



考虑拥堵区域的多车型绿色车辆路径问题优化

赵志学^{1,2*}, 李夏苗¹, 周鲜成²

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410083; 2. 移动商务智能湖南省重点实验室(湖南工商大学), 长沙 410205)

(* 通信作者电子邮箱 zhaozhixue90@126.com)

摘要:针对降低物流配送过程中产生的碳排放问题,从绿色环保角度出发,提出一种考虑交通拥堵区域的多车型物流配送车辆的绿色车辆路径问题(GVRP)。首先分析不同类型车辆、不同拥堵状况对车辆行驶路线规划的影响,然后引入基于车辆行驶速度和载重的碳排放速率度量函数;其次以车辆管理使用费用和油耗碳排放成本最小作为优化目标,构建双目标绿色车辆路径模型;最后根据模型的特点设计一种融合模拟退火算法的混合差分进化算法对问题进行求解。通过实验仿真验证模型和算法可以有效规避拥堵区域,与只使用单一4t车型配送相比,所提模型总成本降低了1.5%,油耗碳排放成本降低了4.3%;和以行驶距离最短为目标的模型相比,所提模型的总配送成本降低了8.1%。说明该模型提高物流企业的经济效益也促进了节能减排。同时所提算法与基本差分算法相比,总配送成本可以降低3%~6%;与遗传算法相比,优化效果更明显,总配送成本可以降低4%~11%,证明该算法更具有优越性。综上所述所提模型和算法可以为物流企业城市配送路径决策提供良好的参考依据。

关键词:绿色车辆路径;能耗;碳排放成本;混合差分进化算法;拥堵

中图分类号:TP301.6 文献标志码:A

Green vehicle routing problem optimization for multi-type vehicles considering traffic congestion areas

ZHAO Zhixue^{1,2*}, LI Xiamiao¹, ZHOU Xiancheng²

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. Key Laboratory of Hunan Province for Mobile Business Intelligence, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China)

Abstract: In order to reduce the carbon emission of vehicles during the process of logistics distribution, on the perspective of green environmental protection, a Green Vehicle Routing Problem (GVRP) of logistics distribution vehicles with multi-type vehicles considering traffic congestion areas was analyzed. Firstly, the effect of multi-type vehicles and different traffic congestion situations on the vehicle route planning was investigated. Secondly, the metric function of carbon emission rate was introduced on the basis of vehicle speed and load. Thirdly, a dual-objective green vehicle routing model with minimizing the vehicle management cost as well as the fuel consumption and carbon emission cost as optimization objects was established. Finally, a hybrid differential evolution algorithm combined with simulated annealing algorithm was designed to solve the problem. Simulation results verify that the model and algorithm can effectively avoid the congestion areas. Compared to the simulation results only using 4 t vehicles for distribution, the proposed model has the total cost reduced by 1.5%, and the fuel consumption and carbon emission cost decreased by 4.3%. Compared the model with optimization objective of shortest driving distance, the proposed model has the total distribution cost decreased by 8.1%, demonstrating that the model can improve the economic benefits of logistics enterprises and promote the energy saving and emission reduction. At the same time, compared with the basic differential algorithm, the hybrid differential evolution algorithm with simulated annealing algorithm can reduce the total transportation cost by 3% to 6%; compared with the genetic algorithm, the proposed algorithm has more obvious optimization effect, and has the total transportation cost reduced by 4% to 11%, proving the superiority of the algorithm. In summary, the proposed model and algorithm can provide effective advices for the urban distribution routing decision of logistics enterprises.

Key words: green vehicle routing; energy consumption; carbon emission cost; hybrid differential evolution algorithm; congestion

收稿日期:2019-07-30;修回日期:2019-10-03;录用日期:2019-10-08。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61304253, 61403426);教育部人文社科基金资助项目(14YJCZH099)。

作者简介:赵志学(1982—),男,河北唐山人,讲师,博士研究生,主要研究方向:交通运输规划、智能优化;李夏苗(1963—),男,湖南茶陵人,教授,博士,主要研究方向:物流企业管理、运输系统分析与决策;周鲜成(1965—),男,湖南双峰人,教授,博士,主要研究方向:优化理论与方法、智能物流。



0 引言

近年来,节能减排热点问题引起了世界各国的密切关注。在哥本哈根举行的联合国气候大会上,中国承诺到2020年将单位GDP(Gross Domestic Product)的碳排放量减少到2005年水平的50%~60%。在全球碳排放统计中,整个交通运输部门占14%,而公路运输碳排放占整个交通部门碳排放量的70%以上^[1]。实施绿色运输已经成为当今社会节能减排的必然趋势,倡导绿色发展,以降低能耗、减少碳排放为目标的绿色车辆路径问题已然成为学术界研究的热点。Bektaş等^[2]对传统车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)的目标进行扩展,提出污染路径问题,其优化目标不仅考虑车辆使用成本,同时也考虑车辆的油耗和碳排放。Demiraab等^[3]、Demir等^[4-5]等对绿色车辆路径问题进行了评述;Kara等^[6]、Tarantilis等^[7]、李进等^[8]、陈玉光等^[9]、吴丽荣等^[10]分别以最小化油耗、最短行驶距离、最小化租车费用以及准时送货为优化目标建立绿色车辆路径模型(Green Vehicle Routing Problem, GVRP),并分别采用改进的粒子群算法、基于模拟退火和禁忌搜索的两阶段求解方法以及基于路径划分的禁忌搜索算法进行求解。Xiao等^[11]、Zhang等^[12]、葛显龙等^[13]构建了不同目标下的低碳低油耗的绿色车辆路径问题,并分别采用模拟退火算法、混合人工蜂群算法、改进的粒子群算法和遗传算法进行求解。在油耗和碳排放测度研究中,Demir等^[14]和Suzuki^[15]研究表明车速、载重、道路坡度和交通拥堵是影响油耗最重要的因素,Kuo^[16]、Maden等^[17]研究表明道路拥堵对油耗和碳排放将产生重要影响,随着拥堵程度的增加,油耗和碳排放量将显著增加。Tarantilis等^[18]以希腊肉类和牛奶的配送为例,研究了多车型、多配送中心的开放冷链物流配送车辆路径问题,并采用门槛值法进行求解;Amorim等^[19]针对葡萄牙一个食品配送问题构建了多时间窗多车型车辆路径问题。何东东等^[20]研究在传统带时间窗车辆路径问题(Vehicle Routing Problem with Time Window, VRPTW)的基础上,从节能减排的角度出发,引入了油耗和碳排放量的近似计算方法,建立了带时间窗且考虑低碳和成本节约的多车型绿色车辆路径问题模型,并设计了改进的禁忌搜索算法求解该问题。

