

考虑配送紧迫度与公平的应急车辆调度模型

龙科军¹,刘嘉¹,高志波¹,陈夙乾²,张仲根^{1,3*}

(1.长沙理工大学 智能道路与车路协同湖南省重点实验室,湖南长沙 410114;2.湖南省交通科学研究院 智慧交通事业部,湖南长沙 410029;3.同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海市 201804)

摘要:突发事件下的应急车辆调度,既要优先考虑需求紧迫度高的关键节点,又要避免其他节点配送延时过大产生次生影响。基于此,该文建立了考虑需求紧迫度与配送延时公平的应急车辆调度模型。首先,采用熵权-TOPSIS法计算节点需求紧迫度,并引入配送延时均衡指标避免节点之间的配送延时差异过大;其次,以配送的总时间、总成本和配送延时均衡度为多目标函数,配送中心库存量、路径连续性等为约束条件,建立优化模型;最后,通过K-Means算法和CW节约算法划分子路网,结合可变邻域局部搜索算法改进蚁群算法。结果表明:相比于基本模型,所提模型下,需求紧迫度高的节点的平均配送延时和最大配送延时分别降低25.26%、22.98%,配送延时方差增加34.30%;相比于仅考虑需求紧迫度的模型,所提模型下,需求紧迫度高节点的平均配送延时、最大配送延时和配送延时方差分别降低10.79%、20.26%和40.57%。这表明所提模型能更好地兼顾关键节点的优先和普通节点的公平。

关键词:智慧交通;应急车辆调度;配送延时均衡;需求紧迫度;改进蚁群算法

中图分类号:U491

文献标志码:A

Emergency Vehicle Dispatching Model Considering Demand Urgency and Delivery Fairness

LONG Kejun¹, LIU Jia¹, GAO Zhibo¹, CHEN Suqian², ZHANG Zhonggen^{1,3*}

(1.Hunan Key Laboratory of Smart Roadway and Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2.Smart Transportation Division, Hunan Academy of Transportation Sciences, Changsha, Hunan 410029, China; 3.Experimental Teaching Center of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In emergency vehicle dispatching after unexpected events, it is crucial to prioritize critical nodes with high demand urgency while minimizing excessive delivery delays at other nodes to prevent secondary impacts. On this basis, this study developed an emergency vehicle dispatching model that considered demand urgency and delivery delay fairness. Firstly, the entropy weight-TOPSIS method was used to calculate the demand urgency for each node, and a delivery delay balance index was introduced to minimize disparities in delivery delays between nodes. Secondly, a multi-objective optimization model was established with total delivery time, overall cost, and delivery delay balance as objectives, while considering constraints such as inventory levels at distribution centers and route continuity. Finally, the K-Means algorithm and the Clarke-Wright (CW) saving algorithm were employed to partition the sub-networks, and an improved ant colony algorithm incorporating a variable neighborhood local search was applied. The results indicate that compared with the basic model, the proposed model reduces the average and maximum delivery delays at nodes with high demand urgency by 25.26% and 22.98%, respectively, while increasing the delivery delay variance by 34.30%. Compared with a model considering only demand urgency, the proposed model decreases the average

收稿日期:2024-10-29(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52172313,52402371);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2023JJ30033,2024JJ6037);长沙市科技重大专项(编号:kh2301004);长沙理工大学智能道路与车路协同湖南省重点实验室开放基金资助项目(编号:kfj230802)

作者简介:龙科军,男,博士,教授.E-mail:Longkejun@csust.edu.cn

*通信作者:张仲根,男,博士研究生.E-mail:zhangzhonggen@tongji.edu.cn

delivery delay, maximum delivery delay, and delivery delay variance at nodes with high demand urgency by 10.79%, 20.26%, and 40.57%, respectively. These findings demonstrate that the proposed model effectively balances priority for critical nodes with fairness for standard nodes.

Keywords: smart transportation; emergency vehicle dispatching; delivery delay balance; demand urgency; improved ant colony algorithm

0 引言

应急事件发生时,受应急车辆的数量和配送能力的约束,无法及时满足所有受灾区域的需求,亟须合理优化车辆调度方案,避免损失加重^[1]。因此,配送能力约束下的应急车辆调度优化问题成为重要研究课题。应急车辆调度方案的优劣取决于全体受灾节点的配送时效性^[2],既要保证需求紧迫度高的关键节点能优先获得应急物资,又要减少其他节点的配送延时以避免受灾程度恶化。因此,如何兼顾优先和公平是应急车辆调度的难题。

