

控制与决策

Control and Decision

一种集成最后一公里的四方物流网络设计问题启发式算法

董丽薇, 黄敏, 匡韩斌, 王兴伟

引用本文:

董丽薇, 黄敏, 匡韩斌, 王兴伟. 一种集成最后一公里的四方物流网络设计问题启发式算法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(6): 1601–1608.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1516>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可持续逆向物流网络设计研究进展及趋势

Progress and prospects of sustainable reverse logistics network design

控制与决策. 2020, 35(11): 2561–2577 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1175>

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化

Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal

控制与决策. 2021, 36(12): 3063–3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

凸优化与A*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

基于时空聚类求解带容积约束的选址-路径问题

Time-space cluster based location-routing problem with capacitate constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2504–2510 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0073>

一种集成最后一公里的四方物流网络设计问题启发式算法

董丽薇^{1,2,3}, 黄敏^{1,2†}, 匡韩斌^{1,2}, 王兴伟⁴

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110004; 3. 沈阳师范大学软件学院, 沈阳 110034; 4. 东北大学计算机科学与工程学院, 沈阳 110169)

摘要: 最后一公里分销网络可以帮助企业达成高响应性的供应链管理目标, 集成最后一公里四方物流网络设计问题成为网络设计的一个重要研究方向. 该问题需要对分销中心的位置, 三方物流的选择、分配以及其车辆路径规划进行决策. 在满足车辆路径规划、流守恒等约束条件下, 以最小化网络构建费用为目标建立混合整数规划模型. 由于该问题的 NP-难特性, 可将该问题分解成两个子问题并设计两阶段启发式算法, 通过迭代算法解决两个子问题. 在数值实验中, 将启发式算法分别与 CPLEX 和粒子群优化算法求出的解进行比较, 实验结果验证了启发式算法的有效性; 同时, 将提出的启发式算法成功地应用到实际规模的问题中, 表明所提出的算法能够为解决集成最后一公里四方物流网络设计问题提供有效的工具.

关键词: 最后一公里分销网络; 四方物流; 路径规划; 启发式算法; CPLEX; 粒子群优化算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A



DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1516

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

引用格式: 董丽薇, 黄敏, 匡韩斌, 等. 一种集成最后一公里的四方物流网络设计问题启发式算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1601-1608.

A heuristic algorithm for fourth party logistics network design problem with last-mile delivery

DONG Li-wei^{1,2,3}, HUANG Min^{1,2†}, KUANG Han-bin^{1,2}, WANG Xing-wei⁴

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. College of Software, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China; 4. College of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China)

Abstract: A distributor storage network with last-mile delivery can be used to achieve the supply chain management objective of high responsiveness. The fourth party logistics network design problem with last-mile delivery is an important research in the network design problem, which needs to be solved by simultaneously making decisions on issues of the distribution center location, the selection, allocation and routing programming of the third party logistics. A mix-integer programming model is established to minimize the total system cost with satisfying the constraints of vehicle routing programming and flow conservation and so on. Because the problem is NP-hard, this paper presents a two-phase heuristic algorithm for the fourth party logistics network design problem with last-mile delivery by dividing the problem into two subproblems. The algorithm solves the subproblems in an iterative manner. In the numerical tests, by comparing with the solutions calculated by the CPLEX and the particle swarm optimization algorithm, the heuristic algorithm outperforms the other two algorithms, which illustrates that the heuristic algorithm can provide an efficient solution to the fourth party logistics network design problem with last-mile delivery; meanwhile, the heuristic algorithm is successfully applied in the experiment of practical scale, which also shows that it can offer an effective tool in the field.

Keywords: distributor storage network with last-mile delivery; the fourth party logistics network design; routing programming; heuristic algorithm; CPLEX; particle swarm optimization algorithm

收稿日期: 2020-11-03; 录用日期: 2021-03-16.

基金项目: 国家自然科学基金重点国际合作研究项目(71620107003); 国家自然科学基金青年基金项目(71601039); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802115); 辽宁省高校创新团队支持计划项目(LT2016007); 流程工业综合自动化国家重点实验室基础科研业务费基金项目(2013ZCX11); 辽宁省教育厅基础研究项目(LJC201909).

责任编辑: 李国齐.

†通讯作者. E-mail: mhuang@mail.neu.edu.cn.

0 引言

当今,越来越多的第三方物流(3PL)参与到物流的传递中^[1-2],如何更好地管理3PL成为当今研究的重点.埃森哲资讯公司在1998年提出了四方物流(4PL)的概念^[3],4PL是一个供应链的集成商,它通过拥有的信息技术、整合能力以及其他资源为企业提供一套完整的供应链解决方案,以此帮助企业实现降低成本和有效整合资源的目标,并为自身获取一定的利润.当今的供应链网络除了有传统的供应商、分销中心和用户外,还集成了很多3PL,比如京东物流为了扩展其物流业务与中国邮政、三通一达等众多3PL合作,构建自己的供应链运输网络.经典的网络设计模型都是考虑满载的情况^[4-6],然而现在的用户需要分销商送货上门,比如京东启动了当日或次日交付用户的“本地特快交付”模式,区域用户的需求量不足以达到整车装运的运输方式,Chopra等^[7]提出了最后一公里传递下的分销网络,在这种到户交货模式下,其运输成本很高,因此3PL车辆路径的规划对分销中心的选址也产生了重大的影响.在集成最后一公里的4PL网络设计问题下,分销中心往往由不同的3PL完成运输,因此4PL在进行网络设计的同时完成对分销中心和3PL的选择及3PL路径的规划是本文的研究重点.

