

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2024.01.005

# 基于拥挤度的危化品道路运输事故 应急救援路线动态优化

石云霄<sup>1</sup>, 周荣义<sup>1,2\*</sup>, 刘灿<sup>1</sup>, 姜子建<sup>1</sup>, 杨璧帆<sup>1</sup>, 郑时求<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;  
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 快速高效的应急救援对于有效降低危化品道路运输事故后果及防止次生衍生灾害的发生具有重要意义, 针对目前应急救援路线规划中对交通流实时动态性考虑不足进而影响最优路径选择的问题, 构建事故应急救援路线选择动态优化模型. 通过引入交通流中拥挤度的概念, 利用模糊理论对不同道路拥堵情况进行量化, 以救援车辆抵达事故点时间最短为目标, 对动态路网下救援车辆行驶路径进行优化建模, 并在路径求解中引入动态交叉概率和动态变异概率对遗传算法进行改进. 实例应用表明: 利用动态路径优化模型, 行驶时间较未考虑拥挤度的路径模型效率提高 25%, 说明本文提出的动态路径优化模型是科学、合理和有效的.

**关键词:** 道路拥堵; 危化品运输; 应急救援路线; 改进遗传算法; 动态路径选择

中图分类号: U492.8 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2024)01-0026-09

## Dynamic Optimization of Emergency Rescue Routes for Hazardous Chemical Road Transport Accidents Based on Congestion Degree

SHI Yunxiao<sup>1</sup>, ZHOU Rongyi<sup>1,2</sup>, LIU Can<sup>1</sup>, JIANG Zijian<sup>1</sup>, YANG Bifan<sup>1</sup>, ZHENG Shiqiu<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Coal Mine Safety Mining Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Rapid and efficient emergency rescue is of great significance for effectively reducing the consequences of hazardous chemical road transport accidents and preventing the occurrence of secondary derivative disasters. In view of the current problem of insufficient consideration of the real-time dynamics of traffic flow in the planning of emergency rescue routes, and thus affecting the optimal choice of paths, this paper constructs a dynamic optimization model for the selection of emergency rescue routes in the event of accidents. Through the introduction of the concept of congestion in traffic flow, this paper uses fuzzy theory to quantify the congestion of different roads, with the goal of the shortest arrival time of the rescue vehicle to the accident point. The rescue vehicle driving path under the dynamic road network is optimized for modeling, and the introduction of dynamic crossover probability and dynamic variability probability in the path solving to improve the genetic algorithm. Example applications show that when using the dynamic path optimization model, the driving time is 25% more efficient than the path model without considering congestion, indicating that the dynamic path optimization model proposed in this paper is scientific, reasonable and effective.

**Keywords:** road congestion; hazardous chemical transportation; emergency rescue routes; improved genetic algorithm; dynamic path selection

收稿日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074118); 湖南省教育厅重点资助项目(20A192)

\* 通信作者, E-mail: jackyzry@163.com

近年来,随着经济的高速发展,危险品需求越来越大,其道路运输亦日趋频繁.同时,随着道路交通流和交通负荷的日益加重以及部分道路交通基础设施的不完善,道路交通拥堵的情况也日益增多<sup>[1-2]</sup>.不仅客观上增加了危险品道路运输车辆发生事故的风险,也给事故发生后应急救援车辆、设备和队伍快速到达事故地点造成重大影响.而危险品道路运输事故不同于普通交通事故,很多危险品具有易燃易爆、有毒有害<sup>[3]</sup>等性质,一旦救援不及时,极易导致人员伤亡、财产损失和环境污染等重大事故后果,甚至会引发更大的次生衍生灾害.2022年12月31日,广东省茂名市一辆载重17 t的危化品槽车在包茂高速路发生侧翻,导致装载物泄漏,而救援车辆因被堵太久未能进行及时有效救援,不仅使伤者错过最佳救援时间最终不幸身亡,而且后续大量危化品挥发至空气中造成当地环境污染.因此,如何在道路路网的交通流和拥挤度不断动态变化的客观实际情况下,科学合理地选择救援车辆的最优路线,有效减少拥堵情形,使救援车辆快速到达事故地点成为需要解决的重要问题.