国内外学者针对节点的应急物资需求紧迫度的车辆调度问题开展了广泛研究^[3-4],Silva等^[5]评估节点优先级,应用排队论得到应急车辆救援路径;Yang等^[6]依据救援政策确定优先级,以救援需求满足率最大、成本最低为目标,构建应急车辆调度优化模型;赵建有等^[7]提出医疗物资需求紧迫度评价方法,以总配送费用最少为目标,建立考虑需求紧迫度的配送路径优化模型;Zheng等^[8]提出考虑需求紧迫度的路径优化模型能保证受灾严重的节点优先救援,但会导致配送路径末端节点的配送延时过长。

受灾节点的损失增长呈线性,配送延时过长将导致受灾严重,同时会加剧受灾群众的不满情绪,甚至引发群体不理智行为。一些学者将配送延时等公平性指标引入目标函数中,对多目标下应急路径优化问题展开研究。Balcik等^[9]以公平分配资源和降低运输成本为目标,优化物资配送时间表,解决末端配送难题;Cook等^[10]以选择需求满足率作为配送公平性指标,并将其纳入应急车辆调度模型的目标函数;Sun等^[11]提出以节点伤亡加权总和最小为公平性指标,结合系统总成本与未满足救援需求的惩罚成本,建立应急车辆调度模型;王旭坪等^[12]考虑受灾群众的心理因素,建立了公众心理风险感知与物资未满足度最小的双目标规划模型;郝正博等^[13]考虑基于车道数量、路段长度等静态属性与拥堵延迟指数、平

均车速等动态属性对应急车辆救援路径进行优化;Ghasemi等^[14]提出一种人道主义物流救援路径规划方法,以出行成本、需求满足率和路径疏散率共同作为多目标函数。

综上,现有研究主要侧重于应急车辆调度优化中关键节点的优先配送问题。虽然部分学者将节点的物资需求满足率引入优化目标中,构建多目标优化模型,但未考虑节点的配送延时均衡,导致配送路径末端节点配送延时过大的问题。本文将节点需求紧迫度作为影响因子纳入模型中,引入配送延时均衡指标,与总配送时间、总成本一同作为优化目标,构建多目标优化模型,并设计一种改进的蚁群算法提高求解速度和质量。最后,应用实际案例验证模型的有效性。

1 研究问题

1.1 问题描述

在突发事件发生时,需求节点的应急物资储备往往有限,难以满足节点需求。同时,应急车辆数量和配送能力通常受到限制,使得配送中心无法直接对所有需求节点进行同时配送。为解决这一问题,本文将由 H 个配送中心和 D 个需求节点构成的二级配送网络合理划分为多个子路网,每个子路网包含1个配送节点和若干需求节点。通过建立考虑配送紧迫度与公平的应急车辆调度模型,以期合理分配 K 辆车的配送次序和物资装载量,实现总配送时间最小、优先满足需求紧迫度高节点的物资需求,并确保所有节点的配送延时尽可能均衡。建立模型前,先做以下假设:

- (1) 配送车辆为同一型号,装载容量为 A ,速度为 V 。
- (2) 每个需求节点的配送次数不超过1次。
- (3) 应急物资配送中心不存在物资转运。
- (4) 各种应急物资统一计算为重量,为单种物资配送。

1.2 需求紧迫度

应急事件发生时,需求节点的应急物资往往供不应求,亟须评估各节点对物资的需求程度并依此优先配送^[15]。本文依据不同应急事件特点,定义目标层、准则层和指标层^[16],采用熵权-TOPSIS法计算节点需求紧迫度 D_i 。

首先,熵权法计算指标权重:将指标数据采用0~1标准化处理,得到标准化矩阵并计算指标比重 p_{ij} 和信息熵冗余 d_j ,得到指标权重 w_j ,如式(1)所示:

$$d_j = 1 + \frac{\sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}}{\ln m} \quad (1)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (2)$$

其次,通过TOPSIS法评价节点需求紧迫度:将标准化矩阵与权重 w_j 相乘,得到紧迫度矩阵 B ,通过正、负理想解 B^+ 与 B^- ,点与最优、劣解的距离 d_i^+ 、 d_i^- 计算需求点紧迫度 D_i 。以紧迫度最小的节点 D_{\min} 为基准,计算相对需求紧迫度 λ_i ,并作为影响因子纳入优化模型中。具体公式如式(3)~(5)所示:

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (B_{ij} - B_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (B_{ij} - B_j^-)^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$D_j = \frac{d_i^+}{d_i^+ + d_i^-} \quad (4)$$

$$\lambda_i = \frac{D_i}{D_{\min}} \quad (5)$$

1.3 配送延时均衡

配送延时的增大会导致受灾程度加重,也会使受灾者感到不公平,进而引发焦虑情绪^[17]。引入配送均衡延伸 ρ 作为多目标函数之一,避免因节点配送延时过大和差异引发不良影响。

