



考虑客户聚类与产品回收的两级闭环物流网络选址-路径优化

梁喜*, 凯文

(重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074)

(*通信作者电子邮箱 liangxi0001@126.com)

摘要:针对目前不合理的废旧产品回收以及物流活动产生的碳排放污染,提出了一种考虑客户聚类与产品回收的两级闭环物流网络选址-路径优化模型。首先,结合实际物流网络的动态性假设客户需求量和回收率的不确定性特征,以最小运营成本和最小环境影响为目标建立选址-路径优化模型;其次,对多目标进化算法进行改进,提出了考虑客户聚类结果的两级物流设施选址-路径问题求解算法;最后,对该优化算法进行算法性能分析,并以重庆市某企业为例进行了模型和算法验证。结果表明,所建立的模型和算法能有效降低决策难度并提高物流系统的运作效率,所求出的优化方案能减少物流运作成本和降低物流运输过程对环境的影响。

关键词: 闭环物流; 选址-路径优化; 产品回收; 客户聚类; 遗传算法

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

Two-echelon closed-loop logistics network location-routing optimization based on customer clustering and product recovery

LIANG xi*, Kevin Assogba

(School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: With regard to unreasonable waste collection and considerable environmental pollution due to logistics activities, a two-echelon closed-loop logistics network location-routing optimization model based on customer clustering and product recovery was proposed. Firstly, considering the dynamic nature of actual logistics network, the uncertain characteristics of customer demand and recovery rate were assumed, and location-routing optimization model based on minimum operating cost and minimum environmental impact was established. Secondly, based on improvement of multi-objective evolutionary algorithm, an algorithm for two-echelon closed-loop logistics network location-routing optimization model based on customer clustering and product recovery was proposed. Finally, the performance of the proposed optimization algorithm was analyzed and a practical experimentation of model and algorithm was conducted on the location-routing problem of a company in Chongqing city. Analyses show that the proposed model and algorithm can alleviate the final decision difficulty and improve operational efficiency of the logistics system while the optimization scheme obtained can reduce total cost and environmental impact.

Key words: closed-loop logistics; location-routing optimization; product recovery; customer clustering; genetic algorithm

0 引言

自工业革命以来,大建筑物的兴起和经济的繁荣引起大量城镇乡村居民向周边城市的移民活动,而随着城市总人口的增长,现代供应管理也面临着巨大的挑战。从原材料采购到最终客户签收,每个供应链环节的效率对企业经济资源、客户体验、政府机构的认可等因素都具有一定的影响,并且要求生产和物流企业保持一定的运作效率并定期采取改善业务的措施。然而,随着城市交通运输网络的复杂化程度提高,物流活动作为供应链管理的重要组成部分也需要优化网络以便提高效率。城市物流不仅承担着市民日常生活消费品的供应,还负责从客户点回收废品任务,因而对城市的可持续发展有很大影响。由于货物量增加,现代物流的产品配送和回收车辆出行次数也增多,甚至导致日均油耗和碳排放量上升。物流网络设计与优化结合战略性、技术性和运作性决策^[1],而且设施选址问题等战略性决策和车辆路径问题等技术性决策已被研究学者广泛探讨。由于交通相关因素对物流设施选址

的影响也十分重要,因此,针对正向与逆向物流,同时优化物流设施选址和车辆路径问题有利于结合实际促进有效而系统的决策。

近几年,很多国内外学者已经深入研究物流设施选址、客户分配、车辆路径、选址-路径等物流网络优化问题并得出丰硕解决方案。现有文献当中,典型的选址-路径问题主要针对静态网络的优化,而随着人口的增长、城乡地区的发展、环境的污染,越来越多研究学者考虑随机需求、逆向物流、库存中断等因素。Drexel等^[2]详细综述了现有选址-路径问题的特点、扩展方式以及优化方法。Contardo等^[3]基于两级网络提出了带容量限制的选址-路径问题,通过分支定界和自适应大邻域搜索算法分别研究每一级选址-问题再集成全局优化解。李昌兵等^[4]结合正向和逆向物流研究选址-路径-库存问题,考虑回收过程中的回收量可拆分,表明正逆向物流组合有利于降低总成本。

大数据技术的发展及客户数据规模的增加也使国内外学者渐渐掌握改进供应链管理模式的工具,从而,越来越多

收稿日期: 2018-06-25; 修回日期: 2018-08-25; 录用日期: 2018-08-31。

作者简介: 梁喜(1978—),男,江苏连云港人,教授,博士,主要研究方向: 物流与供应链管理、交通运输经济; 凯文(Kevin Assogba)(1991—),男,贝宁人,硕士研究生,主要研究方向: 物流与供应链管理。



的研究将大数据分析技术与设施选址、车辆路径、选址-路径等问题结合。事实上,在构建优化模型之后,大多数研究通常利用实际案例数据分析并证明模型和求解方法的有效性。作为传统数据挖掘工具,客户聚类或市场细分受到广泛的关注。与李周芳等^[5]相同,许多利用进化算法解决大规模优化问题的研究学者经常将聚类设为初始环节。Calvet 等^[6]将客户聚类操作与启发式算法结合提出了一种混合智能算法,经过预测获得新客户对应的服务费用并应用方法于求解多中心车辆路径问题。在优化研究领域,虽然有的学者常用智能算法试图求得最优解决方案^[7],还有些通常结合模糊理论寻优^[8]。Prins 等^[9]混合了贪婪随机自适应搜索算法(Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, GRASP)和 CW (Clarke, Wright)节约启发式算法解决带容量限定选址-路径问题。吕新福等^[10]探讨了废弃物品回收网络的选址-路径问题,并且采用了两阶段禁忌搜索算法得出改善废品物流系统管理的有效措施。李想等^[11]将大邻域搜索代入模拟退火算法设计中并基于两级物流配送网络研究选址-路径问题。关菲等^[8]建立了以最小总费用和最高服务水平为目标的模糊多目标物流配送中心选址模型,结合非支配排序遗传算法-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)中的拥挤距离排序和非支配排序思想改进标准粒子群算法。陈刚等^[12]研究了应急物流选址-路径问题,设计了非支配排序遗传算法和变权多目标遗传算法,分别用两个算法进行求解发现 NSGA-II 给出的结果最优。总体上而言,上述研究主要存在两方面不足:一是在物流网络优化问题中虽然考虑了环保问题,但是并没有综合考虑产品回收率和碳排放量;二是在物流配送中心选址-路径问题中,都是从企业视角出发,而不是从客户角度考虑消费特征。

