

文章编号:1671-8879(2017)06-0105-08

改进蚁群算法求解带时间窗的应急 物流开环车辆路径问题

郭咏梅,胡大伟,陈 翔

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为解决受灾区域的物资运输问题,研究应急物流背景下带时间窗的开环车辆路径问题。将灾后道路通行性能差异及物资运输优先级考虑入约束范围,在确保应急物资运输可靠性的基础上,提出基于物流响应能力最大化的车辆路径模型。同时,考虑到传统优化算法收敛性差、易陷入局部最优的缺点,提出一种改进的蚁群算法以突破已有的算法瓶颈。该算法混合了人工鱼群算法与蚁群算法,将拥挤度因子引入蚁群算法以指导蚁群的聚集,从而提高蚁群算法求解的质量。通过一个基础算例对所提出模型与算法进行验证,得到最优解优化曲线并求解最优解,采用 1 组 CMT 与 GWKC 标准算例对提出的改进蚁群算法的性能进行评估计算试验。分别采用模拟退火算法、变邻域搜索算法及邻域搜索算法对标准算例进行求解。研究表明:提出的改进蚁群算法在求解收敛性与精确性上有显著优势,提出的算法在迭代 60 次后得到最优解,收敛速度比蚁群算法提前了 68 个迭代循环,最优解优化接近 7.8%;在相同试验环境下,实例数据的规模与算法所求得最优解的差值无关,即算例规模并不影响算法求解的精确度;提出的改进蚁群算法在可接受时间范围内,通过适当延长邻域搜索运算时间可显著提升求解精度,在各组试验结果中相比于其他算法均求得了最优的结果,在 CMT2 中改进蚁群算法求得的最优解比已知上界优化了超过 40%。

关键词:交通工程;应急物流;开环车辆路径问题;可靠性;蚁群算法;鱼群算法

中图分类号:U491

文献标志码:A

Solution of emergency logistics open-loop vehicle routing problem with time window based on improved ant colony algorithm

GUO Yong-mei, HU Da-wei, CHEN Xiang

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to solve the problem of material transportation in the affected area, an emergency logistics open-loop vehicle routing problem with time window (EL-OLVRPTW) was studied. Taking into account the difference of road traffic performance and the priority of material transportation after disaster, a vehicle routing model based on the maximization of logistics response ability was proposed on the basis of ensuring the reliability of emergency material

收稿日期:2017-06-11

基金项目:国家自然科学基金项目(61503043);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310822151030);

陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JQ6214, 2015JO7272)

作者简介:郭咏梅(1980-),女,辽宁东港人,讲师,工学博士研究生,E-mail:gymei@chd.edu.cn。

通讯作者:胡大伟(1963-),男,北京市人,教授,博士研究生导师,E-mail:dwhu@chd.edu.cn。

transportation. Meanwhile, an improved ant colony algorithm (IAC) was proposed to break through the bottleneck of traditional optimization algorithm. The new algorithm improved its convergence and had a great ability to keep from falling into local optimum. This algorithm combined the artificial fish swarm algorithm and the ant colony algorithm. Crowding factor was used for guiding the ant colony for its process of aggregation and finally improved the quality of its solution. The proposed model and algorithm were verified by a basic numerical case. The optimized solution curve was obtained and the optimal solution was solved. The evaluation calculation experiment was conducted on the performance of improved ant colony algorithm by adopting one CMT and GWKC standard example. Numerical calculation adopted simulated annealing algorithm, variable neighborhood search algorithm and neighborhood search algorithm on the standard examples. The results show that the IAC proposed in this paper has a significant advantage in its solving convergence and accuracy. Among these numerical results, the optimal solution solved by IAC is obtained after 60 iterations, which advances 68 iterative cycles compared with the ant colony algorithm. And optimization of the solution is close to 7.8%. Under the same experimental conditions, the scale of the instance data is independent of the difference of the optimal solution, which means the scale of the example does not affect the accuracy of the algorithms. The proposed IAC can significantly improve the accuracy of the solution by properly extending the search time for neighborhood within an acceptable time limit. Compared with other algorithms, the optimal result is obtained by the proposed IAC in each group. The optimal solution obtained by IAC is optimized more than 40% than the known upper bound in the case of CMT2. 4 tabs, 5 figs, 28 refs.