综上所述,关于绿色车辆路径问题的研究已经产生一定的研究成果,但也存在一定的局限性,主要体现在以下三个方面:1)对客户分布在交通拥堵状况不同的区域,其绿色车辆路径如何规划缺乏研究;2)对车辆行驶在不同拥堵状况的路段上,其速度变化和载重变化如何影响车辆的能耗和碳排放量缺乏研究;3)城市配送大多选用单车型进行研究,而没有考虑多车型混合配送。

基于此本文研究配送中心采用具有固定车辆数的多种车型,以能耗、碳排放和车辆管理使用成本总成本最小为目标的车辆路径问题,充分考虑城市拥堵状况对车辆油耗和碳排放影响,引入基于车速和载重的油耗和碳排放测度模型,建立了考虑交通拥堵的多车型绿色车辆路径数学规划模型,然后设计了混合差分进化算法求解该问题,将物流管理和能源管理理论有效衔接。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

本文研究交通拥堵状况下的多车型物流配送车辆路径问题,可描述为:物流配送中心具有多种类型的车辆,给位于城市不同区域的客户配送货物;客户点的货物需求量确定,具有

时间窗要求;客户点的位置已知,拥堵区域已知,交通拥堵状况会影响车辆的行驶速度。目标是在考虑车辆油耗、碳排放和车辆使用成本的情况下,找出满足客户货物需求和时间窗要求的车辆调度和路径安排方案。

为便于分析和研究,做出如下假设:1)配送中心和客户点的位置已知,车辆从配送中心出发,完成配送任务后返回配送中心;2)配送中心具有多种类型的配送车辆,不同类型车辆的数量有限;3)车辆行驶在城市拥堵区域和非交通拥堵的路段上,其行驶速度不同;4)每位客户的货物需求量确定,均小于车辆的最大负载能力,且有服务时间窗要求,车辆可提前到达,但是要承担惩罚费用,但不能超过客户点最迟服务时间;5)每辆车运载的货物重量不能超过其最大负载能力;6)每位客户有且仅有一辆车为其提供配送服务;7)不同类型车辆的单位时间租用费用和固定发车费用不同,车辆租用费用包括车辆使用费和驾驶员工资,根据车辆配送时间进行计算;8)不同类型车辆,单位油耗的行驶距离不同;9)车辆在客户点等待和服务期间,发动机关闭,车辆没有油耗和碳排放。

1.2 符号和变量

$G = (N, R)$ 为配送网络; N 表示节点集, $N = \{0, 1, \dots, n\}$,其中0表示配送中心,其余节点为客户点 N' ; $N' = N \setminus \{0\}$ 。

R 为连接顶点的弧集, $R = \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$, d_{ij} 为任意节点 i 到 j 的距离。

C 为交通拥堵区域, \bar{C} 为非交通拥堵区域。

m 表示车辆的类型, $m = \{1, 2, \dots, M\}$; k 表示车辆的编号, $k = \{1, 2, \dots, K\}$ 。

K_m 为 m 类型车辆数限制,总的车辆数限制为 $K = \sum_{m=1}^M K_m$ 。

v_{jk}^m 表示 m 类型车辆 k 在路段 R_j 的速度,存在 v_c 和 v_f 两种速度, v_c 为车辆在交通拥堵路段上的速度, v_f 为车辆在非拥堵区域畅通状况下行驶的车速。

Q_m 为 m 类型车辆的容量, $m = \{1, 2, \dots, M\}$ 。

L_{jk}^m 表示 m 类型车辆 k 在路段 R_j 的载重。

q_i 为客户 i 的货物需求量($q_0 = 0$); $[ET_i, LT_i]$ 表示客户 i 的时间窗要求; t_{ik}^m 为 m 类型车辆 k 到达客户 i 的时间; s_i 为给客户 i 配送货物的服务时间, Fc 表示总的油耗, f_{jk}^m 为 m 类型车辆 k 在路段 R_j 上的油耗。

E 表示总的碳排放量, e_{jk}^m 为 m 类型车辆 k 在路段 R_j 上的碳排放。

TT 表示总的配送时间。

ξ_m 为 m 类型车辆的固定发车费用。

μ_m 为 m 类型车辆单位时间租用费用。

p_m 为租用 m 类型车辆单位时间人力成本。

P_{ik}^m 为 m 类型车辆 k 服务客户 i 点的时间窗惩罚费用成本。

λ_f 为单位油耗费用。

λ_e 为单位碳排放费用。

X_{jk}^m 为决策变量。若车辆 k 从 i 行驶至 j ,则 $X_{jk}^m = 1$;否则 $X_{jk}^m = 0$ 。

Y_{ik}^m 为决策变量。若 m 类型车辆 k 为客户 i 服务,则 $Y_{ik}^m = 1$;否则, $Y_{ik}^m = 0$ 。

2 模型建立

2.1 考虑交通拥堵区域描述以及行驶时间计算

为了更好地描述实际城市拥堵状况,本文采用文献[21]方法,利用交通拥堵圆形(Congestion Circle, CC)区域模拟城



市拥堵状况。设以城市中心点为圆心, r 为半径的圆形区域作为城市拥堵区域, 其余为非拥堵区域, 拥堵区域内所有路段均为拥堵路段, 车辆在该路段内均以拥堵车速 v_c 行驶, 车辆在非拥堵区域内陆段以 v_f 行驶。行驶随着时间变化, 拥堵区域半径 r 和拥堵车速随之变化。如 R_{ij} 在城市拥堵区域内, 存在交通拥堵状况, 车辆以拥堵速度 v_c 行驶, 车速较慢, 其行驶时间为 d_{ij}/v_c ; 如果 R_{ij} 在非拥堵区域内, 车辆以正常速度 v_f 行驶, 车速较快, 其行驶时间为 d_{ij}/v_f ; 如行驶路段跨越了拥堵区和非拥堵区, 则其行驶时间由行驶在交通拥堵路段 R_{ij1} 上的时间和非拥堵路段 R_{ij2} 上的时间两部分构成, 车辆行驶的具体情况如图 1。车辆行驶在 R_{ij} 时间 t_{ij} 的计算如式(1)所示。通过行驶路线(以两节点之间的线段)与拥堵区域(圆形区域)之间的位置关系判断拥堵路段和非拥堵路段长度进而求解行驶时间。

