

考虑时间窗因素的物流配送车辆调度优化

初良勇¹, 孟 聪¹, 阮志毅²

(1. 集美大学现代物流研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 厦门雅迅网络股份有限公司研发部, 福建 厦门 361008)

[摘要] 根据物流配送中车辆调度的实际, 综合考虑配送中心装货的时间和用户的时间窗, 建立了物流配送车辆调度优化的数学模型, 并根据模型特点, 设计了基于模拟退火算法的求解方案, 通过实例验证该数学模型和算法的实用性和有效性。

[关键词] 物流配送; 车辆调度; 模拟退火算法; 时间窗

[中图分类号] U 691

Research on the Optimization Model and Algorithm of Logistics Distribution Vehicle Scheduling Considering the Time Window

CHU Liangyong¹, Meng Cong¹, RUAN Zhiyi²

(1. Modern Logistics Institution, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. R&D Department, Xiamen Yaxon Network Co., Ltd., Xiamen 361008, China)

Abstract: Based on the actual situation of vehicle dispatching in logistics distribution, the paper establishes a mathematical model for the optimization of vehicle scheduling problem considering the loading time and the user's time window. Based on the characteristics of the model, solution schemes is designed based on simulated annealing algorithm, and the practicality and validity of the mathematical model and algorithm are verified by an example.

Keywords: logistics distribution; vehicle scheduling; simulated annealing algorithm; time window

0 引言

随着市场经济的不断发展, 物流作为“第三利润源”对企业各项经济活动的影响和作用日益凸显。在物流研究领域, 配送和车辆的调度问题一直是研究的热点, 车辆调度是一个涉及多个目标、多个约束条件的复杂组合优化问题, 配送线路的规划是否合理对配送时间、配送成本以及整个配送服务的质量影响很大。物流配送车辆的调度问题是指在满足一定的约束条件下, 为了使整个调度过程实现某些特定目标的最优化, 通过安排适当的配送车辆和组织合适的行驶路线, 使配送车辆有序的对该系统中的客户实现送货服务^[1]。这里的约束条件有货物的需求量、交发货时间、行驶里程、车辆的载质量约束、时间限制及路径的约束等, 所达到的目标有总成本最少、总行驶里程最短、总使用车辆最少、准时送达等。国内外学者对车辆调度问题进行了大量研究。Gendreau、Ichou 等^[2-3]采用禁忌搜

[收稿日期] 2017-05-26

[修回日期] 2017-07-17

[基金项目] 福建省自然科学基金(2017J01796); 福建省自然科学基金(2017J01797); 福建省中青年教育科研项目(JA15288)

[作者简介] 初良勇(1973—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事交通运输系统规划, 现代物流与供应链管理方向的研究, E-mail: chuliangyong@163.com。

索算法分别对有新增配送需求和运输时间改变的 车辆调度问题进行了求解; Szeto 等^[4] 利用人工蜂群算法对有载质量限制的物流配送车辆的优化调度问题做了大规模的研究; 李大卫、王景恒等^[5-6] 采用启发式算法对有时间窗的车辆调度问题进行了求解; 蔡延光、刘浩等^[7-8] 应用并行禁忌搜索算法和模拟退火算法对车辆调度问题进行了求解; 张涛等^[9] 采用禁忌搜索算法和遗传算法的混合策略对车辆调度进行了求解。

在上述的研究中, 比较少考虑配送车辆在物流配送中心的装货时间和实际配送中道路的状况, 由于这两个因素对于最终用户服务的时间窗有重要影响, 本文将综合考虑装货时间和配送中道路运输状况, 建立相应的优化模型, 并进行算法设计。

1 物流配送车辆调度优化模型的建立

1.1 问题的描述

物流配送车辆调度问题可以这样描述: 在某个物流系统中, 有配送中心, 有若干车辆和用户, 需要在满足某些特定的约束下, 安排合理数量的车辆、合理的发车时间以及合理的行车线路, 使用户的货物需求能被满足, 而在这个过程中要根据不同的要求达到一定的目标最优。