综上所述,针对现有文献中缺乏以最大产品回收率和最小碳排放量为目标函数的研究,以及缺乏从客户角度考虑消费特征并以客户聚类结果为基础寻找优化结果的研究,本文结合碳排放和产品回收目标研究两级物流网络选址-路径问题,将客户的产品偏好和购物行为设为客户聚类指标,构建了适合多产品并同时考虑客户聚类和产品回收的两级闭环物流网络选址-路径问题优化模型,提出基于客户聚类的改进非支配排序遗传算法-II (Improved Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, INSGA-II),结合算法的局部与全局搜索功能提高算法的准确性,并提高两级物流网络选址-路径问题的寻优效率。

1 问题定义与优化模型的构建

1.1 问题定义

随着生产作业规模的增加及客户数量的增多,众多生产企业选择通过多级网络完成产品供应与回收活动。物流中心是多级物流网络重要设施之一,在分级后主要从事服务配送中心和回收中心的任务,在实际网络中也拥有直接服务最终客户的功能。在此基础之上,与实际结合并考虑 M 制造厂仓库 ($m \in M$)、 I 物流中心 ($i \in I$) 和 C 客户 ($c \in C$) 构成的两级闭环物流网络。给定物流中心强大运作能力,它可以同时承担配送与回收作业。正向物流中,车辆从制造厂仓库将 P 产品 ($p \in P$) 输运到物流中心的配送区域,而订单处理之后,货物将被送到相应的客户。每当车辆完成配送作业时,也负责收集可回收物品并送至物流中心的回收区域。回收区域主要检验回收物品的质量,并将合格产品运到制造厂仓库进行再制造;废品由 W 废品处理中心 ($w \in W$) 收集。第一级运输中, K 半挂

卡车 ($k \in K$) 负责产品的运输,但配送与回收作业由 V 城市物流车辆 ($v \in V$) 完成。现实生活中,客户对消费品偏好的不稳定性使许多决策者处于不确定状态。因此,虽然客户位置已知,本文还考虑物流网络中需求量及回收率的随机性。

基于上述分析,经过同时寻找最小总成本和最小环境影响面影响的优化结果求解“考虑环保的两级闭环物流网络选址-路径问题”(Two-Echelon Closed-loop Logistics Location-Routing Problem with Environmental considerations, TECLLRP-E)。为简化并结合实际物流网络运作,考虑了以下四个假设。第一,由于制造商仓库规模大并且网络中的数量相对少,设其位置已知,因此无需对第一层设施进行选址;事实上,物流企业主要基于主要设施的地址选择其他小型设施的地址。另外,为简化物流作业的流程,假设客户不能直接由制造厂仓库服务。第二,根据历史数据,制造企业已知客户对产品回收的习惯,从而回收率不能等于 0。这项假设体现物流企业的环保意识,表示企业更倾向于服务拥有一定产品回收意识的客户。另外,为保持计算的便利性,假设企业从物流中心回收的产品中可再用于制造的比例是固定的。第三,由于物流中心规模较大,可从事更多作业,本文假设每个物流中心可以承担产品配送和废品回收作业,而不同产品的库存费和回收物品处理费相同。第四,根据实务中物流中心的标准化与规范化要求,假设第二级运输车辆类型相同,回收的产品在容量和重量上不超过配送的产品。

另外,在建立适于 TECLLRP-E 问题优化的混合整数模型过程中,采用表 1 所述的集合、参数和决策变量。

1.2 优化模型建立

本文以最小运营成本和最小环境影响为目标求得合适的选址-路径优化方案。总成本目标函数包含物流设施的建设成本、单周期的固定与库存成本以及配送与回收车辆的运输和维护成本。

制造厂仓库的固定成本和物流中心的建设与固定成本为 $C1$,计算公式如下:

$$C1 = \sum_{m \in M} Z_m + \sum_{i \in I} O_i \cdot (W_i + Z_i) \quad (1)$$

物流中心库存成本和回收物品处理成本为 $C2$,计算公式如下:

$$C2 = \sum_{i \in I} O_i \cdot \left[H_i \cdot \sum_{p \in P} D_{ip} + H'_i \cdot \left(\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} Y_{ci} \cdot \tilde{\alpha}_{cp} \cdot \bar{D}_{cp} \right) \right] \quad (2)$$

半挂卡车和城市物流车辆的运输与维护成本为 $C3$,计算公式如下:

$$C3 = \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \left[\frac{\sum_{p \in P} D_{ip}}{Q_k} \cdot (x_{mik} \cdot S_{mi} \cdot \kappa \cdot G_k + Z_k) \right] + \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \left[\frac{\sum_{p \in P} \bar{D}_{cp}}{Q_v} \cdot (x_{icv} \cdot S_{ic} \cdot \kappa \cdot G_v + Z_v) \right] + \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \sum_{v \in V} \left[\frac{\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} (1 - \delta_{ip}) \cdot \tilde{\alpha}_{cp} \cdot \bar{D}_{cp}}{Q_v} \cdot (x_{icv} \cdot S_{ic} \cdot \kappa \cdot G_v + Z_v) \right] \quad (3)$$