Perl等^[8]将带有车辆路径问题的网络设计问题称之为选址路径问题(LRP).很多学者在此基础上对LRP进行了深入的研究,因为LRP是NP难问题,所以学者很多都是将问题拆解成两个子问题,即车辆路径问题和选址分配问题,并将所提出算法求解的近似解和CPLEX求解的精确算法进行对比,分析算法的有效性^[9-12].然而,LRP并没有考虑3PL,选择合适的3PL,对3PL进行合理的市场分配是4PL网络设计的主要工作,Dong等^[13]提出了4PL选址路径问题(4PL-LRP),但并没有给出解决实际规模问题的算法.本文在Dong等提出的问题模型基础上,根据Hansen等^[12]提出的启发式算法将问题分解成两个子问题,不同于Hansen等提出的启发式算法,两个子问题包含了3PL路径规划和选择.本文分析启发式算法的有效性后将启发式算法应用到实际规模问题上,说明提出的启发式算法可以为集成最后一公里的4PL网络设计问题提供很好的解决方案.

1 问题描述和模型

1.1 4PL-LRP问题描述

4PL-LRP可以描述为产品从供应点通过3PL以满载的形式运送到各分销中心,3PL再按一定的路径

将产品交付到用户手中,4PL通常要对分销中心的位置和3PL的选择进行决策(主问题),同时要解决从供应点到分销中心的3PL分配问题和从分销中心到用户的3PL路径规划问题(子问题).

一个四方物流网络可以用一个有向多重图 $G = (V, E)$ 表示,如图1所示.

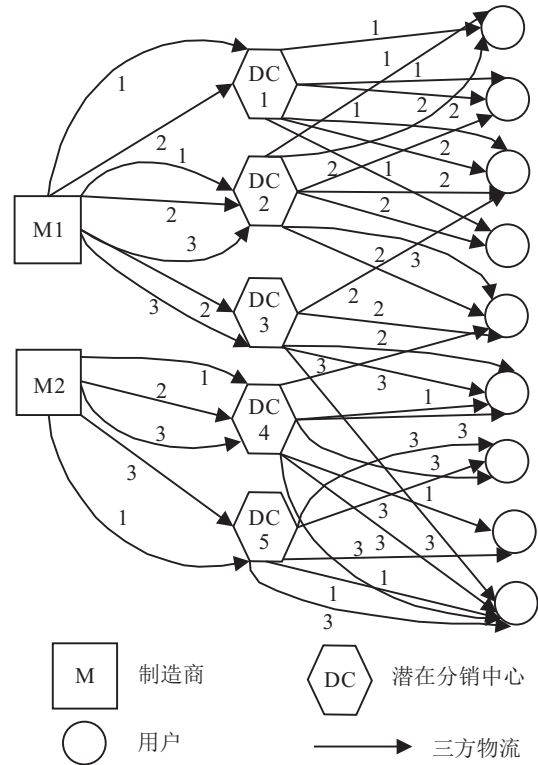


图1 4PL网络

图1中的节点表示制造商、分销中心和用户,每一个潜在的分销中心有能力限制,并需要支付固定的构建费用和可变的存储费用.有向边表示3PL供应商提供的运输,有向边上的数字表示从分销中心到用户可以由哪个3PL服务.4PL在不同的分销中心与3PL合作需要支付给3PL一定的合作费用.从制造商到分销中心的运输过程中,3PL将采用直接发运的方式进行运输,3PL的运输能力和单位量运输费用已知.在最后一公里的分销网络模型中,一个3PL的一个车辆可以服务多个用户,每一个潜在的3PL用于服务用户的车辆个数,车辆的单位距离运输费用以及车辆的运输能力是已知的.

决策主要考虑潜在分销中心和3PL的选择,从制造商到分销中心3PL的市场流量分配,从分销中心到用户的3PL路径规划.4PL的决策目标是最小化最后一公里分销网络设计的总费用,包括分销中心和三方物流的固定费用,分销中心的产品存储费用,制造商到分销中心的3PL运输费用,以及分销中心到用户的3PL车辆路径运输费用.

1.2 数学模型

4PL-LRP需要在实现车辆路径规划的基础上同时考虑不同的3PL合作费用和单位距离运输费用,这为建模带来一定的挑战.为了建模和求解的方便,本文假设每个用户都可被任意的3PL服务,且每个用户只能被某个3PL的一辆车服务,即每个用户只能出现在一条3PL的车辆路径上.因为本文是根据文献[13]提出的模型提出的启发式算法,所以模型中涉及的集合、参数和决策变量可参见文献[13].

