

配送选址-多车型运输路径优化问题及求解算法

石兆符卓

(中南大学交通运输工程学院 长沙 410075)

摘要 考虑到不同车型、车辆容量、时间窗等约束,研究了配送选址-多车型运输路径优化问题,采用分解法进行问题分析,建立数学模型。首先应用改进聚类分析模型确定配送中心的最佳位置与服务客户群,然后设计遗传算法进行求解。算法比较及算例测试表明它是求解选址-多车型运输路径优化问题的一种有效方法。

关键词 选址-运输路径优化,多车型,聚类分析,遗传算法

中图分类号 TP301 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.5.049

Distribution Location-routing Problem of Heterotypic Vehicles and its Algorithms

SHI Zhao FU Zhuo

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract Distribution location-routing problem of heterotypic vehicles was considered, which contains heterotypic vehicles restriction, the vehicle capacity restriction, time windows restriction. A mathematic model of the problem was established by using the decomposition method for analysis. First, the locations of distribution centers and group of customers were determined by using improved model based on clustering analysis, and then genetic algorithm was used to solve the problem. Comparison of algorithms and test example show this method can solve location-routing problem of heterotypic vehicles effectively.

Keywords Location-routing problem, Heterotypic vehicles, Clustering analysis, Genetic algorithm

1 问题描述

传统研究较为注重对配送活动中的配送中心(仓储)选址和运输两个问题进行独立研究,致使难以实现物流系统的整体最优。随着现实中配送系统的复杂性不断增加,上述两个问题之间的耦合也越来越高。这迫使我们在解决很多实际问题时,必须将这两个问题综合起来考虑,由此形成了选址-运输路径优化问题(Location-Routing Problem, LRP)。该问题属于典型的 NP 难问题。

以往的 LRP 问题研究大多假设为客户点提供配送服务的运输车辆同型,即具有相同的容积、载运量、单位运费和行驶里程约束,而在实际经济生活中,供应商或配送中心的配送车辆通常都不止一种型号。受经济条件的制约,这些车辆的数目都是有限的,同时,不同的商品具有不同的比重和外形特征,可能采用不同的包装方法,配送车辆的载重量和车厢尺寸各异,单位运费也有差别,以及道路条件的限制等,使得多车型 LRP 问题较单车型问题复杂得多。

2 研究现状分析

国内外有关选址-多车型运输路径优化问题的研究成果极少^[1]。从已知文献看,Wu 等^[2]应用两阶段模拟退火启发式算法求解具有多车型且数量给定的 LRP 问题;方涛^[3]针对

震后应急物资配送中的动态 LRP 问题进行了研究,研究涉及多车型问题的处理;赵志彦^[4]研究了企业物流配送系统的选址-路径优化问题,根据问题特点进行了随机选址-多车型运输路径优化问题模型的构建和求解。

可以看出,上述研究主要基于单级两层 LRP 问题进行探讨,研究领域(如震后救灾环境)存在一定的特殊性,较少涉及多层(级)LRP 问题及其求解应用。

根据以上分析,本文对多层选址-多车型运输路径优化问题进行了研究。

3 多车型运输问题模型分析

3.1 模型参数设定

模型中的参数定义如下:

D 表示配送中心的集合; C 表示客户的集合; N 表示配送中心及客户的总数量集合, $N=C+D$; i 表示配送中心, $i \in D$; j 表示某客户, $j \in C$; L 表示车辆类型集合; K 表示车辆类型; m_K 表示 K 型车辆的数量; $x_{ij}^{(K)}$ 为车型 K 由点 i 到点 j 的空车数; $a_i^{(K)}$ 表示由客户点 i 发出的 K 型车辆的空车数量; $a_j^{(K)}$ 表示客户点 j 所需的 K 型车辆的空车数量,即 K 型车驶入客户点 j 的空车数量; $b_i^{(K)}$ 表示配送中心 i 可供的 K 型车辆的空车数量; $b_j^{(K)}$ 表示配送中心 j 可接收的 K 型车辆的空车数量; C_{ij} 表示 N 集合内任意两节点间距离(用距离表示费用);

到稿日期:2014-06-25 返修日期:2014-09-27 本文受国家自然科学基金资助项目(71271220)资助。

石兆(1972-),男,博士,副教授,主要研究方向为物流系统优化等,E-mail:2741244627@qq.com;符卓(1960-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为交通运输规划与管理、物流系统优化。

$\lambda_s^{(K)}$ 表示根据车型 K 和商品 s 的具体情况而确定的相容系数; r_i 表示第 i 项配送任务的商品需求量; $q_s^{(K)}$ 表示由 K 型车运送商品 s 时的单车可载量; $\bar{q}_s^{(K')}$ 表示由 K' 型车运送商品 s 时的实际单车载运量; $\bar{a}_s^{(K)}$ 表示已确定运送商品 s 的 K 型车数量。