目前,已有大量国内外学者对危化品道路运输事故应急救援路线进行研究.韩晓宇等<sup>[4]</sup>研究了改进型Floyd加速算法在多点対多点救援路线选择中的应用,并通过实例验证该模型在解决多点対多点救援路线规划中的有效性;Xu Xiaolong等<sup>[5]</sup>提出一个基于移动云计算模式的高性能危化品车辆应急救援管理系统,实现了整体高效的救援过程;吴嘉彬<sup>[6]</sup>考虑应急救援车辆的优先通行特性,研究应急场景下信号交叉口与高快速路合流区的交通安全评价模型,并将安全因素纳入路径规划,提出动态路网下应急救援车辆路径定时协同规划方法;王晓刚等<sup>[7]</sup>采用加权求和法将多维目标聚合为单个目标,提高了救援车辆路径的搜索效率;崔丽群等<sup>[8]</sup>研究改进蚁群算法在应急救援路线选择中的应用,并根据实际情况提出相应的数学模型;Wan Shuping等<sup>[9]</sup>通过结合TSP(Traveling Salesman Problem,旅行商问题)、DEA(Data Envelopment Analysis,数据包络分析)和构建的IVHFCC(Interval-Valued Hesitant Fuzzy Constraint Cone,区间值犹豫模糊约束锥),最早提出了一个基于效率的交互动态模型来生成救援队的最优救援路线.在考虑道路拥堵的前提下,也有学者对最优路径规划进行了一些研究.苟丹丹等<sup>[10]</sup>研究并提出一种基于物联环境下拥堵道路的最优路径选择的“分布式”算法,并在模拟运行环境下,测试验证了该算法优选方案及其决策支持下的最优路径的合理性;牛锴文等<sup>[11]</sup>融合遗传算法与免疫算法,提出免疫遗传算法,对拥堵情况下的车辆路径优化问题进行求解;吴正言等<sup>[12]</sup>在考虑交通拥堵的情况下,运用模糊推理理论建立了驾驶员路径选择行为模型,并提出一种路径诱导方案的生成方法;毕仁忠<sup>[13]</sup>对几种通过分配道路通行能力来缓解交通拥堵的方法进行了梳理和评估;杨浩雄等<sup>[14]</sup>提出利用蚁群算法的交通拥堵网络模型的最短路径算法,并针对静态交通网络进行求解.基于上述研究可知,目前在危化品道路运输事故应急救援路线规划的研究中,对道路交通流实时动态性的考量较少,若忽略此方面的研究,不仅不符合实际情况,而且会影响救援路线的准确性和救援车辆抵达事故点的效率.

因此,本文在以往研究危化品运输车辆应急救援路线规划的基础上,考虑道路拥堵的不同情况和影响因素,引入交通流中拥挤度的概念,并利用模糊理论将其量化.以救援车辆抵达事故点时间最短为目标,构建动态路网下救援车辆行驶路径模型,并使用改进的遗传算法对其进行求解,在不同拥挤度的情况下为救援车辆匹配时效最高的救援路线.

## 1 道路拥挤度

### 1.1 影响因素

交通流是指汽车在道路上连续行驶形成的车流,其状态会随时间不断变化.拥挤度是直观表示道路拥堵情况的参数,主要表现在同一时段交通流量的增加和行车速度的下降<sup>[15-16]</sup>.本文将交通流量、行车速度与拥挤度建立量化关系,当拥挤度隶属度函数输出值处于 $[0.4, 1]$ 即为拥堵状态.

根据《城市道路交通管理评价指标体系》(2019年版)以及目前的相关理论研究<sup>[17-19]</sup>对交通流量和行车速度做如下定义:

#### 1) 交通流量

交通流量是指单位时间内通过道路单位截面或者节点的车辆数,在交通网络中,交通流量是不断波动的,具体大小因时间、路段的变化而变化.在一定程度上,交通流量可以反映某一路段的交通拥堵情况,体现这一路段的交通需求.交通流量大,道路供给少,车辆和道路发展不平衡,再加上混合交通,各种交通方式互相干扰,道路通行能力降低,从而道路拥挤度提高.交通流量可分为 5 级:流量小于 225 veh/h 为“特轻交通”,流量大于等于 225 veh/h 且小于 700 veh/h 为“轻交通”,流量大于等于 700 veh/h 且小于 1 400 veh/h 为“中交通”,流量大于等于 1 400 veh/h 且小于 2 100 veh/h 为“重交通”,流量大于等于 2 100 veh/h 为“特重交通”.

2) 行车速度

行车速度降低会导致车辆在道路上流速减慢、滞留时间延长、交通密度增大,使得在同一时期、同一路段上实际行驶的车辆数量大幅增加,进而降低道路通行能力,最终造成交通拥堵.行车速度可分为 5 级:速度小于 25 km/h 为“慢”,速度大于等于 25 km/h 且小于 45 km/h 为“较慢”,速度大于等于 45 km/h 且小于 75 km/h 为“适中”,速度大于等于 75 km/h 且小于 95 km/h 为“较快”,速度大于 95 km/h 为“快”.