根据文献[13]给出的变量和参数,本文给出了考虑最后一公里4PL网络设计模型.不同于文献[13]给出的模型,本文的模型为了计算方便没有给出距离的约束,同时本文的模型考虑了3PL和其所在分销中心的关系.

$$\min \sum_{j \in J} f_j X_j + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \beta_{jk} \gamma_{jk} + \sum_{j \in J} g_j \left(\sum_{i \in I} h_i Y_{ij} \right) + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{sjk} W_{sjk} + \sum_{k \in K} \alpha_k \left(\sum_{p=1}^{P_k} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} Z_{ijkp} \right). \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k \in K} \sum_{p=1}^{P_k} \sum_{j \in V} Z_{ijkp} = 1, \forall i \in I; \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} h_i \left(\sum_{j \in V} Z_{jikp} \right) \leq \sigma_k, \quad \forall k \in K, \forall p = 1, 2, \dots, P_k; \quad (3)$$

$$W_{sjk} \leq Q_{sjk} \gamma_{jk}, \forall s \in S, k \in K, j \in J; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{j \in \bar{M}} \sum_{p=1}^{P_k} \sum_{k \in K} Z_{ijkp} \geq 1, \quad \forall \text{ subsets } M \subset V \text{ such that } J \subseteq M; \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} Z_{ijkp} - \sum_{j \in V} Z_{jikp} = 0, \quad \forall i \in V, \forall k \in K, \forall p = 1, 2, \dots, P_k; \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} Z_{jikp} \leq 1, \forall k \in K, \forall p = 1, 2, \dots, P_k; \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} W_{sjk} - \sum_{i \in I} h_i Y_{ij} = 0, \forall j \in J; \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} W_{sjk} - t_j X_j \leq 0, \forall j \in J; \quad (9)$$

$$\sum_{m \in V} Z_{imkp} + \sum_{h \in V} Z_{jhkp} - Y_{ij} \leq 1, \quad \forall j \in J, \forall i \in I, \forall k \in K, \forall p = 1, 2, \dots, P_k; \quad (10)$$

$$Z_{ijkp} \leq \gamma_{jk}, \forall i \in I, \forall j \in J,$$

$$\forall k \in K, \forall p = 1, 2, \dots, P_k; \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} \gamma_{jk} \leq X_j, \forall j \in J; \quad (12)$$

$$X_j \in \{0, 1\}, \forall j \in J; \quad (13)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J; \quad (14)$$

$$Z_{ijkp} \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \forall p = 1, 2, \dots, P_k; \quad (15)$$

$$\gamma_{jk} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, \forall k \in K; \quad (16)$$

$$W_{sjk} \geq 0, \forall s \in S, \forall j \in J, \forall k \in K. \quad (17)$$

目标函数(1)最小化总的费用,包括分销中心的固定费用,3PL在分销中心的固定费用,分销中心的存储费用,制造商到分销中心的3PL运输费用和分销中心到用户的3PL车辆运输费用.约束(2)确保每个用户都要被服务,且只能被某个3PL的一辆车服务.约束(3)是3PL车辆的能力限制约束.约束(4)确保从某个制造商到某个分销中心运输的量不超过选中3PL的运输能力.约束(5)确保3PL的车辆路径上必须包含一个分销中心.约束(6)是点守恒约束.约束(7)是3PL的车辆路径上仅有一个被选中的分销中心.约束(8)是流守恒约束.约束(9)是分销中心的能力约束.约束(10)确保3PL的车辆路径包含用户*i*(*i* ∈ *I*),并且也包含分销中心*j*(*j* ∈ *J*),那么用户*i*(*i* ∈ *I*)必须被分销中心*j*(*j* ∈ *J*)服务.约束(11)确保如果3PL的车辆用于从某个分销中心*j*(*j* ∈ *J*)服务用户*i*(*i* ∈ *I*),则分销中心*j*(*j* ∈ *J*)的这个3PL必须被选择.约束(12)确保当分销中心的3PL被选择后,分销中心也需要同时被选择.约束(13)~约束(16)表示二值的决策变量.约束(17)是决策变量的非负限制.

LRP本身是NP难问题,4PL-LRP在LRP的基础上还要完成3PL的分配,路径规划以及选择,其算法的设计就更加具有挑战性,本文根据提出的问题模型设计了启发式算法,完成了实际规模问题的求解.

2 算法设计

本文根据4PL-LRP的定义将问题划分为两个子问题设计二阶段启发式算法,子问题的分解如下.

阶段1: 3PL车辆路径问题;

阶段2: 4PL选址-分配问题.

二阶段启发式算法在解决两个子问题的同时考虑子问题之间的内在关系,通过对两个子问题的迭代求解,使得两个子问题之间的内在联系在算法中得以体现.在3PL车辆路径子问题中,因其主要求的是3PL的路径,所以根据Hansen等^[12]在求解选址路径问题中对子问题车辆路径问题的求解假设,本文也假设

潜在3PL车辆求解问题中分销中心的固定费用和存储费用以及3PL的固定费用忽略不计,其求出的3PL路径解可以为原问题的路径解提供一个下界.这些被忽略不计的费用将在4PL选址-分配子问题中进行考虑.不同于LRP分解的车辆路径问题,3PL具有不同的单位距离运输费用,在路径设计时不能只简单考虑距离,同时当3PL没有被选择时,3PL也不可以用于路径规划.在4PL选址-分配子问题中,将获得的车辆路径上用户点的集合作为一个需求点应用到4PL选址-分配问题中,不同于简单的选址分配问题,4PL选择-分配问题需要考虑3PL的固定费用.4PL选址-分配子问题选择的分销中心和3PL作为3PL车辆路径分配问题的输入条件,重新寻找3PL车辆路径的集合,如此循环直到4PL选址-分配子问题的最优值不再减少.

在本节首先根据子问题的描述,给出两个子问题的数学模型;然后通过广义节约方法设计3PL车辆路径,在解4PL选址-分配问题时采用CPLEX进行求解;最后给出求解4PL-LRP的启发式算法.