Key words: traffic engineering; emergency logistics; open-loop vehicle routing problem; reliability; ant colony algorithm; fish swarm algorithm

0 引言

救灾物资的应急物流供应问题一直是救灾中不容忽视的关键问题。然而,在突发性事件发生时,中国由于应急物流造成的损失占其损失总额的15%~20%^[1]。

中国应急物流的供应体系可以看成是多阶段的物流配送体系,不同阶段所对应的应急物流需求环境呈现显著差异特征。区域配送中心(regional distribution center, RDC)与物流配送中心(logistics distribution center, LDC)之间通常考虑物资平衡性的中长期调度,临时性的风险程度较低,应急响应需求程度不高。灾难发生时,能否在关键救援期内将相对匮乏的应急物资合理分配到各受灾点,使其效用最大化,对于整个应急救援活动的可靠性起着决定性作用。因此,末端物资向受灾需求点的供应物流对应急物流配送车辆路径问题提出了巨大挑战。如何利用地方有限的运输资源在第一时间内向各受灾需求点供应充足的救灾物资,成为应急供应体系中车辆调度策略必须考虑的关键问题。

国内外学者对应急物流背景下的车辆路径问题

进行了较为广泛的探讨。Ardekani 等提出需要对救援物资的运输、供应进行管理,首次提出了救援车辆调度问题^[2];Barbarosoglu 等提出了 2 层确定型决策模型解决应急物流中直升机调度问题^[3];Liu 等构建了一个新的复合加权多目标优化模型,综合考虑了消耗于应急配送中心的物流时间及费用惩罚^[4];吴青等基于路段通行时间的优化,建立了震后救灾车辆调度路径优化模型^[5];Ukkusuri 等提出了应急物流设施预选址问题,并考虑了应急车辆路径及可能发生的交通网络中断问题^[6];刘杨等在考虑通行可靠性、安全性、道路限制条件的基础上,建立了城市内部应急车辆出行最优路径选择的多目标优化模型^[7];Hu 在可预见应急物资需求与补给的情况下,以运输成本和物资短缺最小化为目标,提出了一种多目标优化模型^[8];刘帆归纳了应急物流车辆路径问题需考虑的主要因素并构建对应数学模型,提出一种自适应遗传算法对该问题进行求解^[9];Özdamar 等提出应用层次聚类算法找到密集型灾后车辆路径问题的最优解^[10];Zhang 等提出新的算法求解应急物流车辆路径问题^[11-12];Wang 等建立了确定需求下应急物流的开放式车辆路径问题的优

化模型^[13];Tofighi 等提出不确定条件下包含中心物资库与地方配送中心的双层应急物流网络设计问题,同时构建了一种新的两阶段模糊随机规划方法求解^[14];Huang 等用随机变量描述第 4 方物流因数数据缺乏引起的配送时间不确定性,并在此基础上构建了一个新的不确定规划模型^[15];程碧荣等在假设救灾物资的随机性服从正态分布的基础上,建立了随机需求下车辆路径问题的多目标优化模型^[16]。

已有学者从线性规划、整数规划等角度对应急物流车辆路径问题进行了相关研究^[17-18],但其模型对灾后救援路径的通行能力差异性以及物资配送优先级均欠缺考虑;也有部分学者在启发式算法上初步寻求针对这一问题的有效求解方法,但在算法的求解精度和收敛性方面仍有待提高^[19-21]。因此,本文在引入救援路径可靠性因素的基础上,构建基于物流响应能力的应急物流车辆路径数学模型。同时,改进传统的蚁群算法,融入人工鱼群算法的思想,引入拥挤度因子调整蚁群的聚集策略,从而改善算法的精确性与收敛性。

1 应急物流车辆路径模型

1.1 问题描述

本文研究的应急物流车辆路径问题基于中国应急物流供应体系中的第 3 阶段,如图 1 中区域受灾阶段(阶段Ⅲ)所示。该问题可归结为带时间窗的开环车辆路径问题,其中出救点和各受灾需求点构成应急物流网络节点集合,各节点间存在有效的应急救援路径。灾难发生后,在应急物流网络中产生 N 个节点,救灾车辆由出救点装载救灾物资并出发,要求在各受灾需求点各自的救灾时间窗内将数量已知的救灾物资送达。本文不考虑灾难发生时路径中断的可能性,但引入灾后不同道路通行能力可靠性指标,反映灾后运输路径实际通行情况差异对救灾物资运输产生的影响。

