

doi: 10.11731/j.issn.1673-493x.2020.03.001

考虑受灾点需求时间窗的应急物资配送车辆路径规划研究*

吕伟^{1,2} 李志红^{1,2} 马亚萍^{1,2} 赵相成^{1,2} 宁晶婧^{1,2}

(1. 武汉理工大学 中国应急管理研究中心 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院 湖北 武汉 430070)

摘要:为解决灾后应急物资亟待配送到灾区的现实问题,提高应急物资配送效率,考虑灾点对应急物资的需求紧迫程度的差异,建立软硬时间窗综合约束情况下以应急物资配送的总延迟时间最短、软时间窗的惩罚成本最小、硬时间窗的不满足个数最少为目标的应急物资车辆配送路径方案生成模型。前期对路网数据预处理,形成配送中心到受灾点的多对多时间最短路径集合,后期根据目标和约束进行模型构建,并利用遗传算法求解。引入算例分析对模型的有效性进行验证。结果表明:该模型可综合考虑软硬时间窗的影响,形成高效的应急物资车辆路径配送方案,可对灾后整体的应急方案制定提供帮助,具有较好的可行性和现实意义。

关键词:应急管理; 应急救援; 应急物资; 时间窗; 路径规划

中图分类号: X913.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-193X(2020)-03-0005-07

Research on route planning of emergency materials distribution vehicles considering time window of requirements by disaster point

LYU Wei^{1,2} , LI Zhihong^{1,2} , MA Yaping^{1,2} , ZHAO Xiangcheng^{1,2} , NING Jingjing^{1,2}

(1. China Research Center for Emergency Management ,Wuhan University of Technology ,Wuhan Hubei 430070 ,China;

2. School of Safety Science and Emergency Management ,Wuhan University of Technology ,Wuhan Hubei 430070 ,China)

Abstract: In order to solve the practical problem that the emergency materials need to be delivered to the disaster area urgently after the disaster and improve the efficiency of emergency materials distribution ,considering the difference in the urgency of the requirements for emergency materials by the disaster area ,a generation model for the distribution route scheme of emergency materials vehicles under the comprehensive constraints of soft and hard time window was established ,which took the shortest total delay time of emergency materials distribution ,the lowest penalty cost of soft time window and the minimum non-satisfaction number of hard time window as the objects. In the early stage ,the road network data was preprocessed to form a multi-to-many shortest time route set from the distribution center to the disaster point ,and in the later stage ,the model was constructed according to the objects and constraints ,and the solving was carried out by using the genetic algorithm. The effectiveness of the model was verified by the analysis of example. The results showed that the model could comprehensively consider the influence of soft and hard time window ,thus form an efficient distribution route scheme of emergency materials vehicles. It can provide assistance for the formulation of overall emergency plan after the disaster ,and has high feasibility and practical significance.

Key words: emergency management; emergency rescue; emergency materials; time window; route planning

0 引言

我国正处于突发事件的高发期,每年因自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件等突发事件造

成的人员伤亡和经济损失巨大,据国家减灾网公布数据^[1]显示,仅2017年全国各类自然灾害就造成1.4亿人次受灾,近900人死亡。由于突发事件的不确定性、突发性和破坏性,常会造成灾区物资急需、灾民生活困

收稿日期: 2019-08-10

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51604204); 中国博士后科学基金项目(2018M632937); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017IVB040, 2018VII070, 2018VII080)

作者简介: 吕伟,博士,副教授,主要研究方向为公共安全、交通安全方面的研究。

难,如疏散安置不合理、应急物资保障不及时、配送效率低,又会进一步造成更严重的损失^[2-4],因此,如何将应急物资在第一时间配送到灾区,进一步提高应急物资的配送效率,已成为我国应急管理工作的重大问题之一。实际应急救援工作中,不同受灾点在灾情、环境、人口等因素上存在差异,受灾严重程度、对物资需求的紧迫程度也不尽相同,加之应急资源的筹集时间需求,常需要考虑受灾点对应急物资配送的时间窗要求,进而制定科学的配送路径规划方案,使各受灾点最大限度地各自的需求时间内获取相应的应急物资。