1.2 量化

根据上述对道路拥挤度影响因素的分析,利用模糊理论<sup>[20]</sup>予以量化,并借助 MATLAB 中模糊逻辑工具箱进行数据输出,量化的主要过程可以分为 6 个步骤:(1)模糊变量的确定;(2)输入和输出空间的模糊分割;(3)隶属度函数的确定;(4)模糊控制规则的确定;(5)获取输出曲面;(6)获取拥挤度的输出值.其中,将交通流量  $Q$  和车辆速度  $v$  确定为输入模糊变量,将道路拥挤度  $R$  确定为输出模糊变量,三者关系如图 1 所示.交通流量  $Q$  的模糊集为{特轻交通,轻交通,中交通,重交通,特重交通},车辆速度  $v$  的模糊集为{慢,较慢,适中,较快,快},道路拥挤度  $R$  的模糊集为{非常畅通,基本畅通,轻度拥堵,中度拥堵,重度拥堵},根据评价标准确定它们的隶属度函数(如图 2、图 3、图 4 所示)以及 25 条模糊控制状态规则(如表 1 所示).

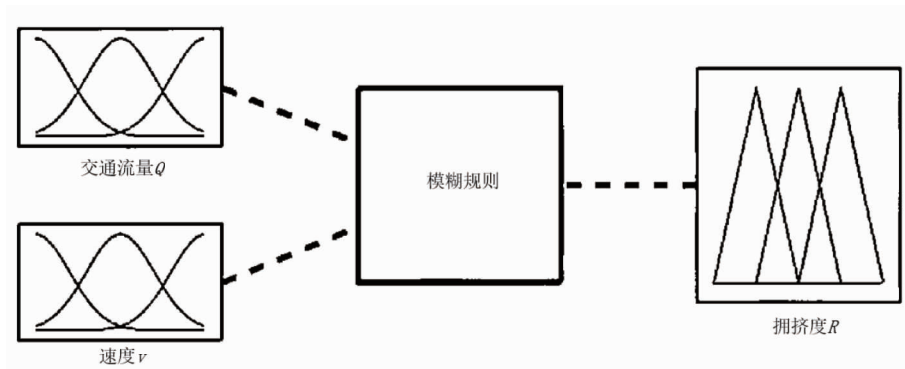


图 1 交通流量、车辆速度与拥挤度量化的关系

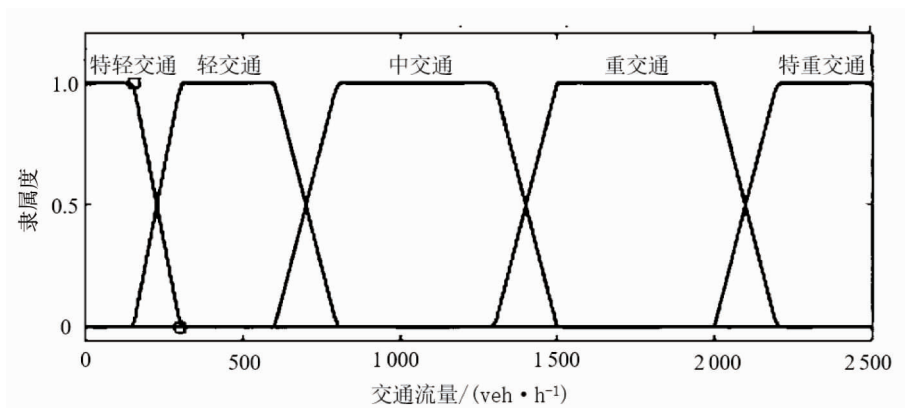


图 2 交通流量隶属度函数

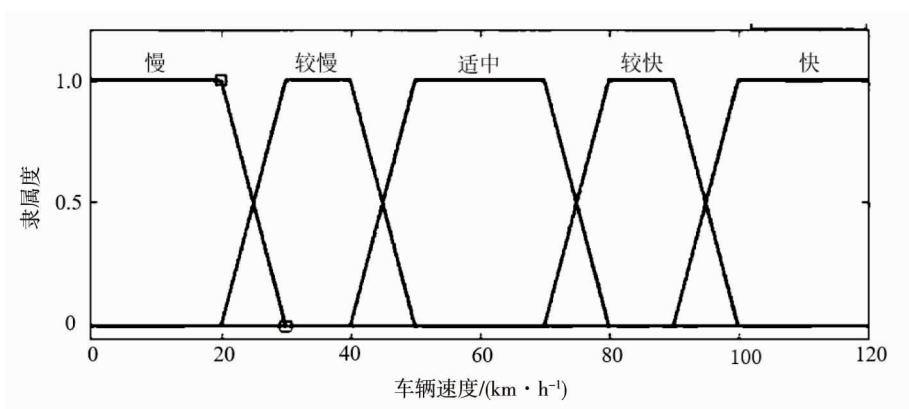


图 3 车辆速度隶属度函数

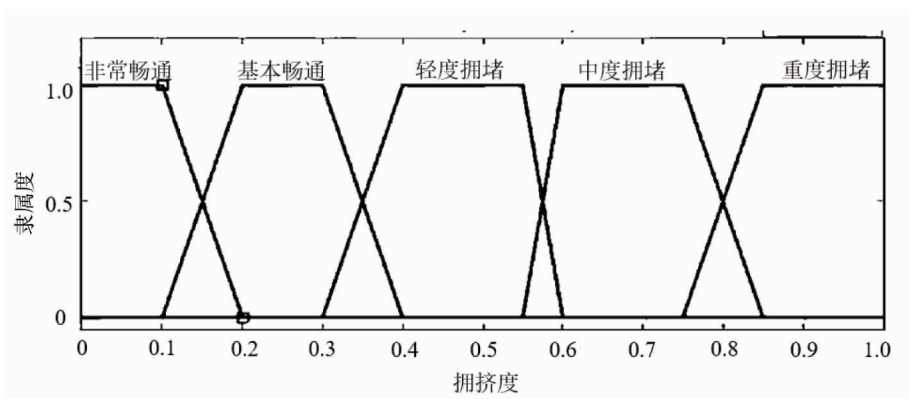


图 4 拥挤度隶属度函数

表 1 模糊控制状态规则

速度	交通流量				
	特轻交通	轻交通	中交通	重交通	特重交通
慢	轻度拥堵	轻度拥堵	中度拥堵	重度拥堵	重度拥堵