3.2 模型的建立

假设共有 L 种车型, 如以系统费用最小化为优化目标, 可将多车型运输问题数学模型表述如下:

$$\min z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{K=1}^L C_{ij} x_{ij}^{(K)} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^N x_{ij}^{(K)} = a_i^{(K)} \\ \sum_{i=1}^N x_{ij}^{(K)} = a_j^{(K)} \\ \sum_{j=1}^N x_{ij}^{(K)} \leq b_i^{(K)} \\ \sum_{i=1}^N x_{ij}^{(K)} = b_j^{(K')} \end{cases} \quad (2)$$

$$a_i^{(K)} = \left[(r_i - \sum_{K'=1}^{L-1} \lambda_s^{(K')} \bar{a}_s^{(K')} \bar{q}_s^{(K')}) / q_s^{(K)} \right] \lambda_s^{(K)} \quad (3)$$

$$\lambda_s^{(K)} = \begin{cases} 1, & \text{如果可用 } K \text{ 型车配送商品 } s \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$x_{ij}^{(K)} \geq 0$ 且为整数;

优化目标式(1)表示系统费用最小化;

约束式(2)表示使用车辆数量流量平衡;

式(3)表示用 K 型车运送商品 s 时所需的车辆数, $[\]$ 表示取值不大于其中数值的最大整数。

显然, 当 $K=1$ 时, 模型就转化为同型车辆优化问题。

3.3 模型求解策略

模型求解具体策略如下:

Step1 对于每种车型给予一定的优先权(例如, 车辆装载能力越大, 优先级越高), 分别以车型 1、车型 2、...、车型 K 表示, 总共有 L 种车型, 首先使用优先级最高的车型。

Step2 计算使用车型 1 配送时, 各种商品所需的空车数 $a_i^{(1)}$ 为

$$a_i^{(1)} = \lambda_s^{(1)} [r_i / q_s^{(1)}]$$

$[r_i / q_s^{(1)}]$ 表示数值不大于 $r_i / q_s^{(1)}$ 的最大整数。

Step3 根据 $a_i^{(1)}$ 和各配送中心可提供和接收的空车数 $b_i^{(1)}$ 和 $b_j^{(1)}$ 求调度解, 根据调度解组织配送路线。若有的商品运输任务无法完成, 考虑采用优先级次之的车型进行配送。

Step4 采用下一种车型, 即 $K=K+1$, 根据式(3)计算 $a_i^{(K)}$, 并用同型车辆优化方法求解配送路线。

Step5 若 $K < L-1$, 转 Step4, 否则执行 Step6。

Step6 计算每种车型使用车辆数, 根据 $r_i' = r_i - \sum_{K'=1}^{L-1} \lambda_s^{(K')} \bar{a}_s^{(K')} \bar{q}_s^{(K')}$, 则有

$$\begin{cases} a_i^{(K)} = [r_i' / q_s^{(K)}] \lambda_s^{(K)}, & \text{当 } r_i' / q_s^{(K)} \text{ 为整数} \\ a_i^{(K)} = \{ [r_i' / q_s^{(K)}] + 1 \} \lambda_s^{(K)}, & \text{当 } r_i' / q_s^{(K)} \text{ 不为整数} \end{cases}$$

然后按照同型车辆优化方法求解配送路线。

Step7 检查是否已完成全部配送任务, 如已完成, 转 Step9; 否则执行 Step8。

Step8 选择有多余车辆的能完成剩余服务需求的最小车型执行配送任务, 如无法完成任务, 则选择次大车型进行替换, 依次递增, 以使用最小车辆数完成任务。

Step9 任务结束。

4 选址-运输路径优化问题模型构建

4.1 问题描述

本研究主要考虑在同一个城市商品供需系统中, 有一个供应商、若干个配送中心及若干个客户, 供应商及配送中心各有若干台多型号配送车辆; 客户需求信息首先通过配送中心进行处理, 然后向供应商发出送货指令; 供应商为配送中心及配送中心为客户提供配送服务都有时间窗要求, 即选择空间位置最优的配送中心, 使其能够覆盖所有需要提供服务的客户; 同时为供应商及配送中心车辆确定行驶线路, 使得在满足装载量和时间限制的条件下, 满足配送中心与客户服务需求, 以最少的车辆数、最低的配送总成本与最少时间窗偏离完成规定的配送服务。

4.2 模型基本假设

一个供应商、多个配送中心、多个客户分散分布在同一个城市的各个不同地区; 配送中心库存容量能够满足配送最大通过量需求; 商品可用不同车型进行配送; 所有配送中心所需商品都由供应商供给, 配送中心之间不存在相互调剂的情况; 所有客户所需商品都由配送中心供给, 客户之间不存在相互调剂的情况; 车辆非满载, 配送中心所需商品需求量均小于供应商车辆的载容量, 一辆车可以完成多个配送中心需求配送任务; 客户所需商品需求量均小于配送中心车辆的载容量, 一辆车可以完成多个客户需求配送任务; 供应商对配送中心或配送中心对客户都采取整车配送的策略, 即每个配送中心或每个客户只由一辆配送车辆送货且所有服务点都得到服务; 配送车辆车型不同, 且每一条线路上的送货任务只由一辆车承担; 各配送中心或客户的需求量确定并在一定时期内相对稳定; 配送车辆单位运价与车型相关, 同型车单位运价相同; 允许车辆到达配送中心或客户的时间与其服务时间段有所偏离, 但要根据所带来的不方便程度承担一定的惩罚。