相对于成本目标函数,本文的环境目标主要着重于第二级配送与回收作业的环境影响,分别考虑网络中每家物流中心通过回收为环保的贡献以及服务客户的过程中所产生的碳



排放量,得出相应的环境影响目标函数。

表1 参数定义

Tab. 1 Parameter definition

类别	符号	定义
模型参数	W_i	物流中心 i 的建设成本
	Z_m	单周期制造厂仓库 m 的固定成本
	Z_i	单周期物流中心 i 的固定成本
	H_i	物流中心 i 单周期有待配送产品的单库存费
	H'_i	物流中心 i 回收站的单周期单产品处理费
	Z_k	单周期半挂车 k 平均的维护成本
	K	每毫升柴油价格
	Z_v	单周期城市物流车辆 v 平均的维护成本
	\tilde{D}_{cp}	客户 c 的产品 p 不确定配送量
	D_{ip}	为物流中心 i 运输的产品 p 货物量
	Q_i	物流中心 i 最大配送量
	Q'_i	物流中心 i 最大回收量
	Q_k	半挂车 k 最大装载量
	Q_v	城市物流车辆 v 最大装载量
	α_L	最低回收率
	α_H	最高回收率
	$\tilde{\alpha}_{cp}$	物流中心从客户 c 回收产品 p 的比率
	δ_{ip}	制造厂从物流中心 i 可回收产品 p 的比率
	G_k	半挂车 k 每百公里的平均油耗率(单位: mL/km)
	G_v	城市物流车辆 v 每百公里的平均油耗率(单位: mL/km)
	S_{mi}	制造厂仓库 m 与物流中心 i 之间的距离
	S_{ic}	物流中心 i 与客户 c 之间的距离
	S_{iw}	物流中心 i 与废品处理中心 w 之间的距离
	E_k	半挂车 k 每毫升的排放量(单位: g/mL)
	E_v	城市物流车辆 v 每毫升的排放量(单位: g/mL)
决策变量	ζ_{av}	子回路消除的变量, $a \in I \cup C, v \in K \cup V$
	O_i	当在候选地址 i 设物流中心, $O_i = 1$, 否则等于 0
	Y_{ci}	当客户 c 分配给物流中心 i , $Y_{ci} = 1$, 否则等于 0
	X_{mik}	当卡车 k 从仓库 m 出发去服务物流中心 i , $X_{mik} = 1$, 否则 $X_{mik} = 0$
	X_{icv}	当车辆 v 从点 i 出发去服务点 c , $X_{icv} = 1$, 否则 $X_{icv} = 0$

首先,结合历史数据分析每个客户的历史回收率,通过数据拟合求得回收率服从的正态分布均值,并且利用模糊理论计算模糊回收系数;主要采用三角模糊数获取相应回收系数的隶属度函数。产品回收的模糊隶属函数 $\mu(\tilde{\alpha}_{cp})$ 和物流中心 i 的产品回收系数分别如式(4)、(5)所示。

$$\mu(\tilde{\alpha}_{cp}) = \begin{cases} 0, & \tilde{\alpha}_{cp} < \alpha_L \\ \frac{\tilde{\alpha}_{cp} - \alpha_L}{\alpha_H - \alpha_L}, & \alpha_L \leq \tilde{\alpha}_{cp} \leq \alpha_H \\ 1, & \tilde{\alpha}_{cp} > \alpha_H \end{cases} \quad (4)$$

$$RR_i = \frac{Y_i \cdot \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \mu(\tilde{\alpha}_{cp}) \cdot \tilde{D}_{cp}}{\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \tilde{D}_{cp}} \quad (5)$$

从而,整个网络的产品回收目标函数如式(6):

$$\max \left(RO = \sum_{i \in I} RR_i \right) \quad (6)$$

其次,引入碳排放模型寻找有助于综合优化物流中心运营对环境的影响。由于本文已知车辆类型、油耗以及碳排放系数,第二级配送与回收路线的低碳模型如式(7):

$$\min \left(CE = \sum_{i \in I \cup C} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} S_{ic} \cdot E_v \cdot G_v \cdot x_{icv} \right) \quad (7)$$

最后,结合式(6)和(7),提出式(8)中的综合环境影响目

标函数为寻找有助于减少环境破坏程度的选址-路径的方案。

$$\min(F_2 = CE/RO) \quad (8)$$

综上所述,TECLLRP-E 问题主要寻找有利于达到最小总成本式(9)和最小环境影响破坏式(10)的选址-路径方案。其中,约束条件式(11)保证网络中的每一个物流中心被访问,而式(12)要求车辆从制造厂仓库出发访问一个物流中心的次数不多于一次;对于下游客户,式(13)~(14)保证每一个客户被城市物流车辆服务,并且从物流中心出发的车辆访问次数不多于一次;约束条件式(15)~(16)限制车辆的装载量,分别要求指派给半挂车和城市物流车辆的需求量不大于相应服务车辆的最大容量;式(17)~(18)分别为第一级和第二级物流约束,表示无论是第一级或第二级设施之间每辆车停靠服务之后一定离开去访问其他服务点;式(19)表示回收物品的容量不大于配送量;约束条件式(20)~(21)分别表示物流中心有足够容量满足自己客户的配送需求和回收物品库存空间要求;式(22)~(25)中的约束条件为子回路消除条件,分别通过限制每路段上的运输容量确保车辆不再重复访问同一个服务点;式(26)~(29)介绍计算中采用的 0 和 1 变量。