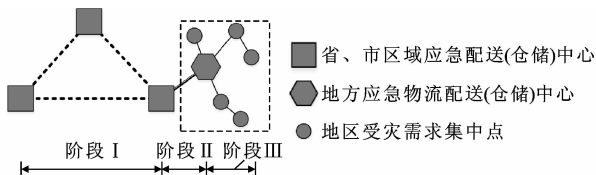


图 1 中国应急物流供应体系示意

Fig. 1 Illustration of emergency logistics supply system in China

1.2 参数定义

令 $G=(N,A)$ 表示完全有向的应急物流网络。本文参数及相关变量定义见表 1。

表 1 参数定义
Tab. 1 Parametes definition

符号	定义
集合	N 节点的集合, $N=\{i,j i,j=0,1,\cdots,n\}$ 且配送中心为 0
	D 受灾需求点的集合, $D=N/\{0\}$
	S 受灾需求点的任意子集, $S\subseteq D$
	A 救灾路径的有向弧集合, $A=\{(i,j) i\neq j\in N\}$
参数	K 物资运输车辆集合, $K=\{k 1,2,\cdots,m\}$, k 为救援车辆。
	n 受灾需求点数量
	m 救灾车辆数
	v 救灾车辆平均行驶速度
	Q 救灾车辆最大承载物资量
	q_i 受灾点 $i\in D$ 的救灾物资需求量
	u_i 与卸载救灾物资相关的物流作业时间,规定 $u_0=0$
	β_i 受灾点 $i\in D$ 的物资需求紧急程度系数, $\beta_i\leq 1$ 且其值越大表示目标物质需求紧急程度越高
	t_i^v 受灾点 $i\in D$ 的救灾时间窗限制, t_i^v 为上界
	d_{ij} $i\neq j\in N$ 间救援路径 $(i,j)\in A$ 的长度
	α_{ij} $i\neq j\in N$ 间救援路径 $(i,j)\in A$ 的可靠性系数, $\alpha_{ij}>1$, 且其值越大表示目标路径可靠性越高
	t_i 救灾车辆实际到达受灾点 $i\in D$ 的时间,规定 $t_0=0$
变量	x_{ijk} 决策变量,当且仅当节点 $i\neq j\in N$ 间救援路径 $(i,j)\in A$ 由救援车辆 $k\in K$ 负责时取值为 1,否则为 0
	φ_{ik} 决策变量,当且仅当受灾点 $i\in D$ 由救灾车辆 $k\in K$ 负责时取值为 1,否则为 0
	y_{ik} 决策变量,当且仅当受灾点 $i\in D$ 为救灾车辆 $k\in K$ 的最终救援对象时取值为 1,否则为 0

1.3 应急物流开环车辆路径模型构建

在应急物流的背景下,所有救灾物资必须在有限的时间内被送达受灾地区。因此,区别于传统车辆路径问题普遍考虑物流成本最低的优化目标,本文模型基于应急物流响应能力的优化目标,以期最小化物资运输与配送过程中总的物流时间 Z ,即

$$\min Z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m t_{ij} x_{ijk} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m u_i \varphi_{ik} \quad (1)$$

s. t.

$$t_{ij} = d_{ij} / v \alpha_{ij} \beta_j \quad \forall i \in N, j \in D \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i \varphi_{ik} \leq Q \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^m \varphi_{ik} = 1 \quad \forall i \in D \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} + y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} = \varphi_{jk} \quad \forall j \in D, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = \varphi_{ik} \quad \forall i \in N, k \in K \quad (8)$$

$$t_j = t_i + t_{ij} x_{ijk} +$$

$$u_i \varphi_{ik} \quad \forall i \in N, j \in D, k \in K \quad (9)$$

$$t_i \leq t_i^v \quad \forall i \in D \quad (10)$$

$$Q, q_i, u_i > 0 \quad \forall i \in D \quad (11)$$

$$x_{ijk}, \varphi_{ik}, y_{ik} \subseteq \{0, 1\} \quad (12)$$

目标函数式(1)表示最小化救援时间,最大化应急响应能力。约束式(2)定义了 OD 对间救灾车辆的在途运输时间,综合考虑了灾后道路通行性能差异以及物资运输优先级。其中,道路通行可靠性系数 $\alpha_{ij} > 1$, 通常可通过 GO 法根据受灾实际情况构建 GO 模型计算得到^[22]。需求紧急程度因子 $\beta_i \leq 1$, 反映受灾点对救灾物资的需求优先级别,体现对救援物资运输速率的要求。式(3)为车辆容量限制约束;式(4)~式(6)保证每个受灾点都将被救灾车辆服务。式(7)和式(8)保证车辆 k 负责救援路径 $(i, j) \in A$ 时,受灾点 $i, j \in D$ 由该车负责。式(9)和式(10)限制了所有救灾物资均在受灾需求点的救灾时间窗内送达。式(11)与式(12)为标准的非负性约束和完整性约束。