较慢	轻度拥堵	基本畅通	中度拥堵	重度拥堵	重度拥堵
适中	基本畅通	基本畅通	轻度拥堵	中度拥堵	重度拥堵
较快	非常畅通	基本畅通	轻度拥堵	轻度拥堵	中度拥堵
快	非常畅通	非常畅通	基本畅通	基本畅通	中度拥堵

根据上述数据,便可得出基于模糊控制器的拥挤度输出曲面(图 5),拥挤度越接近 1 时道路越拥堵,越接近 0 时道路越畅通.

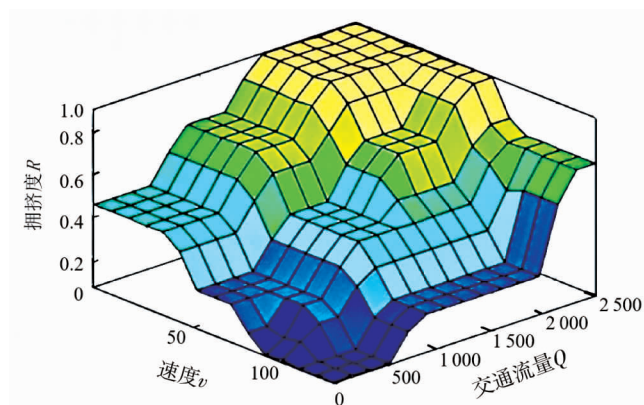


图 5 拥挤度输出曲面

## 2 模型构建

### 2.1 问题描述

考虑道路拥堵条件下的危化品运输车辆应急救援路线优化问题可描述为:假如不考虑其他因素(如应急救援车辆和人员的数量、装备是否足够和合理等情形下),某危化品运输车辆在途中遭遇事故,需救援中心对其提供救援服务,在道路交通流实时动态变化的情况下为救援车辆优化一条抵达事故点时间最短的救援路线.

### 2.2 模型构建

为将道路交叉路口以及交叉路口之间的路段在路径规划中表达出来,引入图论<sup>[21]</sup>的概念,将道路路网模型抽象为简单的路网拓扑结构,如图6所示.路网的有向赋权图用  $G = (E, S, R)$  来表示,其中  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  为路网节点的集合,  $e_1$  表示起点,  $e_2, \dots, e_n$  表示各网络节点;  $S_{ij}$  表示区间路段  $(e_i, e_j)$  的长度(其中  $i \neq j$ );  $S$  表示从起点到终点的最短距离.