4.3 模型参数设定

模型中的参数定义如下:

G 表示供应商的集合; D 表示配送中心的集合; C 表示客户的集合; M 表示供应商及配送中心的总数量集合, $M=G+D$; N 表示配送中心及客户的总数量集合, $N=C+D$; g 表示某供应商, $g \in G$; i 表示配送中心, $i \in D$; j 表示某客户, $j \in C$; L 表示车辆类型集合; K 表示车辆类型; m_k 表示 K 型车辆的数量; s 表示 K 型车辆; Q_k 表示 K 型车辆的最大载重量; W_k 表示 K 型车辆的最大容积; l_g 表示 M 集合内任意两节点间距离; C_{ij} 表示 N 集合内任意两节点间距离; e_i 表示配送中心 i 的商品需求量; e_{iw} 表示配送中心 i 所需商品体积; y_i 表示配送中心发往客户的其他混装商品运量; n_j 表示客户 j 的商品需求量; n_{jw} 表示客户 j 所需商品体积; P_i 表示配送中心 i 运营固定费用与因商品中转所产生的变动费用之和; V_k 表示类型为 K 的车辆单位行驶费用; Y_k 表示类型为 K 的车辆空载成本; T_0 表示供应商配送车辆出发时间; T_{D0} 表示供应商配送车辆回到出发地的时间; t_0 表示配送中心配送车辆出发时间; t_{D0} 表示配送中心配送车辆回到出发地的时间; T_i 表示车辆 s 到达配送中心 i 的时间; A_i 表示配送中心最早能服务的时间; B_i 表示配送中心最晚能服务的时间; f_1 表示早于 A_i 到达配送中心 i 并开始服务的惩罚系数; f_2 表示晚于 B_i 到达配

送中心 i 并开始服务的惩罚系数; t_i 表示车辆 s 到达客户 j 的时间; a_j 表示客户最早能服务的时间; b_j 表示客户最晚能服务的时间; f_3 表示早于 a_j 到达客户 j 并开始服务的惩罚系数; f_4 表示晚于 b_j 到达客户 j 并开始服务的惩罚系数。

4.4 模型的建立

建立模型如下:

$$\min Z_1 = \sum_{g=0}^M \sum_{i=1}^L \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} X_{gKs} l_{gK} V_K + \sum_{i=1}^D P_i W_i + \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^N \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} X_{ijKs} C_{ij} V_K + f_1 \sum_{i=1}^D \max(A_i - T_i, 0) + f_2 \sum_{i=1}^D \max(T_i - B_i, 0) + f_3 \sum_{j=1}^N \max(a_j - t_j, 0) + f_4 \sum_{j=1}^N \max(t_j - b_j, 0) \quad (4)$$

$$\min Z_2 = \sum_{g=0}^M \sum_{i=1}^L \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} Y_{Ks} (\max(1 - (e_i X_{iKs} / Q_K)), (1 - (e_{av} X_{iKs} / W_K))) + \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^N \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} Y_{Ks} (\max(1 - (n_j X_{jKs} / Q_K)), (1 - (n_{jw} X_{jKs} / W_K))) \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^D e_i + \sum_{j=1}^N n_j = \sum_{j=1}^N n_j \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^L \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} X_{gKs} = \sum_{i=1}^L \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} X_{igKs} \leq 1, g=0 \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} X_{ijKs} = \sum_{j=1}^N \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} X_{jiKs} \leq 1, i=0 \quad (8)$$

$$\sum_{g=0}^M \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} X_{gKs} = 1, i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (9)$$

$$\sum_{i=0}^M \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} X_{gKs} = 1, g \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (10)$$

$$\sum_{j=0}^N \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} X_{ijKs} = 1, i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (11)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} X_{jiKs} = 1, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (12)$$

$$\sum_{g=0}^M \sum_{i=1}^L \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} e_i X_{gKs} \leq Q_K \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^N \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} n_j X_{ijKs} \leq Q_K \quad (14)$$

$$\sum_{g=0}^M \sum_{i=1}^L \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} e_{av} X_{gKs} \leq W_K \quad (15)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^N \sum_{K=1}^m \sum_{s=1}^{mK} n_{jw} X_{ijKs} \leq W_K \quad (16)$$

$$W_i = \begin{cases} 1, & \text{表示配送中心 } i \text{ 被选中} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$X_{iKs} = \begin{cases} 1, & \text{配送中心 } i \text{ 送货任务由 } K \text{ 型车中第 } s \text{ 辆车完成} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$X_{jKs} = \begin{cases} 1, & \text{客户 } j \text{ 送货任务由 } K \text{ 型车中第 } s \text{ 辆车完成} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$X_{gKs} = \begin{cases} 1, & K \text{ 型车中第 } s \text{ 辆车从配送中心 } g \text{ 行驶到配送中心 } i \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$X_{ijKs} = \begin{cases} 1, & K \text{ 型车中第 } s \text{ 辆车从客户 } i \text{ 行驶到客户 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