2 应急物流开环车辆路径问题优化算法

考虑到本文所构建的应急物流车辆路径模型为纯整数非线性模型,且一般车辆路径问题已被证明为 NP 难问题(存在多项式检查算法验证其解的正确性的一类问题),这使得当问题具有一定规模时,采用精确算法较难获得优化解。因此,本文通过构建适宜的启发式算法以求解此类问题。

2.1 蚁群算法

蚁群算法由意大利学者 Dorigo 等于 20 世纪 90 年代初提出^[23]。在蚁群算法中,蚂蚁 s 在 t 时刻通过路径 (i, j) 上的启发式信息以及信息素的浓度计算其转移下一节点的概率 $P_{ij}^s(t)$, 可表示为

$$P_{ij}^s(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_s} [\tau_{is}(t)]^\alpha \eta_{is}^\beta} & j \in \text{allowed}_s \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\text{allowed}_s = \{V - \text{tabu}_s\}$ 为蚂蚁 s 下一步允许选择的节点, V 为所有节点集合, tabu_s 为记录蚂蚁 s 路径的禁忌表; α 为信息启发式因子,表示每次迭代蚂蚁在路线上留下轨迹的相对重要性; β 为期望启发式因子,反映蚂蚁对启发式信息的重视程度。

$\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$ 为启发式函数,其值越小则 $P_{ij}^s(t)$ 的值就越大。信息素浓度 τ_{ij} 不断增多会对原来留下的信息素进行覆盖淹没,同时残留信息素将挥发稀释。故算法中 $t+n'$ 时刻路径 (i, j) 上蚂蚁留下的信息素按如下规则更新

$$\tau_{ij}(t+n') = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (14)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{s=1}^m \Delta\tau_{ij}^s(t) \quad (15)$$

式中: ρ 为信息素挥发系数, $1-\rho$ 为信息素残留因子; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 为单次迭代中所有蚂蚁留在其行进线路 (i, j) 上的信息素增加量; $\Delta\tau_{ij}^s(t)$ 为第 s 只蚂蚁进行单次迭代搜索中留在其行进线路 (i, j) 上的信息量。

对于 $\Delta\tau_{ij}^s(t)$, 通常按照 ant-cycle 模型规则进行取值(Q 表示信息素浓度常数), 即

$$\Delta\tau_{ij}^s(t) = \begin{cases} \frac{Q}{d_{ij}} & \text{蚂蚁 } s \text{ 在 } [t, t+1] \text{ 间经过 } (i, j) \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (16)$$

2.2 人工鱼群算法

人工鱼群算法由李晓磊等于 2002 年提出^[24], 与蚁群算法类似,其同样来源于自然界中生物行为的抽象模拟。该算法通过模拟现实中鱼群的活动特征划分了觅食、聚群、追尾和随机行为 4 种算法基本行为。其中,在聚群和追尾行为中,鱼群会在食物较多的区域聚集从而模拟出数学上寻找最优解的过程;但为了避免鱼群过分拥挤使得算法过早收敛,该算法引入拥挤度因子 δ 来控制群体聚集的浓度从而防止算法过早收敛。

求极小值时,假设 t 时刻的拥挤度因子为 $\delta(t)$; 假设当前算法中鱼群状态为 X_i , 食物浓度为 Y_i ; 视野范围内探索区域中鱼群伙伴的数量为 n_i ; 中心位置为 X_c ; 食物浓度为 Y_c 。在聚群行为中,鱼群向中心位置方向移动的准则为

$$Y_c/n_i > \delta(t)Y_i \quad (17)$$

假如探索区域中状态最好的伙伴处于状态 X_j 、食物浓度为 Y_j 时,在追尾行为中,鱼群向 X_j 方向移动的准则为

$$Y_j/n_i > \delta(t)Y_i \quad (18)$$

2.3 改进人工鱼群-蚁群优化算法

在蚁群算法中,蚁群聚集的行为受信息素浓度的影响最大。因此,在次优解提前出现时很可能在次优路径上存在过多的积累信息素而使算法陷入局部最优。现有研究一般围绕改变 α 与 β 两类启发式因子取值来解决这一问题,但对于数据结构各异的实际情形而言,这一过程十分复杂且搜索范围过于

