

带软时间窗的两阶段连锁门店配送车辆路径问题研究*

石兆^{1,2}, 符卓¹

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 长沙商贸旅游职业技术学院, 长沙 410000)

摘要: 针对连锁企业配送路径优化决策问题, 利用分解法进行两阶段分析, 建立数学模型, 并引入时间窗约束。应用最小包络聚类分析方法确定供应商与配送中心的最佳位置与数量, 运用禁忌搜索算法求解配送中心到门店的最佳配送路径, 算例测试验证了该方法的有效性与研究的实用价值。

关键词: 连锁门店; 车辆路径问题; 物流网络; 软时间窗; 两阶段; 最小包络法; 禁忌搜索算法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)09-3358-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.041

Research on two-phase chain store distribution vehicle routing problem with soft time windows

SHI Zhao^{1,2}, FU Zhuo¹

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Changsha Trade & Tourism Professional College, Changsha 410000, China)

Abstract: According to chain enterprises distribution routing optimization decision making problem, this paper established a mathematic model of the problem by using the decomposition method for two phase analysis, and introduced a time window constraints. First, the method determined the optimal number and locations of suppliers and distribution centers by using minimum wrap-net method, then used TS to search the optimal routes from distribution centers to stores. The test example shows the validity this method of and practical value.

Key words: chain store; vehicle routing problem; logistics network; soft time windows; two phase; minimum wrap-net method; tabu search algorithm(TS)

连锁门店配送是连锁配送体系的一个重要组成部分,它一般是指在配送中心库存充足的前提下,按门店的订货要求,在配送中心进行分货、配货,并将配好的货物及时送交收货人;当配送中心库存不足以满足门店要求时,经供应商即时补货,然后实现配送的活动。随着人们消费水平的不断提高,以连锁为重要特征的商业门店的规模也在不断壮大。对于连锁门店来说,因为商品价格差别较小,物流成本始终是企业成本竞争的焦点,而配送环节更是整个物流环节的关键所在。因此,配送路径合理与否将直接影响连锁企业的成本、效率与竞争能力。

商业连锁企业配送作业流程一般可分为标准型、通过型、直送型。通过型是指供应商将事先已经指定门店的商品送至配送中心,配送中心对商品验收后不经储存而与发往该门店的其他商品混合配装后直接出库,配送至门店。本文研究主要依据通过型商品配送作业流程,针对门店缺货同时配送中心库存不足即时通知供应商补货配送的情况进行分析。

由于通过型商品配送关系到商品从供应商经过配送中心到最终门店的整个流程,涉及两阶段三层次物流网络(供应商、配送中心、门店)设施选址、物流路径、库存及运输量的确定、配送时间限制等多决策项目,其目的是在满足门店需求的基础上,使网络系统成本(含设施费用)与运输配送费用最小化,以实现物流网络整体优化。因此,采用传统数理手段解决此类问题变得异常复杂和困难。

目前,多数研究者采用分解法,即把问题分为若干个子问

题后再进行研究。Melkote 等人^[1]对选址与网络同时优化问题进行了研究;Amiri^[2]提出应将运输配送路径同时进行优化,以此解决供应链运输与配送网络优化问题;Clarisse^[3]运用空间分解提出了多设施生产与配送问题的解决办法;Syam^[4]提出了将成本进行分类同时优化的方法;Gena 等人^[5]认为应将生产、配送与库存问题组合起来进行同时优化;Kutanoglu 和 Cordeau 等人^[6,7]对单源供应物流网络进行了优化;Wang 等人^[8]对包含三种运输路径的四级物流网络优化问题进行了研究;Lee 等人^[9]对多工厂、多仓库、多配送中心的动态产品分销网络进行了探讨;陈松岩、马甜甜、陈静等人^[10-12]对三级物流网络进行了建模优化。

以上学者提出的方法多是将问题分为若干个子问题,然后针对子问题分别进行探讨,各子问题是相互独立的。本文研究方法也是将一个复杂的问题分成两个子问题,但是子问题间是衔接而非独立关系,即第二个子问题最优解是建立在第一个子问题最优解基础之上。同时,本研究涉及到软时间窗的问题^[13-20],重在配送中心缺货且门店有配送时间约束的情况下如何安排供应商根据门店时间要求即时补货的两阶段整体优化问题进行探讨。本问题属于 MSDLRP(选址与路径优化问题)范畴,问题具有较强的应用价值。