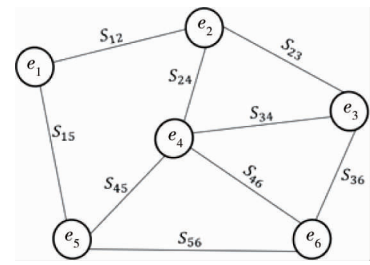


图6 道路网络拓扑结构

动态路网模型分为畅通状态和拥堵状态,根据道路拥挤度的时变性和拥挤度的隶属度函数(图4),设定畅通与拥堵状态的拥挤度临界值  $R_c = 0.4$ ,当拥挤度在  $[0, 0.4)$  时,为畅通状态;当拥挤度在  $[0.4, 1.0]$  时,为拥堵状态.救援车辆行驶路径流程如图7所示.

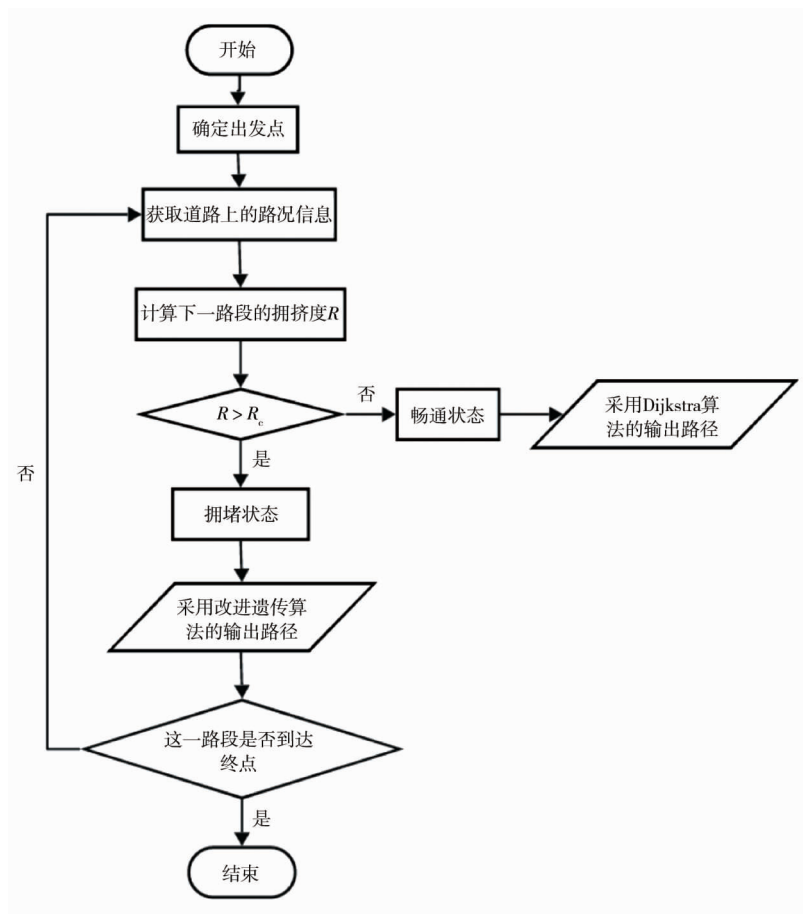


图7 救援车辆行驶路径流程

以抵达事故点时间最短为路径优化目标,故此动态路网模型可用式(1)~式(4)表示.

$$G = (E, S, R); \tag{1}$$

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}; \tag{2}$$

$$t_{ij} = \frac{S_{ij}}{v_{ij}}; \quad (3)$$

$$T = \sum t_{ij}. \quad (4)$$

式中: $v_{ij}$ 为车辆在区间路段( $e_i, e_j$ )的速度; $t_{ij}$ 为车辆通过区间路段( $e_i, e_j$ )所需的时间; $T$ 为车辆从起点到终点所需的总时间.

### 3 求解算法

#### 3.1 算法设计

由于动态路径优化是典型的 NP (Non-Deterministic Polynomial, 非确定多项式) 问题和组合优化问题, 所以在对于路径求解的问题上要求算法具有高效性和动态性. 在以往求解最优路径的问题中最常用的算法是 Dijkstra 算法, 但该算法只适用于静态路网, 不适用在复杂多变的动态路网中求全局最优解. 而遗传算法不受搜索空间的限制性假设约束, 且具有良好的容错能力和全局择优能力, 能够保证在较大规模的解空间中搜索到全局最优解, 并且其具有的隐含并行性和鲁棒性能够减少问题的求解时间, 提高算法的求解效率, 但传统遗传算法缺乏对路网动态性的考量, 因此, 在动态路径计算的选择上采用遗传算法进行求解时, 针对目前遗传算法所存在的问题进行改进, 引入动态交叉概率和动态变异概率, 以救援时间最短为目标, 建立考虑道路拥堵状态下的动态最优模型的遗传算法.