宽广。因此,本文将人工鱼群中用于控制算法收敛性的拥挤度因子引入传统蚁群算法中,提出改进的人工鱼群-蚁群优化算法,通过控制蚂蚁在搜索路径上遗留的信息素浓度来改善蚁群的聚集行为,以提升算法性能,算法流程如图 2 所示。图 2 中: t_l 、 t_u 分别为救灾节点时间窗的上、下界; N_{Cmax} 为最大迭代次数。

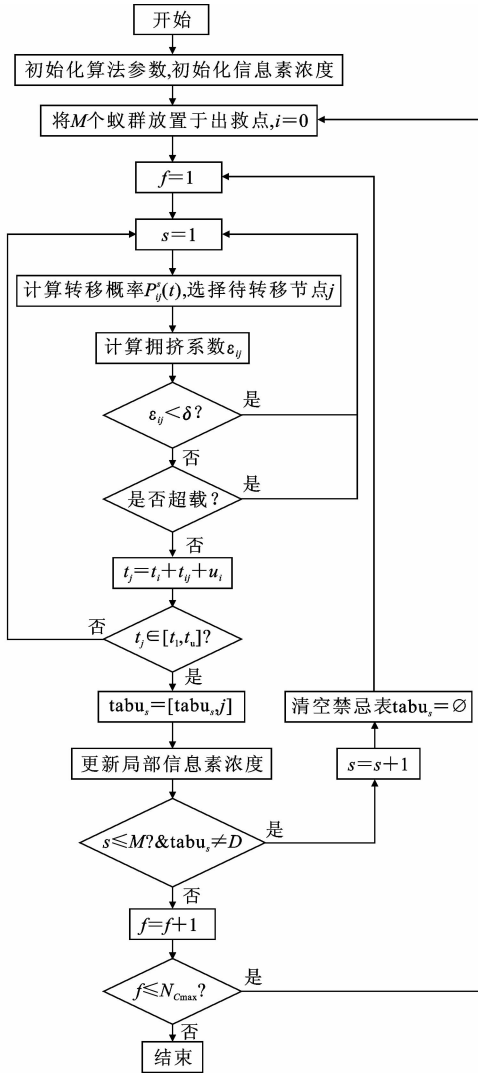


图 2 改进蚁群优化算法流程

Fig. 2 Flow of improved ant colony algorithm

在改进算法中,第 f 次迭代时的拥挤度因子 $\delta(f)$ 可表示为

$$\delta(f) = \gamma e^{-bm} \quad (19)$$

式中: γ 为极值接近水平; b 为变异系数。

根据 ant-cycle 规则,第 f 次迭代中由蚁群算法得到的待转移路径上的信息素拥挤系数 $\epsilon_{ij}(f)$ 计算为^[25]

$$\epsilon_{ij}(f) = 1 - \frac{\tau_{ij}(f)}{\sum_{i \neq j} \tau_{ij}} \quad (20)$$

算法的每次迭代首先调用蚁群算法,通过转移概率公式[式(14)]计算蚂蚁的转移概率并找到待转移路径,然后计算该路径上的信息素拥挤度,并判断是否选择该路径转移。具体地,假设 f 时刻蚂蚁根据转移概率选择从节点 i 转移至节点 j ,则计算该路径上的信息素拥挤系数 $\epsilon_{ij}(f)$ 。若 $\epsilon_{ij}(f) > \delta(f)$,认为该路径信息素浓度处于低水平状态,选中该路径并转移;反之,放弃转移并重新计算转移概率,选择其他路径。

3 数值计算分析

3.1 基础算例试验

一个模拟灾害发生时受灾区域实情的基础算例被用来检验本文模型及算法。该受灾区域含 1 个应急配送中心与 20 个受灾需求点。假设当地配送中心拥有 3 台额定载荷为 8 t 的救灾车辆参与本次救灾行动,每台救灾车辆的平均时速为 50 km/h;区域救灾路径按 2 个节点间的欧式距离计算。

在相同的试验条件下,分别采用蚁群算法及本文算法对该算例进行 200 次迭代求解。其中,蚁群算法部分所涉及的参数参照叶志伟等的研究,取值为 $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.6$ ^[26];拥挤度计算参数取值为 $\gamma=0.9$, $b=0.0002$ 。试验结果见下页图 3,其中: x 、 y 为各节点坐标;数字表示 20 个救灾点序号,3 台车分别走路径 A、路径 B、路径 C。

显然,本文模型可以有效地解决救灾车辆的路径分配问题,算法的准确性与收敛性显然优于蚁群算法。本文算法在迭代 60 次后得到了最优解,而蚁群算法则在 128 次迭代后才得到了该问题的一个次优解,本文算法在精确度上优化了约 7.8%,见下页图 4 和表 2。