2.1 3PL车辆路径问题和4PL选址-分配问题

根据3PL车辆路径问题描述建立线性规划模型,模型中涉及的集合,参数和决策变量同4PL-LRP模型中的一样,建立的3PL车辆路径问题模型为

$$\min \sum_{k \in K} \alpha_k \left(\sum_{p=1}^{P_k} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} Z_{ijkp} \right). \quad (18)$$

s.t. 式(2), (3), (5) ~ (7), (15).

模型的约束条件为4PL-LRP的部分约束条件,目标函数是使得3PL的车辆路径费用最小化.从模型可以看出4PL-LRP的可行解中3PL车辆路径的解是3PL车辆路径分配问题的可行解,同时3PL车辆路径问题最优解为4PL-LRP解中的3PL路径费用提供了下界.因此3PL车辆路径问题可以为4PL-LRP提供路径的初始解.

根据4PL选址-分配问题描述建立线性规划模型,模型中涉及的集合、参数和决策变量除了4PL-LRP定义的以外,作如下增加:集合 R 为路径集合.参数 d_r 为路径 $r(r \in R)$ 上支线距离(用户间的距离), D_{jr} 为从分销中心 $j(j \in J)$ 到路径 $r(r \in R)$ 的干线距离(分销中心到路径的第1个节点和最后1个节点的距离和), H_r 为路径 $r(r \in R)$ 的总需求.决策变量

$$y_{rjk} = \begin{cases} 1, & \text{如果路径 } r(r \in R) \text{ 被潜在的分销中心} \\ & j(j \in J) \text{ 通过 } 3\text{PL } k(k \in K) \text{ 服务;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

根据上述变量和参数,建立4PL选址-分配模型

$$\min \sum_{j \in J} f_j X_j + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \beta_{jk} \gamma_{jk} + \sum_{j \in J} g_j \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} W_{sjk} \right) + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{sjk} W_{sjk} + \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \alpha_k y_{rjk} (d_r + D_{jr}). \quad (19)$$

s.t. 式(4), (9), (12), (13), (16), (17);

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} y_{rjk} = 1, \quad \forall r \in R; \quad (20)$$

$$H_r y_{rjk} \leq \sigma_k, \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall r \in R; \quad (21)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} W_{sjk} - \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} y_{rjk} H_r = 0, \quad \forall j \in J; \quad (22)$$

$$y_{rjk} \leq \gamma_{jk}, \quad \forall r \in R, \forall j \in J, \forall k \in K; \quad (23)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in J} y_{rjk} \leq P_k, \quad \forall k \in K; \quad (24)$$

$$y_{rjk} \in \{0, 1\}, \quad \forall r \in R, \forall j \in J, \forall k \in K. \quad (25)$$

目标函数(19)为最小化总费用,包括分销中心的固定费用,3PL在分销中心的固定费用,分销中心的存储费用,制造商到分销中心的运输费用和分销中心到路径的3PL车辆运输费用.约束(20)确保每条路径都要被服务,且只能被一个3PL服务.约束(21)是3PL车辆的能力限制约束.约束(22)是流守恒约束.约束(23)确保如果路径 $r(r \in R)$ 被分销中心 $j(j \in J)$ 通过3PL $k(k \in K)$ 服务,那么分销中心 $j(j \in J)$ 的3PL $k(k \in K)$ 必须被选择.约束(24)确保被选中的3PL所服务的路径个数不能超过其拥有的车辆个数.约束(25)表示二值的决策变量.

定理1 如果4PL-LRP模型可行解中用户的路径是预先确定的,则4PL-LRP模型和4PL选址-分配问题模型是等价的.换言之,如果4PL-LRP模型支线距离的解给定,则4PL-LRP的最优解可以从4PL选址-分配模型的最优解中得到.

证明 证明两个模型等价,需要证明两个模型的目标函数是等价的,在4PL-LRP可行解中得到的路径被某个分销中心某个3PL服务的解是4PL选址-分配问题的可行解,反之亦然.

证明两个模型目标函数等价,需要证明两个模型中3PL的车辆路径运输费用 $\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \alpha_k y_{rjk} (d_r + D_{jr})$ 和 $\sum_{k \in K} \alpha_k \left(\sum_{p=1}^{P_k} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} Z_{ijkp} \right)$ 是等价的.假设

4PL-LRP中用户的路径是预先确定的,因此决策变量 Z_{ijkp} 中的车辆 p 可以代表一条具体的路径,4PL-LRP 中的路径决策变量 Z_{ijkp} 可以被划分为4个子集,即

$$\begin{aligned} Z^1 &= \{Z_{ijkp} | i \in I, j \in I, k \in K, 1 \leq p \leq P_k\}, \\ Z^2 &= \{Z_{ijkp} | i \in I, j \in J, k \in K, 1 \leq p \leq P_k\}, \\ Z^3 &= \{Z_{ijkp} | i \in J, j \in I, k \in K, 1 \leq p \leq P_k\}, \\ Z^4 &= \{Z_{ijkp} | i \in J, j \in J, k \in K, 1 \leq p \leq P_k\}. \end{aligned}$$