#### 3.2 算法优化

##### 3.2.1 动态交叉概率

交叉操作作用于组合出新的个体, 在解空间中进行有效搜索, 同时降低对有效模式的破坏概率. 交叉概率用于控制交叉操作的频率, 本文引入动态交叉概率<sup>[22]</sup>, 其计算式为

$$P_c = \begin{cases} P_{cmax} - (P_{cmax} - P_{cmin}) \left( \frac{h}{H} + \frac{f_i - \bar{f}}{2(f_{max} - \bar{f})} \right), & f_i \geq \bar{f}; \\ P_{cmax}, & f_i < \bar{f}. \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{cmax} = \begin{cases} 0.9, & h \leq \frac{H}{4}; \\ 0.8, & \frac{H}{4} < h \leq \frac{3H}{4}; \\ 0.7, & \frac{3H}{4} < h \leq H. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_c$ 为种群中个体交叉操作的概率; $H$ 为最大迭代次数; $h$ 为当前迭代次数; $P_{cmax}$ 为交叉概率的上限, 与  $H$  和  $h$  有关; $P_{cmin}$ 为交叉概率的下限; $f_i$ 为适应度的函数值; $f_{max}$ 为当前种群中最大的适应度函数值; $\bar{f}$ 为适应度函数值的平均值.

##### 3.2.2 动态变异概率

交叉概率是加大种群多样性的重要因素, 为降低算法陷入局部最优解的可能性, 本文引入动态变异概率<sup>[23]</sup>, 动态变异概率的计算式为

$$P_m = \begin{cases} P_{mmin} - (P_{mmax} - P_{mmin}) \left( \frac{h}{H} + \frac{f_i - \bar{f}}{2(f_{max} - \bar{f})} \right), & f_i \geq \bar{f}; \\ P_{mmin}, & f_i < \bar{f}. \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{\text{mmax}} = \begin{cases} 0.001, h \leq \frac{H}{4}; \\ 0.002, \frac{H}{4} < h \leq \frac{3H}{4}; \\ 0.003, \frac{3H}{4} < h \leq H. \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_m$  为给定的变异概率;  $P_{\text{mmax}}$  为变异概率的上限;  $P_{\text{mmin}}$  为变异概率的下限, 与  $H$  和  $h$  有关.

### 3.3 算法步骤

步骤一: 编码和初始化. 编码方法选用符号编码法, 初始种群的构建采用完全随机方式完成.

步骤二: 适应度的计算. 根据适应度函数计算所有个体的适应度值, 通过适当的选择策略选择出参与遗传进化的个体.

步骤三: 交叉操作. 种群中的交叉操作采用动态交叉概率进行计算.

步骤四: 变异操作. 种群中的变异操作采用动态变异概率进行计算.

步骤五: 结果输出. 对当前迭代次数与最大迭代次数进行比较, 若当前迭代次数大于最大迭代次数, 则输出结果; 若不是, 则返回步骤二继续进行算法.

## 4 算例

### 4.1 算例描述

本算例选取在以湖南省某应急救援队为中心的周边道路上, 对道路中主要交叉口进行节点标注, 将地图抽象为网络结构, 如图 8 所示 (各节点间的数据为路段长度, 单位: m). 假设在节点 1 发生事故, 需从该应急救援队 (节点 16) 派发救援车辆前往救援, 本算例对救援路线中路段交通流的不同状态分情况讨论.

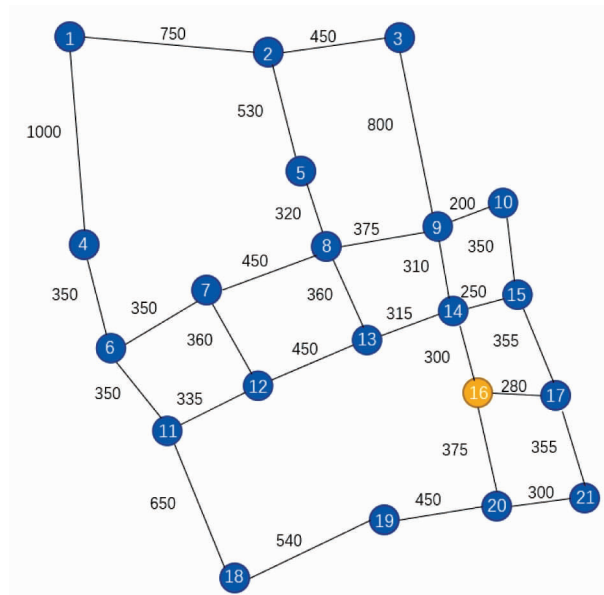


图 8 道路网络结构

### 4.2 算例模拟

情形 1: 不考虑路网的动态性. 利用 Dijkstra 算法计算节点 16 到节点 1 的最优路径, 得出该情况下最优路径为 16→14→13→8→5→2→1. 算法运算结果如图 9 所示.