配送延时 T_i 为实际救援时间 T_{ik}^h 和理论最快配送时间 T_i^{\min} 的差值。 T_i 越小,受灾程度越小,受灾群体心理越稳定。为确保需求紧迫度较高的节点配送延时最小化,将需求紧迫度作为加权因子 λ_i 纳入配送延时指标 T_1 中,得到加权配送延时 T_1' ,如式(6)所示:

$$T_1' = \lambda_i (T_{ik}^h - T_i^{\min}) \quad (6)$$

应急车辆救援时,既要确保高紧迫度节点配送延时的最小化,又要尽可能减少低紧迫度节点的配

送延时,保证节点之间的公平性。因此,提出配送延时均衡指标 ρ , ρ 越小,节点间的配送延时差异越小,从而配送更公平, ρ 值计算如式(7)所示:

$$\rho = \sqrt{\sum_{i=1}^D [\lambda_i (T_i' - T_i^{\min})]^2} \quad (7)$$

2 考虑紧迫度与配送公平的应急车辆调度模型

2.1 参数定义

H 为配送中心集合; D 为需求节点集合; K 为运输车辆集合; \tilde{Q}_h 为配送中心 h 的应急物资模糊供应量, $\tilde{Q}_h = [\tilde{q}_{h1}, \tilde{q}_{h2}, \tilde{q}_{h3}]$, \tilde{Q}_h 对应的去模糊量为 Q_h ; R^h 为配送中心 h 的配送路径集合; d^h 为配送中心 h 负责的需求节点集合; d_r^h 为配送中心 h 的配送路径 r 上的需求节点集合; λ_i 为节点的需求紧迫度; F_0 为物资运输成本; F_v 为车辆使用成本; A 为车辆容量限制; V 为车辆行驶速度; s_{ij} 、 t_{ij} 为需求节点 i 、 j 间的距离和行驶时间; T_{ik}^h 为配送中心 h 的车辆到达需求节点 i 的时间; T_i^{\min} 为需求节点 i 的理论最快配送时间; T_u 、 T_d 为车辆 k 装载、卸载物资所需要的时间; S_u 、 S_d 为车辆 k 装载、卸载物资需要的费用; T_{uh}^k 、 T_{dh}^k 为车辆 k 在物资配送节点 i 的物资装载、卸载时间; S_{uh}^k 、 S_{dh}^k 为车辆 k 在物资配送节点 i 的物资装载、卸载费用; y_k^h 为配送中心 h 的车辆 k 启用,取值为1,否则为0; q_{ijk}^h 为配送中心 h 的车辆 k 从需求点 i 到 j 配送的实际物资数量; x_{ijk}^h 为配送中心 h 的车辆 k 从需求点 i 到 j 进行服务为1,否则为0; T_i' 为考虑需求影响因子的节点配送延时; ρ 为节点间配送延时均衡度; ϑ 为置信水平; p_i' 为节点的实际模糊需求量。

2.2 模型建立

本研究属于多人多目标旅行商问题,将节点需求紧迫度作为影响因子纳入应急车辆调度模型中,以总配送时间、总配送成本和配送延时均衡最小为目标函数,考虑配送中心库存数量、车辆运载能力和路径连续性等约束条件下,建立应急车辆调度模型。

主目标函数为:

$$\min Z = \min \left(w_1 \frac{z_1 - \min z_1}{\max z_1 - \min z_1} + w_2 \frac{z_2 - \min z_2}{\max z_2 - \min z_2} + w_3 \frac{z_3 - \min z_3}{\max z_3 - \min z_3} \right) \quad (8)$$

子目标函数为:

$$\min Z_1 = \sum_{h \in H} \sum_{k \in K} \sum_{i \in D} \sum_{j \in D} (\lambda_i t_{ij} x_{ijk}^h) + \sum_{h \in H} \sum_{k \in K} \lambda_i T_{uh}^k + \sum_{i \in D} \sum_{j \in D} (\lambda_i T_{di}^k) \quad (9)$$

$$\min Z_2 = \sum_{h \in H} \sum_{k \in K} \sum_{i \in D} \sum_{j \in D} (\lambda_i F_0 D_{ij} x_{ijk}^h) + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \lambda_i F_v y_k^h + \sum_{h \in H} \sum_{k \in K} \lambda_i S_{uh}^k + \sum_{i \in D} \sum_{k \in K} \lambda_i S_{di}^k \quad (10)$$

$$\min Z_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^D [\lambda_i (T_{ik}^h - T_i^{\min})]^2} \quad (11)$$