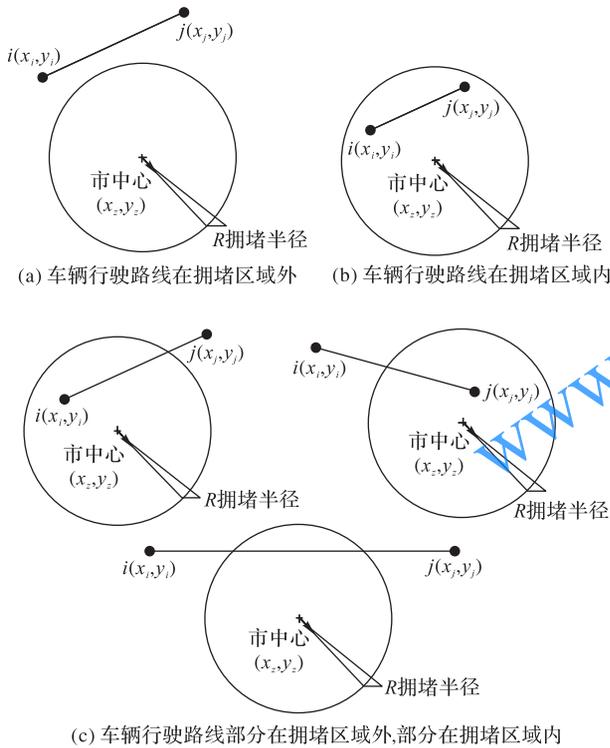


图 1 考虑拥堵区域的车辆行驶路线
Fig 1 Vehicle routes considering traffic congestion areas

$$t_{ij} = \begin{cases} \frac{d_{ij}}{v_c}, & R_{ij} \subset C \\ \frac{d_{ij}}{v_f}, & R_{ij} \subset \bar{C} \\ \frac{d_{ij1}}{v_c} + \frac{d_{ij2}}{v_f}, & R_{ij1} \subset C, R_{ij2} \subset \bar{C} \text{ 且 } d_{ij1} + d_{ij2} = d_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

其中: C 为拥堵区域, \bar{C} 为非拥堵区域。

2.2 需求点时间窗处理

由于客户对收货时间有着严格的要求, 要求配送车辆必须在规定好的时间窗内到达, 但是由于道路拥堵和车辆调度的原因, 配送车辆往往不能准时到达, 这就予以一定惩罚, 因此惩罚费用成本 P_i 为:

$$P_i = \begin{cases} C1*(ET_i - t_{ik}^m), & t_{ik}^m < ET_i \\ 0, & ET_i \leq t_{ik}^m \leq LT_i; \forall i \in N' \\ C2, & t_{ik}^m > LT_i \end{cases} \quad (2)$$

时间窗约束允许车辆到达时间早于 ET_i , 则等待时间为 $\omega_{ik}^m = ET_i - t_{ik}^m$, 但到达时间早于时间窗则需要承担一定的惩罚费用, $C1$ 是惩罚因子, $C2$ 为非常大的正数。

2.3 油耗与碳排放计算

油耗和碳排放受多种因素影响, 其中速度和载重是两个最重要的影响因素。根据文献[22], MEET(Methodology for calculating Transport Emissions and Energy consumption)碳排放率估计函数:

$$e(v) = A_0 + A_1v + A_2v^2 + A_3v^3 + \frac{A_4}{v} + \frac{A_5}{v^2} + \frac{A_6}{v^3} \quad (3)$$

其中: $e(v)$ 为空载车辆在坡度为 0 的道路上行驶的碳排放率(单位 g/km), v 表示车速, 根据不同拥堵状况车速不同。 $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ 为预定义参数, 载重不同的货车取值不同。同时车辆碳排放率还要考虑载重因素进行修正。MEET 模型载重修正因子:

$$LC = B_0 + B_1\gamma + B_2\gamma^2 + B_3\gamma^3 + B_4v + B_5v^2 + B_6v^3 + \frac{B_7}{v} \quad (4)$$

其中: γ 表示载重率; v 表示车速; $B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7$ 为定义参数, 不同车型的货车取值不同。不同车型的货车碳排放率 c_{ijk}^m (kg/km) 为:

$$c_{ijk}^m = e(v) * LC / 1000 \quad (5)$$

根据文献[22]方法, 碳排放率可以转换成油耗率, 设定 1 L 汽油产生 2.32 kg 碳排放量, 则产生 1 kg 碳排放量的油耗为 $1/2.32 = 0.431$ L。因此不同车型的货车油耗率为:

$$f_{ijk}^m = 0.431 * c_{ijk}^m \quad (6)$$

2.4 模型的构建

在考虑行驶速度、运载量变化影响油耗成本、车载容量约束、时间窗、多车型等情况下, 满足所有客户的需求, 以油耗和碳排放量最少、车辆使用成本最低为目标, 构建双目标优化模型, 如下所示:

$$\min O_1 = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n X_{ijk}^m * f_{ijk}^m * \lambda_f + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n X_{ijk}^m * c_{ijk}^m * \lambda_e \quad (7)$$

$$\min O_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (\mu_m + p_m) * t_{ij}^m * X_{ijk}^m + \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^K \sum_{i=1}^n (\mu_m + p_m) * Y_{ik}^m * s_i + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n X_{0jk}^m * \xi_m + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n X_{ijk}^m * P_i \quad (8)$$

s. t.

$$\sum_{j=1}^n X_{0jk}^m \leq 1; \forall k, \forall m \quad (9)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ijk}^m = 1; \forall i \in N' \quad (10)$$

$$\sum_{i=0}^n X_{ijk}^m = 1; \forall j \in N' \quad (11)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq j} X_{ijk}^m = \sum_{i' \in N, i' \neq j} X_{i'jk}^m; \forall j \in N', \forall k, \forall m \quad (12)$$



$$\sum_{i=1}^n Y_{ik}^m q_i \leq Q_m; \forall k, \forall m \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K X_{0jk}^m \leq K_m; \forall j \in N' \quad (14)$$

$$t_{ik}^m + s_i \leq LT_i; \forall i \in N' \quad (15)$$

$$X_{ijk}^m (t_{jk}^m - t_{ik}^m) \geq 0; \forall i \in A, j \in N', \forall m, \forall k \quad (16)$$

$$X_{ijk}^m = \{0, 1\}; \forall m, \forall k \quad (17)$$

$$Y_{ik}^m = \{0, 1\}; \forall m, \forall k \quad (18)$$

式(7)、(8)表示目标函数,第一个目标表达式表示所有车辆油耗和碳排放的总费用,第二个目标表达式表示车辆管理成本,包括使用的时间成本、人力成本、车辆的固定发车费用,以及时间窗惩罚成本;式(9)表示每辆车只能从配送中心离开一次;式(10)、(11)表示一个客户点只能有一辆车进行配送服务且仅服务一次;式(12)表示进入客户点服务的车辆必须离开客户点;式(13)表示车辆的载重不能超过其容量;式(14)表示每种类型的车辆数约束;式(15)表示时间窗要求;式(16)表示车辆配送的先后顺序;式(17)、(18)表示0-1决策变量。

