

文章编号 :1002-0268 (2006) 07-0147-03

一种有时窗约束的非满载车辆调度问题中的启发式算法研究

李作秋 , 王国林

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 设计了一种求解有时窗约束的非满载车辆调度问题的启发式算法, 它将路网中各点首先分组, 而后又在局部使用了修正后的 C-W 节约算法进行路线的安排, 最后给出一具体实例来展示此算法的原理及解题过程。通过实例可以看出, 此种算法简明、易于理解、可操作性强, 能够很好地解决有时限非满载的车辆调度问题。

关键词: 车辆调度; 时间窗; 非满载; C-W 节约算法

中图分类号: U492.3

文献标识码: A

Study on a Heuristic Arithmetic for Vehicle Scheduling Problem of Non-full Loads with Time Windows

LI Zuo-qiu , WANG Guo-lin

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Jinagsa Zhenjiang 212013, China)

Abstract : In this article, the authors design a heuristic arithmetic for non-fully loaded vehicle dispatchment with time window restraint. Firstly, it groups those points which are in the route, then make use of the Clark-Wright saving arithmetic to arrange the route. At last, it gives a practical example to show the theory and the procedure of this arithmetic. It is shown that this arithmetic is a concise, comprehensible and easy operate. It can resolve the non-fully loaded vehicle dispatchment problem with time window to restraint.

Key words : vehicle dispatchment ; time window ; non-fully loaded ; Clark-Wright saving arithmetic

0 引言

从 1959 年由 Dantzig 和 Ramser 首次提出车辆调度问题 (Vehicle Scheduling Problem, VSP) 后, 几十年来, 物流配送车辆调度问题^[2]一直是一个研究热点, 尤其是近几年来在电子商务浪潮的推动下, 物流在社会中的地位也越来越重要。而作为物流系统优化的关键一环——物流配送车辆优化调度, 也因是电子商务活动不可缺少的内容而备受瞩目。据文献 [1] 所述: 自 1995 年来, 对于旅行商问题 (Traveling Salesman Problem, TSP) 就有超过 1 300

篇文章, 车辆路线安排问题 (Vehicle Routing Problem, VRP) 有 500 多篇文章。

现代化配送中心所进行的集货、送货作业, 最大的特点就是多品种、小批量、多批次, 所以多为非满载运输问题^[3]。该问题可描述为: 某配送中心的车辆容量为 q , 现有 m 项货物运输任务需要完成, 以 $1, \dots, m$ 表示, 已知任务 i 的货运量为 g_i , 且 $g_i < q$, 求满足货运需求的费用最小的运输路线。

本文采用先将路网中各点按其地理位置以车场为坐标原点建立坐标系。以原点为中心逆 (顺) 时针进行扫描, 将路网中各点以货车的容量为约束进

收稿日期: 2005-03-22

作者简介: 李作秋 (1980-), 女, 吉林长春人, 硕士, 研究方向为物流配送车辆优化调度。 (lizuoqiuxye@163.com)

行分组,每一组再应用C-W节约算法寻求最优线路,进而来实现车辆的优化调度。

1 时间窗VSP问题描述及模型建立

1.1 问题的描述

设 T_i 为任务 i 装(卸)货所需时间, ET_i 为任务 i 的允许最早开始时间, LT_i 为任务 i 的允许最迟开始时间,即任务 i 的开始时间需在一定的时间范围 $[ET_i, LT_i]$ 内。如果车辆到达 i 的时间早于 ET_i ,则车辆须在 i 处等待,如果车辆到达时间晚于 LT_i ,任务 i 要延迟进行。求满足货运要求的费用最少的车辆行驶线路。称此问题为有时间窗的车辆优化调度问题。

以 s_i 表示车辆到达 i 点的时间, t_{ij} 表示车辆由点 i 行驶到点 j 的时间,一般应满足以下关系式

$$s_0=0 \quad ET_i \leq s_i \leq LT_i$$

式中, $s_0=0$ 表示从车场出发,若每项任务必须在要求的时间范围内完成,即必须满足上式,否则得到的解为不可行解,称之为硬时间窗VSP;若某项任务不能在要求的时间范围内完成,则给予一定的惩罚,称之为软时间窗VSP。

1.2 模型建立^[4,6-8]

为构造数学模型方便,将车场编号为0;任务编号为 $1, \dots, l$,以点 i ($i=0, 1, \dots, l$) 来表示。定义如下变量

$$y_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{点 } i \text{ 的任务由车辆 } k \text{ 完成} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

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

则可得到车辆优化调度数学模型如下

$$\min z = \sum_i \sum_j \sum_k c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\sum_i g_i y_{ki} \leq q \quad \forall k \quad (2)$$

$$\sum_k y_{ki} = 1 \quad i=0, 1, \dots, l \quad (3)$$

$$\sum_i x_{ijk} = y_{kj} \quad j=0, 1, \dots, l; \quad \forall k \quad (4)$$

$$\sum_j x_{ijk} = y_{ki} \quad i=0, 1, \dots, l; \quad \forall k \quad (5)$$

$$X=(x_{ijk}) \in S \quad (6)$$

$$x_{ijk}=0 \text{ 或 } 1 \quad i, j=0, 1, \dots, l; \quad \forall k \quad (7)$$

$$y_{ki}=0 \text{ 或 } 1 \quad i=0, 1, \dots, l; \quad \forall k \quad (8)$$

式中, c_{ij} 表示从点 i 到 j 的运输成本,它的含义可以是距离、费用、时间等,具体根据实际情况来确定;

g_i 表示任务 i 的货运量; q 为车辆容量。式(1)为目标函数;式(2)表示容量约束;式(3)表示任务 i 只能由1辆车来完成;式(4)、(5)表示任意车辆 k 只能经过 i, j 两点连线一次;式(6)为支路消去约束,能避免与车场出现相分离的线路;式(7)、(8)为变量取值约束。