优化目标式(4)表示商品从供应商,经配送中心配送到客户产生的费用最小化;式(5)表示配送车辆未满载时的运输能力损失最小化;约束条件式(6)为确保配送中心将供应商送货完全用于客户配送,不会存留或用于同城调剂;式(7)确保车辆从供应商处出发并回到出发地;式(8)确保车辆从配送中心出发并回到中心;式(9)、式(10)确保各配送中心只被同一供

应商车辆服务一次且最多一次;式(11)、式(12)确保各客户只被同一配送中心车辆服务一次且最多一次;式(13)为受车辆载重量的限制,确保供应商每辆车的送货量不超过其载重量;式(14)为受车辆载重量的限制,确保配送中心每辆车的送货量不超过其载重量;式(15)为受供应商车辆容量的限制,确保每辆车的送货量不超过其容量;式(16)为受配送中心车辆容量的限制,确保每辆车的送货量不超过其容量。

5 求解算法设计

5.1 求解思路

问题采用首先进行选址分配,其次采用运输线路优化的启发式方法进行求解:即将 LRP 整体优化问题分解为两个相互衔接的子问题,先考虑对两个子问题求解,然后再思考问题的整体性,统筹综合得到问题的解决方法。

即首先设计一种改进聚类选址分析方法进行设施定位,以确定服务设施(配送中心)位置和其服务的客户群(分别进行供应商-配送中心及配送中心-客户点服务归属选址);然后求解不同客户群的配送优化运输路径(分别进行供应商-配送中心及配送中心-客户点配送路径优化),将第二个子问题最优解建立在第一个子问题最优解基础之上;最后根据以上求解得网络整体优化问题目标解,设计遗传算法并求解问题。

5.2 聚类选址模型分析

聚类分析选址方法设计相对简单、适应性强、求解迅速、计算效率高,已被张潜等^[5]、曾敏刚等^[6]、秦津娜等^[7]、Sergio Barreto^[8]证明为行之有效的方法。本文基于基本聚类分析模型,根据实际情况对判定准则进行改进,设计了一种新的分析方法,即首先确定客户点应归属哪个配送中心配送,然后根据客户点服务时间窗要求对其归属进行调整。

模型中的参数定义如下:

(x_i, y_i) 表示客户点坐标位置;

(X_i, Y_i) 表示配送中心坐标位置;

D 表示配送中心建设备选地的集合;

C 表示客户点的集合;

i 表示某配送中心, $i \in D$;

j 表示某客户点, $j \in C$ 。

将客户集划分成若干子类,任意两个配送中心 D_i 和 D_j 距离已知,令 d_{ij} 和 R_{ij} 分别为 D_i 和 D_j 之间距离及距离的一半,即

$$R_{ij} = \frac{1}{2} d_{ij} \quad (17)$$

客户点的数量为 C , d_{ip} 为任意一个配送中心 D_i 到任意客户点 p 的距离。

以 R_{ij} 为半径作相切圆 $O_1, O_2, \dots, O_i, O_j, \dots, O_m$, 对应半径分别为 $R_1, R_2, \dots, R_i, R_j, \dots, R_m$, 若

$$r_{ip} = \frac{1}{2} d_{ip} \quad (18)$$

对应的客户点位置 C_p 落在某一圆 O_i 内,则将 C_p 列入 O_i 类(C_p 由配送中心 D_i 提供服务),判定准则为:

(1)如果满足

$$r_{ip} < R_{ij} \quad (19)$$

则将客户 C_p 聚为配送中心 D_i 类;否则,先不列入此类。

(2)如果存在某一客户 C_p 到任意配送中心 D_i 的距离 $r_{ip} =$

$\frac{1}{2}d_{ip}$ 大于最大的两个设施距离和的一半,即

$$r_{ip} > \max R_{ij} \quad (20)$$

则根据就近原则,以某一客户 C_p 到任意配送中心 D_i 的距离 d_{ip} 的最小值为准,将 C_p 列入 D_i 类(C_p 由配送中心 D_i 提供服务):

$$D_i = \begin{cases} 1, & \text{选择 } D_i, d_{ip} = \min(d_{1p}, d_{2p}, \dots, d_{ip}), i \in \{1, 2, \dots, p\} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (21)$$

(3)按照路径优化最小化配送车辆数,优先采用载重量较大配送车辆的原则,在 O_i 类中有客户 $C_1, C_2, \dots, C_l, C_m$,令

$$V = (\sum_{i=1}^l (n_i/Q_1) - \lfloor \sum_{i=1}^l (n_i/Q_1) \rfloor) \times Q_1 \quad (22)$$