3 求解模型混合差分进化算法

3.1 混合差分进化算法设计的基本思想

基本差分(Differential Evolution, DE)算法^[23-26]是一种基于实数编码的用于连续空间函数的优化进化算法,而本文多车型绿色车辆路径优化问题是一个典型的离散化问题,因此标准DE算法不能直接应用于本文模型求解。为此本文通过种群结构的修正和操作算子的改进将变异操作后的实数转化为整数,使之能继续进行交叉操作和选择操作,从而使差分进化算法能求解车辆路径这种离散优化问题。

3.2 种群编码和解码

1)种群编码。混合DE算法编码采用如下设计,假设一个配送中心为n个需求点提供配送,其中配送中心可以提供M种类型运输车,运输车数量为K,其中1至e号车和e+1至K号车分别为两种不同类型运输车。采用n维实数向量表示粒子的状态,因此个体每一维 $x_j(j=1, 2, \dots, n)$ 为实数,其范围为(1, K+1)。对n维例子进行解码操作,其中整数部分代表车辆号码,由1-K整数随机构成,整数部分相同的,表示由同一辆车运输,小数部分的大小表示车辆运输需求点的次序。

2)解码说明。按照文献[25]方法,记 $[x]$ 表示对X取整数部分,具体解码过程如下:

- 步骤1 对于粒子每一维,进行 $[x]$ 操作。
- 步骤2 根据 $[x]$ 值进行分组,形成车辆分组。
- 步骤3 在分组内,根据客户点时间窗要求,对同组维数进行排序操作获得车辆配送需求点的次序。

假设7个客户VRP问题需要三辆车,具体参数如表1采用编码方式如下。

表1 编码举例
Tab. 1 Code examples

客户点	时间窗	粒子 x_i
1	(15, 30)	4. 10
2	(10, 30)	1. 86
3	(50, 90)	1. 53
4	(30, 80)	1. 12
5	(30, 40)	1. 24
6	(20, 40)	3. 29
7	(40, 50)	3. 05

按照上述编码方法解码,1至2号车为一种类型运输车,3号车为另一种类型运输车。将 $x_i(i=1, 2, \dots, 7)$ 取整,整数部分相同的分在一组,得到3组:(4, 1), (1, 86, 1, 53, 1, 12, 1, 24), (3, 29, 3, 05),将上述状态映射到相应客户点得到:(1), (2, 3, 4, 5), (6, 7);然后根据时间窗要求,客户点最早的服务时间进行排序,如果客户点最早服务时间相同,则比较最晚服务时间。得到相对应的配送路线:第一辆车(0-1-0),第二辆车:(0-2-5-4-3-0),第三辆车(0-6-7-0)通过此种解码,维数和客户点数目相当,使粒子可以进行变异和交叉操作,使差分进化算法能用于求解VRP这种离散优化问题。

3.3 改进差分进化算法设计

步骤1 初始化。参考文献[26]进行基本参数设置,包括:群体规模NC,最大迭代次数 T_{max} ,缩放因子F,交叉概率(Crossover Rate, CR)的上下界 CR_{min}, CR_{max} ,全局最优解为 $xbest$,迭代计数器 $t=0$,在实数(1, K+1)范围内随机产生一组n维粒子 $x(i)(i=1, 2, \dots, NC)$ 。

步骤2 构建可行解。初始解或临时种群解码后产生的线路,可能会发生客户的需求量超过车的载重或者车辆达到时间超过时间窗的情况发生,从而产生非法解。为了减少或者避免这些情况的发生,就需要对种群结构进行调整,从而产生可行解。首先要对每条线路的载重和客户进行评估,然后通过启发式算法进行调整。本模型使用节约法和最邻近法对线路内核线路间的客户进行调整,一方面对所得结果进行改进,另一方面修正非法解。具体的过程如下所示:

- 步骤2.1 计算解码后各条线路的负载,并记录。
- 步骤2.2 对于超重的非法线路,按照顺序从中移除若干客户,使其合法化。将这些客户放入待选客户列表。
- 步骤2.3 对于线路中客户负载远小于载重的线路,将其线路删除,将客户放入待选客户列表。
- 步骤2.4 根据启发式算法中最邻近法和节约法,保证线路载重可行的前提下,将待选列表的客户插入已有的线路中。如果已有线路已经饱和,则根据待选客户的最早服务时间作为种子客户初始化一辆车。
- 步骤2.5 判断待选列表是否所有客户都遍历到,如果待选客户列表还有需求点,继续进行步骤2.4;否则,则转向步骤2.6。

步骤2.6 根据现有的线路情况和客户时间窗要求,进行粒子所代表线路中客户点服务顺序的修正与改进。

步骤3 适应度函数计算。根据式(6)、(7)分别计算目标值 O_1, O_2 ,令 $w_1, w_2(w_1 \geq 0, w_2 \geq 0, w_1 + w_2 = 1)$ 分别表示 O_1, O_2 的权重。因此总的目标函数为 $fit(x) = O_1w_1 + O_2w_2$,从而获得更优的粒子即更好的行驶路线。

步骤4 变异操作。在混合DE算法中,将模拟退火算法引入到基本DE算法差分变异操作中,并在交叉操作中引用不变交叉概率因子CR策略^[25]。

$$uz_{i,t} = ra * x_{a_i} + (1 - ra) * x_{best_t} + FT(x_{b_i} - x_{c_i}) \quad (19)$$

其中: $x_{a_i}, x_{b_i}, x_{c_i}$ 为互不相同的父代个体,代表父代不同行驶路线, $xbest_t$ 为种当前迭代次数下种群中适应值最好的个体, $FT \in [0, 2]$ 为变异因子, $ra \in [0, 1], ra = (T_{max} - t) / T_{max}$,利用ra成为退火因子,从而保证算法既有较强的全局搜索能力又有较快的收敛速率和较高的搜索精度。