4PL-LRP的3PL车辆路径运输费用可写成

$$\begin{aligned} &\sum_{Z_{ijkp} \in Z^1} \alpha_k d_{ij} Z_{ijkp} + \sum_{Z_{ijkp} \in Z^2} \alpha_k d_{ij} Z_{ijkp} + \\ &\sum_{Z_{ijkp} \in Z^3} \alpha_k d_{ij} Z_{ijkp} + \sum_{Z_{ijkp} \in Z^4} \alpha_k d_{ij} Z_{ijkp}. \end{aligned} \quad (26)$$

由4PL-LRP的约束(5)和(7)可知,3PL的车辆路径上只允许有一个分销中心并且必须有一个分销中心,因此有

$$\sum_{Z_{ijkp} \in Z^4} \alpha_k d_{ij} Z_{ijkp} = 0.$$

路径上和分销中心相连接的点仅仅是用户路径的起点和终点,因此有

$$\begin{aligned} \sum_{Z_{ijkp} \in Z^2} \alpha_k d_{ij} Z_{ijkp} &= \sum_{Z_{f_{pk}j} \in Z^2} \alpha_k d_{f_{pk}j} Z_{f_{pk}j} k p, \\ \sum_{Z_{ijkp} \in Z^3} \alpha_k d_{ij} Z_{ijkp} &= \sum_{Z_{i s_{pk}k} \in Z^3} \alpha_k d_{i s_{pk}} Z_{i s_{pk}k} k p. \end{aligned}$$

其中 f_{pk} 为3PL k 的车辆路径 p 上的终点, s_{pk} 为3PL k 的车辆路径 p 上的起点.又因为假设4PL-LRP中用户的路径已知,所以 $\sum_{Z_{ijkp} \in Z^1} d_{ij} Z_{ijkp}$ 是所有路径的支线距离和.假设每条路径的支线距离是 d_{pk} ,对于已存在的3PL k 的车辆路径 p 有 $\sum_{Z_{ijkp} \in Z^1} d_{ij} Z_{ijkp} = \sum_{k \in K} \sum_{p=1}^{P_k} \rho_{pk} d_{pk}$,其中 $\rho_{pk} = 0$ 或 1 表示3PL k 的车辆路径 p 是否存在.

根据之前对符号集合的定义,式(26)可以被重新写成如下形式:

$$\begin{aligned} &\sum_{k \in K} \sum_{p=1}^{P_k} \alpha_k \rho_{pk} d_{pk} + \sum_{k \in K} \sum_{p=1}^{P_k} \sum_{j \in J} \alpha_k d_{f_{pk}j} Z_{f_{pk}j} k p + \\ &\sum_{k \in K} \sum_{p=1}^{P_k} \sum_{j \in J} \alpha_k d_{j s_{pk}} Z_{j s_{pk}k} p. \end{aligned} \quad (27)$$

根据4PL选址-分配模型中对决策变量 y_{rjk} 的定义,路径 r 对应3PL k 的车辆路径 p ,有

$$\begin{aligned} \rho_{pk} &= \sum_{j \in J} y_{pjk}, \\ Z_{f_{pk}j} k p &= Z_{j s_{pk}k} p = y_{pjk}. \end{aligned}$$

因此式(27)可写成

$$\begin{aligned} &\sum_{k \in K} \sum_{p=1}^{P_k} \sum_{j \in J} \alpha_k y_{pjk} d_{pk} + \\ &\sum_{k \in K} \sum_{p=1}^{P_k} \sum_{j \in J} \alpha_k d_{f_{pk}j} y_{pjk} + \\ &\sum_{k \in K} \sum_{p=1}^{P_k} \sum_{j \in J} \alpha_k d_{j s_{pk}} y_{pjk}. \end{aligned} \quad (28)$$

根据假设,3PL k 的车辆路径 p 即为已知的路径 r ,因此式(28)可写成

$$\begin{aligned} &\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \alpha_k y_{rjk} d_r + \\ &\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \alpha_k (d_{f_{pk}j} + d_{j s_{pk}}) y_{rjk}. \end{aligned} \quad (29)$$

根据干线距离的解释,式(29)和4PL选址-分配模型目标函数中 $\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \alpha_k y_{rjk} (d_r + D_{jr})$ 是等价的.因此,两个模型的目标函数是等价的.

显而易见,当路径已知时,4PL选址-分配模型的可行解对4PL-LRP是可行的,反之亦然. □

定理1说明了二阶段启发式算法的有效性,即对两个子问题分别进行求解,再将各自的解作为输入条件进行迭代,4PL-LRP可以得到相对有效的解.

2.2 3PL车辆路径问题启发式算法

3PL车辆路径问题是车辆路径问题的广义,因此是NP难问题.本节将提出一个启发式算法用于解决3PL车辆路径问题.算法首先设定初始的3PL车辆路径,再对路径进行改进.本文初始路径的产生源于perl提出的广义节约方法(MGSAV)^[14]的改进,MGSAV方法在节约过程中仅仅考虑了距离增加越小越好.然而,本文中不同的3PL运输的单位距离费用是不同的,因此只考虑距离无法真正优化3PL的车辆路径,本文在节约值的设计中加入了3PL运输费用的考虑.假设已经存在一条路径 p_k' ,选择什么样的用户加入到已知路径中,加入到什么位置是本文初始路径产生过程中重点解决的问题.