其中, $\sum_{i=1}^l (n_i/Q_1)$ 表示计划由配送中心 D_i 提供服务的客户总需求量与 Q_1 型车载重量的比值; $\lfloor \sum_{i=1}^l (n_i/Q_1) \rfloor$ 表示不超过 $\sum_{i=1}^l (n_i/Q_1)$ 的最大整数; Q_1 表示 A 型车辆载重量; V 表示尚未采用 A 型车辆配送的商品重量。

$$X_{O_i Q_K} = \begin{cases} Q_K, V \leq Q_K \\ Q_{K-1}, Q_K < V \leq Q_{K-1} \\ \dots \\ Q_2, Q_3 < V \leq Q_2 \\ Q_1, Q_2 < V \leq Q_1 \end{cases} \quad (23)$$

准则(3)适用于多车型车辆配送的情况,可根据以上判断式选择配送中心的配送车辆型号,同时依照约束条件决定是否进行车型调整^[9,10]。

传统的设施选址分析通常注重节点的空间分布,即依据其地理位置将需要服务的各点直接分配到最近的配送中心,较少考虑这些点的服务时间要求。本文将距离和各节点的时间窗口综合权衡,基于上述分析,在初步确定客户点服务归属(配送中心)选址的基础上,设计了一种较为适合带时间窗口的选址优化算法对其定位进行调整,具体思路如下:

令 $t_i = (a_i + b_i)/2$ (a_i 表示客户点最早能服务的时间, b_i 表示客户点最晚能服务的时间),计算 t_i ,令 $T = \{t_i\}$,然后根据 t_i 值进行降排序,再依次将各客户点分配到距其最近的配送中心。如果该配送中心尚未分配服务客户点,则将其直接分配至该配送中心,如果已分配服务客户点(假设上一被分配至该配送中心的客户点 C_i 服务时间窗为 $[a_i, b_i]$),当前待分配客户点 C_j 服务时间窗为 $[a_j, b_j]$,若 $(b_i - a_i) \geq \lambda(b_j - a_j)$, $0 \leq \lambda \leq 1$,值越小则时间窗要求越容易满足),则将 C_j 纳入该配送中心服务范围,否则将 C_j 分配至次近配送中心;假如最终无满足条件的配送中心,则采用就近原则,即由距离最近的配送中心为其提供服务,当 $T = \emptyset$ 时,算法终止。

5.3 改进遗传算法设计

遗传算法是一种“生成+检测”的迭代搜索算法,算法性能优良,目标函数值相对变化很小,具有全局性和并行性的特点,然而产生初始种群的随机数选择、交叉和变异过程对求解有很大影响。本文基于 Goldberg 的遗传算法中应用思想,针对所要优化问题的特征,对影响遗传算法收敛速度和收敛效果的几个因素即编码操作、初始群体的生成、交叉和变异算子进行了改进。

(1)编码

它是算法中解的表现形式,解的编码称为染色体。本文

根据求解问题的特点,对在首阶段已经选择的设施及其所要配送的客户进行运输路线优化,采用分段组合编码的方法。编码原理如下:对可分派的车辆和有需求的客户分别排序,按顺序从车辆序列中取一车辆,考察客户序列中的客户,依次将满足条件的客户放入该车辆的路径。当路径上总的服务量超过车辆能力时,再取下一辆车,继续上面的工作,直到客户序列中所有客户均已派车为止。

例如:染色体长度为 $m+n$,前一段码长 m 为多车型车队的车辆数,并按照车辆装载能力进行从大到小排序,如 $(1, 2, 3, \dots, 6, \dots, m)$, 1、2 为装载能力最大车型,3 至 5 为装载能力次之车型,6 至 m 为装载能力最小车型,基因为 1 至 m 之间的自然数。第 i 个位置基因 s_1 表示车辆 s_1 在车辆序列的第 i 个位置。后一段码长 n 为有需求的客户数,基因为 $1-n$ 之间的自然数。第 j 个位置基因 s_2 表示客户 s_2 在客户序列的第 j 个位置。

(2)初始解的形成

按上述编码规则产生的一个染色体并不能直接表示问题的解,还需利用解码规则对其解码才能生成问题的解。解码规则为:

- 1)从 1 开始首先选用最大车型,并依次建立车辆序列中车辆 s 的路径 r_s ;
- 2)在客户序列中依次分派客户给路径 r_s ;
- 3)路径 r_s 上客户总服务量 \leq 车辆 s 的装载能力;
- 4)路径 r_s 总里程 \leq 车辆 s 的最大行驶里程;
- 5)当全部车辆总能力 $<$ 所有客户总需求时,允许分派虚拟的租用车辆;
- 6)所有客户均加入到配送路线,即配送路线初步形成时,依序用无服务需求的较小型车替换大型车,判断能否满足车辆运输能力要求,如果小型车能够完成配送任务,即进行车型替换;
- 7)一直重复这个过程,直到将每个客户都纳入新配送路径中。