步骤5 交叉操作。利用交叉操作是为了增加群体的多



样性,对于群体中目标矢量个体 $x(i, :)$,将与变异矢量 uz 进行交叉操作,产生探测个体 \bar{x} 。为保证个体 $x(i, :)$ 的进化,首先通过随机选择,使得 \bar{x} 至少有一位由 uz 贡献,而对于其他位,可利用一个交叉概率因子 CR ,决定 \bar{x} 中哪位由 uz 贡献,哪位由 $x(i, :)$ 贡献。交叉操作的方程为:

$$\bar{x}_{i,t+1} = \begin{cases} uz_{i,t+1}, & \text{rand}(j) \leq CR \text{ 或 } j = \text{randn}(i) \\ x_{i,t}, & \text{rand}(j) > CR \text{ 或 } j \neq \text{randn}(i) \end{cases} \quad (20)$$

同时采用不变交叉概率因子 CR 策略。令:

$$CR = CR_{\min} + \frac{t(CR_{\max} - CR_{\min})}{T_{\max}} \quad (21)$$

其中: CR_{\max} 为最大交叉概率, CR_{\min} 为最小交叉概率,再通过步骤 2 得到临时可行解种群。

步骤 6 选择操作。利用“贪婪”选择策略,从种群中父代个体 $x_{i,t}$ 和实验个体 $\bar{x}_{i,t+1}$ 中选择生命力最强的作为下一代个体,从而形成新的种群。具体步骤如下:

$$x_{i,t+1} = \begin{cases} x_{i,t}, & \text{fit}(x_{i,t}) \leq \text{fit}(\bar{x}_{i,t+1}) \\ \bar{x}_{i,t+1}, & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

步骤 7 算法结束判断。进化代数 $t=t+1$,并记录当前整个群体中最佳个体。如果满足最大迭代数,则终止算法;否则

返回步骤 4。

4 算例分析

4.1 实验设置

算例采用 Solomon 测试数据库中的 R208 进行仿真实验,该算例需求点数量为 100 个,各需求点服务时间、时间窗、需求量均为算例所述,令 1 个重量单位为 30 kg。设定配送中心点坐标为(35,35),城市中心坐标为(40,40),初始拥堵区域半径为 $R=20$ km,配送中心具有满载重量分别为 4 t 和 8 t 两种不同类型的车辆。根据文献[22]以及目前交通运输市场的情况,各相关数据如表 2、表 3 和表 4 所示。

表 2 碳排放系数

Tab. 2 Carbon emission coefficients

参数	满载重量为 5 t	满载重量为 8 t
A_0	110	871
A_1	0	-16.0
A_2	0	0.143
A_3	0.000 375	0
A_4	8 702	0
A_5	0	32 031
A_6	0	0

表 3 载重修正因子系数

Tab. 3 Load correction factor coefficients

载重/t	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7
5	1.27	0.061 4	0	-0.001 10	-0.002 35	0	0	-1.33
8	1.26	0.079 0	0	-0.001 09	0	0	-2.03E-7	-1.14

表 4 运输车辆信息

Tab. 4 Vehicle information

车辆编号	载重/t	启用成本/元	管理租用成本 μ /(元·h ⁻¹)	人力成本 p /(元·h ⁻¹)
1~5	4	400	60	20
6~10	8	500	80	30

参考碳交易市场的行情,将与有关费用设置如下^[27]: $\lambda_j = 7.5$ 元/L, $\lambda_e = 0.052 8$ 元/kg,时间窗惩罚系数 $c_1 = 10$ 元/分。将上述混合差分进化算法程序在 Matlab 7.0 在 2.50 GHz CPU 和 4 GB 内存的微机上进行求解,程序运行参数设置如下:种群规模 $NC=50$,最大迭代次数 $T_{\max}=100$;最小交叉概率为 $CR_{\min} = 0.1$,最大交叉概率 $CR_{\max} = 0.9$,变异因子 $FT = 0.5$ 。

4.2 算例仿真结果分析

4.2.1 车辆行驶路径与拥堵区域结果分析

为了更加符合实际,令拥堵区域内车速 $v_c = 30$ km/h,城市拥堵半径为 20 km,并取权重 $w_1 = 0.8, w_2 = 0.2$ 进行算例仿真,运行时间为 690.4 s。其优化仿真结果见表 5。表 5 中 VN (Vechile Number) 表示车辆编号,VT (Vechile Type) 表示车辆型号,VR (Vechile Route) 表示行车路径,FC (Fuel Cost) 表示油耗成本,CC (Carbon Cost) 表示碳排放成本,VMC (Vehicle Management Cost) 表示车辆使用管理成本,DL (Distance Length) 表示行驶距离。由表 5 可知:1)不同车型车辆配送的需求点数量存在较大差别,配送数量最多的 8 t 车型达到 19 个点,数量最少的 8 t 车型的只有 3 个点,而且在固定数量的小型车和中型车情况下,小型车完全使用,中型车未完全使用(10 号车未启用),其原因是 100 个需求点的时间窗不一样,车辆行驶过程中在满足车载量和最小化适应度函数的同时,尽可

能避免错过时间窗而产生的惩罚费用;2)小型车的单位油耗碳排放成本、车辆启用成本和车辆使用成本也低于中型车,因此小型车使用率高于中型车,先尽可能满足小型车配送,然后在满足中型车配送。

4.2.2 不同拥堵程度仿真结果比较

模型的目标函数和其他约束不变,拥堵区域行驶速度 v_c 不同,令 $w_1 = 0.8, w_2 = 0.2$,拥堵半径为 20 km,对不同拥堵车速下的仿真结果进行分析,如表 6 所示。FCC (Fuel Consumption and Carbon emission cost) 表示油耗碳排放成本,TC (Transportation Cost) 表示总配送成本,NV (Number of Vehicles) 表示车辆使用数量。数据表明:1)随着拥堵区域行驶速度逐渐降低,导致油耗、碳排放的费用逐渐增大,说明油耗和碳排放、车辆使用成本以及总成本与拥堵程度正相关;2)随着拥堵状况严重,拥堵车速减小,行驶距离也随之增大,说明随着拥堵程度的增加,车辆要尽量规避拥堵区域,导致行驶距离随之增大,会对行驶路径产生影响;3)随着拥堵车速减小,为了满足时间窗,就会增加车辆数来满足需求点,说明拥堵状况越差,车辆使用数越多,车辆使用成本提高。