情形 2: 考虑路网的动态性. 在出发点 (节点 16) 处通过卫星通讯和射频识别等先进技术获取各路段的交通流量和车辆速度, 经模糊控制器量化出节点 16 至节点 1 各路段拥挤度都属于  $[0, 0.4)$ , 按畅通状态下 Dijkstra 算法给出的最优行驶路径为 16→14→13→8→5→2→1; 当救援车辆行驶到节点 8 时, 此时节点 8 至节

点 5 路段的拥挤度为 0.65,属于 $[0.4, 1]$ ,处于中度拥堵状态,故使用改进的遗传算法进行动态最优路径计算,此时给出的路径优化结果为 8→7→6→4→1.算法运算结果如图 10 所示.其中,改进遗传算法中最大迭代次数为 200,种群规模为 100,交叉概率为 0.90,交叉概率下限为 0.70,变异概率为 0.003,变异概率下限为 0.001.

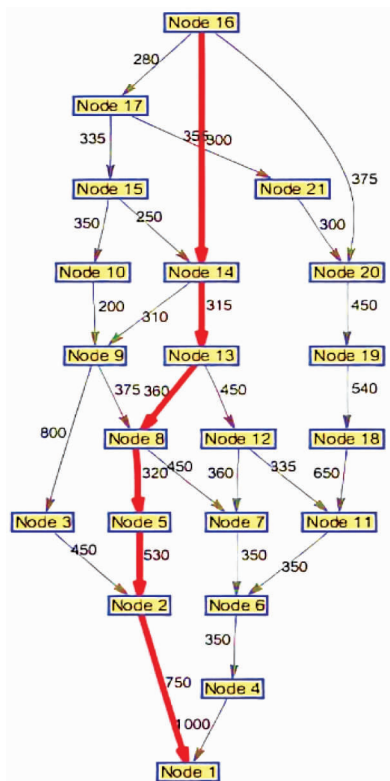


图 9 静态模型最优路径

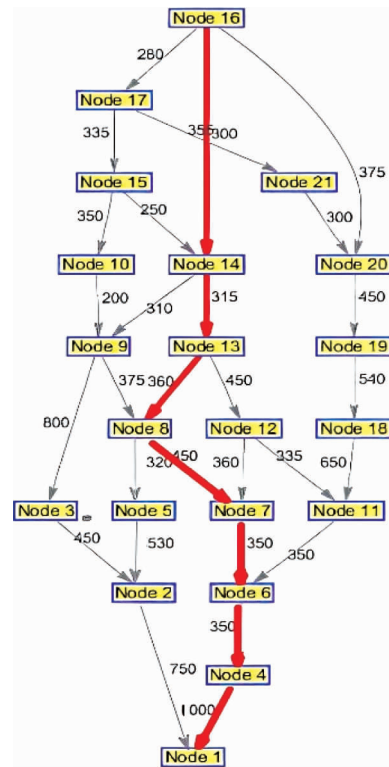


图 10 动态模型最优路径

### 4.3 结果分析

#### 4.3.1 路径优化分析

不考虑路网的动态性情况下,利用 Dijkstra 算法进行路径规划时,救援路线长度为 2 575 m,此时由高德地图开发的交通先知系统和百度地图开发的智慧交通对拥堵情况的预测,从节点 8 至节点 5 因拥堵造成的等待时常为 4 min,全程(节点 16 到节点 1)共需时常为 12 min;考虑路网的动态性情况下,使用改进遗传算法进行动态路径规划后,救援行驶路线长度为 3 125 m,但从节点 16 到达节点 1 的时长只有 9 min,时间上效率提高了 25%.

#### 4.3.2 算法优化分析

在算例情形 2 中使用改进的遗传算法,得到算例的运行结果进化迭代曲线如图 11 所示,由图 11 可知,在最大迭代次数为 200 的情况下,该运算结果在迭代 79 次后趋于稳定,故该算法收敛,该模型有效.