1 问题描述及模型的建立

本文研究主要考虑在同一个城市有若干个供应商,每个供

收稿日期: 2012-02-25; 修回日期: 2012-03-30 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70671108)

作者简介: 石兆(1972-),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为物流系统优化等(191941954@qq.com);符卓(1960-),男,教授,博导,主要研究方向为交通运输规划与管理、物流系统优化。

应商有若干台配送车辆,每次使用一辆车即可满足某配送中心对某特定商品的即时送货需求,同时有多个配送中心。门店缺货需求信息需首先通过配送中心进行处理然后向供应商发出送货指令,门店配送有时间要求,要求为每辆车确定行驶路线,使得在满足装载量和行驶距离限制的条件下,以最小的车辆数、最低的行驶成本与最少时间窗偏离处理完规定的配送业务。

1.1 模型基本假设

a) 多个门店、多个配送中心、多个供应商分别分散在同一个城市的各个不同地区;b) 配送中心运营费用固定;c) 多个供应商可以为任意配送中心供货,多个配送中心可以为任意门店配送,配送中心库存容量能够满足补货最大通过量需求;d) 所有门店商品都由配送中心供给,门店之间不存在商品调剂的情况;e) 车辆非满载,门店的货物需求量均小于车辆的载容量,一辆车可以完成多个门店需求配送任务;f) 配送中心对门店采取整车配送的策略,即每个门店只由一辆配送车辆送货且所有缺货门店都得到服务;g) 配送车辆车型相同,且每一条线路上的送货任务只由一辆车承担;h) 合计车辆到达门店的时间有所偏离门店服务时间段,但要根据所带来的不方便程度支付一定的惩罚;i) 各连锁门店的需求量确定并在一定的时间内相对稳定;j) 配送中心库存不足时即时通过供应商送货,供应商直接将商品发往配送中心;k) 连锁门店定期通过且只能通过配送中心补货,各连锁门店的补货周期相同;l) 配送车辆单位运价相同,不考虑路程中所发生的突发情况等一些不确定因素,如需求变化、交通路况限制、天气变化等。

1.2 模型的建立

分两阶段建立模型,即利用启发式算法中的分解法对问题进行配送中心选择与配送路径优化两阶段分析,首先选择配送中心,然后对配送路径进行优化。

第一阶段 模型中的参数定义如下: G 表示供货商的集合; D 表示配送中心的集合; C 表示门店的集合; K 表示配送车辆的总数; g 表示某供应商, $g \in G$, i 表示某配送中心, $i \in D$, j 表示某门店, $j \in C$; k 表示某配送车辆, $k \in K$; l_{gi} 表示供应商与配送中心集合内任意两节点间的距离(用距离表示费用); M_{ij} 表示配送中心与门店集合内任意两节点间的距离(用距离表示费用); e_i 表示供应商 g 发往配送中心 i 的商品运量; d_i 表示配送中心发往门店的其他混装商品运量; n_j 表示门店 j 的需求量; q 表示车辆的容量; P_i 表示配送中心 i 的固定费用。建立模型如下:

$$\min Z_1 = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^D l_{gi} + \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^C M_{ij} + \sum_{i=1}^D P_i W_i \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^D e_i + \sum_{i=1}^D d_i = \sum_{j=1}^C n_j \quad (2)$$

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

$$x_{gik} e_i + d_i \leq q \quad g \in \{1, 2, \dots, G\}, \quad i \in \{1, 2, \dots, D\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (3)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 从供应商 } g \text{ 行驶到配送中心 } i \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

式(1)为优化目标,即商品从供应商,经配送中心配送到门店产生的费用最小化;式(2)确保配送中心将供应商补货完全用于门店配送,不会存留或用于同城调剂;式(3)为受车辆载重量的限制,确保每辆车载运的供应商发往配送中心的商品与配送中心发往门店的其他商品混装后配送量不超过其载重量。