解码过程如下:

Step1 从染色体车辆段的车辆序列中按顺序依次取出一辆车 s ,建立 s 的一个只包含配送中心的初始路径 r_s 。

Step2 判断染色体客户段的客户序列中是否有未派车的服务点,如果有,则从客户序列中按顺序取出一个未派车客户 i ,转 Step3;否则转 Step6。

Step3 试将客户 i 加入路径 r_s ,如果加入客户 i 后 r_s 上客户总服务量 $>$ 车辆 s 的装载能力或路径 r_s 总里程 $>$ 车辆 s 的最大行驶里程,则将客户 i 放回客户序列原来的位置,转 Step4;否则将客户 i 加入 r_s ,转 Step2。

Step4 如果车辆序列中有未分派的车,则转 Step1,取下一辆车;否则转 Step5。

Step5 记下已分派的车辆路径,依序用无服务需求的较小型车替换大型车,判断能否满足车辆运输能力要求,若满足则替换车型,并将其作为此染色体对应问题的解。

Step6 记下重新分派的车辆路径。

Step7 结束。

(3)确定适应度评估方法

适应度被用作区分群体中个体好坏的标准。

本算法采用

$$E=Z+M \times P \quad (24)$$

作为解的评价值, Z 为对应的配送路径方案的目标函数值, M 为不可行路径数, P 为对不可行路径的惩罚值, 则可用

$$f=1/E=1/(Z+M \times P) \quad (25)$$

进行适应度计算。

(4) 选择操作

本文采用改进赌轮选择与保留最佳个体相结合的选择策略来实现对种群中的个体进行优胜劣汰的操作。

传统的轮盘赌法是完全随机地产生选择指针, 可能产生大量个体位于区域某一部分, 导致种群方差过小, 降低了种群的多样性。因此, 本文随机生成的选择随机数不再在 $[0, 1]$ 中产生, 而是先将 $[0, 1]$ 等分成 N 个子区间 $[0, i/N]$ ($i=1, 2, \dots, N$), 然后再在各子区间产生随机数。改进后的轮盘赌法使得选择随机数更加均匀。

此外, 本算法在选择操作时还使用了最佳个体保存策略, 将适应度最好的个体直接保存到下一代, 以保证当前最优个体不会被遗传操作破坏。

(5) 交叉操作

本文采用类 OX 算子求解问题, 其具体操作如下:

随机在父代个体中选择一个交配段, 如设两父代个体及交配段为:

$$P1=47|8563|921$$

$$P2=83|4691|257$$

将 $P2$ 的交配段加到 $P1$ 的前面, $P1$ 的交配段加到 $P2$ 的前面, 得到:

$$P1'=4691|478563921$$

$$P2'=8563|834691257$$

在 $P1'$ 和 $P2'$ 自交配段后依次删除与交配段相同的自然数, 得到最终两个后代个体为:

$$P1''=469178532$$

$$P2''=856349127$$

与其他方法相比, 该算子在两父代个体相同的情况下仍能产生一定程度的变异, 因此对于维持种群多样化特性具一定作用。

(6) 变异操作

本算法采用的变异算子是加入贪婪策略的交换变异算子。其具体操作如下:

Step1 将变异计数器置 0;

Step2 判断变异计数器是否大于 30, 是则转 Step4; 否则随机选择 1 对或 2 对基因位进行交换;

Step3 计算变异后新解的适应度, 若适应度提高, 则接受该解, 转 Step4; 否则变异计数器加 1, 转 Step2;

Step4 若变异计数器大于 30, 则保持原解不变, 否则用新解取代原解。

该算子有两个优点: 首先交换基因位操作简单, 易于实行; 其次加入贪婪策略后对解的局部搜索能力有所增强。

算法参数设置如下:

1) 种群规模

种群规模 N 表示每一代种群中所含个体的数目, 它与问题规模关联性很强。本算法根据问题研究特点, 设定种群规模取值为 21。

2) 交叉概率 p_c 和变异概率 p_m

为避免发散和陷入局部最优, 且在加快优化进程的同时保留种群中的优良个体, 本文设计了一种动态调整策略。 f 表示变异个体的适应值, 策略通过对 f 高的解降低 p_c 和 p_m , 对 f 低的解提高 p_c 和 p_m , 来具体实现, 即设:

$$p_c = \begin{cases} k_1(f_0 - f)/(f_0 - \bar{f}), & f \geq \bar{f} \\ k_3, & f < \bar{f} \end{cases} \quad (26)$$

$$p_m = \begin{cases} k_2(f_0 - f')/(f_0 - \bar{f}), & f' \geq \bar{f} \\ k_4, & f' < \bar{f} \end{cases}$$