国内外相关学者相继开展带时间窗的物资车辆配送路径问题研究,提出考虑时间窗约束的物资配送路径求解方法。在 Dantzing 和 Rarnser 最早提出的车辆路径问题^[5]基础上, Solomon 等^[6]最先探讨带时间窗的车辆路径问题启发式求解算法,为后来的带时间窗车辆路径问题研究提供参考;赵彤等^[7]针对带硬时间窗的应急物资配送车辆路径优化问题进行研究,以车辆总的行驶距离最短为目标建立有容量约束的路径优化模型并借助蚁群算法进行求解。就研究方法而言,大多学者着重于对智能求解算法(如遗传算法^[8-10]、蚁群算法^[11-12]、粒子群算法^[13]等)进行改进使得计算结果更加快速和有效,从而进行时间窗约束下目标函数的求解;就研究内容而言,多以传统的运输成本最小^[14]、总时间最少^[15-17]、总路程最短^[18]等为目标进行目标函数的构造和模型的搭建,且多数为研究单配送中心^[19-20]进行物资配送的问题,多配送中心^[21]则较少;从时间窗类型来看,大多只考虑软时间窗或硬时间窗中1种时间窗的影响^[22-24],而实际情况常是软硬时间窗共同存在的,这些研究成果为带时间窗的应急物资配送路径规划科学问题提供有效的技术支撑,为进一步满足应急救援工作的实际需要,针对多受灾点的不同灾损和不同需求,需同

时考虑软、硬2种时间窗的影响,对应急物资配送路径方案进行更深入研究。

本文考虑多受灾点对应急物资需求的不同紧迫程度,研究软、硬时间窗综合影响下的应急物资配送路径生成问题,通过引入软时间窗惩罚成本和硬时间窗物资满足状况等约束条件,考虑道路交通流密度对路段运输时间的影响,进而构建基于多目标的应急物资配送路径规划模型,并运用遗传算法求解获得最优的配送路径方案,为突发事件发生后第一时间进行规划和采取行动提供科学高效的决策方案。

1 问题描述

1.1 带时间窗约束的车辆路径基本问题

带有时间窗的车辆路径问题(Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW)指在进行车辆路径选择和分配的时候,考虑到被服务地点的时间窗口的约束,在容量和时间窗限制下最小化若干车辆的总旅行成本的问题。时间窗是1个时间段 $[ET, LT]$,是由客户要求的最早服务时间 ET 和最晚服务时间 LT 确定的1个服务时间区间。按照客户满意度可将时间窗分为3种类型:硬时间窗(Hard Time Windows, HTW)、软时间窗(Soft Time Windows, STW)和混合型时间窗(Mixed Time Windows, MTW)。硬时间窗不允许配送时间违背时间窗约束,一旦违背则惩罚值非常高;软时间窗允许适当的违反约束,即可放松时间窗口的约束以产生更好的解决方案,但须按照违反时间的长短施加一定的惩罚;混合时间窗针对某客户在特定时间段内按惩罚函数进行惩罚,超过该时间段范围为无效配送。此3种时间窗对应的惩罚函数示意^[19]如图1所示,其中 $P(t)$ 表示惩罚值, t 表示服务时间; M 表示1个极大的函数值。

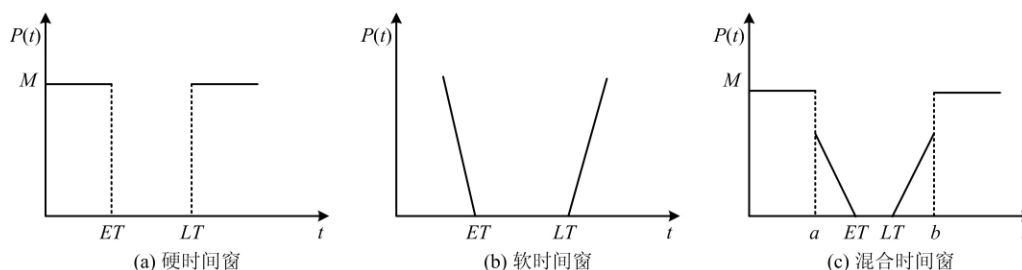


图1 3种时间窗口的惩罚函数示意

Fig.1 Schematic diagram for penalty functions of three time windows

1.2 车辆配送时间问题

车辆配送时间指按照指定配送路径完成配送任务所需要的运输时间,是评判配送路径能否满足时间窗约束的关键依据。对于某条选定的配送路径 l ,其运输时间 T_l 的基本计算方法如式(1)所示:

$$T_l = S_l / V \quad (1)$$

式中: S_l 表示路径 l 的长度,km; V 表示配送车辆的行驶速度,km/h。此计算方法假设配送车辆沿配送路径做匀速直线运动,不符合道路实际的实际情况。

在实际道路交通流中,车辆在配送路径 l 上的总行

驶时间(即配送时间)由路段总行驶时间和路口总等待时间2部分组成。其中,路段行驶时间取决于路段长度和车辆在该路段上的平均行驶速度,而车辆的行驶速度又取决于路段的实际交通流状况,如交通流密度等;路口等待时间取决于车辆到达路口的时间和交通信号灯的参数。准确计算车辆行驶时间是复杂的科学问题,客观的计算方法如式(2)~(3)所示:

$$T_1 = \sum_{i=1}^m (l_i/v_i) + \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{m-1} t_{w_i} \quad (2)$$

$$v_i = v_f \cdot \exp \left[- \left(\frac{\rho_i - c_1}{c_2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中: l_i 表示配送路径 l 上的第 i 条路段的长度, km; $i=1, 2, 3, \dots, m$ 为 i 的最大值。 t_{w_i} 表示车辆在配送路径 l 上第 i 个路口遇到红灯停留等待的时间, min; v_i 表示车辆在第 i 条路段上的速度, km/h, 该速度取决于车辆所在路段 i 的交通流密度 ρ_i , veh/(km · lane); ρ_i 可由式(3)计算得出。 v_f 表示自由交通流速度(本文取 $v_f = 74$ km/h); c_1, c_2 表示交通流参数(本文取 $c_1 = -20$ veh/(km · lane), $c_2 = 75$ veh/(km · lane))。

1.3 考虑软硬时间窗影响的应急物资车辆配送路径问题

考虑软硬时间窗影响的应急物资车辆配送路径问题,是指当城市遭受重大突发事件并形成多个受灾点后,根据各受灾点的受灾程度、物资需求量和需求紧迫程度,在不同的软硬时间窗限制下,寻求最优的车辆配送路径方案。在实际应急物资配送中,配送时间常作为配送车辆路径选择和分配的首要因素,运输到灾区的应急物资通常要求越快越好,时间窗约束 $[ET, LT]$ 中的最早开始服务时间 ET 可以直接设定为突发事件发生的时间($t=0$),在最晚服务时间 LT 之前完成配送均不存在惩罚成本。对于最晚服务时间 LT ,如果是硬时间窗要求(如配送抢救类药品),最晚服务时间 LT 表示物资最晚到达时间,在物资最晚到达时间之后完成配送视为无效、惩罚值巨大;如果是软时间窗要求(如配送粮食、衣物等),则允许对 LT 放宽到规定的最晚到达时间 ST ($ST > LT$),在 ST 之后完成配送视为无效、惩罚值巨大,在 LT 和 ST 之间完成配送的需要承担相应的延时配送惩罚,惩罚程度可由决策者设定。因此,结合应急救援的实际,本文在研究应急物资配送时,使用软、硬时间窗惩罚函数形式,如图2所示。其中 ST 表示软时间窗约束情况下规定的最晚到达时间。

本文所定义的最优车辆配送路径方案,是能够最小化配送时间且同时最大化各受灾点物资满足率的方案。为实现方案求解,提出3个目标:1)有软、硬时间窗要求的受灾点物资配送时间超出 LT 的总延迟时间最小;

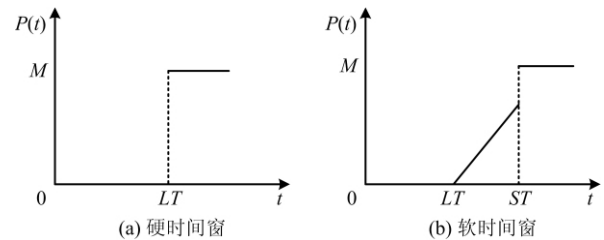


图2 应急物资配送时间窗的惩罚函数示意

Fig. 2 Schematic diagram for penalty functions of time windows for emergency materials distribution

2)有软时间窗要求的受灾点因配送延迟而受到的总惩罚最低;3)有硬时间窗要求但物资不能满足时间窗要求的受灾点数量最少。

2 考虑软硬时间窗影响的应急物资车辆配送路径模型

2.1 模型假设

本文侧重研究自然灾害下软、硬时间窗对应急物资车辆配送路径的综合影响,考虑道路实时交通流密度对运输时间的影响,但不考虑车辆在交通路口处的停车等待问题,并作如下假设:

