergency Services, 2019, 9(1):69-88.
- [2] MURPHY P, ECKERSLEY P, FERRY L. Accountability and transparency: police forces in England and Wales[J]. Public Policy and Administration, 2017, 32(3): 197-213.
- [3] MALI V, RAO M, MANTHA S S. AHP driven GIS based emergency routing in disaster management[J]. In Advances in Computing, 2023, 361(4):237-248.
- [4] MAR S S H, NE O H. Gis based fire emergency response system for Mandalay[J]. International Journal of Open Internation Technologies, 2019, 7(12): 39-53.
- [5] PANG B, TAN Q, LOW K H. A risk-based UAS traffic network model for adaptive urban airspace management[J]. In Proc AIAA Aviation Forum, 2020, 51(9):2900-2912.
- [6] PRIMATESTA S, GUGLIERI G, RIZZO A. A risk-aware path planning strategy for UAVs in urban environments[J]. J Intell Robot, 2019,95(2):629-643.
- [7] PRIMATESTA S, RIZZO A, COUR-HARBO A L. Ground risk map for unmanned aircraft in urban environments[J]. J Intell Robot, 2019(97):489-509.
- [8] WU P P Y, CAMPBELL D, MERZ T. Multi-objective four-dimensional vehicle motion planning in large dynamic environments [J]. IEEE Trans, 2021, 41(3): 621-634.

(下转第 121 页)