TECLLRP-E 问题的双目标混合整数优化模型如下:

$$\min(F_1 = C_1 + C_2 + C_3) \quad (9)$$

$$\min(F_2 = CE/RO) \quad (10)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} x_{mik} = 1; i \in I \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in I} x_{mik} \leq 1; k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in I \cup J} x_{icv} = 1; c \in C \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} x_{icv} \leq 1; v \in V \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{p \in P} Q_{ip} \cdot \sum_{m \in M \cup I} x_{mik} \right) \leq Q_k; k \in K \quad (15)$$

$$\left\{ \sum_{c \in C} \left(\sum_{p \in P} \tilde{D}_{cp} \cdot \sum_{i \in I \cup C} x_{icv} \right); \sum_{w \in W} \left[\sum_{p \in P} (1 - \delta_{ip}) \cdot \tilde{\alpha}_{cp} \cdot \tilde{D}_{cp} \cdot \sum_{i \in I \cup W} x_{icv} \right] \right\} \leq Q_v; v \in V \quad (16)$$

$$\sum_{c \in I \cup C} X_{icv} - \sum_{c \in I \cup C} X_{civ} = 0; v \in V, i \in I \cup C \quad (17)$$

$$\sum_{i \in M \cup I} X_{mik} - \sum_{i \in M \cup I} X_{imk} = 0; k \in K, m \in M \cup I \quad (18)$$

$$\sum_{p \in P} \tilde{D}_{cp} \geq \sum_{p \in P} \tilde{\alpha}_{cp} \cdot \tilde{D}_{cp}; c \in C \quad (19)$$

$$\sum_{c \in C} Y_{ic} \cdot \left(\sum_{p \in P} \tilde{D}_{cp} \right) \leq Q_i; i \in I \quad (20)$$

$$\sum_{c \in C} Y_{ic} \cdot \left(\sum_{p \in P} \tilde{\alpha}_{cp} \cdot \tilde{D}_{cp} \right) \leq Q'_i; i \in I \quad (21)$$

$$\zeta_{ik} - \zeta_{lk} + (Q_k \cdot x_{ilk}) \leq Q_k - \sum_{p \in P} \tilde{D}_{ip}; i, l \in I, i \neq l \quad (22)$$

$$\zeta_{cv} - \zeta_{jv} + (Q_v \cdot x_{cjo}) \leq Q_v - \sum_{p \in P} \tilde{D}_{jp}; c, j \in C, c \neq j \quad (23)$$

$$\sum_{p \in P} \tilde{D}_{ip} \leq \zeta_{ik} \leq Q_k; i \in I, k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{p \in P} \tilde{D}_{cp} \leq \zeta_{cv} \leq Q_v; j \in J, v \in V \quad (25)$$

$$x_{mik} = \{0, 1\}; m \in M \cup I, i \in I, k \in K \quad (26)$$

$$x_{icv} = \{0, 1\}; i \in I \cup C, c \in C \cup W, v \in V \quad (27)$$

$$Y_{ic} = \{0, 1\}; i \in I, c \in C \quad (28)$$



$$O_i = \{0,1\}; i \in I \quad (29)$$

2 TECLLRP-E 的优化方法设计

基于多目标进化算法提出了 TECLLRP-E 的求解方法。首先进行客户的聚类,并在其结果基础上优化物流中心选址与两级的车辆路径网络。本文在标准非支配排序遗传算法-II (NSGA-II) 基础之上,将 K-means 聚类算法和改进 NSGA-II^[13] 方法结合,以有效求解 TECLLRP-E 问题的多目标数学模型。NSGA-II 是一个典型的多目标进化算法,作为 NSGA 的改进版,NSGA-II 的提出源于许多学者和决策者对 NSGA 计算复杂与结果质量的分析与改进,是一种快速并拥有保留精英功能的非支配排序遗传算法。现有多目标进化算法当中,NSGA-II 由于其非支配的特点和拥挤距离的计算能力,已经是应用最广并拥有最高效率的多目标进化算法之一^[12]。本章介绍考虑客户聚类结果的两级物流设施选址-路径问题求解算法,相比标准 NSGA-II,引入客户聚类作为初始环节,并且在初始种群的生成和遗传算子方面对标准算法进行改进。下面介绍改进的非支配排序遗传算法 (INSGA-II) 的主要流程。

2.1 客户点的聚类操作

聚类在物流网络优化过程中常用于降低计算的复杂性及提高结果的准确性。作为一个中间过程,它主要根据元素的相似点进行分组,以使每一个聚类单元内的成员有相同的行为。尽管不同优化中聚类指标之间可能有差别,聚类方法通常最大化实现相似性分类。本文在 INSGA-II 运行之前通过以下方式对市场的分割。

1) 市场定义:以企业新老客户构成的网络为对象,但为提高准确性只考虑有连续购买频率的新客户。

2) 聚类指标体系的构建:如图 1 所示,采取一个三级指标体系,处于第二级的客户特征包括客户的忠诚度及对产品的偏好,而关于距离评价的指标包括客户点的经纬度。

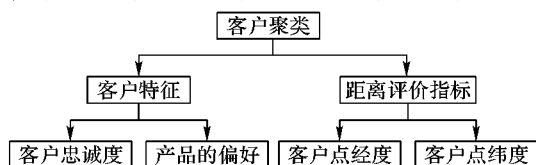


图1 客户聚类操作指标体系

Fig. 1 Customer clustering criteria index

客户忠诚度:通过客户的消费频率进行评价,主要依据两次消费之间的时长是否大于或等于所有客户的平均时长。

客户对产品的偏好:产品的消费量可以用于评估生命周期、消费品对环境的影响及顾客对产品的消费趋势^[14],因此,通过产品消费量评价客户对每一类产品的偏好。

距离评价指标:将客户点的经纬度数据代入聚类算法有助于求得客户之间最小的距离,即提高聚类单元的密度。根据收集的数据,采取二进制变量将客户特征信息转为数字。数据处理之后,客户聚类数据构成一个 $L \times N$ 矩阵, L 和 N 分别为客户聚类指标和客户总数。假设产品的数量为 $P = 4$, 矩阵的列数是 $N = 7$ (包括客户忠诚度、四类产品的偏好、纬度和经度)。