- 1) 各受灾点的物资需求量和配送时间窗要求已知。
- 2) 1个物资配送中心可向多个受灾点配送物资,1个受灾点只接受1个物资配送中心配送的物资。
- 3) 路网完整,不存在损毁道路,且路网节点、路段距离和通达性已知。
- 4) 不考虑物资和车辆限制,默认总物资满足总需求且配送车辆数量充足。
- 5) 不考虑拆分配送。

2.2 模型构建

相关符号说明如下:

1) 集合

$I = \{i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 表示配送中心集合; $J = \{j | j = 1, 2, \dots, m\}$ 表示受灾点集合; $G = \{a, b | a = 1, 2, \dots, M; b = 1, 2, \dots, M\}$ 表示路网的道路节点集合; $K_{ab} = \{k_{ab} | a = 1, 2, \dots, M; b = 1, 2, \dots, M; a \neq b\}$ 表示路网的可达路段集合。

2) 相关参数

S_{ij} 表示从配送中心 i 到受灾点 j 的物资配送量, kg; p_i 表示配送中心 i 的物资储备量, kg; q_j 表示受灾点 j 的物资需求量, kg; l_{ij} 表示从配送中心 i 到受灾点 j 的时间最短路径长度, km; t_{ij} 表示从配送中心 i 到受灾点 j 的最短路的配送时间, h; LT_j 表示受灾点 j 在硬时间窗要求下的规定到达时间, h; ST_j 表示受灾点 j 在软时间窗要求下可放宽的最晚到达时间, h; SC_j 表示受灾点 j 的软

时间窗惩罚成本; $d_{k_{ab}}$ 表示路段 k_{ab} 的长度, km; $v_{k_{ab}}$ 表示路段 k_{ab} 的车辆实际行驶速度, km/h。

3) 决策变量

决策变量如式 (4) 所示:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{选择配送中心 } i \text{ 向受灾点 } j \text{ 进行配送 按 } l_{ij} \text{ 配送} \\ 0 & \text{不选择配送中心 } i \text{ 到受灾点 } j \text{ 进行配送} \end{cases} \quad (4)$$

4) 目标函数

目标函数如式 (5) ~ (7) 所示:

$$\text{Min} F_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \cdot (t_{ij} - LT_j) \quad (5)$$

$$\text{Min} F_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \cdot z_j \cdot SC_j \quad (6)$$

$$\text{Min} F_3 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \cdot (1 - z_j) \cdot w_{ij} \quad (7)$$

综合 3 个目标函数, 确定多目标函数, 如式 (8) ~ (15) 所示:

$$\text{Min} F = F_1 \cdot F_2 \cdot (F_3 + 1) \quad (8)$$

$$s. t. t_{ij} = \sum_{a \in G} x_{ij} \cdot d_{k_{ab}} / v_{k_{ab}} \quad k_{ab} \in l_{ij} \quad (9)$$

$$SC_j = \begin{cases} 0 & t_{ij} < LT_j \\ h \cdot S_{ij} \cdot (t_{ij} - LT_j) & LT_j < t_{ij} \leq ST_j \\ M & t_{ij} > ST_j \end{cases} \quad (10)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & t_{ij} \geq LT_j \\ 0 & t_{ij} < LT_j \end{cases} \quad (11)$$

$$z_j = \begin{cases} 1 & \text{受灾点 } j \text{ 为软时间窗约束} \\ 0 & \text{受灾点 } j \text{ 为硬时间窗约束} \end{cases} \quad (12)$$

$$v_{k_{ab}} = v_{f k_{ab}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\rho_{k_{ab}} - c_1}{c_2} \right)^2 \right] \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \geq 1 \quad \forall i \quad (15)$$