根据路径费用最小化的目标函数,希望选择加入已知路径的用户满足两个条件:1)此用户重新开辟一条新路径的花费越大越好;2)用户加入到已有路径 p_k' 的分销中心 j' 后增加的费用越小越好.根据这两个条件,给出如下改进的公式:

$$\begin{aligned} \bar{d}_{ij'} \alpha_{k'} &= \min_{j \in J} \min_{k \in K} d_{ij} \alpha_k - (d_{ij'} \alpha_{k'} - \\ &\min_{j \in J} \min_{k \in K} d_{ij} \alpha_k). \end{aligned} \quad (30)$$

其中: i 为需要决策的用户, j' 为已知路径上的分销中

心, k' 为已知路径上的3PL. 式(30)表示选择的3PL大概节约的运输费用, 因此 $\bar{d}_{ij'}\alpha_{k'}$ 的值越大越好.

其次要解决加入到哪两个点之间, 假设 b 和 q 是已知路径 $p_{k'}$ 上相邻的两个点, 用户 i 加入到 b 和 q 所增加的3PL运输费用的公式为

$$3PLGST_{i,k'}(b, q) = d_{bi}\alpha_{k'} + d_{iq}\alpha_{k'} - d_{bq}\alpha_{k'}. \quad (31)$$

式(31)表示加入到 b 和 q 所增加的3PL运输费用, 因此 $GST_{i,k'}(b, q)$ 的值越小越好.

由式(30)和(31)可得出, 在已知路径 $p_{k'}$ 中加入用户后的3PL节约运输费用公式为

$$3PLMGS_{i,k'}(b, q) = \bar{d}_{ij'}\alpha_{k'} - 3PLGST_{i,k'}(b, q). \quad (32)$$

需要决策用户 i 及点 b 和 q , 使得 $3PLMGS_{i,k'}(b, q)$ 的值越大越好. 在决策过程中, 首先对于每一个用户都通过式(31)计算应该插入在哪两个点之间, 再根据式(32)确定选哪个用户.

根据本文给定的改进的广义节约公式, 应用 Perl 提出的初始化路径的方法^[14]对路径进行初始化. 在路径的设计中同时完成了3PL的选择.

在完成了3PL路径的初始化后, 首先对每一条路径进行用户顺序和连接分销中心的调整, 本文采用

lin等^[15]提出的解决经典货郎问题(TSP)的2-optimal算法实现3PL路径的优化和分销中心的再分配. 由于多条路径的存在, 可以通过将路径上的某一用户转移到另一路径上, 或者采用将两条路径上的用户进行互换的方式对多条路径进行同时调整. 具体的调整方法采用文献[13]中的 Single Displacement 和 Exchange 方法, 需要注意的是在调整过程中, 不仅考虑运输距离, 还要考虑3PL的单位距离运输费用. 完成了上述的调整, 即实现了对路径的优化. 3PL车辆路径分配问题启发式算法得到的解作为4PL选址-分配的输入条件实现了4PL选址-分配的求解.

2.3 4PL-LRP启发式算法

由定理1可知, 当路径给定时, 4PL-LRP和4PL选址-分配问题的模型是等价的, 因此当利用3PL车辆路径问题启发式算法求解出相关路径时, 可以通过CPLEX对4PL选址-分配模型进行求解. 3PL车辆路径解出的路径只是为4PL-LRP提供一个下界, 分销中心和3PL的选择也会影响路径的分配; 因此, 在选择出分销中心和3PL后还要返回到3PL车辆路径子问题中, 调整3PL车辆路径子问题中的 J' 和 K'_j 进行求解, 如此循环, 直到总费用不再降低. 具体的算法流程如图2所示.