4.2.3 不同拥堵半径仿真结果比较

需求点位置、时间窗和需求量等情况不变, $v_f = 60$ km/h, $v_c = 30$ km/h,考虑拥堵区域变化情况下分析计算。表 7 中,RC (Radius of Congestion) 表示拥堵区域半径。由表 7 结果可见,随着拥堵区域扩大,车辆使用数量、车辆总行驶距离、车辆油耗和碳排放费用与车辆使用费用都会随之增加。由此可知车辆使用成本与拥堵半径正相关,尤其在拥堵半径最大时也就是拥堵区域最大时总成本最大,油耗和碳排放也是最多。



表 5 算例 R208 车辆在拥堵车速 $v_c=30$ km/h 下的行驶路径方案明细表
 Tab. 5 Driving path scheme of the example R208 vehicles at $v_c=30$ km/h in traffic congestion area

VN	VT/t	VR	CC/元	FC/元	VMC/元	DL/km
1	4	0,27,6,37,91,42,22,80,63,19,45,17,44,76,0	5.95	340.49	1294.90	267.03
2	4	0,92,57,21,24,34,70,69,11,47,38,13,84,0	6.07	346.72	1518.90	278.44
3	4	0,90,53,10,55,3,1,35,84,21,85,93,80,66,91,0	3.90	222.93	918.84	180.23
4	4	0,89,98,61,16,86,7,1,26,73,0	3.45	196.86	936.44	152.45
5	4	0,52,60,48,10,20,50,23,54,0	5.48	313.03	1289.20	185.56
6	8	0,12,68,29,78,81,66,90,49,36,46,82,83,2,41,18,62,9,58,55,0	10.63	607.28	2136.20	357.70
7	8	0,8,40,75,43,15,85,96,5,88,31,30,51,3,99,53,87,0	8.24	471.10	1747.01	263.86
8	8	0,59,56,39,35,33,32,64,79,8,4,74,25,77,100,0	13.42	607.27	2391.00	448.25
9	8	0,95,97,67,0	2.88	164.33	1201.60	106.67
10	8		0.00	0.00	0.00	0.00
合计	60		60.02	3270.01	13434.09	2240.19

注：总费用 18 846.02 元；行驶距离 2 349.71 km。

表 6 不同拥堵车速状况下行驶路径与相关费用表

Tab. 6 Driving paths and related costs with different speeds in traffic congestion area

$v_c/(km \cdot h^{-1})$	FCC/元	VMC/元	TC/元	DL/km	NV
40	3 223.98	12 903.64	16 127.62	2 178.92	9
30	3 330.03	13 434.09	16 764.12	2 240.19	9
15	3 567.02	14 854.18	18 421.20	2 376.81	10

表 7 不同拥堵区域情况下数据分析

Tab. 7 Data statistics under different congestion area situations

RC/km	NV	FC/元	CC/元	VMC/元	TC/元	DL/km
0	8	2 898.34	50.72	11 481.64	14 430.70	2 019.47
10	9	3 089.07	54.06	12 117.88	15 261.01	2 176.22
20	10	3 270.01	60.02	13 434.09	16 764.12	2 240.19
30	10	3 619.46	63.34	14 815.18	18 497.98	2 311.31
无穷大	10	5 078.16	88.87	16 704.11	21 871.14	2 493.47

4.2.4 不同权重组合的仿真结果比较

在其他变量参数不变的情况下，令 $v_f=60$ km/h， $v_c=30$ km/h，拥堵半径为 20 km，将油耗与碳排放费用与车辆使用费用的权重 w_1 、 w_2 分别不同取值， $w_1+w_2=1$ ， $w_1<1$ ， $w_2<1$ ， $w_1>w_2$ 。计算结果如表 8 所示。由表 8 可知，配送总成本费用主要由油耗碳排放费用和车辆使用成本费用组成，而且车辆使用成本占总成本的很大比例，这说明：1) 物流配送成本主要来自车辆使用成本，要降低物流配送成本，就要尽可能降低车辆管理使用费用。2) 油耗碳排放费用占总成本费用比例偏低，最高也只达到 20%，其中碳排放费用占总成本的比例更是微乎其微，物流企业因此不会太注意碳排放成本。3) 当 w_1 、 w_2 均为 0.5 时，车辆使用成本最低，油耗和碳排放费用最高。随着 w_1 上升， w_2 下降，油耗和碳排放费用逐渐降低，车辆使用成本升高，

表 9 不同优化目标的仿真结果比较

Tab. 9 Comparison of simulation results with different optimization objectives

优化目标	FCC/元	VMC/元	TC/元	NV	DL/km	VTT/min
本文目标	3 330.03	13 434.09	16 764.12	9	2 240.19	4 724.00
油耗与碳排放	3 188.53	14 103.63	17 292.16	9	2 265.49	4 789.23
车辆行驶距离	3 291.86	14 959.49	18 251.35	8	2 059.91	4 802.11
车辆运行时间	3 514.28	13 449.12	16 963.40	9	2 261.55	4 720.17

4.2.6 不同车型数量仿真结果比较

本文采用固定数量的不同车型的运输车辆进行配送，同

但是车辆总成本随之增大。说明如果加大对绿色路径的优化，就必须强调节能减排，导致物流配送成本增加。

表 8 不同权重仿真结果比较

Tab. 8 Comparison of simulation results with different weights

w_1	w_2	FCC/元	VMC/元	TC/元	NV
0.9	0.1	3 292.89	13 508.77	16 801.66	9
0.8	0.2	3 330.03	13 434.09	16 764.12	9
0.7	0.3	3 334.15	13 244.07	16 578.22	9
0.6	0.4	3 362.98	13 227.69	16 590.67	9
0.5	0.5	3 391.58	13 168.71	16 560.29	9

4.2.5 不同优化目标仿真结果比较

在算法程序其他条件不变的前提下，令 $v_f=60$ km/h， $v_c=30$ km/h，分别以总油耗和碳排放费用、车辆总行驶距离、车辆总运行时间作为优化目标，对算例 R208 进行仿真实验，具体结果见表 9，其中 VTT (Vehicle Travel Time) 表示车辆运行时间。由表 9 可知：1) 以油耗和碳排放为优化目标时，油耗与碳排放费用最小；以行驶距离最短为目标时，行驶距离最小；以运行时间最小为目标时，车辆运行时间最小；本文提出的优化目标，总成本和车辆使用成本最小。2) 以油耗与碳排放费用、车辆运行时间、行驶距离最小等作为单一目标时，虽然单一目标会达到最优，但会导致车辆数增加、拥堵区域行驶距离增大，客户点时间窗惩罚值增大等情况发生，从而车辆使用成本、总成本大幅度增加，如本文目标与车辆运行时间最短为目标时相比总成本降低了 1.2%；与运行距离最短为目标时相比总成本降低了 8.1%；与油耗和碳排放最低为目标时相比降低了 3.0%。虽然本文模型以油耗与碳排放费用、车辆使用成本作为目标函数，在行驶距离、运行时间、油耗与碳排放费用单项目标不是最优，但总配送成本最低，因此可以获得良好的经济效益。