优化模型包括3个子目标,选择线性加权法将多目标问题转换为单目标问题。式(9)为总配送时间最短,包括运输、装载和卸载物资;式(10)为总配送成本最小,包括总配送费用、车辆固定成本、物资装载和卸载成本;式(11)为配送延时均衡度最小。

模型主要约束为:

$$T_{uh}^k = \sum_{k \in K} \sum_{i \in d^h} \sum_{i \in d^h} \left(\frac{T_u q_{ijk}^h}{A} \right), \forall h \in H \quad (12)$$

$$T_{dj}^k = \sum_{k \in K} \sum_{i \in d^h} \left(\frac{T_u q_{ijk}^h}{A} \right), \forall h \in H, j \in d^h \quad (13)$$

$$S_{uh}^k = \sum_{k \in K} \sum_{i \in d^h} \sum_{i \in d^h} \left(\frac{S_u q_{ijk}^h}{A} \right), \forall h \in H \quad (14)$$

$$S_{dj}^k = \sum_{k \in K} \sum_{i \in d^h} \left(\frac{S_u q_{ijk}^h}{A} \right), \forall h \in H, j \in d^h \quad (15)$$

$$T_{jk}^h = T_{ik}^h + \sum_{k \in K} \sum_{i \in d^h} \sum_{j \in d^h} \left(\frac{T_u q_{ijk}^h}{A} \right) + \quad (16)$$

$$x_{ijk}^h (t_{ij} + T_{di}^k), \forall h \in H, i \in d^h \quad (17)$$

$$x_{ijk}^h = 0, \forall i, j \in H$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in d^h} q_{ijk}^h \leq \tilde{Q}_h, \forall h \in H, i \in d^h \quad (18)$$

$$q_{ijk}^h \leq p_i^j, \forall i, j \in D, k \in K, h \in H \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in d^h} q_{ijk}^h \leq A, \forall h \in H, i \in D, k \in K \quad (20)$$

$$\sum_{i \in D} x_{ijk}^h = \sum_{j \in D} x_{ijk}^h, \forall h \in H, i \in D, k \in K \quad (21)$$

$$\sum_{i \in D} x_{ijk}^h = 1, \forall h \in H, j \in D, k \in K \quad (22)$$

$$\sum_{i \in D} x_{ijk}^h \leq y_k^h, \forall h \in H, k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{i \in D} x_{ijk}^h \leq 1, \forall k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{i \in (D \cup H)} x_{ijk}^h - \sum_{i \in (D \cup H)} x_{ijk}^h = 0, \forall k \in K, i \in D, h \in H \quad (25)$$

$$y_k^h = \{0, 1\}, \forall k \in K, h \in H \quad (26)$$

$$q_{ijk}^h \geq 0, \forall k \in K, i \in D, h \in H \quad (27)$$

$$x_{ijk}^h = \{0, 1\}, \forall i, j \in D, k \in K, h \in H \quad (28)$$

式(12)~(15)为物资装卸时间和费用;式(16)为节点 h 的物资实际到达时间;式(17)为确保配送中心间不会出现物资转运;式(18)为确保运出物资少于库存;式(19)为分配给需求点的物资少于需求;式(20)为不超过车辆的装载能力;式(21)和(22)为保证配送路径的连续性和节点不重复出现在路径中;式(23)与(24)规定配送路径从配送中心开始;式(25)为车辆返回至出发地配送中心;式(26)~(28)为变量取值范围。

突发事件发生时节点的应急物资供应和需求具有强不确定性,区间数学和三角模糊数学能够灵活、准确地表达不确定性^[18],本文引入其来描述不确定性,对模糊参数进行确定性转换。此方法能够灵活且直接表达不确定性,减少对数据的依赖,计算效率高。在物资需求水平 γ 与物资供应置信水平 ϑ 下,约束条件(18)与(19)转换得到式(29)和(30):

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in d^h} q_{ijk}^h \leq Q_h = \begin{cases} (1 - 2\vartheta)\tilde{q}_{h1} + 2\vartheta\tilde{q}_{h2}, & \vartheta \in (0.5, 1] \\ 2(1 - \vartheta)\tilde{q}_{h2} + (2\vartheta - 1)\tilde{q}_{h3}, & \vartheta \in (0.5, 1] \end{cases}, \forall i \in d^h, h \in H \quad (29)$$

$$q_{ijk}^h \leq p_i = (1 - \gamma)p_i^- + \gamma p_i^+, \forall k \in K, i \in D, h \in H \quad (30)$$

式中: \tilde{P}_i 为节点 i 的模糊需求量, $\tilde{P}_i = [p_i^-, p_i^+]$, p_i^-, p_i^+ 通常表示上下限值; p_i 为物资需求量。