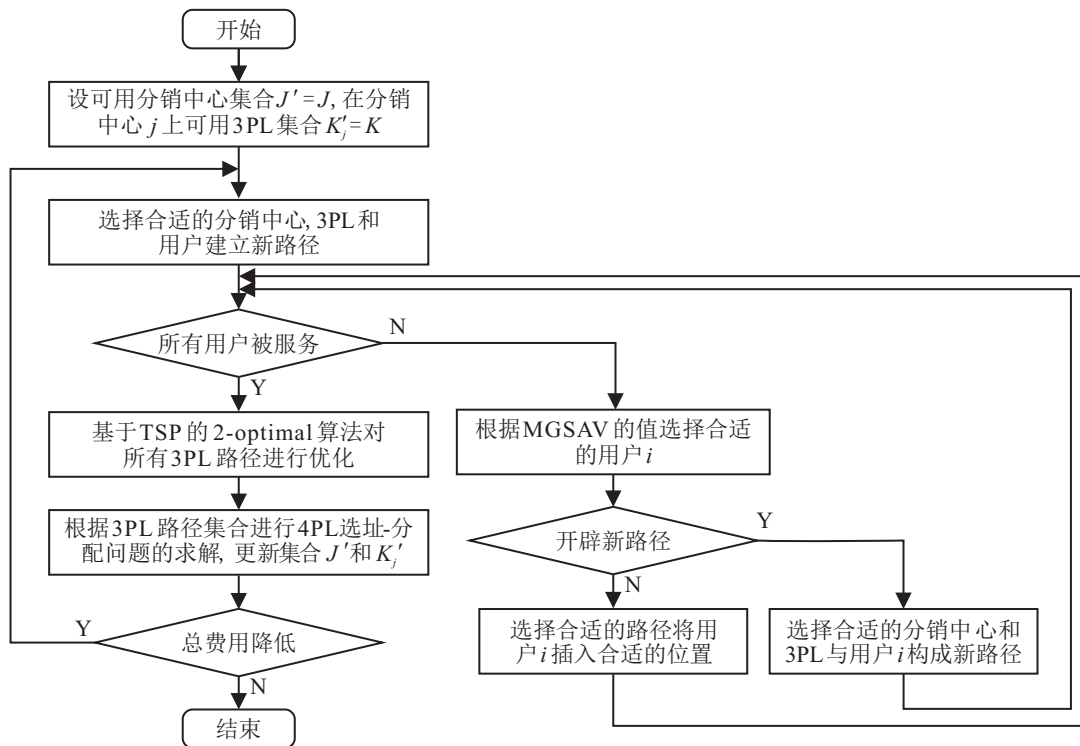


图2 4PL-LRP启发式算法流程

3 数值例子

本节通过与CPLEX解的精确解以及基于PSO智能优化算法的比较, 评估第2节提出的启发式算

法的有效性. 测试的数据集合根据对京东物流的规模调研结果均匀随机产生. 京东物流目前构建的是经典的最后一公里分销网络, 京东在北京地区各区

域的分销中心从2个到25个不等,其最终用户是各个小区的代收站.基于调研结果,本文设潜在分销中心的个数 $U[2, 50]$,其上级制造商的个数 $U[1, 10]$,最终用户的个数 $U[4, 200]$,3PL的个数 $U[2, 8]$.用户的需求服从区间 $U[10, 50]$.3PL在潜在分销中心的固定费用 $U[2000, 5000]$,其在分销中心的车辆个数 $U[5, 15]$,3PL从制造商到分销中心的运输能力 $U[100, 1500]$,其单位量运输费用 $U[5, 10]$,3PL从分销中心到用户的车辆运输能力 $U[100, 500]$,其车辆的单位距离运输费用 $U[5, 20]$.分销中心的固定费用 $U[5000, 10000]$,其最大存储能力 $U[1000, 2000]$,单位量存储费用 $U[10, 50]$.分销中心和用户以及用户和用户的距离 $U[50, 250]$.

本文的模型是线性规划模型,因此可以用优化软件CPLEX求出最优解,但本文模型中约束(5)的个数超过了 $3^{|J|}$,其中 $|J|$ 为分销中心的个数,因此CPLEX无法在有效的时间内求解现实规模的问题.本文设定CPLEX的求解时间为8~10个小时.测试案例被标识为“制造商个数-分销中心个数-用户个数-3PL个数”,例如1-3-8-3表示有1个制造商,3个分销中心,8个用户,在整个网络中有3个3PL,他们可同时分布在各个不同的分销中心.表1给出了随机产生的数值例子通过CPLEX和所提出的启发式算法分别进行求解的比较结果.

表1 启发式和CPLEX比较结果

测试案例	启发式		CPLEX		Gap/%
	目标值	时间/s	目标值	时间/s	
1-2-4-3	18 737	0.05	18 737	1.39	0
1-2-4-5	12 733	0.08	12 733	1.48	0
1-2-5-3	19 032	0.06	19 030	9.00	0
1-2-5-5	20 214	0.06	20 214	15.54	0
1-3-5-4	23 056	0.06	23 056	9.67	0
1-3-5-5	17 400	0.09	17 400	56.94	0
1-3-6-4	22 560	0.09	22 560	478.83	0
1-3-6-5	20 406	0.09	20 406	2 469.51	0
1-4-7-4	26 545	0.16	26 545	1 251.53	0
1-4-7-5	19 164	0.05	19 164	806.13	0
5-10-50-8	63 712	16.35	152 213	28 780	-58.1
8-25-75-8	1 218 262	91.99	-	-	-
8-30-100-8	171 070	102.29	-	-	-
8-40-130-8	227 692	99.97	-	-	-
10-18-57-6	98 226	29.72	600 362	33 186.6	-83.6
10-50-160-7	341 237	154.83	-	-	-
10-50-170-7	253 077	141.96	-	-	-

表1中, $Gap = \frac{\text{启发式目标值} - \text{CPLEX目标值}}{\text{CPLEX目标值}}$.

可以看出,当问题规模不大时,例如供应商的个数为1时,CPLEX可以计算出精确解,启发式算法和CPLEX

解出的精确解一致,其Gap的值为0%,当供应商数大于1时,CPLEX已经不能在有限的时间内给出最优解甚至找不到可行解;当CPLEX能够给出可行解时,本文的启发式算法求得的目标值要远远好于CPLEX给出的可行解的目标值,这说明CPLEX的求解性能已经非常差,其比较不具有的说明性.本文设计了基于PSO智能优化的算法对供应商数大于1的案例进行求解,并与本文提出的启发式算法进行对比,进一步验证算法的有效性.其比较结果见表2.

表2 启发式与PSO比较结果

测试案例	启发式		CPLEX		Gap/%
	目标值	时间/s	目标值	时间/s	
5-10-50-8	63 712	16.35	79 983	10.05	-20.3
8-25-75-8	121 826	91.99	161 922	29.23	-24.8
8-30-100-8	171 070	102.29	178 014	43.7	-3.9
8-40-130-8	227 692	99.97	259 189	64.68	-12.2
10-18-57-6	98 226	29.72	101 997	19.51	-3.7
10-50-160-7	341 237	154.83	420 095	131.51	-18.8
10-50-170-7	253 077	141.96	385 822	107.67	-34.4

表2中, $Gap = \frac{\text{启发式目标值} - \text{PSO目标值}}{\text{PSO目标值}}$.虽然和PSO比较,启发式算法的执行时间差于PSO算法,但其解在可接受的时间范围内均好于智能算法,说明本文提出的启发式算法可以在有效的时间内找到一个高质量的解.