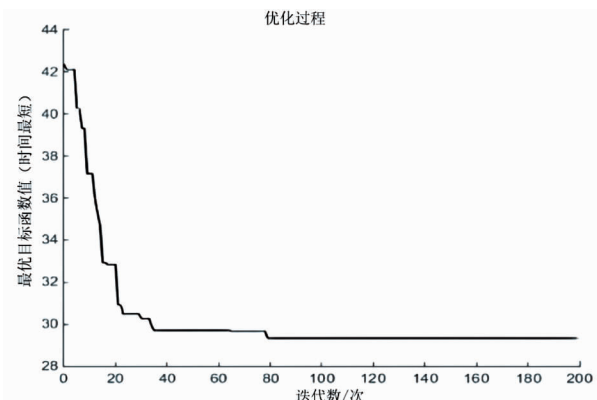


图 11 改进遗传算法迭代曲线



## 5 结论

1) 在危化品道路运输事故应急救援路线的研究中考虑交通流实时动态,以量化拥挤度为基础建立动态模型更贴近于实际情况,为危化品道路运输事故应急车辆救援路线的优化提供了新思路。

2) 引入动态交叉概率和动态变异概率优化救援路径的求解算法,以救援时间最短为优化目标,保证了救援的及时性。

### 参考文献:

- [1] 刘岩松.城市道路交通拥堵及防治策略[J].建设科技,2017(5):76.
- [2] 白哲.城市道路交通拥堵多视角分析及应对措施[J].门窗,2017(1):190.
- [3] 郑时求,周荣义,杨璧帆,等.危化品槽罐车运输事故关键致因及传递路径研究[J].中国安全科学学报,2023,33(4):172-178.
- [4] 韩晓宇,卢昕玮,吴群琪.高速公路紧急救援路线选择路径模型[J].长安大学学报(自然科学版),2013,33(5):86-92.
- [5] XU X L, ZHANG L, TROVATI M, et al. PERMS: an efficient rescue route planning system in disasters[J]. Applied Soft Computing Journal, 2021, 111: 107667.
- [6] 吴嘉彬.基于路网节点安全评价的应急救援车辆路径规划方法研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- [7] 王晓刚,韩印.救援车辆多目标实时路径规划模型[J].物流科技,2019,42(9):15-17.
- [8] 崔丽群,张明杰,许堃.基于改进蚁群算法的应急救援路线选择[J].计算机工程与应用,2014,50(23):256-260.
- [9] WAN S P, CHEN Z H, DONG J Y. An efficiency-based interactive dynamic technique with interval-valued hesitant fuzzy constraint cone for rescue route planning[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 231: 120648.
- [10] 苟丹丹,张开生,王放.物联环境下拥堵道路汽车最优通行路径选择[J].单片机与嵌入式系统应用,2022,22(12):32-36.
- [11] 牛锴文,初良勇,闫淼,等.考虑拥堵因素的配送车辆路径优化模型与算法研究[J].物流研究,2022(3):75-85.
- [12] 吴正言,莫时旭.交通拥堵情况下路径诱导方案的生成方法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(1):5-8.
- [13] 毕仁忠.城市交通拥挤与道路通行能力的分配[J].国外公路,1997,17(5):1-5.
- [14] 杨浩雄,王丹,张敬蕤.基于蚁群算法的拥堵交通最短路径研究[J].计算机仿真,2015,32(3):186-191.
- [15] 公维勇.基于粗糙集的城市道路拥挤度模糊评价方法[J].黑龙江交通科技,2017,40(10):216-217.
- [16] 施云惠,熊梦伟,孙艳丰.城市轨道交通线网拥挤度指标体系研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(11):2290-2298.
- [17] 林瑜,杨晓光,马莹莹.城市道路间断交通流阻塞量化方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2007(3):336-340.
- [18] 郝媛,徐天东,孙立军.基于模糊的城市快速路交通流状态判别[J].公路工程,2008(2):94-99.
- [19] 杨兆升,张茂雷.基于模糊综合评判的道路交通状态分析模型[J].公路交通科技,2010,27(9):121-126.
- [20] 关桂霞,赵剡,刘莹青.一种基于模糊理论的最佳路径选择方法[J].华北工学院学报,2001,22(1):75-78.
- [21] 林培群,徐建闽.基于图论的路网交通检测器之布点[J].控制理论与应用,2010,27(12):1605-1611.
- [22] 王泽鹏.基于动态遗传算法的共享配送模式研究[J].运筹与管理,2021,30(12):115-122.
- [23] ZHANG T J, CAO Y, MU X W. Route optimization of DGT based on improved genetic algorithm[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,536/537: 845-848.