式中: 式 (5) 为目标函数 1, 表示使有软、硬时间窗要求的受灾点物资配送时间超出 LT 的总延迟时间最小; 式 (6) 为目标函数 2, 表示使有软时间窗要求的受灾点因配送延迟而受到的总惩罚最低; 式 (7) 为目标函数 3, 表示使有硬时间窗要求但物资不能满足时间窗要求的受灾点数量最少。为实现多目标求解, 式 (8) 将 3 个目标函数整合, 求其综合值达到最小, 使整体的满意度达到最大; 式 (9) 表示从配送中心 i 到受灾点 j 最快的车辆路径对应的配送时间; 式 (10) 表示软时间窗的惩罚成本, 式中 h 表示软时间窗惩罚的强度系数 (惩罚函数的斜率); 式 (11) 中 w_{ij} 为 0-1 变量, 表示是否满足硬时间窗要求; 式 (12) 中 z_j 为 0-1 变量, 表示时间窗类型; 式 (13) 表示交通流密度影响下的车辆速度; 式 (14) 表示对于任意 1 个受灾点 j 只有 1 个物资供应点 i 为其提供物资; 式 (15) 表示对于任意 1 个物资供应中心 i 至少对 1 个受灾点 j 进行物资配送。

2.3 问题求解

针对所构建的数学模型, 设计如下求解方案:

1) 将所有受灾点 J 根据受灾程度和需求紧迫程度分为配送要求硬时间窗的受灾点 J_H 和配送要求软时间窗的受灾点 J_S 2 类。

2) 运用弗洛伊德算法计算出任意配送中心 i 到任意受灾点 j 的所有路径集合 K_{ij} 。

3) 获取各路段实时道路交通流量, 运用交通流密度影响的速度公式计算出实时情况下, 任意配送中心 i 到任意受灾点 j 的时间最短路径集合 L_{ij} 和对应的最小配送时间集合 T_{ij} 。

4) 根据受灾点 J_H 硬时间窗的规定送达时间 LT , 计算受灾点 J_H 在接受各配送中心时间最短路径配送下是否满足硬时间窗要求; 根据受灾点 J_S 软时间窗的规定送达时间 LT 和最晚送达时间 ST , 计算受灾点 J_S 在接受各配送中心时间最短路径配送下的惩罚成本; 计算根据所有受灾点的规定送达时间 LT , 计算各受灾点在接受各配送中心时间最短路径配送下的延迟时间。

5) 运用遗传算法求解多目标函数 F , 获得所有受灾点 J 接受指定配送中心 I 配送应急物资的时间最短路径方案。

3 算例分析与结果讨论

3.1 情景介绍

选取上海市地图的某级路网, 进行道路的提取, 如图 3 所示, 以暴雨灾害后的应急物资运输为例, 进行案例分析。本案例以上海市的上海火车站、上海虹桥站和上海南站 3 个火车站作为应急物资的运输起点 (即临时配送中心), 编号分别为 $a1$, $a2$, $a3$; 以上海市第一人民医院、上海浦东医院等在内的 10 家医院作为应急物资运输终点, 即物资需求点, 编号及相关信息见表 1, 由于篇幅有限, 故只列出以下部分数据。图 3 (b) 中星号代表上海市的 3 个火车站所在位置, 三角表示上海市 10 家医院所在位置, 其中每家医院作为物资需求点对应急物资的需求量以及时间窗口要求如表 1 所示。

3.2 结果与讨论

运用 MATLAB R2016a 编程进行方案求解步骤的处理, 在求解目标函数时采用遗传算法 (GA) 进行计算, 因求解结果对初值依赖性较大, 在求解过程中将计算结果作为初值进行迭代, 最终找到稳定的最优值及其对应的配送方案, 如图 4 所示。由图 4 可知, 经过近 90 次迭代, 目标函数值可收敛到最优值 38.688 4, 增加迭代次数到 1 000 次, 目标函数值依然收敛于 38.688 4, 表明该结果已是稳定的最优解, 其对应的配送方案即为满足目标要求的最优配送方案。结合受灾点的物资需求量和