本文根据京东在北京市丰台区大致的分销中心位置,随机生成50个用户点,其距离根据欧几里德度量.对最后一公里分销网络进行设计,给出最后一公里分销中心的选址和3PL路径规划方案,如图6所示.其中DC表示分销中心,根据设计方案,分销中心DC1、DC2、DC5被选择,在这些分销中心中都选中了3PL4为用户服务.

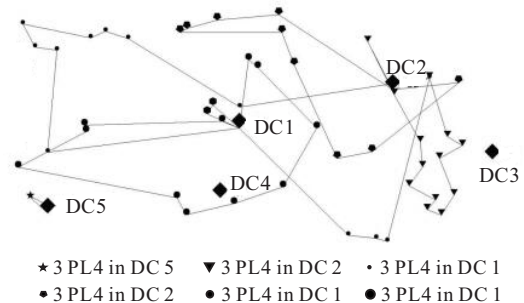


图3 丰台区网络设计方案

4 结论

最后一公里分销网络在各种分销网络的设计方案中具有响应时间快、用户体验好等优势,如何更好地完成集成最后一公里网络的4PL网络设计问题在当今变得越来越重要.4PL-LRP的模型可以很好

地完成网络设计中分销中心的选址和3PL的选择及3PL的车辆路径规划.本文首先根据4PL-LRP的模型特点,将模型分为3PL车辆路径模型和4PL选址-分配模型,并证明模型分解后的求解对原模型求解的有效性,通过顺序地求解两个子模型完成4PL-LRP模型中决策变量的求解.本文通过启发式算法,CPLEX和PSO算法分别对问题进行求解,分析了启发式算法的有效性,并将启发式算法应用到实际规模问题上,说明启发式算法的实用性.本文提出的启发式算法为解决集成最后一公里4PL网络设计问题提供了有效的工具.本文应用4PL-LRP的模型只考虑了确定的情景,而在4PL网络设计中不确定性对网络的设计也会产生重要的影响,在今后的研究中可以考虑需求不确定下4PL最后一公里分销网络设计问题.

参考文献(References)

- [1] Huang M, Ren L, Lee L H, et al. 4PL routing optimization under emergency conditions[J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 89: 126-133.
- [2] Huang M, Tu J, Chao X L, et al. Quality risk in logistics outsourcing: A fourth party logistics perspective[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 276(3): 855-879.
- [3] Gattorna J. Strategic supply chain alignment: best practice in supply chain management[M]. London: Gower Publishing, 1998: 425-445.
- [4] 李锐, 黄敏, 王兴伟. 基于混合概率解发掘算法的第四方物流弹性网络设计[J]. 控制与决策, 2013, 28(10): 1536-1540.
(Li R, Huang M, Wang X W. Resilient network design for fourth-party logistics based on hybrid probability solution discovery algorithm[J]. Control and Decision, 2013, 28(10): 1536-1540.)
- [5] Li J, Liu Y Q, Hu Z J. Routing optimization of fourth party logistics with reliability constraints based on Messy GA[J]. Journal of Industrial Engineering and Management, 2014, 7(5): 1097-1111.
- [6] Rohaninejad M, Sahraeian R, Tavakkoli-Moghaddam R. Multi-echelon supply chain design considering unreliable facilities with facility hardening possibility[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 62: 321-337.
- [7] Chopra S. Designing the distribution network in a supply chain[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2003, 39(2): 123-140.
- [8] Perl J, Daskin M S. A warehouse location-routing problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1985, 19(5): 381-396.
- [9] Xie W J, Ouyang Y F, Wong S C. Reliable location-routing design under probabilistic facility disruptions[J]. Transportation Science, 2016, 50(3): 1128-1138.
- [10] Zheng X J, Yin M X, Zhang Y X. Integrated optimization of location, inventory and routing in supply chain network design[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 121: 1-20.
- [11] Capelle T, Cortés C E, Gendreau M, et al. A column generation approach for location-routing problems with pickup and delivery[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 272(1): 121-131.
- [12] Hansen P H, Hegedahl B, Hjortkjær S, et al. A heuristic solution to the warehouse location-routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 76(1): 111-127.
- [13] Dong L W, Kuang H B, Huang M. Fourth party logistics location-routing problem[C]. 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang, 2018: 1187-1191.
- [14] Perl J. The multi-depot routing allocation problem[J]. American Journal of Mathematical and Management Sciences, 1987, 7(1/2): 7-34.
- [15] Lin S, Kernighan B W. An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem[J]. Operations Research, 1973, 21(2): 498-516.

作者简介

董丽薇(1981—), 女, 讲师, 博士生, 从事供应链管理的研究, E-mail: dlw6611@126.com;

黄敏(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 从事企业物流与供应链管理、现代集成制造系统等研究, E-mail: mhuang@mail.neu.edu.cn;

匡韩斌(1984—), 男, 讲师, 博士, 从事冲突分析方法的理论及其在水资源和环境领域的应用、物流与供应链等研究, E-mail: kuanghanbin@ise.neu.edu.cn;

王兴伟(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 从事下一代互联网、自组织网络等研究, E-mail: wangxingwei@ise.neu.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)