可以用数学语言将车辆调度问题描述为: 在某个地区, 有 M 个配送中心, 各自拥有 L 种不同车型的 车辆, 负责对该地区的 N 个用户进行送货服务。配送中心 m 拥有车型 l 的车辆数为 K_{ml} ($m = \{1, 2, \dots, M\}, l = \{1, 2, \dots, L\}$); 用户 i 的需求量为 q_i ; 用户编号为 $1, 2, \dots, N$; 配送中心编号为 $N + 1, N + 2, \dots, N + M$ 。

在某一时间, 用户的需求产生, 配送中心如何根据目前拥有的资源进行配送服务, 使总的耗费成本最小。

1.2 模型的建立

1.2.1 模型的假设

现实中, 配送车辆的调度问题十分复杂, 为了方便建模和求解, 需对现实问题进行抽象和简化。具体界定如下:

- 1) 从多个配送中心向多个用户站点配送货物, 配送中心和用户的位置一定, 且任意两点之间的距离用直线距离代替;
- 2) 在配送中心, 车辆从车场到仓库装货之前的距离不作考虑;
- 3) 仓库中的货物量总是可以满足用户的需求;
- 4) 每台配送车辆的最大载质量一定, 不允许超载;
- 5) 在一次任务中, 每个用户的货物不允许分批配送, 且只能被一辆车服务;
- 6) 每台配送车辆均从配送中心出发, 完成任务后返回配送中心。

1.2.2 目标函数及约束条件

1) 参数设定 f —目标函数值, 即总成本, 这里折合成公里数表示; P_E —车辆早于用户时间窗的最早时间到达时的惩罚系数; P_L —车辆晚于用户时间窗的最晚时间到达时的惩罚系数; g_{mlk} —配送中心 m , 车型为 l 的车辆 k 的固定成本; q_{mlk} —配送中心 m , 车型为 l 的车辆 k 的载质量限制; ET_i —用户 i 期望服务的开始时间; LT_i —用户 i 期望服务的结束时间; S_i —用户 i 的实际服务的开始时间; $t_s(i)$ —用户 i 的服务过程时间; $t_0(k)$ —车辆 k 的初始出行时间, 即装货开始时间; $t_Z(k)$ —车辆 k 装货完成时间; v_k —车辆 k 的行驶速度; $q(k)$ —车辆 k 的实际装货量; d_{ij} —用户 i 到用户 j 的行驶距离; θ_{ij} —用户 i 到用户 j 的路况系数; t_{ij} —用户 i 到用户 j 的行驶时间; μ —车辆的装货速度 (默认所有车辆装货速度相同)。

2) 目标函数的建立以车辆的总运行成本最小为目标, 其运行成本用折合后的车辆里程来表示, 其目标函数为:

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_{ml}} \left(\sum_{i=1}^{N+M} \sum_{j=1}^{N+M} d_{ij} x_{mlkij} + g_{mlk} \right) + P_E \sum_{i=1}^N \max(ET_i - S_i, 0) + \\ & P_L \sum_{i=1}^N \max(S_i - LT_i, 0), l \in \{1, 2, \dots, L\}. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x_{mlkij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$, 表示车辆的运行路径, 当车辆从用户 i 运行到用户 j , 即为 1, 否则为 0; P_E 、 P_L 为罚金。

本文重点考虑装货时间影响下的时间窗因素, 该模型将车辆在配送中心的装货时间考虑在内, 故作如下设定:

I. 车辆在配送中心装货时, 设定仓库仅能为一辆车进行装货服务, 若车辆 k_2 到达装货仓库时, 前一辆车 k_1 还未装货结束, 则车辆 k_2 需等待, 其装货结束时间为:

$$t_z(k_1) = t_0(k_1) + q(k_1)/\mu, \quad (2)$$

$$t_z(k_2) = \max\{t_z(k_1), t_0(k_2)\} + a(k_2)/\mu. \quad (3)$$

II. 假设车辆 k 从配送中心 m 出发, 服务的用户为 i, j , 且出行的顺序为 $i \rightarrow j$, 则到达用户的时间为:

$$S_i = t_z(k) + t_{mi}; \quad (4)$$

$$S_j = S_i + t_s(i) + t_{ij}. \quad (5)$$

3) 约束条件

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{K_{ml}} x_{mlkij} \leq \sum_{l=1}^L K_{ml}, i = m \in \{N+1, N+2, \dots, N+M\}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{mlkij} = \sum_{j=1}^N x_{mlkij} \leq 1, i = m \in \{N+1, N+2, \dots, N+M\}, k \in \{1, 2, \dots, K_{ml}\}; \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{N+M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_{ml}} x_{mlkij} = 1, i \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{N+M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_{ml}} x_{mlkij} = 1, j \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N q_i \sum_{j=1}^{N+M} x_{mlkij} \leq q_{mlk}, m \in \{N+1, N+2, \dots, N+M\}, k \in \{1, 2, \dots, K_{ml}\}; \quad (10)$$