3) 聚类方法的选择:在定义聚类对象并确定指标体系之后,决策者需要针对数据的类型作出选择。由于数据处理已将涉及的因素都转换为数值,故利用 K-means 聚类算法,因为 K-means 聚类算法设计简单、应用广泛,众多学者都验证了 K-means 算法的效率。

4) 客户点的聚类:应用 K-means 算法把具有很大大相似度的客户归为同一个集群。K-means 聚类不仅有利于确保聚类单元相似,也将助于保证每个中心服务最合适的客户,而每一个客户有一个中心服务,从而使优化解满足约束条件式 (11) ~ (14)。

2.2 INSGA-II 算法的主框架

在客户聚类之后,根据 TECLLRP-E 的特征并在标准非支配排序遗传算法-II 基础上提出适于优化两级物流网络选址-路径问题。本文提出的 INSGA-II 算法流程如图 2 所示。

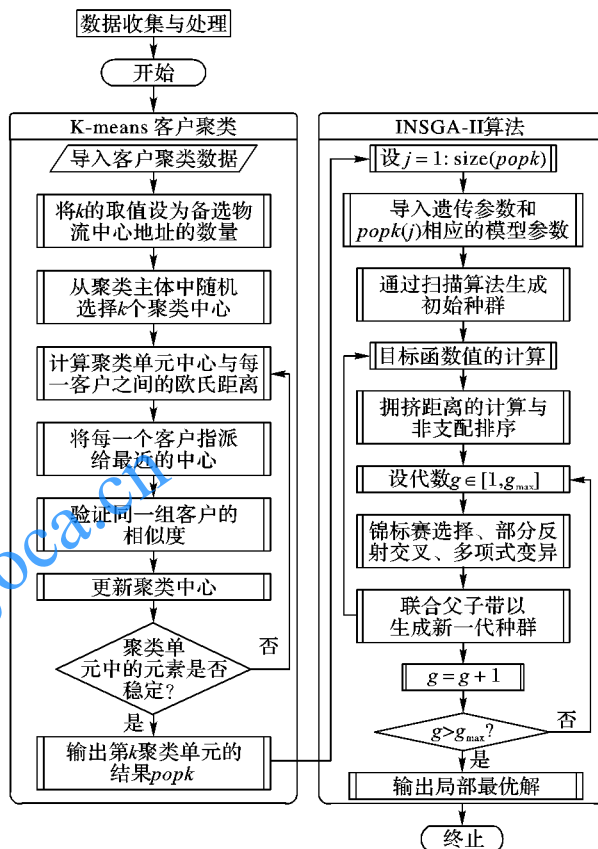


图2 INSGA-II 算法流程

Fig. 2 Flow chart of INSGA-II algorithm

主要步骤如下:

步骤1 初始群生成。在 K-means 客户聚类结果基础上,采用实数编码方式生成初始种群。考虑消费者特征和行驶距离的客户聚类操作之后,采取 Gillett 等^[15] 提出的扫描算法生成初始路线。扫描算法主要以车辆的出发点为极点,根据经纬度标记访问点,并以每一点与极点的角度大小排序:角度最小的访问点优先;当两个点的角度相同时,根据与极点的距离排序。通过扫描算法的使用,决策者可以避免自回路的生成,从而满足约束条件式 (17) ~ (29)。之后,基于扫描算法给出的解进行路段分割,并且通过累加方式保证不超出每一辆车的容量,满足约束条件式 (15) ~ (16)。

步骤2 目标函数值的计算。由于 INSGA-II 是一个多目标优化算法,决策者不需要在计算过程中把两个目标函数转成单目标模型,因此,本文以式 (9) ~ (10) 为目标,分别计算总成本和环境破坏系数。

步骤3 快速非支配排序与拥挤距离计算。使用非支配排序对种群进行排序,把排序结果返为一列数组,并将对应的拥挤距离返为另一列;然后,在染色体向量后面添加相应的排



名和拥挤距离以简化结果优劣性的判断,最终排在前几行的染色体是种群中最好的解。

步骤 4 遗传操作。INSGA-II 的遗传操作将原算法中的模拟二进制编码转换为部分反射交叉算子 (Partially Mapping Crossover Operator, PMX) 和交换变异算子 (Exchange Mutation Operator, SM), 适用于序号型编码。PMX 主要随机选择父代染色体上的两点, 交换两点之间的基因码, 在每一条父代上检查重复的遗传因子并修改。对于 SM 的操作, 随机选择一个子代染色体上的两个遗传因子并将位置交换。

步骤 5 终止条件。当换代次数超过设置的最大代数, 终止 INSGA-II 算法的运行。

3 数值分析

3.1 算法性能的分析

虽然 INSGA-II 算法拥有标准 NSGA-II 的框架及主要组成

部分,但是本文通过节点扫描算法生成初始种群并替换遗传算子。事实上,INSGA-II 算法的目标主要是为了提高算法在结果质量、运行时间、便利性等方面的性能,但是,这些修改也有破坏算法效率的可能性。为检验 INSGA-II 算法的性能,采取数据集比较,分别使用 INSGA-II 算法、标准 NSGA-II 和多目标蚁群算法 (Multi-Objective Ant Colony Optimization, MOACO) 对每个数据组进行计算,最后根据结果分析方法的优劣势。本文以 10 组随机生成的测试数据组为对象,在已知配送中心和客户数量的基础之上,设网络上有 I 个配送中心 ($I \in [2, 10]$) 和 J 个客户 ($J \in [10, 100]$)。根据均匀分布随机生成的节点经纬度,假定客户需求量为 $[20, 50]$ 内的随机数,车辆单位运费为 1.5 元/km,车辆维护成本为 200 元,车辆最大载重量是 250 件。针对算法参数设计,最大迭代次数为 500,种群规模为 100。设交叉概率 $p_c = 0.9$,变异概率 $p_m = 0.1$ 。表 2 总结了每一组数据的规模及三种算法的优化结果。