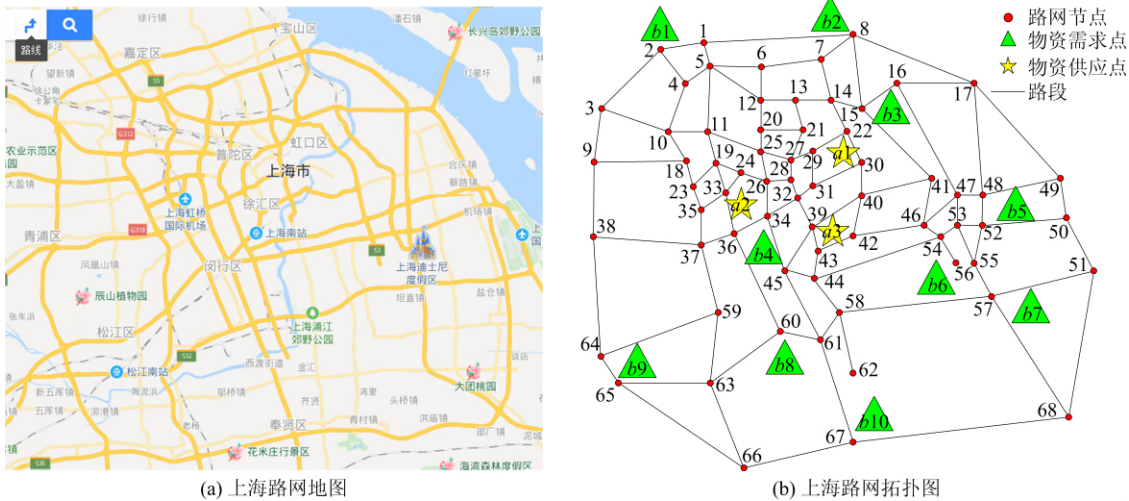


图3 上海市路网(情景覆盖范围)
Fig.3 Road network map of Shanghai (Covering range of scenario)

表1 需求点物资需求和时间窗信息

Table 1 Information of materials requirements and time windows for requirement points						
需求点	编号	物资需求量/kg	规定物资灾后到达时间/h	可放宽的灾后最晚到达时间/h	时间窗类型	
嘉定区妇幼保健院	b1	200	0.5	1	S	
上海市第一人民医院	b2	380	0.7	/	H	
上海交通大学医学院附属新华医院	b3	400	0.5	0.8	S	
上海市闵行区中心医院	b4	300	0.6	0.8	S	
上海市浦东新区人民医院	b5	280	0.8	1	S	
上海市国际医学中心	b6	220	0.8	1	S	
上海浦东医院	b7	200	1	1.2	S	
上海市第五人民医院	b8	400	0.8	1	S	
上海市松江区中心医院	b9	300	1.2	/	H	
奉贤区中心医院	b10	320	1	1.5	S	

注: H 表示物资需求点受硬时间窗约束; S 表示物资需求点受软时间窗约束。

前期得到的时间最短路径集合,可得出应急物资最优配送方案,见表2。

由表2可知,配送方案包含3种重要信息:1)各个配送中心需要服务哪些受灾点;2)各配送中心向所服务的受灾点按哪条路径进行配送;3)各个配送中心需要配送的总量。前2种信息可以用于制定具体的应急配送行动方案,第3种信息则反映受灾点对各配送中心服务能力的需求。配送中心a2和a3共承担的物资量超过所有受灾点总需求的76%,说明此2个临时物资配送中心在整个应急救援中权重很大,在进行物资调配的时候应优先保证此2个物资配送中心的物资量充足。此外,根据配送路径集合,可以看出44、45和54等路段节点出现在多条配送路径中,如果通往此类节点的道路出现损毁而无法保证车辆正常通行,也将大大影响应急物资的

配送效率和应急救援的实际成效,因此,针对此类关键节点的连通道路,在实施配送方案时也应该制定相应的道路通达保障方案。

4 结论

- 1) 通过构建同时考虑软硬时间窗的车辆配送路径方案生成模型,利用遗传算法进行求解,最终可得到符合约束的最优配送方案。
- 2) 前期通过智能算法求解时间最短路径集合,可较大程度上节省后期路径选择的不必要筛选。从结果上看,通过算法求解可使模型迅速收敛,且得到使应急物资配送总的延迟时间、软时间窗惩罚成本以及硬时间窗不满足程度等整体达到最优的结果,保证每条配送路径均为对应配送中心和需求点之间的时间最短路径,有效