其中, $k_1=0.6, k_2=0.05, k_3=1, k_4=0.06, f_0$ 为种群中的最大适应值, \bar{f} 为种群的平均适应值, f' 表示交叉的两个个体中较大的适应值。 p_c 随 $f \rightarrow f_0$ 而减小, 当 $f=f_0$ 时, $\sum p_c=0$ 。

(7) 终止准则

为便于算法实现, 本文采用进化指定代数的终止准则。

(8) 算法比较

本文所采用的遗传算法(Ga)使用 Matlab 编程, 并在微机上实现。由于目前学术界并不存在标准的三层定位-运输路径问题的测试数据, 同时本文所研究问题假设配送中心库存容量能满足商品最大中转需要, 因此为测试算法求解 LRP 性能, 本文以文献[11]为基础随机产生数据进行数值测试, 并与文献[12]两阶段启发式算法(HM-1)和文献[11]改进离散型 PSO 算法(IPSO)进行了比较。文献[11]求解方法与本文相同, 即首先进行选址分配, 其次进行运输线路优化; 文献[12]则采取先求解 VRP 再规划 LAP 的方法。为了便于算法比较, 本文在目标值计算时去除了文献[12]中所考虑的库存管理成本。

进行多组实验, 每组采用不同的客户数、设施数等不同组合, 每组实验均进行 10 次, 得到的仿真计算比较结果见表 1 (CPU 程序运行以秒为单位运算时间)。

表 1 算法计算结果比较

供应商设施 点数	配送中心 设施点数	客户 点数	HM-1		IPSO		Ga	
			成本最优值	CPU 时间	成本最优值	CPU 时间	成本最优值	CPU 时间
6	4	8	158.23	0.49	158.23	0.98	158.23	0.97
6	5	10	278.15	0.62	278.15	1.77	278.15	1.18
8	5	12	388.36	0.87	388.36	2.01	388.36	1.59
10	8	20	1992.15	1.67	1961.65	4.44	1969.85	3.04
10	8	30	5556.22	3.19	5539.27	5.96	5539.27	5.27
15	10	30	5121.23	3.52	5121.23	7.01	5121.23	7.06
15	10	50	7732.56	6.08	7528.27	9.27	7477.12	8.02
24	15	50	6352.37	7.41	6117.48	11.53	6096.56	9.95
24	15	80	9927.99	9.16	9632.77	13.89	9631.98	12.26

本算法的各组合参数搭配是在经过多次重复性实验的基础上得出的。结果显示, 文献[12]与文献[11]所使用算法和本文算法在求解 LRP 问题时都是比较有效的方法; 与 HM-1 算法和 IPSO 算法相比, 本文所设计遗传算法时间效率介于两

者之间, 比 HM-1 算法所耗时间略长, 优于 IPSO 算法。但是总体来说, 本文算法的解的质量要优于前两者: 相对于 HM-1 算法平均成本解改进率(平均成本解下降百分比)为 2.15%, 相对于 IPSO 算法平均成本解改进率为 0.15%。

6 算例分析

本文采用 Matlab 程序对湖南省内某配送边长长宽均为 100km 的正方形地域内的配送网络进行计算仿真。

区域内有 1 个供应商、5 个配送中心建设备选地、15 个客户点, 供应商有 A、B、C 三型配送车辆若干台, 其中 A 型车载重量为 40t, B 型车载重量为 30t, C 型车载重量为 20t; 配送中心有 D、E、F 三型配送车辆若干台, 其中 D 型车的载重量为 7t, E 型车载重量为 5t, F 型车载重量为 3t, 在考虑车辆行驶损耗等的约束前提下, 设车辆一次配送的最大行驶距离均为 100km。要求选择 3 个备选地建设配送中心, 使其能为所有门店提供配送中转服务, 并能在符合基本约束的前提下实现配送总成本最优。供应商、配送中心、客户点坐标矩阵见表 2。客户点需求量及服务时间窗口见表 3。

表 2 供应商、配送中心及客户点坐标位置

供应商	坐标(km)	配送中心	坐标(km)	客户点	坐标(km)
G ₁	[71, 53]	D ₁	[54, 93]	C ₁	[48, 60]
		D ₂	[47, 46]	C ₂	[54, 19]
		D ₃	[78, 16]	C ₃	[94, 101]
		D ₄	[47, 29]	C ₄	[31, 85]
		D ₅	[82, 53]	C ₅	[91, 100]
				C ₆	[40, 16]
				C ₇	[70, 89]
				C ₈	[60, 41]
				C ₉	[37, 97]
				C ₁₀	[104, 59]
				C ₁₁	[91, 34]
				C ₁₂	[89, 92]
				C ₁₃	[109, 68]
				C ₁₄	[53, 74]
				C ₁₅	[31, 73]