表 2 三种算法性能比较结果

Tab. 2 Performance comparison results of three algorithms

编号	问题规模		INSGA-II			NSGA-II			MOACO		
	配送中心数量	客户数量	成本	车辆数	运行时间	成本	车辆数	运行时间	成本	车辆数	运行时间
1	2	10	829	2	59	888	2	77	685	2	101
2	3	10	845	3	71	902	3	79	702	3	200
3	2	30	2 197	4	90	2 414	5	130	3 372	5	129
4	3	30	2 168	5	100	2 717	5	141	2 728	5	138
5	6	70	7 610	11	200	8 665	11	420	7 709	12	258
6	8	70	5 852	12	225	7 867	12	446	6 040	14	264
7	6	90	6 875	15	244	10 582	15	635	6 922	16	326
8	8	90	9 081	15	259	10 858	15	640	9 183	17	350
9	6	100	11 315	15	267	13 074	16	740	14 127	17	389
10	8	100	10 765	16	274	12 391	17	763	11 613	18	371
均值			5 753	10	179	7 036	11	407	6 308	11	253

通过 Matlab 软件分别运行 10 次,求得表 2 中成本和车辆数。通过 Profiler 窗口收集每组数据运行时间。为了有效比较 INSGA-II 与 NSGA-II 和 MOACO 等传统多目标优化算法性能,应用每个目标平均值,根据优化结果可得 INSGA-II 优化结果最好,其在单个数据组、平均值、运行时间上的效率均具有优势,从而说明本文的算法有一定性能优势。

3.2 实际算例分析

以重庆市某家企业为例,分析 TECLLRP-E 问题的实际影响,并且在收集的数据基础上通过数值分析验证模型和算法的实际应用。该企业服务范围不仅覆盖整个直辖市,在周围县村也有很多客户。然而,与众多企业情况相同,同时追求出售产品的需求量增大、成本的减少、服务质量的提高和环境的保护有赖于网络优化。作为供应链优化的重要战略物流设施的选址-优化问题不但可以使物流企业达到预定目标,考虑客户的聚类和产品回收,也有助于作出更系统的决策。为了保证优化过程的便利性,本文仅考虑企业在重庆市内的物流网络,如图 3 所示,企业在选择满足客户需求的时候备选 7 家物流中心 $LC_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 作为它与网络上 75 个客户 $C_i (i = 1, 2, \dots, 75)$ 之间的中级设施。三角形符号表示客户的位置 (也用 $C_i (i = 1, 2, \dots, 75)$ 表明);十字形符号为备选物流中心的地址 (也用 $LC_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 表明),箭头符号指定制造商仓库 (也用 MV 表明)。由于地点偏远的问题,示意图上没有标回收中心。

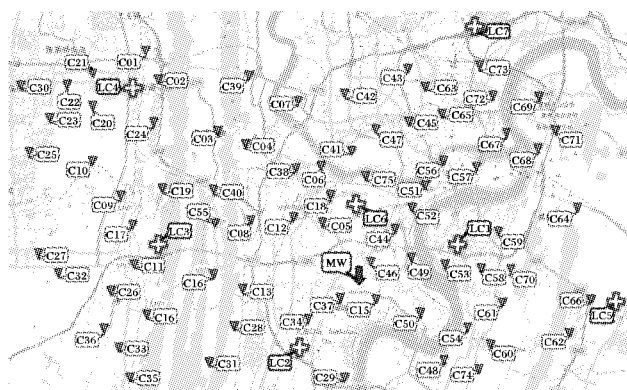


图 3 实例的物流网络示意图

Fig. 3 Schematic diagram of logistics network example

针对 4 种不同产品类型,根据模型要求初始设置相应的参数值并采用 Matlab R2015a 软件编写算法。经过企业运作相关数据收集以及现有文献分析,主要参数如下:物流中心的建设成本 W_i (元) 分别为 $W_1 = 13\ 000$, $W_2 = 19\ 500$, $W_3 = 22\ 850$, $W_4 = 15\ 600$, $W_5 = 20\ 000$, $W_6 = 15\ 900$ 和 $W_7 = 21\ 350$; 至于一个周期内的固定成本 Z_i (元), $Z_1 = 1\ 300$, $Z_2 = 2\ 000$, $Z_3 = 1\ 600$, $Z_4 = 2\ 300$, $Z_5 = 1\ 800$, $Z_6 = 2\ 300$ 和 $Z_7 = 2\ 500$; 假设不同产品的单位库存成本相同,而且不同回收物品的处理成本也相同,设 $H_i = 15$, 而 $H'_i = 9$; 另外设 $\alpha_L = 0.1$, $\alpha_H = 0.9$, $\delta_{ij} = 0.5$; 单个工作周期中有 5 个工作



日。另外,本研究在优化过程中也考虑客户需求量和回收率的不确定。因此,基于所收集的数据得出单客户的单产品需求量和回收率服从的正态分布均值与标准偏差,最后生成三组仿真

数据,如表3所示(其中环境目标具体是指CO₂排放量,单位为kg),并且求出不同情况下有效的选址-路径方案。下面分析TECLLRP-E求解的过程以及得出的计算结果。