$$\sum_{j=N+1}^{N+M} x_{mlkij} = \sum_{j=N+1}^{N+M} x_{mlkij} = 0, i = m \in \{N+1, \dots, N+M\}, k \in \{1, 2, \dots, K_{ml}\}; \quad (11)$$

$$t_{ij} = \theta_{ij} d_{ij} / v_k. \quad (12)$$

其中: 式 (6) 表示某配送中心派出的车辆数不能超过配送中心拥有的车辆总数; 式 (7) 表示车辆均从各自的配送中心出发, 并回到原来的配送中心; 式 (8) 和式 (9) 表示确保每个用户只能被一辆车服务一次; 式 (10) 表示车辆服务用户的需求量之和不超过车辆的载质量限制; 式 (11) 表示车辆不能从配送中心到配送中心; 式 (12) 表示车辆的运行时间与路况系数之间的关系。

2 求解算法的设计

模拟退火算法可以通过温度的变化进行解的重复迭代过程, 从而克服对初始值的依赖性, 避免问题陷入局部最优的困境, 因此, 本文的车辆调度模型选用模拟退火算法求解。

2.1 相关参数和规则设置

1) 温度设定 在本模型相应的模拟退火算法中, 对于温度的设定, 根据具体的问题和主观经验确定初始温度和终止温度。温度的下降方法采用指数温度更新函数: $T_{k+1} = \alpha T_k$, 其中, α 是介于 0 ~ 1 之间的一个常数。

2) 解的表现形式 将需要配送的用户以及配送中心的车辆进行编号, 形成一个矩阵, 矩阵第一行表示用户的配送顺序, 第二行表示对应的服务车辆的编号, 即矩阵的每一列表示用户和对应的服务车辆。例如:

$$\begin{bmatrix} 7 & 4 & 2 & 3 & 9 & 5 & 1 & 8 & 6 \\ 3 & 2 & 3 & 4 & 2 & 4 & 3 & 2 & 4 \end{bmatrix}$$

表示用户 7 由 3 号车进行配送, 用户 4 由 2 号车配送, 且 3 号车的服务用户及顺序为: 7 - 2 - 1; 2 号车服务的用户及服务顺序为: 4 - 9 - 8; 4 号车服务的用户及服务顺序为: 3 - 5 - 6。

3) 初始解的产生 利用蒙特卡洛模拟, 随机产生一个用户的初始解, 即解的矩阵的第一行, 根据“需求量最大的用户先分配, 且分配的是可载质量最大的车辆”的分配原则, 产生对应的服务车辆的初始解, 即矩阵第二行, 这样就得到了一个初始解的矩阵, 并使其能够满足车辆的载质量限制要求。该初始解通过蒙特卡洛模拟 100 次的循环, 使得后面的模拟退火算法过程能够尽快找到最优解。

4) 邻域的产生 在车辆调度模型中, 设定邻域的产生是用户的任意两个位置进行交换, 或者车辆的任意两个位置进行交换, 从而得到新的邻域, 且用户与车辆产生邻域的概率相等, 均为 0.5。

5) 内循环的步长 内循环的次数一般设定成一个常数, 在每一温度下, 内循环的迭代次数相同。由于车辆调度模型规模较大, 解的寻优范围广, 因此本文设定算法在每次的循环中可以记录过程的最优解, 根据需要来进行第二轮降温, 通过此轮全局寻优过程, 更加保证了解的有效性。