3.2 实例计算试验与分析

在求解车辆路径问题中,模拟退火(SA)算法、变邻域搜索(VNS)算法及最近邻域搜索(NN)算法被广泛用于寻求问题的最优解。采用 SA 和 VNS 评估所提出改进算法在大规模问题中的性能。采用 Christofides 等^[27]和 Golden 等^[28]具有 50~320 个客户数量的大规模实例进行计算试验。所涉及文献中实例集合 CMT 和 GWKC 的规模如下页表 3 所示,所有算法通过 1 台搭载 2.66 GHz 的 Intel 处理器和 2 GB 内存的计算机平台实现。

采用 NN 算法计算出这些实例的贪婪上界。在每次迭代中,算法搜索一个距离当前车辆位置最近的未分配的客户,并且选择相应的车辆和客户作为

表 2 基础算例最优解结果

Tab. 2 Optimal numerical results of base case				
路径	蚁群算法		本文算法	
	救灾物资分配	最优解	救灾物资分配	最优解
A	7.9	30.7	7.8	28.3
B	7.8		8.0	
C	8.0		7.9	

表 3 实例数据集 CMT 与 GWKC

Tab. 3 Data set CMT & GWKC of instance		
实例数据集名称	目标节点数	车辆数/veh
CMT1	50	5
CMT2	75	10
CMT3	100	8
CMT4	150	12
CMT5	199	17
GWKC1	240	9
GWKC2	320	10

下辆车的目的地。当所有要求都满足的时候进程终止。随后,分别采用 SA、VNS 及本文算法进行计算试验。

表 4 为上述计算试验的最优解。其中,所有结果均为 10 次独立运行后得到的最优值和平均值, U_B 为采用 NN 算法获得的上界。所有运算结果均为在没有车辆容量限制且允许最大时间是 7 200 s 条件下的最优解。结果表明,在求解精准性上,本文算法优于其他算法。

下页图 5 说明了测试算法所得结果与上界 U_B 的差值以及求解时间之间的关系,横轴为算法求得最优解所需的计算时间,竖轴为算法的最优解与已知上界 U_B 的差值 GAP。该差值用 $(U_B - R_B)/U_B$ 来计算,其中, R_B 为当前测试算法求得的最优解。因此,在本文求解的最小化目标问题中,GAP 值与算法的求解精确度正相关。

表 4 CMT 与 GWKC 最优解计算结果

Tab. 4 Optimal numerical results of CMT & GWKC							
实例数据集名称	SA 算法		VNS 算法		本文算法		U_B
	最优解	平均值	最优解	平均值	最优解	平均值	
CMT1	2 338.1	2 357.4	2 341.7	2 341.7	2 311.7	2 327.9	2 843.1
CMT2	2 528.1	2 591.5	2 586.5	2 605.9	2 463.4	2 541.0	3 460.3
CMT3	4 733.3	4 802.5	4 697.4	4 777.7	4 593.3	4 653.0	4 977.6
CMT4	5 622.7	5 681.3	5 578.5	5 644.3	5 482.6	5 573.8	6 645.6
CMT5	6 543.9	6 642.6	6 321.1	6 456.4	6 218.8	6 348.3	7 517.6
GWKC1	57 451.3	57 883.2	56 637.4	57 104.4	56 525.4	56 904.4	75 687.5
GWKC2	104 630.2	105 613.1	104 280.4	104 549.3	103 252.7	103 672.8	142 948.7

从图 5 可以看出:对于计算时间较少的实例,其最优解差值范围较大。因此,可以总结出,实例数据

的规模与算法所求得最优解的差值无关,即算例规模并不影响算法求解的精确度。从计算时间上来

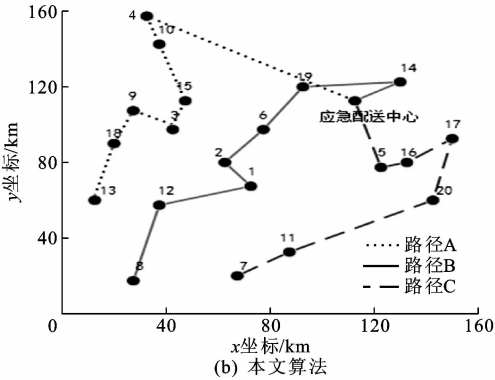
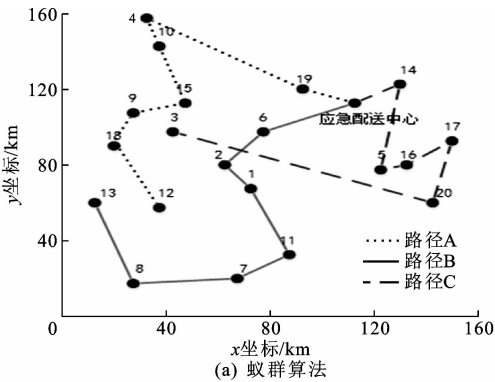