样针对算例 R208，分别采用 4 t 和 8 t 单一车型进行仿真实验，计算结果见表 10。由表 10 可知：1) 当以 4 t 车辆进行配送时，



车辆数会增加,从而车辆行驶距离和使用成本会增大,导致总配送成本增大。2)以8 t车辆配送时,车辆数和行驶距离会减小,但是车辆使用成本会加大,从而导致配送总成本增大。3)多车型配送相比单车型配送,相比单一4 t车型,总成本降低了1.5%,油耗碳排放费用降低了4.3%,说明多车型配送更能节省物流成本。

表10 采用单一车型仿真结果比较

Tab. 10 Comparison of single vehicle simulation results

VT	NV	FC/元	CC/元	VMC/元	TC/元	DL/km
4 t	12	3 414.88	63.26	13 573.45	17 051.59	2 321.32
8 t	7	3 219.39	58.06	13 917.88	17 195.33	2 198.69
本文模型	9	3 270.01	60.02	13 434.09	16 764.12	2 240.19

4.2.7 不同客户分布算例仿真结果比较

为验证本文模型的有效性和正确性,采用多类型算例实验,实验算例R203、R204的客户坐标属于随机分布,C103、C104属于集中分布,RC203、RC204属于混合分布,R类、RC类分布分配4 t和8 t车辆各8辆配送,C类分布分配4 t和8 t车辆各13辆配送,城市中心坐标均为(50,50),拥堵区域半径为 $R=20$ km,拥堵区域车速为 $v_c=30$ km/h, $w_1=0.5$, $w_2=0.5$ 。实验结果如表11所示,VU(Vehicle Usage)表示车辆使用情况。

表11 三种不同客户分布算例计算结果

Tab. 11 Calculation results of examples of three types of user distributions

分布类型	TC/元	VMC/元	FCC/元	NV	VU
C103	39 052.63	35 825.14	3 227.49	25	4 t启用13辆; 8 t启用12辆
C104	34 124.38	30 934.68	3 189.70	23	4 t启用13辆; 8 t启用10辆
R203	24 451.93	20 378.12	4 073.81	15	4 t启用8辆; 8 t启用7辆
R204	21 733.42	18 159.70	3 573.72	13	4 t启用8辆; 8 t启用5辆
RC203	19 464.72	15 521.02	3 943.70	13	4 t启用8辆; 8 t启用5辆
RC204	17 643.53	14 149.60	3 493.93	10	4 t启用8辆; 8 t启用2辆

由表11可以看出:1)C类算例的总配送费用、车辆使用和人力成本、车辆使用数量在所有类型中最高,但是油耗成本相比其他类型最低。主要由于C类分布客户点主要集中在几个区域,行驶距离较短,因此油耗成本相对较低;但是客户时间窗相对较窄,由于Solomon数据库中C类模型中客户点服务时间为90 min,不同于R和RC类客户10 min服务时间,使得对车辆到达客户点满足其时间窗要求较高,因此车辆只能服务较少客户,但是总的配送行驶时间较长。2)R类和RC类总配送费用、车辆使用管理成本、车辆数均小于C类,主要由于这两种类型服务时间只有10 min,客户均随机分布,客户时间窗要求相对宽松,使得车辆可以配送多个客户,而且总行驶时间较短。3)配送总成本构成中,所有类型的VMC占比相对较高,均达到80%左右,而C类占比将近90%,说明物流配送成本主要来自车辆使用管理费用,而这些主要影响因素就是行驶时间,因此要降低物流成本,最主要就是降低总的运输时间。

4.2.8 不同算法算例仿真结果比较

将本文算法与基本差分算法^[23]、遗传算法^[28]对比实验,算例选取4.2.7节中三种分布算例,实验参数不变,实验结果如表12所示。由表12可知:1)关于C类型算例,本文差分算法要优于遗传算法和基本差分算法。总配送费用相比遗传算法降低了4.9%,车辆使用数节约了2辆,相比基本差分算法降低了3.1%,车辆数减少了1辆;2)关于R类型算例,本文差分算法有明显优越性。总配送费用降低了9.1%,车辆使用数节约了3辆;相比基本差分算法降低了5.2%,车辆数减少了2辆;3)关于RC类型算例,本文差分算法有显著优越性。总配送费用降低了11.1%,车辆使用数节约了3辆;相比基本差分算法降低了6.0%,车辆数减少了2辆。综上所述本文差分算法更优。

表12 不同算法求解不同算例计算结果

Tab. 12 Calculation results of different types of examples solved by different algorithms

算例	本文差分算法		基本差分算法		遗传算法	
	TC/元	NV	TC/元	NV	TC/元	NV
C103	39 052.63	25	40 125.71	26	41 058.77	27
R203	24 451.93	15	25 694.53	17	26 897.12	18
RC203	19 464.72	13	20 773.39	15	21 882.05	16

5 结语

本文以传统的车辆路径问题为基础,考虑了城市拥堵状况,引入基于车速和载重的油耗碳排放测度模型,相应设计了混合差分进化模型进行求解,通过数值实验验证了模型和算法的可行性和有效性,其结论主要有:1)日益严重的城市交通拥堵状况增加了物流配送时间,降低了运输效率,增加了能耗和碳排放,对城市环境污染有着重要的影响,凸显了物流配送中考虑交通拥堵的必要性。2)物流企业在调度配送车辆时,采用混合车型配送比单一车型更加节约成本。3)本文构建的模型在油耗碳排放费用、车辆使用成本双目标折中时,物流配送总成本最低。4)目前物流配送成本主要是车辆使用管理费用,影响其主要因素就是配送时间,因此要合理规划车辆路径,从而减低总成本。5)本文差分算法能有效降低配送费用、减少车辆使用数。6)目前我国的碳税较低,当前的碳交易价格不会显著影响物流企业车辆配送调度安排,因此政府应该适当调整提高碳税,才能有效地促进运输业的节能减排。

由于水平有限,本文只是研究了静态拥堵状况下的多车型车辆路径,虽然也提到了拥堵区域半径和拥堵车速会随时间变化而变化,但并没有研究时变网络下动态车辆路径问题,而且运输物品也是单一类型,所以研究时变网络下动态多车型绿色车辆路径问题将是下一步研究内容。

参考文献(References)

- [1] PIECYK M I, MCKINNON A C. Forecasting the carbon footprint of road freight transport in 2020[J]. International Journal of Production Economics, 2010, 128(1):31-42.
- [2] BEKTAŞ T, LAPORTE G. The pollution-routing problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(8): 1232-1250.
- [3] DEMIRAAB E, BEKTAŞ T, LAPORTE G. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 223(2): 346-359.