2.2 算法的步骤

1) 首先设置初始温度、终止温度和降温系数, 通过 100 次的蒙特卡洛模拟, 获得一个随机排列, 生产初始解。

2) 通过设定的规则产生邻域解, 得到一个新解, 计算新解的目标函数值, 并判断初始解的目标函数值的大小, 若小于初始解的目标函数值, 则接受新解, 否则计算 $\Delta f/T_0$ 是否会大于 (0,1) 之间的随机数, 若大于该随机数, 则接受新解, 否则进行降温, 并进行下一次的迭代。

3) 每降温一次实现设定次数的内循环, 直到温度降到终止温度, 算法终止, 输出最优解以及目标函数值。

3 算例分析

某物流企业在某地区有两个配送中心, 位置分别为 I (20,20), II (45,75), 为该城区及周边城镇的 10 个门店用户进行货物配送。各配送中心拥有的车辆编号、载质量、固定成本以及初始出发时间见表 1。

各车辆在各配送中心的装货时间由其总的装货量和装货速度决定, 设定每辆车的装货速度均为 600 kg/min, 各用户的货物需求量、服务时间、服务时间窗见表 2。

仓库的货物充足, 且不分车型, 设定每辆车在市内的正常行驶速度为 50 km/h, 该速度随具体交通情况变化而变化, 不同的交通状况 (路况系数) 对应不同车速, 各个路段的路况系数见表 3。

本文设定不满足时间窗时, 罚金 $P_E = 20(\text{km/h}) \cdot t_E$, $P_L = 25(\text{km/h}) \cdot t_L$ (t_E 为早到时间, t_L 为晚到时间)。要求组织适当的行车路线, 使总成本最小。

在本模型相应的模拟退火算法中, 对于温度的设定, 根据具体的问题和主观经验确定温度, 通过多次试验, 设置初始温度为 $T_0 = 103$, 终止温度为 $T_f = 1$, $\alpha = 0.9998$ 。本文中, 由于初始解是在满足车辆的载质量限制的前提下产生的, 即得到的初始解均为可行解, 每一次产生的领域解也为可行解, 大大降低了搜索的难度, 为了使模拟退火过程效率更高, 故内循环的次数设定为 10 次。

表 1 配送中心的各车辆数据表
Tab. 1 Data sheets of each vehicle in distribution center

配送中心位置 Distribution center location	车辆编号 Vehicle number	载质量 Load capacity/t	固定成本 Fixed costs/元	初始出发时间 Initial departure time
I (20,20)	1	3	10	0
	2	3	10	0.3
	3	5	20	0.1
	4	5	20	0
	5	6	25	0.2
I (45,75)	6	3	10	0.2
	7	3	10	0.1
	8	5	20	0
	9	6	25	0.2

表 2 各用户数据表
Tab. 2 Data tables for each user

用户 User	位置 Location coordinates	需求 Demand/t	服务时间 Servie time/h	时间窗 Time window
1	(55,88)	2.0	0.5	[0.5,2]
2	(31,39)	1.5	0.3	[1,2]
3	(76,20)	1.0	0.2	[2,5]
4	(98,65)	1.5	0.3	[0.5,2]
5	(23,95)	2.5	0.6	[1,3]
6	(9,50)	1.8	0.4	[2,4]
7	(65,33)	2.5	0.6	[3,5]
8	(75,79)	0.8	0.2	[1,2.5]
9	(35,55)	1.2	0.3	[1.5,3]
10	(30,78)	1.0	0.2	[2,4]

表 3 配送中心到用户以及用户之间路段的路况系数表
Tab. 3 Road condition coefficient table between the distribution center to the user and the user to other user

编号 Number	I	II	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	0	—	1.3	1.1	1.2	1.1	1.5	1.3	0.9	1.2	0.8	1.3
II	—	0	1.7	1.2	0.8	1.3	0.9	1.1	1.2	1.1	1.2	1.4
1	1.3	1.7	0	1.1	1.3	1.1	1.1	1.5	0.8	1.2	1.4	1.1
2	1.1	1.2	1.1	0	1.2	0.8	1.3	1.1	1.5	1.1	1.3	1.2
3	1.2	0.8	1.3	1.2	0	1.1	1.3	1.1	1.0	0.6	1.6	1.1
4	1.1	1.3	1.1	0.8	1.1	0	1.1	1.3	1.2	1.0	1.2	1.3
5	1.5	0.9	1.1	1.3	1.3	1.1	0	1.2	1.1	1.3	1.2	1.4
6	1.3	1.1	1.5	1.1	1.1	1.3	1.2	0	1.1	1.2	0.9	1.1
7	0.9	1.2	0.8	1.5	1.0	1.2	1.1	1.1	0	1.3	1.1	1.2
8	1.2	1.1	1.2	1.1	0.6	1.0	1.3	1.2	1.3	0	1.1	1.3
9	0.8	1.2	1.4	1.3	1.6	1.2	1.2	0.9	1.1	1.1	0	1.2
10	1.3	1.4	1.1	1.2	1.1	1.3	1.4	1.1	1.2	1.3	1.2	0