第二阶段 模型中的参数定义如下: t_i 表示车辆 k 到达门店 i 的时间; N 表示配送中心及门店的总数量, $N = D + C$; c_{ij} 表

示门店 i 到门店 j 之间的距离(用距离表示费用); n_i 表示门店 i 的需求量; H 表示配送中心已有库存; a_i 表示门店最早能服务的时间; b_i 表示门店最晚能服务的时间; f_1 表示早于 a_i 到达门店 i 并开始服务的惩罚系数; f_2 表示晚于 b_i 到达门店 i 并开始服务的惩罚系数。建立模型如下:

$$\min Z_2 = K \quad (4)$$

$$\min Z_3 = \sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N c_{ijk} x_{ijk} + f_1 \sum_{i=1}^N \max(a_i - t_i, 0) + f_2 \sum_{i=1}^N \max(t_i - b_i, 0) \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^N x_{ijk} = \sum_{j=1}^N x_{jik} \leq 1 \quad i=0, k \in \{1, \dots, K\} \quad (6)$$

$$\sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^K x_{jik} = 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K x_{jik} = 1 \quad j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^N n_i x_{ijk} \leq q \quad k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (9)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 从客户 } i \text{ 行驶到客户 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

式(4)为第一优化目标,即最小化车辆数;式(5)为第二优化目标,即行驶的总距离最小,每条线路违反时间窗的惩罚总成本最小;式(6)确保车辆从配送中心出发并回到中心;式(7)(8)确保各门店只被同一车辆服务一次且最多一次;式(9)为受车辆载重量的限制,确保每辆车的配送量不超过其载重量。

本数学模型运用数理规划软件进行求解,并利用 MATLAB 语言编写程序后设置数据运行,可求出被选中的供应商、配送中心的数量及位置以及问题的最优路径。

2 算例分析

本算例以长沙市某知名连锁餐饮机构为背景,候选供应商三个、配送中心三个、连锁门店六个,布局如图1所示。其中菱形、正方形、圆圈分别代表供应商、配送中心、连锁门店;供应商与配送中心及门店的距离矩阵如表1和2所示,配送中心固定费用如表3所示。

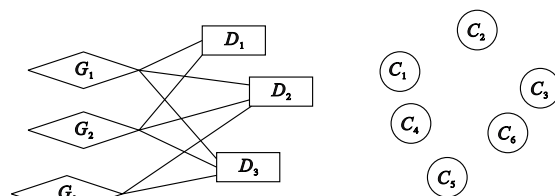


图1 供应商、候选配送中心、连锁门店布局

表1 供应商到配送中心及门店的距离矩阵 /km

	D_1	D_2	D_3	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
G_1	6	9	9	4	8.5	11.9	10	9	9.3
G_2	8	13	4	13	12	12.8	10	9.6	12.5
G_3	7	12	4	11	12.5	12	9	8.6	11

2.1 选择配送中心

首先应用最小包络聚类分析方法将门店集划分成若干子类,具体操作如下:

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

$$R_{ij} = d_{ij}/2 \quad (10)$$

门店的数量为 C , d_{ip} 为任意一个配送中心 D_i 到任意门店 p 的距离。

表 2 配送中心及门店间的距离矩阵 /km

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
D_1	6.5	7.5	10	7.5	7.5	7.5
D_2	10	10	10	7.5	7.5	10
D_3	8	7.6	9	7	8	7.5
C_1	0	4	5	7.5	11	10
C_2	4	0	5	9	9	15
C_3	5	5	0	7	9	7.5
C_4	7.5	9	7	0	7	10
C_5	11	9	9	7	0	10
C_6	10	15	7.5	10	10	0

表 3 配送中心固定费用 /元/t

配送中心	D_1	D_2	D_3
固定费用	32	87	60

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

$$r_{ip} = d_{ip}/2 \quad (11)$$

对应的门店位置 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

a) 如果满足

$$r_{ip} < R_{ij} \quad (12)$$

则将门店 C_p 聚为配送中心 D_i 类; 否则, 先不列入此类。

b) 如果存在某一门店 C_p 到任意配送中心 D_i 的距离 $r_{ip} = d_{ip}/2$ 大于最大的两个设施距离和的一半, 即

$$r_{ip} > \max R_{ij} \quad (13)$$

则根据就近原则, 以某一门店 C_p 到任意配送中心 D_i 的距离 d_{ip} 的最小值为准,

$$D_i = \begin{cases} 1 & \text{选择 } D_i, d_{ip} = \min(d_{1p}, d_{2p}, \dots, d_{ip}), i \in \{1, 2, \dots, D\} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (14)$$

将 C_p 列入 D_i 类 (C_p 由配送中心 D_i 提供服务)。

c) 在 O_i 类中有门店 $C_1, C_2, \dots, C_l, C_m$, 令

$$\omega = ((\sum_{i=1}^l n_i/q) / \lfloor \sum_{i=1}^l n_i/q \rfloor) - 1 \quad (15)$$