图 3 基础算例最优结果

Fig. 3 Optimal results of base case

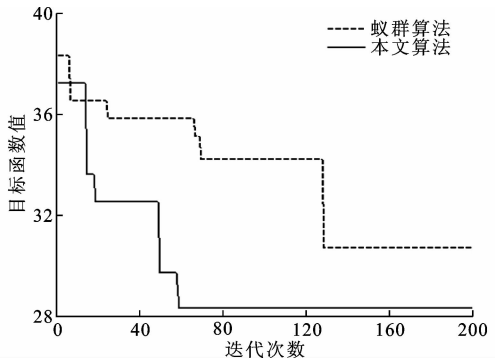


图 4 基础算例最优优化曲线

Fig. 4 Optimal solution convergence curves of base case

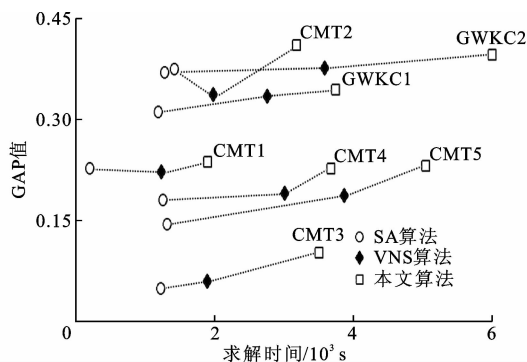


图 5 求解时间与最优解差值对比

Fig. 5 Comparison of solving time and differences of optimal solution

看,本文算法相比其他算法需要更多的计算时间,这是因为本文算法在蚁群算法的基础上增加了鱼群算法的拥挤度因子,故需在邻域搜索中花费更多的时间。本文算法的 GAP 值均高于 VNS 算法及 SA 算法,且实例 CMT2 的计算结果中,本文算法的最优解比已知上界 U_B 优化了超过 40%,所以本文算法精度优于其他 3 种常用算法。

4 结 语

(1)针对应急物流背景下的车辆路径问题,构建基于物流响应能力的车辆路径模型,从而最小化救灾物资运输与配送过程中总的物流时间。该模型综合考虑了应急物流救灾过程中的关键性道路可靠性及物资需求紧急程度因素。

(2)提出一种改进蚁群算法求解此类应急物流车辆路径问题。通过引入人工鱼群算法中的拥挤度因子改善标准蚁群算法的寻优能力,克服蚁群易陷入局部最优的瓶颈。数值计算结果表明,本文算法在精确性、收敛性和寻优速率上均较蚁群算法有显著改善,且该算法的最优解优于其他 3 类常用启发式算法。

(3)本文研究是基于对现实应急物流复杂化场景的一种简化假设,其实际应用中还可能面临更加复杂的约束因素与环境。进一步的研究将着重针对更加贴合实际应用场景下的限制因素进行探讨。同时,针对物资需求多样化和不同救灾阶段的差异化研究仍有待深入。

参考文献:

References:

[1] 何明珂. 应急物流的成本损失无处不在[J]. 中国物流

与采购,2003(23):18-19.

HE Ming-ke. The cost loss of emergency logistics is ubiquitous[J]. China Logistics & Purchasing, 2003 (23):18-19.

[2] ARDEKANI S A, HOBEIKA A G. Logistics problems in the aftermath of the 1985 Mexico City earthquake[J]. Transportation Quarterly, 1988, 42(1):107-124.

[3] BARBAROSOGLU G, ÖZDAMAR L, CEVIK A. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 140(1):118-133.

[4] LIU Ming, ZHAO Lin-du. A composite weighted multi-objective optimal approach for emergency logistics distribution[C]//IEEE. International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. New York: IEEE, 2007:968-972.

[5] 吴青, 龚亚伟. 地震救灾物资的路径选择[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2007, 37(增2):343-347.
WU Qing, GONG Ya-wei. Path selection of emergency material after earthquake[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(S2): 343-347.