根据本文设计的模拟退火算法，将该算例的相关数据通过 Matlab 软件进行编程，最终运行实现，经过 270.762 795 s 的时间降温，得到了最优的调度方案如下：

配送中心 I：3 号车，路径为：I → 2 → 7 → 3 → I；

配送中心 II：6 号车，路径为 II → 9 → 6 → II；

7 号车, 路径为: $\text{II} \rightarrow 10 \rightarrow 5 \rightarrow \text{II}$;
8 号车, 路径为: $\text{II} \rightarrow 1 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow \text{II}$ 。

结果显示, 本算例共使用 4 辆车, 总的成本 $f = 482.300 \text{ 1 km}$ 。降温过程大概持续 270 s, 之后, 解逐渐趋于稳定, 并稳定在一个相对较优的水平上。

4 结论

本文通过对车辆调度问题的分析, 建立了车辆调度问题的数学模型, 该模型在前人研究的基础上, 考虑了车辆在配送中心装货的时间和实际行驶中道路状况, 使建立的模型更符合配送实际情况。利用模拟退火算法进行求解, 在算法中将退火过程中产生的最好解记录下来, 最终输出整个过程中的最好解, 防止该算法陷入局部最优的困境。配送过程中涉及的环节众多, 本文设计的模型和算法基于一定的理想情况且有一定的局限性, 下一阶段的研究重点应该更多考虑适合配送过程的实际情况, 以及如何克服算法的局限性等, 如:

- 1) 考虑用户需求的货物种类, 且当仓库中某种货物储存不足时, 需要向上游配送中心或生产企业进行补货的情况;
- 2) 考虑本配送中心的车辆除了可以从该配送中心出发进行货物配装外, 当该配送中心某些货物储存不足时, 也可去其他配送中心补充装货, 使其更符合车辆调度的实际;
- 3) 由于模拟退火过程仅考虑单一状态, 大大限制了解的收敛速度, 具有一定的局限性。下一阶段可以尝试实现多种算法进行求解, 如遗传算法、混沌萤火虫算法等, 对比分析每种算法的优势及其局限性, 从而找到一种更加适合的算法来求解, 亦可考虑与其他算法的融合, 如模拟退火和遗传算法融合成的遗传退火算法, 来克服单一算法本身的缺陷。

[参 考 文 献]

[1] DANTZIG G, RAMESER J. The trunk dispatching problem [J]. Management Science, 1959(6): 80-91.
[2] GENDREAU M, TAILARD E. Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching [J]. Transportation Science, 1999, 3(4): 381-390.
[3] SOUMIA ICHOUA, MICHEL GENDREAU, JEAN-YVES POTVIN. Vehicle dispatching with time-dependent travel times [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 114: 379-396.
[4] SZETO W Y, WU Y Z, HO S C. An artificial bee colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 215(1): 126-135.
[5] 李大卫, 王莉莉. 求解带有时间窗口约束的车辆路径问题的启发式算法 [J]. 系统工程, 1998, 4(3): 20-24.
[6] 王景恒. 物流配送关键技术优化方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.
[7] 蔡延光, 钱积新, 孙优贤. 多重运输调度问题的模拟退火算法 [J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(10): 11-15.
[8] 刘浩, 袁健, 卢厚清. 两种类型车辆随机需求路由问题 [J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 34-38.
[9] 张涛, 张明杰, 王梦光. 不确定车辆数的车辆路径问题模型和混合算法 [J]. 系统工程理论方法应用, 2002, 11(2): 121-130.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)