3 求解算法

应急车辆调度模型属于非确定性多项式问题,求解十分复杂^[19-20]。蚁群算法具有收敛快、求解简单等优点,但存在求解质量一般、容易陷入局部最优等缺陷^[21-22],本文应用CW算法划分初始节点方案,引入可变邻域局部搜索算法以增加可行解空间对蚁群算法改进。算法流程如图1所示。

3.1 配送中心-节点分组

针对多配送中心配送的子路网划分问题,引入K-Means算法对需求节点进行分类,并分配配送中心,通过CW算法构造初始解^[23-24]。具体步骤如下:

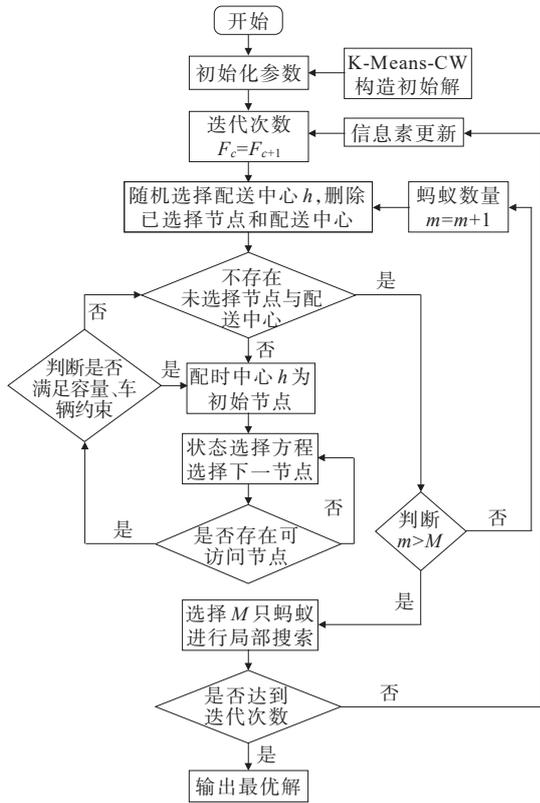


图1 算法流程

Figure 1 Algorithm flow

(1) 综合考虑容量限制与距离的K-Means聚类

随机选取需求节点为初始聚类中心并确定聚类簇数量,将节点分配到距离最近且容量满足需求的簇中,并持续更新聚类中心位置。

(2) CW算法构造初始解

将需求节点与对应的配送中心相连形成环路。将任意两条路径融合为一条路径时,计算距离减少量。以路径的配送总量是否超过载重限制为约束,距离减少量最大为目标,对路径进行迭代更新,直至所有需求节点分配完毕。

3.2 局部搜索

可变邻域搜索算法通过交换算子、交叉算子、动态插入算子等策略,增加可行解空间,避免陷入局部最优。其中,交换算子是指对路径内的访问顺序进行改变,若路径的适应度函数增大,则保存改进后的最优路径,否则保持原有路径;交叉算子是指在可行解 g 中选择某个区段,在该区段中将节点 j 随机插入区段中除首、末位外的任意位置,得到新可行解 g' ;动态插入算子是指随机从可行解中选择2个区段 g_1 、 g_2 ,分别在各自区段选择两个需求节点交换。

3.3 算法效果

选用Solomon VRPTW算例中C类数据集的前25、50和100个节点共27个数据集进行试验,以验证算法的通用性和普适性。本文的改进蚁群算法与蚁群算法、遗传算法的对比结果表明,在25节点的情况下,改进蚁群算法求解时间为46.67 s,偏差值为0;蚁群算法和遗传算法分别需要24.14 s和95.82 s,且偏差值为6.47和0.25。在50节点和100节点情况下,也表现出相同的优势。

4 案例分析

4.1 案例概况

以某市的配送医疗物资的应急车辆调度情况为案例,包括3个配送中心和33个需求节点。配送中心的基本信息包括经纬度坐标、车辆数、物资供应量;需求节点的基本信息包括所属区域人口统计、住院患者、医护人员、危重病人及物资需求量。考虑疫情感染、医疗基础设施、应急医疗物资需求3个因素,评估各节点需求紧迫度,结果如图2所示,可看出节点1、27、19、25、2、17、12、18的需求紧迫度最高,需要优先配送。