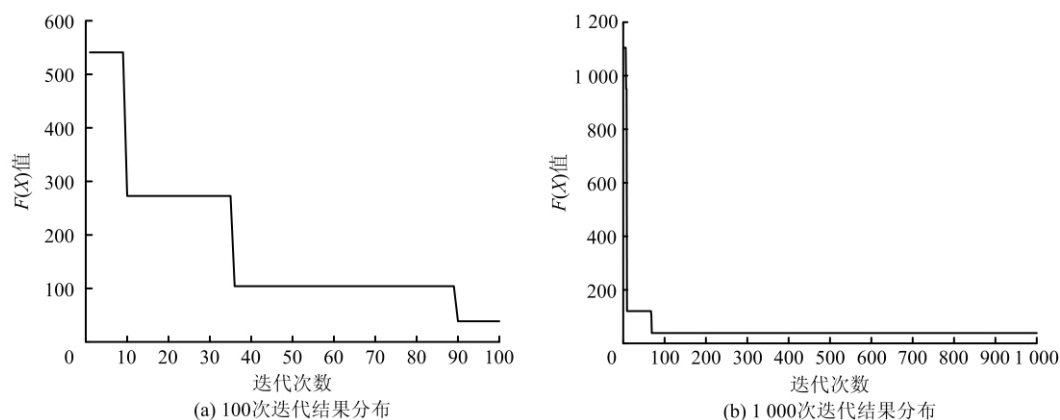


图 4 迭代结果分布情况

Fig. 4 Distribution of iterative results

表 2 应急物资最优路径方案

Table 2 Optimal route scheme of emergency materials

配送中心编号	总供应量/kg	需求点编号	配送量/kg	应急物资配送路径
a1	680	b2	280	a1→14→7→b2
		b3	400	a1→14→b3
		b1	200	a2→19→11→5→4→b1
a2	800	b4	300	a2→36→34→b4
		b9	300	a2→35→37→38→b9
		b5	280	a3→43→42→46→47→48→b5
a3	1 420	b6	220	a3→43→44→54→56→b6
		b7	200	a3→43→44→54→53→55→57→b7
		b8	400	a3→45→61→b8
		b10	320	a3→45→61→b10

解决灾后应急物资的及时有效配送的问题。且该方案形成的路径集合可有效识别物资配送关键路段节点,如 44、45 和 54 等,以及供应量需求较大的关键配送中心,如虹桥站和上海南站承担超过总需求 76% 的配送量。因此,决策者可基于数据分析结果对各个应急物资配送中心进行资源储备量的调整以及关键路段的道路通达保障方案的制定。

3) 本文的不足之处为所进行的灾后应急物资配送车辆路径规划研究建立在灾后物资充足的基础上,未考虑物资紧缺导致无法满足各个受灾点的需求的情况,且未考虑灾后道路损毁对应急物资配送车辆路径的影响。后期的研究方向可针对目前研究模型与方法存在的不足之处进行完善与优化,进一步考虑应急物资紧缺情况下的物资调配车辆路径规划问题、道路损毁对时间窗约束条件下的车辆路径问题的影响,更加全面地考虑在灾害演变情况下进行动态方案的规划与决策。

参考文献

- [1] 应急管理部国家减灾中心. 2017 年全国自然灾害基本情况 [EB/OL]. (2018-02-01) [2020-03-12]. <http://www.jianzai.gov.cn/zq/tj/1148.jhtml>.
- [2] 王娟, 聂锐, 阎薪宇. 多目标规划在应急物流中的应用综述 [J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(7): 68-73.
WANG Juan, NIE Rui, YAN Xinyu. Review on application of multi-objective programming in emergency logistics [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(7): 68-73.
- [3] WASSENHOVE V L N. Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear [J]. Journal of the Operational Research Society, 2006, 57(5): 475-489.
- [4] GAN X, LIU J. A multi-objective evolutionary algorithm for emergency logistics scheduling in large-scale disaster relief [C] // 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). IEEE, 2017.
- [5] DANTZIG G, RAMSER J. The truck-dispatching problem [J]. Management Science, 1959, 6: 80-91.
- [6] SOLOMON M M, DESROSIERS J. Survey paper-time window constrained routing and scheduling problems [J]. Transportation Sci-