表3 TECLLRP-E问题在不同需求量和回收率下的优化结果

Tab. 3 Optimization results of TECLLRP-E problem under different scenarios

编号	网络组合	测试1		测试2		测试3	
		成本目标/元	环境目标/kg	成本目标/元	环境目标/kg	成本目标/元	环境目标/kg
1	{LC1;LC2}	3.737E+06	99.95	3.735E+06	92.21	3.747E+06	101.90
2	{LC1;LC3}	3.481E+06	84.42	3.466E+06	77.47	3.469E+06	84.54
3	{LC1;LC4}	3.728E+06	95.70	3.723E+06	88.35	3.746E+06	97.94
4	{LC1;LC5}	3.972E+06	112.11	3.856E+06	97.63	3.824E+06	105.49
5	{LC1;LC6}	3.525E+06	86.82	3.461E+06	76.17	3.484E+06	85.43
6	{LC1;LC7}	4.163E+06	116.90	4.036E+06	101.66	4.023E+06	110.89
7	{LC2;LC3}	3.758E+06	100.51	3.793E+06	93.84	3.769E+06	102.42
8	{LC2;LC4}	3.796E+06	99.88	3.794E+06	92.14	3.806E+06	101.83
9	{LC2;LC5}	3.802E+06	102.22	3.794E+06	94.31	3.826E+06	104.37
10	{LC2;LC6}	3.738E+06	99.34	3.736E+06	91.60	3.748E+06	101.33
11	{LC2;LC7}	3.868E+06	100.06	3.866E+06	92.33	3.876E+06	102.00
12	{LC3;LC4}	3.525E+06	84.35	3.511E+06	77.40	3.513E+06	84.48
13	{LC3;LC5}	3.548E+06	86.68	3.527E+06	79.57	3.550E+06	87.01
14	{LC3;LC6}	3.473E+06	83.81	3.442E+06	76.46	3.461E+06	83.97
15	{LC3;LC7}	3.597E+06	84.53	3.583E+06	77.58	3.583E+06	84.65
16	{LC4;LC5}	3.800E+06	97.96	3.790E+06	90.45	3.832E+06	100.41
17	{LC4;LC6}	3.722E+06	95.09	3.717E+06	87.73	3.739E+06	97.37
18	{LC4;LC7}	3.833E+06	95.81	3.829E+06	88.46	3.849E+06	98.05
19	{LC5;LC6}	3.975E+06	111.50	3.859E+06	97.01	3.827E+06	104.92
20	{LC5;LC7}	4.101E+06	112.22	3.985E+06	97.74	3.951E+06	105.59
21	{LC6;LC7}	4.162E+06	116.29	4.035E+06	101.05	4.022E+06	110.32
22	{LC1;LC2;LC3;LC4;LC5;LC6;LC7}	2.982E+06	160.46	2.959E+06	145.68	2.990E+06	158.34

3.2.1 聚类结果分析

数据预处理之后进行网络中所有客户的分类。如2.1节分析,考虑7个指标:客户忠诚度、四类产品的偏好、纬度和经度。首先,设 $k \in [2,7]$ 并运行K-means算法。 k 值范围的选定源于物流中心的数量,最大 k 值为7的原因在于网络中共有7个物流中心;而取最小值为2的原因在于初始网络已经形成1个聚类单元,从而经过聚类操作的网络中的聚类单元数量一定大于1。聚类后获得客户在每一种情况下的分配方案以及相应的轮廓系数(silhouette value)。轮廓系数主要用于判断聚类结果的质量,从而评出最合理的距离结构^[16]。作为 $[-1,1]$ 区间的系数,轮廓系数等于-1表示分类错误,0表示节点处于群体的边界(同时适于两个不同单元)、1表示分类正确。

聚类结果表明当 $k=2$ 或者 $k=7$ 时,小于0的系数最少。因而,这两种情况下,不但每一个客户的分类方案基本上没有错误,而且每个聚类单元中客户的相似度也好。在此基础上,本文以生成2和7个聚类单元为例解决TECLLRP-E问题。

3.2.2 寻优分析

首先,经过多次运行寻找优化结果,并将可行解列入表3,前21个组合是基于2个聚类单元网络求满足选址-路径成本 and 环境影响目标的局部最优解,而最后一项表示网络被分为7个聚类单元。

其次,表3显示了每一种网络结构下的目标函数值。分析发现第22组合获得最小成本,但是其环境负面影响最大。这种结果与很多现有的研究结论一致,说明追求最小成本的

企业不一定环保效率高。然而,以测试1为对象,可见获得最高成本的{LC1;LC7}组合并没有求出最低环境目标值,而有最低环境目标值的{LC3;LC6}组合获得高于第22组的成本。这说明成本与环境影响之间没有严格单调的关系,成本的增加不一定代表环境影响的减小。

最后,为了判断决策者可以实施的方案:第一,利用Matlab中的normc函数将每一个目标函数值归一化,使所有结果处于 $[0,1]$ 区间,并且根据INSGA-II非支配排序思路比较所有局部最优解;第二,利用加权求和方法计算并与INSGA-II求出的最终结果进行比较,而且为了避免结果受权重的影响,设两个目标函数权重相等并设权重值为0.5。两个方法的比较结果相同,即说明INSGA-II算法具备的非支配排序功能也有助于作出准确决策。

根据寻优结果分析图2网络也可以发现,企业可以从LC3和LC6的位置有效地覆盖整个网络。该组合的第一级运输由半挂车从制造厂仓库出发先访问LC3再去服务LC6。至于第二级配送与回收路线,随着需求量和回收率的变化,车辆的调度策略也不同,因而企业需要根据客户的需求或者客户提供的信息在不同周期内作决定。尽管如此,只要在候选地点3和6开设物流中心,企业就可以在长期内控制选址-路径决策的成本和环境负面影响。

综上所述,得以下结论:

1) 客户聚类可以使物流企业提高效率、减少成本、为环境做更多的贡献。根据聚类之后的轮廓系数比较,两个聚类单元构成的物流网络不但没有不合理的客户分配,聚类单元内成员的特征也很相似。



2) 由于三次测试的需求量和回收率不同,两个目标函数值在各种情况下都不同,从而说明成本 and 环境影响目标函数值受不同周期内需求量和回收率变化的影响。另外,虽然选址方案稳定,但是车辆路径方案随不同周期的配送与回收量而变。

3) 虽然资金的投入可以提高企业环保效率,但是总成本的增大不一定减少物流作业对环境的负面影响,因此,这两个目标之间没有严格单调的关系。

4) INSGA-II 的效率相比 NSGA-II 和 MOACO 算法占优势。INSGA-II 不但可以通过局部搜索得出每个网络组合下的非劣解,也可以利用非支配排序功能进行全局搜索并得出相对好的结果。