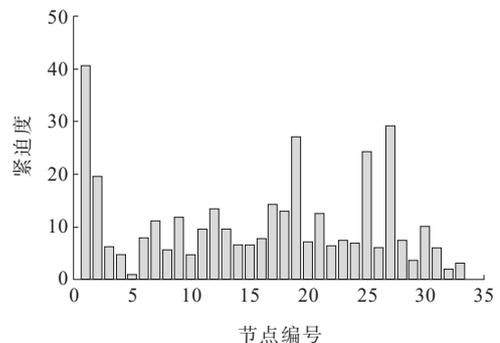


图2 节点需求紧迫度

Figure 2 Demand urgency for nodes

4.2 试验结果

在R7-5800H CPU主频3.2 GHz、内存16 GB环境下,应用Matlab求解。相关参数设置:蚁群规模 $m=50$,最大迭代次数 $F_{max}=100$,物资供应置信水平 $\vartheta=0.95$ 。

为检验节点需求紧迫度、配送延时均衡对配送结果的影响,设计3组方案:方案1:不考虑需求紧迫度和配送延时均衡, $\lambda_i=0, w_1=0.5, w_2=0.5, w_3=0$;方案2:考虑需求紧迫度,不考虑配送延时均衡, $\lambda_i=1, w_1=0.5, w_2=0.5, w_3=0$;方案3:考虑需求

紧迫度和配送延时均衡, $\lambda_i = 1, w_1 = 0.3, w_2 = 0.3, w_3 = 0.4$ 。

求解结果如表1和图3所示,方案2和3优先配送需求紧迫度高的节点,与方案1相比,配送总时间、总成本和总配送延时均有小幅增加;方案3考虑了配送延时均衡,与方案1相比,平均配送延时减小,节点

间公平性更高。

表1 相关指标

Table 1 Related indicators

方案	总时间/h	总成本/元	平均配送延时/h
1	21.8	8 389.7	1.29
2	27.9	10 877.7	1.54
3	25.1	10 653.7	1.47

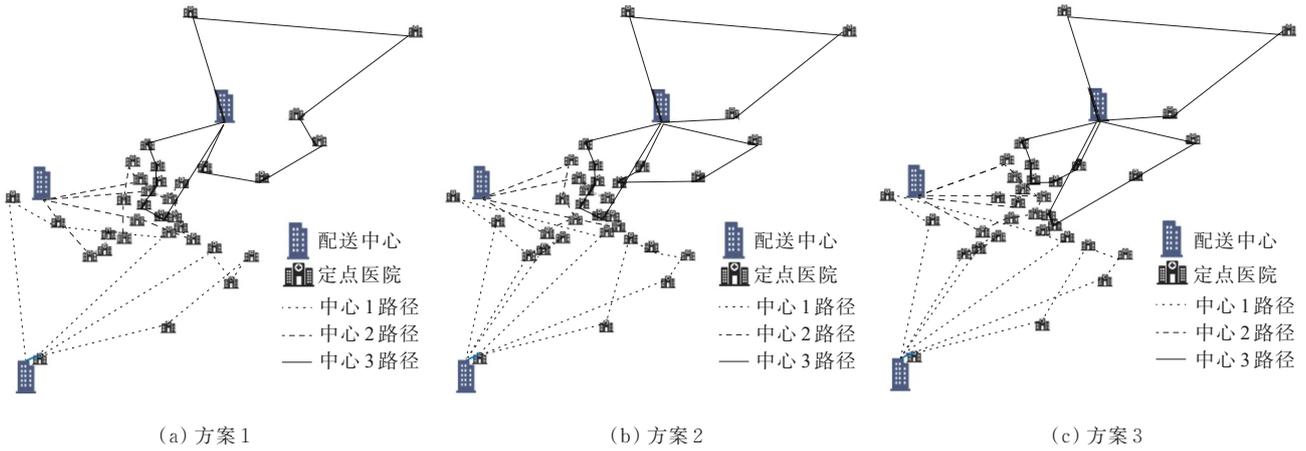


图3 配送路径

Figure 3 Delivery route

为进一步检验模型的效果,分别针对需求紧迫度高和低的节点的配送延时进行分析,结果如表2和图4所示。方案2优先配送紧迫度高的节点,与方案1相比,紧迫度排名前8位节点的平均配送延时 \bar{T}_ρ 、最大配送延时 T_ρ^M 和配送延时方差 σ_ρ 显著下降,分别减少48.55%、49.36%和36.82%;但紧迫度排名后25位节点的指标分别增加43.50%、20.83%和42.59%。结果表明:仅考虑关键节点的优先配送方案将导致

普通节点的配送延时大幅增加。

表2 各方案配送延时指标对比

Table 2 Comparison of delivery delay indicators of various solutions

方案	关键节点			普通节点		
	\bar{T}_ρ/h	T_ρ^M/h	σ_ρ	\bar{T}_ρ/h	T_ρ^M/h	σ_ρ
1	1.417	2.35	0.277	1.253	3.84	0.911
2	0.729	1.19	0.175	1.798	4.64	1.299
3	1.059	1.81	0.372	1.604	3.70	0.772