- [4] DEMIR E, BEKTAŞ T, LAPORTE G. The bi-objective pollution-routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 232(3):464-478.
- [5] DEMIR E, BEKTAŞ T, LAPORTE G. A review of recent research on green road freight transportation [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 237(3):775-793.
- [6] KARA İ, KARA B Y, YETİS M K. Energy minimizing vehicle routing problem [C]// *Proceedings of the 2007 International Conference on Combinatorial Optimization and Applications*, LNCS 4616. Berlin: Springer, 2007:62-71.
- [7] TARANTILIS C D, KIRANOUDIS C T. Distribution of fresh meat [J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 51(1):85-91.
- [8] 李进, 傅培华, 李修琳, 等. 低碳环境下的车辆路径问题及禁忌搜索算法研究 [J]. *中国管理科学*, 2015, 23(10):98-106. (LI J, FU P H, LI X L, et al. Study on vehicle routing problem and tabu search algorithm under low-carbon environment [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(10):98-106.)
- [9] 陈玉光, 陈志祥. 基于准时送货和最小耗油的配送车辆路径问题研究 [J]. *中国管理科学*, 2015, 23(S1):156-164. (CHEN Y G, CHEN Z X. Study on the vehicle routing problem with objectives of on-time delivery and oil consumption minimization [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(S1):156-164.)
- [10] 吴丽荣, 胡祥培, 饶卫振. 考虑燃料消耗率的车辆路径问题模型与求解 [J]. *系统工程学报*, 2013, 28(6):804-811. (WU L R, HU X P, RAO W Z. New capacity-vehicle-routing-problem model and algorithm for reducing fuel consumption [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2013, 28(6):804-811.)
- [11] XIAO Y, ZHAO Q, KAKU I, et al. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem [J]. *Computers and Operations Research*, 2012, 39(7):1419-1431.
- [12] ZHANG S, LEE C K M, CHOY K L, et al. Design and development of a hybrid artificial bee colony algorithm for the environmental vehicle routing problem [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 31:85-99.
- [13] 葛显龙, 苗国庆, 谭柏川. 开放式污染路径问题优化建模与算法研究 [J]. *工业工程与管理*, 2015, 20(4):46-53. (GE X L, MIAO G Q, TAN B C. Research on optimization modeling and algorithm for open pollution routing problem [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2015, 20(4):46-53.)
- [14] DEMIR E, BEKTAŞ T, LAPORTE G. The bi-objective pollution-routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 232(3):464-478.
- [15] SUZUKI Y. A dual-objective metaheuristic approach to solve practical pollution routing problem [J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 176:143-153.
- [16] KUO Y. Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2010, 59(1):157-165.
- [17] MADEN W, EGLESE R, BLACK D. Vehicle routing and scheduling with time-varying data: a case study [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2010, 61(3):515-522.
- [18] TARANTILIS C D, KIRANOUDIS C T. A meta-heuristic algorithm for the efficient distribution of perishable foods [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 50(1):1-9.
- [19] AMORIM P, PARRAGH S N, SPERANDIO F, et al. A rich vehicle routing problem dealing with perishable food: a case study [J]. *TOP*, 2014, 22(2):489-508.
- [20] 何东东, 李引珍. 多车型绿色车辆路径问题优化模型 [J]. *计算机应用*, 2018, 38(12):3618-3624, 3637. (HE D D, LI Y Z. Optimization model of green multi-type vehicles routing problem [J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(12):3618-3624, 3637.)
- [21] LECLUYSE C, SÖRENSEN K, PEREMANS H. A network-consistent time-dependent travel time layer for routing optimization problems [J]. *European Journal of Operational Research* 2013, 226(3):395-413.
- [22] HICKMAN A J. *Methodology for calculating transport emissions and energy consumption* [R]. Crowthorne: Transport Research Laboratory, 1999.
- [23] STORN R. *Differential evolution research - trends and open questions* [M]// CHAKRABORTY U K. *Advances in Differential Evolution*. Berlin: Springer, 2008:1-31.
- [24] 曹二保, 赖明勇, 聂凯. 带时间窗的车辆路径问题的改进差分进化算法研究 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(8):2420-2423. (CAO E B, LAI M Y, NIE K. Research on improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with time windows [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(8):2420-2423.)
- [25] 吴斌. *物流配送车辆路径问题及其智能优化算法* [M]. 北京: 经济管理出版社, 2013:92-95. (WU B. *Vehicle Routing Problem of Logistics Distribution and Its Intelligent Optimization Algorithms* [M]. Beijing: Economy and Management Publishing House, 2013:92-95.)
- [26] 曹二保, 赖明勇, 李董辉. 基于混合差分进化算法的模糊需求车辆路径问题 [J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(2):106-113. (CAO E B, LAI M Y, LI D H. Vehicle routing problem with fuzzy demands based on hybrid differential evolution [J]. *Systems Engineering - Theory and Practice*, 2009, 29(2):106-113.)
- [27] 李进, 张江华. 基于碳排放与速度优化的带时间窗车辆路径问题 [J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(12):3063-3072. (LI J, ZHANG J H. Vehicle routing problem with time windows based on carbon emissions and speed optimization [J]. *Systems Engineering - Theory and Practice*, 2014, 34(12):3063-3072.)
- [28] 封全喜, 刘诚, 贾贞. 车辆路径问题的改进遗传算法 [J]. *数学的实践与认识*, 2008, 38(13):123-129. (FENG Q X, LIU C, JIA Z. Improved genetic algorithms for vehicle routing problem [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2008, 38(13):123-129.)

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61304253, 61403426), the Foundation of Humanities and Social Sciences of Ministry of Education (14YJCZH099).

ZHAO Zhixue, born in 1982, Ph. D. candidate, lecturer. His research interests include transportation planning, intelligent optimization.

LI Xiamiao, born in 1963, Ph. D., professor. His research interests include logistics enterprise management, transportation system analysis and decision making.

ZHOU Xiancheng, born in 1965, Ph. D., professor. His research interests include optimization theory and methods, intelligent logistics.