其中: $\sum_{i=1}^l n_i/q$ 表示计划由配送中心 D_i 提供服务的门店总需求量与单车容量的比值; $\lfloor \sum_{i=1}^l n_i/q \rfloor$ 表示不超过 $\sum_{i=1}^l n_i/q$ 的最大整数; ω 表示偏离度, 偏离度大表示车辆利用率高, 若两配送中心聚类门店相同, 则取偏离度较大的配送中心完成配送任务。当 $\sum_{i=1}^l n_i/q$ 非常接近或等于整数时, 则门店 C_m 转移到其最近配送中心内并由此配送中心为其提供服务。

运用数理规划软件结合模型编程, 将表中的数据输入模型, 在不到 1 s 时间内求出结果。所选的配送中心是配送中心 1 和 2。根据选出的配送中心对供应商进行选择, 选出供应商 1、配送中心 1 和 2。

2.2 模型的建立

运用 MATLAB 编程并采用改进禁忌搜索算法求解, 其基本过程如下:

```

随机产生一初始可行解, 并置该解为当前解和当前最好解;
置 iter 和 cons_iter 为 0;
while( iter ≤ max_iter) and ( cons_iter ≤ max_cons_iter) do
begin
while( cand_list ≤ max_cand_list) do
begin
随机挑选两个顶点及四种邻域变换之一;

```

对当前解作变换, 并把所产生的新解加入到候选解集中;

cand_list = cand_list + 1;

end;

从候选解集中选择非禁忌的最佳候选解, 或优于当前最好解的禁忌候选解作为最佳候选解; 置新的最佳候选解为当前解。

若新的最佳候选解优于当前最好解, 则更新当前最好解,

cons_iter = 0; 否则 cons_iter = cons_iter + 1;

iter = iter + 1;

end.

其中: iter 为当前的迭代步数; max_iter 为最大的迭代步数; cons_iter 表示当前最好解保持不变的当前连续迭代步数; max_cons_iter 表示当前最好解保持不变的最大连续迭代步数; cand_list 是当前的候选解数量; max_cand_list 是最大的候选解数量。

该算法具有如下特点:

a) 采用随机混合邻域结构。由四种基于 2-交换的随机混合邻域结构, 即利用轮盘赌方法, 在 n 维向量 $(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 中随机选择两个或多个顶点重新指派、顶点交换、2-opt 和“尾巴”交换, 在迭代过程中每次都随机的方式选择其中一种应用于当前解。

b) 采用自适应调节技术在求解过程中对不可行解也进行试探。

c) 引入随机多样性增强算法的搜索能力, 随机选用上述邻域变换中的一种, 禁忌长度也随机地在 5 ~ 10 之间选取。

d) 采用当总迭代次数达到一给定值, 或在给定的连续迭代步数内当前的最好解没有改变时, 则算法终止的准则。

e) 采用

$$\sum_{r=1}^k [T(r) + fET(r) + pE(r)] \quad (16)$$

对解进行评价。

其中: K 表示该解中所使用的车辆数 (线路数); $T(r)$ 表示车辆 r 的行驶费用; $ET(r)$ 表示在线路 r 上早于或晚于时间窗卸下的部分; f 是惩罚系数 (取系数和为 100, 代表每偏离一个单位时间相当于增加了 100 单位的距离); $E(r)$ 为在线路 r 上超出车辆载重量的部分, p 是惩罚系数。若一个解是可行的, 则所有线路上的 $E(r)$ 都等于零。

在不到 1 s 时间内求出使用两台车即可完成配送任务, 目标函数最小费用为 426 元, 行驶总距离为 82.5 km, 寻优过程如图 2 和 3 所示。第一条路径 ($G_1-D_2-C_5-C_4-D_2-G_1$) 如图 4 所示, 第二条路径 ($G_1-D_1-C_6-C_3-C_2-C_1-D_1-G_1$) 如图 5 所示。