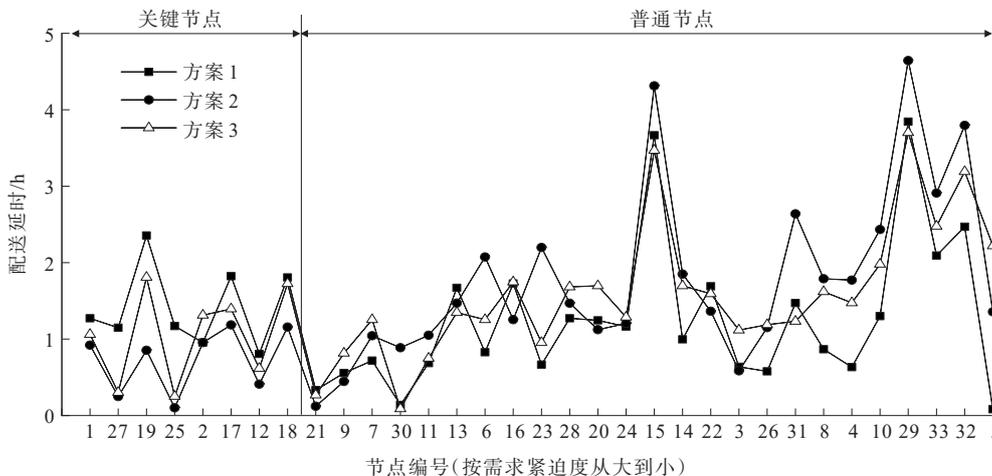


图4 节点配送延时分布

Figure 4 Distribution delay distribution of nodes

方案3同时考虑了关键节点优先配送和普通节点配送延时均衡,与方案1相比,紧迫度排名前8位节点的 \bar{T}_ρ 、 T_ρ^M 分别减少25.26%、22.98%, σ_ρ 增加34.30%;紧迫度排名后25位节点配送效率明显优于方案2, \bar{T}_ρ 、 T_ρ^M 、 σ_ρ 分别减少10.79%、20.26%和40.57%。这表明方案3能更好地兼顾关键节点的优先和普通节点的公平。

5 结语

在面对突发事件下的应急车辆调度问题时,既要优先考虑需求紧迫度高的关键节点,又要兼顾其他普通节点利益来确保公平。基于此,本文提出考虑需求紧迫度与配送延时公平的应急车辆调度模型,并设计改进蚁群算法,应用CW算法划分初始节点方案,引入可变邻域局部搜索算法,增加可行解空间,提高求解质量与速度。试验结果表明:该模型能提高需求紧迫度高节点的配送效率,并大幅降低整体配送延时,改善配送时间的稳定性。但未考虑车型和物资的差异,后期可以继续开展相关研究。

参考文献:

References:

- [1] ZHANG J J, HUANG J R, WANG T H, et al. Dynamic optimization of emergency logistics for major epidemic considering demand urgency[J]. *Systems*, 2023, 11(6): 303.
- [2] 秦进, 徐玖龙, 吴志君, 等. 突发传染病疫情背景下民生物资应急保障服务网络优化研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(10): 3705-3714.
QIN Jin, XU Jiulong, WU Zhijun, et al. Optimization of people's livelihood material supply service network under the background of the sudden outbreak of infectious diseases[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(10): 3705-3714.
- [3] 曾松, 杨晓光. 日本的灾时交通管理系统[J]. *国外公路*, 1999, 19(5): 5-10.
ZENG Song, YANG Xiaoguang. Japan's disaster traffic management system[J]. *Journal of Foreign Highway*, 1999, 19(5): 5-10.
- [4] BAC U, ERDEM M. Optimization of electric vehicle recharge schedule and routing problem with time windows and partial recharge: A comparative study for an urban logistics fleet[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 70: 102883.
- [5] SILVA F, SERRA D. Locating emergency services with different priorities: The priority queuing covering location problem[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2008, 59(9): 1229-1238.
- [6] YANG Y, MA C X, LING G. Pre-location for temporary distribution station of urban emergency materials considering priority under COVID-19: A case study of Wuhan City, China[J]. *Physica A*, 2022, 597: 127291.
- [7] 赵建有, 韩万里, 郑文捷, 等. 重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物资配送[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(3): 168-177.
ZHAO Jianyou, HAN Wanli, ZHENG Wenjie, et al. Distribution of emergency medical supplies in cities under major public health emergency[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(3): 168-177.
- [8] ZHENG F F, DU L J, LI X H, et al. Multi-objective medical supplies distribution open vehicle routing problem with fairness and timeliness under major public health emergencies[J]. *Management System Engineering*, 2023, 2(1): 5.
- [9] BALCIK B, BEAMON B M, SMILOWITZ K. Last mile distribution in humanitarian relief[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2008, 12(2): 51-63.
- [10] COOK R A, LODREE E J. Dispatching policies for last-mile distribution with stochastic supply and demand[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 106: 353-371.
- [11] SUN H L, LI J M, WANG T S, et al. A novel scenario-based robust bi-objective optimization model for humanitarian logistics network under risk of disruptions[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 157: 102578.
- [12] 王旭坪, 马超, 阮俊虎. 考虑公众心理风险感知的应急物资优化调度[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(7): 1735-1742.
WANG Xuping, MA Chao, RUAN Junhu. Emergency supplies optimal scheduling considering the public's psychological risk perception[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(7): 1735-1742.
- [13] 郝正博, 杨晓光, 王一喆, 等. 考虑时空协同优先的城市应急车辆路径优化方法[J]. *公路交通科技*, 2024, 41(3): 169-178, 198.
HAO Zhengbo, YANG Xiaoguang, WANG Yizhe, et al. Dynamic optimization on urban emergency vehicle route considering collaborative spatio-temporal prioritization[J].