表 3 客户点需求量及服务时间窗

客户点	需求量	服务时间窗	客户点	需求量	服务时间窗
C ₁	[1. 4]	[85, 155]	C ₈	[0. 2]	[59, 119]
C ₂	[1. 8]	[58, 128]	C ₉	[1. 7]	[37, 107]
C ₃	[1. 1]	[15, 85]	C ₁₀	[0. 8]	[58, 158]
C ₄	[1. 2]	[21, 91]	C ₁₁	[0. 9]	[87, 187]
C ₅	[1. 9]	[47, 117]	C ₁₂	[0. 8]	[21, 121]
C ₆	[1]	[74, 144]	C ₁₃	[1. 9]	[15, 125]
C ₇	[0. 6]	[46, 106]	C ₁₄	[1. 6]	[56, 156]
			C ₁₅	[0. 9]	[74, 174]

(1) 配送中心选址分析

根据已知信息, 基于改进聚类分析方法结合时间窗要求确定配送中心选址地及客户点服务归属最优方案, 求得在 D₁、D₂、D₃ 3 个地点建设配送中心及其所服务客户点, 分析结果见表 4。

表 4 客户点服务归属(配送中心)选址

配送中心	客户点
D ₁	C ₁ 、C ₃ 、C ₄ 、C ₅ 、C ₇ 、C ₉ 、C ₁₂ 、C ₁₅ 、C ₁₄
D ₂	C ₆ 、C ₂ 、C ₈
D ₃	C ₁₀ 、C ₁₁ 、C ₁₃

(2) 配送路径优化

在选址方案确定的同时, 可以确定供应商通过配送中心将客户点所需商品送达的最优配送路径, 并使得配送总成本最低。

通过编程求解得出供应商使用 C 型车 1 台, 行驶里程 196. 7km; 配送中心 D₁ 使用 D 型车与 E 型车各 1 台, 共行驶里程 194. 4km; 配送中心 D₂ 使用 F 型车 1 台, 行驶里程

81. 8km, 配送中心 D₃ 使用 E 型车 1 台即可完成配送任务, 行驶里程 121. 2km, 对应的 4 条网络配送路径见图 1, 具体路径见表 5, 行驶总里程为 397. 4km。

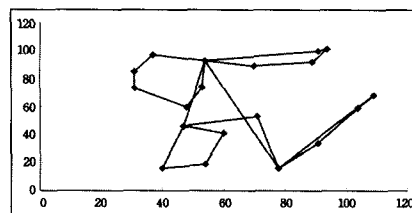


图 1 配送路径

表 5 供应商及配送中心配送服务路径

提供服务节点	服务车型	服务路径
G ₁	A	(G ₁ -D ₂ -D ₁ -D ₃ -G ₁)
D ₁	D	(D ₁ -C ₉ -C ₄ -C ₁₅ -C ₁ -C ₁₄ -D ₁)
D ₁	E	(D ₁ -C ₅ -C ₃ -C ₁₂ -C ₇ -D ₁)
D ₂	F	(D ₂ -C ₆ -C ₂ -C ₈ -D ₂)
D ₃	E	(D ₃ -C ₁₃ -C ₁₀ -C ₁₁ -D ₃)

结束语 本文针对 LRP 问题建立数学模型, 结合时间窗与多车型车辆载重量约束条件应用改进最小包络聚类选址方法进行设施选址及服务客户群分析, 设计遗传算法求解, 算例测试及比较证明了算法的有效性与良好的寻优能力, 对于相关理论研究与企业实践具有一定的参考价值。但研究没有考虑库存管理成本及时间窗动态变化等约束条件, 相关研究有待进一步深入。

参考文献

- [1] Nagy G, Salhi S. Location-routing Issues, models and methods [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177: 649-672
- [2] Wu T H, Low C, Bai J W. Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems [J]. Computers and Operations Research, 2002, 29(10): 1393-1415
- [3] 方涛. 震后应急物资配送中的模糊定位-路径问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007
- [4] 赵志彦. 企业物流配送系统中若干定位-路径问题的建模与调度方法[D]. 天津: 天津大学, 2009
- [5] 张潜, 高立群, 刘雪梅, 等. 定位-运输路线安排问题的两阶段启发式算法[J]. 控制与决策, 2004, 19(7): 773-777
- [6] 曾敏刚, 吴小燕. 自然灾害应急救援系统的定位与路径问题研究[J]. 华南理工大学学报: 社会科学版, 2008, 10(6): 43-47
- [7] 秦津娜, 俞林. 工程建设中的选址与运输综合优化研究[J]. 技术与方法, 2010, 5: 79-82
- [8] Barreto S, Ferreira C. Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 179(3): 968-977
- [9] 石兆. 长株潭城市群物流园区布局规划问题探讨[J]. 中国物流与采购, 2012, 10: 68-69
- [10] 石兆. 时变网络条件下带时间窗的食品冷链配送定位-运输路径优化问题[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(1): 183-188
- [11] 彭扬. 物流配送网络设计模型与算法研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2007
- [12] Liu S C, Lee S B. A two-phase heuristic method for the multi-depot location-routing problem taking inventory control decisions into consideration [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 22(11/12): 941-950