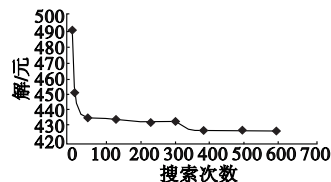


图2 目标费用寻优过程

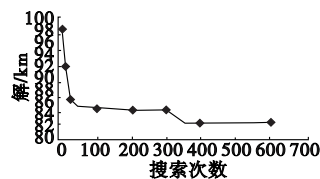


图3 行驶总距离寻优过程

3 结束语

本文在分析连锁企业门店配送特点的基础上, 建立了门店配送数学模型, 构造了合理的目标函数, 并利用分解法进行两

阶段分析,结合数理规划软件,运用最小包络聚类分析方法与禁忌搜索算法对带时间窗约束的路径问题进行求解,通过算例测试用较短时间获得问题的满意解,在实际应用中具有一定的参考价值。通过本算例以及其他文献还可以确定,中间层设施选址是同类型物流网络整体优化问题的关键所在。但本文所建模型未考虑库存与供应商的成本问题,对涉及门店退货及回收物资的逆向物流问题也未进行探讨,还有待继续深入研究。

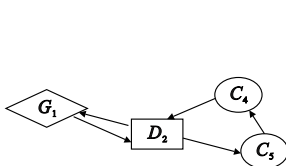


图4 第一条配送路径

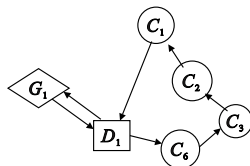


图5 第二条配送路径

参考文献:

- [1] MELKOTE S, DASKIN M S. An integrated model of facility location and transportation network design [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001, 35(6): 515-538.
- [2] AMIRI A. Designing a distribution network in a supply chain system [J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 171(2): 567-576.
- [3] CLARISSE D F. Spatial decomposition for a multi-facility production and distribution problem [J]. *International Journal of Production Economics*, 2000, 64(1~3): 177-186.
- [4] SYAM S S. A model and methodologies for the location problem with logistical components [J]. *Computers and Operations Research*, 2002, 29(9): 1173-1193.
- [5] GENA M, SYARIF A. Hybrid genetic algorithm for multi-time period production/distribution planning [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2005, 48(4): 799-809.
- [6] KUTANOGLU E, LOHIYA D. Integrated inventory and transportation mode selection: a service parts logistics system [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2008, 44(5): 665-683.
- [7] CORDEAU J F, LAPORTE G, PASIN F. An iterated local search heuristic for the logistics network design problem with single assignment [J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 113(2): 626-640.
- [8] WANG Zhuan, ZHANG Qing-hua, YANG bo, et al. 4/R/I/T distribution logistics network 0-1 programming model and application [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 55(2): 365-378.
- [9] LEE B K, KANG K H, LEE Y H. Decomposition heuristic to minimize total cost in a multi-level supply chain network [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 54(4): 945-959.
- [10] 陈松岩, 今井昭夫. 物流网络选址与路径优化问题的模型与启发式解法 [J]. *交通运输工程学报*, 2006, 6(3): 118-121.
- [11] 马甜甜, 丁凯凯. 物流网络优化问题的研究——以山东省为例 [J]. *技术与方法*, 2010(21): 99-101.
- [12] 陈静. 物流网络路径优化模型的探究技术与方法 [J]. *技术与方法*, 2010(16): 83-85.
- [13] 符卓. 带装载能力约束的开放式车辆路径问题及其禁忌搜索算法研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(3): 123-128.
- [14] 段凤华, 符卓. 有软时间窗约束带取送作业的车辆路径问题及其禁忌搜索算法研究 [J]. *计算机工程与科学*, 2009, 31(3): 68-70.
- [15] 赵建有, 吴利清, 刘大学. 带时间窗车辆路径问题的启发式遗传算法 [J]. *交通运输工程学报*, 2008, 8(1): 113-117.
- [16] 魏航. 时变随机网络下有时间窗的有害物品运输路径选择研究 [J]. *中国管理科学*, 2009, 17(3): 93-100.
- [17] 王万良, 黄海鹏, 赵燕伟, 等. 基于车辆共享的软时间窗动态需求车辆路径问题 [J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(5): 1056-1063.
- [18] 杨进, 马良. 蜂群优化算法在带软时间窗的车辆路径问题中的应用 [J]. *预测*, 2010, 29(6): 67-70.
- [19] 孙国华. 带软时间窗的开放式满载车辆路径问题研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(17): 13-17.
- [20] 张健, 张力鑫. 带软时间窗车辆路径问题及禁忌搜索算法 [J]. *交通科技与经济*, 2010, 12(6): 44-46.