- Journal of Highway and Transportation Research and Development,2024,41(3):169-178,198.
- [14] GHASEMI P, GOODARZIAN F, ABRAHAM A. A new humanitarian relief logistic network for multi-objective optimization under stochastic programming[J]. Applied Intelligence,2022,52(12):13729-13762.
- [15] ZHANG Z G, WANG N, LONG K J, et al. Application on network travel time reliability analysis based on critical travel paths by fourth-moment method with RFID data [C]//CICTP 2023. Beijing, China. Reston, VA: American Society of Civil Engineers,2023:2897-2906.
- [16] 杨晓光,安健,刘好德,等. 公交运行服务质量评价指标体系探讨[J]. 交通运输系统工程与信息,2010,10(4):13-21.
YANG Xiaoguang, AN Jian, LIU Haode, et al. Evaluation architecture discussion of route-level transit service quality [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2010,10(4):13-21.
- [17] SUZUKI Y. Impact of material convergence on last-mile distribution in humanitarian logistics[J]. International Journal of Production Economics,2020,223:107515.
- [18] CHOU C C. The canonical representation of multiplication operation on triangular fuzzy numbers[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2003, 45(10/11): 1601-1610.
- [19] 陈凯佳,赵靖. 基于VISSIM仿真的十字信号交叉口待行区适用性分析[J]. 中外公路,2021,41(1):318-322.
CHEN Kaijia, ZHAO Jing. Analysis of applicability of signal intersection waiting area at signalized intersections based on VISSIM simulation[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(1):318-322.
- [20] 龙科军,张仲根,刘洋,等. 城市道路应急车辆借道通行与信号协同优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2023, 23(5):194-201, 226.
LONG Kejun, ZHANG Zhonggen, LIU Yang, et al. Cooperative optimization model for emergency vehicles using reverse left-turn lanes and traffic signals[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2023,23(5):194-201, 226.
- [21] 马昌喜,薛凡松,麻存瑞,等. 时变路网下基于混合调整策略的生鲜品配送路径优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2023,23(4):298-306.
MA Changxi, XUE Fansong, MA Cunrui, et al. Route optimization of fresh food distribution under time-varying network and hybrid adjustment strategy[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2023,23(4):298-306.
- [22] 吕伟晔,裴利华,林东,等. 富水圆砾地层中泥水平衡盾构主要掘进参数K-Means聚类及控制分析[J/OL]. 中外公路, 1-9[2024-10-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240321.1613.002.html>.
LYU Yiye, PEI Lihua, LIN Dong, et al. K-Means clustering and control analysis of the main tunneling parameters of mud-water balanced shields in water-rich round gravel strata[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-9[2024-10-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240321.1613.002.html>.
- [23] 邓发友,夏才初,许崇帮. 基于中智理论的公路隧道健康状态评价方法研究[J]. 中外公路,2023,43(2):173-177.
DENG Fayou, XIA Caichu, XU Chongbang. Study on health state evaluation method of highway tunnel based on neutrosophic theory[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(2):173-177.
- [24] 吴志敏,黄觉,向崎. 基于K-Means聚类算法的高速公路事故多发路段鉴别[J]. 中外公路,2022,42(6):260-264.
WU Zhimin, HUANG Jue, XIANG Qi. Identification of freeway accident-prone sections based on K-Means clustering algorithm[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(6):260-264.