- ence, 1988, 22(1): 1-13.
- [7] 赵彤, 范厚明, 王桂琳, 等. 带时间窗的应急救助物资配送车辆路径优化模型研究[J]. 物流技术, 2010, 29(20): 63-65.
ZHAO Tong, FAN Houming, WANG Guilin, et al. Time-constrained routing optimization model for emergency relief distribution vehicles logistics technology[J]. Logistics Technology, 2010, 29(20): 63-65.
- [8] 陈成. 基于改进遗传算法的带时间窗的多目标配送路径优化[J]. 信息技术与信息化, 2018, 223(10): 53-56.
CHEN Cheng. Multi-objective routing optimization with time windows based on improved genetic algorithm[J]. Information Technology and Informatization, 2018, 223(10): 53-56.
- [9] GHOSEIRI K, GHANNADPOUR S F. Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm[J]. Applied Soft Computing Journal, 2010, 10(4): 1096-1107.
- [10] 柴获, 何瑞春, 苏江省, 等. 求解双目标带时间窗车辆路径问题的蚁群算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018(4): 156-162.
CHAI Huo, HE Ruichun, SU Jiangsheng, et al. An ant colony optimization for the bi-objective vehicle routing problem with time windows on multigraph[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018(4): 156-162.
- [11] 朱杰, 张培斯, 张询影, 等. 基于改进蚁群算法的多时间窗车辆路径问题[J]. 计算机技术与发展, 2019(1): 102-105.
ZHU Jie, ZHANG Peisi, ZHANG Xunying, et al. Vehicle routing problem with multiple time windows based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2019(1): 102-105.
- [12] 金淳, 张雨, 王聪. 带时间窗车辆路径问题的分布式多agent蚁群算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(3): 666-670.
JIN Chun, ZHANG Yu, WANG Cong. Distributed multiagent-based ant colony algorithm for vehicle routing problem with time windows[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(3): 666-670.
- [13] 范厚明, 刘文琪, 徐振林, 等. 混合粒子群算法求解带软时间窗的VRPSD问题[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(19): 221-229.
FAN Houming, LIU Wenqi, XU Zhenlin, et al. Hybrid particle swarm optimization for solving VRPSD problems with soft time windows[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(19): 221-229.
- [14] LIM A, ZHANG X. A two-stage heuristic with ejection pools and generalized ejection chains for the vehicle routing problem with time windows[J]. Inform Journal on Computing, 2017, 19(3): 443-457.
- [15] 肖玉徽, 楼振凯, 戴晓震. 带时间窗的多配送中心协同配送问题研究[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(14): 171-177.
XIAO Yuhui, LOU Zhenkai, DAI Xiaozhen. Research on coordinated distribution of multiple distribution centers with time windows[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2018, 48(14): 171-177.
- [16] KARA I, DERYA T. Formulations for minimizing tour duration of the traveling salesman problem with time windows[J]. Procedia Economics & Finance, 2015, 26(8): 1026-1034.
- [17] 段凤华. 带软时间窗约束的开放式车辆路径问题及其应用[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [18] 阎俊爱, 郭艺源. 非常规突发事件救援物资输送的路径优化研究[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 193-200.
YAN Junai, GUO Yiyuan. Unconventional emergency aid delivery path optimization research[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 193-200.
- [19] 杜雪灵, 孟学雷, 杨贝, 等. 考虑公平性的面向多灾点需求应急资源调度[J]. 计算机应用, 2018, 38(7): 2089-2094.
DU Xueling, MENG Xuelei, YANG Bei, et al. Emergency resource assignment for requirements of multiple disaster sites in view of fairness[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(7): 2089-2094.
- [20] 宋厚冰, 蔡远利. 有时间窗约束的车辆路径问题的改进遗传算法[J]. 交通信息与安全, 2003, 21(4): 25-27.
SONG Houbing, CAI Yuanli. Improved genetic algorithm for vehicle routing problem with time window constraints[J]. Computer and Communications, 2003, 21(4): 25-27.
- [21] 戚铭尧, 张金金, 任丽. 基于时空聚类的带时间窗车辆路径规划算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(3): 218-222.
QI Mingyao, ZHANG Jinjin, REN Li. Vehicle routing algorithm based on spatiotemporal clustering[J]. Computer Science, 2014, 41(3): 218-222.
- [22] 殷亚, 张惠珍. 求解带硬时间窗的多目标车辆路径问题的多种混合蝙蝠算法[J]. 计算机应用研究, 2017(12): 118-122.
YIN Ya, ZHANG Huizhen. Multi-hybrid bat algorithm for solving multi-objectives vehicle routing problem hard time-window[J]. Application Research of Computers, 2017(12): 118-122.
- [23] XU J, YAN F, LI S. Vehicle routing optimization with soft time windows in a fuzzy random environment[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2011, 47(6): 1075-1091.
- [24] 吴天羿, 许继恒, 刘建永, 等. 求解有硬时间窗车辆路径问题的改进遗传算法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4): 708-713.
WU Tianyi, XU Jiheng, LIU Jianyong, et al. Improved genetic algorithm for vehicle routing problem with hard time windows[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(4): 708-713.

(责任编辑:袁文静)