[6] UKKUSURI S, YUSHIMITO W. Location routing approach for the humanitarian prepositioning problem[J]. Transportation Research Record, 2008(2089): 18-25.

[7] 刘杨, 云美萍, 彭国雄. 应急车辆出行前救援路径选择的多目标规划模型[J]. 公路交通科技, 2009, 26(8):135-139.

LIU Yang, YUN Mei-ping, PENG Guo-xiong. A multi-objective programming model of route choice of emergency vehicles before travel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(8):135-139.

[8] HU Zhi-hua. Multi-objective optimization model for emergency logistics distribution with multiple supply points and multiple resource categories[C]//IEEE. The 2nd International Conference on Industrial and Information Systems (IIS). New York: IEEE, 2010: 167-170.

[9] 刘帆. 基于遗传算法的应急物流车辆路径问题研究[D]. 西安:西安科技大学, 2012.

LIU Fan. Research on vehicle routing problem of emergency logistics based on genetic algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.

[10] ÖZDAMAR L, DEMIR O. A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief lo-

- gistics planning[J]. Transportation Research Part E, 2012, 48(3): 591-602.
- [11] ZHANG Xiao-ge, ZHANG Zi-li, ZHANG Ya-juan, et al. Route selection for emergency logistics management: A bio-inspired algorithm[J]. Safety Science, 2013, 54(2): 87-91.
- [12] CHANG F S, WU J S, LEE C N, et al. Greedy-search-based multi-objective genetic algorithm for emergency logistics scheduling[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(6): 2947-2956.
- [13] WANG Hai-jun, DU Li-jing, MA Shi-hua. Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake[J]. Transportation Research Part E, 2014, 69(9): 160-179.
- [14] TOFIGHI S, TORABI S A, MANSOURI S A. Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 250(1): 239-250.
- [15] HUANG M, REN L, LEE L H, et al. 4PL routing optimization under emergency conditions[J]. Knowledge — Based Systems, 2015, 89: 126-133.
- [16] 程碧荣, 赵晓波, 秦 进. 考虑供应不足的应急物流车辆路径优化模型及算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(6): 1682-1685.
- CHENG Bi-rong, ZHAO Xiao-bo, QIN Jin. Optimization model and algorithm for emergency vehicle route with insufficiency supply[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(6): 1682-1685.
- [17] HALE T, MOBERG C R. Improving supply chain disaster preparedness: A decision process for secure site location[J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2005, 35(3): 195-207.
- [18] 陈艺华. 突发灾害下应急物流车辆调度问题的研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2014.
- CHEN Yi-hua. Vehicle routing problem of emergency logistics for burst disasters[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2014.
- [19] EIDESSOUKI W M. Some developments in transportation network analysis and design with application to emergency management problems[D]. Raleigh: North Carolina State University, 1998.
- [20] 董影影. 基于蚁群算法的应急车辆调度系统的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- DONG Ying-ying. The emergency vehicle scheduling system based on ant colony algorithm research[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- [21] 唐 冲. 基于模拟退火算法的应急物流车辆调度[J]. 物流技术, 2017, 36(1): 114-116.
- TANG Chong. Study on emergency logistics vehicle dispatching based on simulated annealing algorithm[J]. Logistics Technology, 2017, 36(1): 114-116.
- [22] 蒋忠海. 基于 GO 法的城市道路网络系统可靠度分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- JIANG Zhong-hai. Reliability analysis of urban road network system by GO methodology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [23] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
- [24] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32-38.
- LI Xiao-lei, SHAO Zhi-jiang, QIAN Ji-xin. An optimizing method based on autonomous animats: Fish-swarm algorithm[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2002, 22(11): 32-38.
- [25] DORIGO M, GAMBARDELLA M. Ant colonies for the traveling salesman problem[J]. Biosystems, 1997, 43(2): 73-81.
- [26] 叶志伟, 郑肇葆. 蚁群算法中参数 α, β, ρ 设置的研究——以 TSP 问题为例[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004, 29(7): 597-601.
- YE Zhi-wei, ZHENG Zhao-bao. Configuration of parameters α, β, ρ in ant algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(7): 597-601.
- [27] TOTH P, VIGO D. The vehicle routing problem[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [28] GOLDEN B L, WASIL E A, KELLY J P, et al. The impact of metaheuristics on solving the vehicle routing problem: Algorithms, problem sets, and computational results[C]//CRAINIC T G, GILBERT L. Fleet Management and Logistics. New York: Springer, 2012: 33-56.