4 结语

工业时代以来,城市与邻近郊区的人口不断增加,城市物流流量不断增大而企业面临的挑战也越来越激烈。物流设施的选址-路径问题作为一项网络优化措施已成为企业与研究学者研究探讨的综合性问题。在考虑两级闭环物流网络基础之上,结合客户需求独特性、随机性及回收率不确定性,研究制造厂仓库、物流中心和最终客户之间的两级物流设施选址-路径优化问题。结合数学模型与智能算法提出以成本和环境最小化的混合整数优化模型,并设计求解模型的改进非支配排序遗传算法-II(INSGA-II)。最后,基于重庆市某家制造企业的实际案例进行算例分析,应用提出的方法寻出最好选址-路径方案。本文提出的模型与优化方法的主要结论如下:

1) 算例分析研究表明最大成本不一定对应于最小的环境影响,反之亦然。因此,企业为降低环境影响,需要在投入资金之外进行物流网络的优化。

2) 本文研究表明,考虑客户销售行为与特征有利于提高选址-路径问题优化方案的质量。虽然算例分析研究表明相似度最高的选址-路径优化结果可以使企业达到目标,但是该结果也有助于库存量的控制以及有效的客户关系管理。

为深入探讨 TECLLRP-E 问题,今后还可以从以下几方面进行研究:

1) 实际上,产品回收率受着价格、服务质量、交通因素、消费者环保意识等因素的影响,因此,可以结合实际问题考虑更多的相关因素,进而完善建立的产品回收数学模型。

2) 作为两个 NP 难问题的结合,选址-路径问题的求解依赖于高性能进化算法的应用,本文所提出的 INSGA-II 算法还可以进一步修改和完善,进而提高算法性能并寻求高质量的优化结果。

参考文献:

- [1] WU X, NIE L, XU M. Designing an integrated distribution system for catering services for high-speed railways: A three-echelon location routing model with tight time windows and time deadlines [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 74: 212 - 244.
- [2] DREXL M, SCHNEIDER M. A survey of variants and extensions of the location-routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 241(2): 283 - 308.
- [3] CONTARDO C, HEMMELMAVR V, CRAINIC T. G. Lower and upper bounds for the two-echelon capacitated location-routing problem [J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(12): 3185 - 3199.
- [4] 李昌兵, 张斐敏. 集成选址-路径-库存问题的逆向物流网络优化 [J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(7): 1793 - 1798. (LI C B, ZHANG F M. Reverse logistics network optimization of integrated location-routing-inventory problem [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(7): 1793 - 1798.)
- [5] 李周芳, 杨桦, 徐振强. 具有聚类性质的蚁群算法在城市蔬菜物流配送中心选址问题中的应用 [J]. *中国农机化学报*, 2013, 34(5): 206 - 209. (LI Z F, YANG H, XU Z Q. Application of an ant colony algorithm with clustering nature in problem of urban vegetable logistics distribution center location [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(5): 206 - 209.)
- [6] CALVET L, FERRER A, GOMES M I, et al. Combining statistical learning with metaheuristics for the multi-depot vehicle routing problem with market segmentation [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 94: 93 - 104.
- [7] 葛显龙, 许茂增, 王伟鑫. 基于联合配送的城市物流配送路径优化 [J]. *控制与决策*, 2016, 31(3): 503 - 512. (GE X L, XU M Z, WANG X W. Route optimization of urban logistics in joint distribution [J]. *Control and Decision*, 2016, 31(3): 503 - 512.)
- [8] 关非, 张强. 模糊多目标物流配送中心选址模型及其求解算法 [J]. *中国管理科学*, 2013, 21(11): 57 - 62. (GUAN F, ZHANG Q. A fuzzy multi-objective logistics distribution center location model and its solution algorithm [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(11): 57 - 62.)
- [9] PRINS C, PRODHON C, CALVO R W. Solving the capacitated location-routing problem by a GRASP complemented by a learning process and a path relinking [J]. *4OR — A Quarterly Journal of Operations Research*, 2006, 4(3): 221 - 238.
- [10] 吕新福, 蔡临宁, 曲志伟. 废弃物回收物流中的选址-路径问题 [J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 25(5): 89 - 94. (LYU X F, CAI L N, QU Z W. The location-routing problem in the municipal solid waste logistics system [J]. *System Engineering — Theory and Practice*, 2005, 25(5): 89 - 94.)
- [11] 李想, 李苏剑, 李宏. 两级选址-路径问题的大规模邻域搜索模拟退火算法 [J]. *工程科学学报*, 2017, 39(6): 953 - 961. (LI X, LI S J, LI H. Simulated annealing with large-neighborhood search for two-echelon location routing problem [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(6): 953 - 961.)
- [12] 陈刚, 付江月. 基于 NSGAII 的应急物流多目标 LRP 研究 [J]. *软科学*, 2016, 30(4): 135 - 139. (CHEN G, FU J Y. Emergency logistics multi-objective location-routing problem based on NSGAII [J]. *Soft Science*, 2016, 30(4): 135 - 139.)
- [13] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182 - 197.
- [14] LAVERS A, KALMVKOVA Y, ROSADO L, et al. Selecting representative products for quantifying environmental impacts of consumption in urban areas [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 34 - 44.
- [15] GILLET B E, MILLER L R. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem [J]. *Operations Research*, 1974, 22(2): 340 - 349.
- [16] ROUSSEUW P, HUBERT M, STRUYF A. Clustering in an object-oriented environment [J]. *Journal of Statistical Software*, 1996, 1: 1 - 30.

LIANG Xi, born in 1978, Ph. D., professor. His research interests include logistics and supply chain management, transportation economy.

KEVIN Assogba, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include logistics and supply chain management.