2 算法原理与步骤

如前所述,我们首先将路网中各点的地理位置以车场为原点建立平面直角坐标系(点的坐标可以通过电子地图或其他途径获取),然后进行扫描,将各点按容量约束进行分组,在组中应用修正了的C-W算法进行求解。

2.1 算法原理

应用于旅行商线路安排上的C-W节约算法,没有考虑时间的约束,而在实际物流配送中,任务的时间特征要求要给予考虑。经过修正的C-W节约算法,在连接点对时,考虑时间约束,是一种解决带有时间窗VSP的有效启发式算法。

当不考虑时间约束时,其算法与旅行商问题中的C-W算法^[9]相类似。首先计算各点对之间的节约值 $S(i, j)=c_{i0}+c_{0j}-c_{ij}$ 。若考虑各项任务的时间要求,按费用节约值 $S(i, j)$ 连接点 i 和 j 时,可能会使 j 后面任务的执行不满足时间要求。这里以 EF_j 表示连接 i, j 两点所在线路后,车辆到达 j 点的时间比原线路上车辆到达 j 点时间的推迟(或提前)量。可如下进行表示

$$EF_j = s_i + T_i + t_{ij} - s_j$$

显然 $EF_j < 0$ 时,车辆到达 j 点任务的时间提前; $EF_j = 0$ 时,到达时间不变; $EF_j > 0$ 时,到达时间推迟。

令 $\Delta_j^- = \min_{r \geq j} \{s_r - ET_r\}$,表示线路上 j 点后面的各项任务均不需要等待的 j 点到达时间的最大允许提前量。 $\Delta_j^+ = \min_{r \geq j} \{LT_r - s_r\}$,表示线路上 j 点后面的任务不违反时间窗约束的 j 点到达时间的最大允许推迟量。

可根据如下原则来判断连接 i, j 后,是否违反时间窗约束:

(1) 当 $EF_j < 0$ 时,若有 $EF_j \leq \Delta_j^-$,车辆在 j 后面的任务处不需要等待,否则要等待。

(2) 当 $EF_j > 0$ 时,若有 $EF_j \geq \Delta_j^+$,则 j 后面的任务不会延迟,否则要延迟进行。

2.2 算法步骤

具体求解步骤如下:

- (1) 计算各点对间的节约值 $S(i, j)$ ，令 $M = \{S(i, j) | S(i, j) > 0\}$ ，并在 M 内从大到小对 $S(i, j)$ 进行排序。
- (2) 若 $M = \varnothing$ ，则停止迭代，否则对第 1 项 $S(i, j)$ ，考察对应的 (i, j) ，若满足下列条件之一，则转下步，否则转入 (5)。
- (a) i, j 两点均不在已构成的线路上；
 - (b) 点 i 或点 j 在已构成的线路上，但不是线路的内点（即不与车场相连）；
 - (c) 点 i 和点 j 位于已构成的不同线路上，均不是内点，且一个是起点，一个是终点。
- (3) 计算 EF_j 。
- (a) 若 $EF_j = 0$ ，则转入 (4)；
 - (b) 若 $EF_j < 0$ ，则计算 Δ_j^- ，当 $EF_j \leq \Delta_j^-$ 时，转入 (4)，否则转入 (5)；
 - (c) 若 $EF_j > 0$ ，则计算 Δ_j^+ ，当 $EF_j \geq \Delta_j^+$ 时，转入 (4)，否则转入 (5)。
- (4) 连接 i, j 两点，计算车辆到达各项任务的新时间，转入 (5)。
- (5) 令 $M = M - S(i, j)$ 转入 (2)。

3 应用实例

某物流配送中心有 8 项送货（或集货）任务，编号为 1, ..., 8，各项任务点的相对于配送中心的地理位置坐标及各项任务的货运量 g_i （单位：t），装（卸）货时间 T_i （单位：h）以及要求每次任务开始执行的时间范围 $[ET_i, LT_i]$ （单位：时刻），由表 1 给出。运货车辆的容量为 8 t，配送中心到各任务点以及各任务点之间的距离（单位：km）由表 2 给出。每辆车的平均行驶速度为 50 km/h，这里我们把各点间的距离作为费用，即 $c_{ij} = d_{ij}$ 。如何安排行驶路线可使总费用最小。

表 1 任务的特征及要求

Tab.1 The character and request of missions

任务 i	1	2	3	4	5	6	7	8
坐标	(-85, 25)	(-80, 60)	(-40, -25)	(-120, -30)	(40, 80)	(80, 100)	(-30, 100)	(-25, 50)
g/t	1.5	4	2.5	3	2	1.5	4.5	3
T/h	1	2.5	3	0.8	1	2	1	3
$[ET_i, LT_i]$	[3, 5.5]	[2, 5]	[5, 8]	[1.5, 4]	[1, 4]	[4, 6]	[1, 2]	[4, 7]

- (1) 将各点分组
- 以配送中心为原点按顺时针方向进行扫描，以车辆容量为约束条件可将网络中的 8 个点分成 3 组，

表 2 点对之间的距离

Tab.2 The distance matrix of nodes

j	i								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	90	100	50	120	90	130	100	60
1	90	0	35	70	65	140	180	90	65
2	100	35	0	90	100	120	165	65	60
3	50	70	90	0	80	130	170	125	75
4	120	65	100	80	0	190	240	160	120
5	90	140	120	130	190	0	45	70	120
6	130	180	165	170	240	45	0	110	120
7	100	90	65	125	160	70	110	0	50
8	60	65	60	75	120	70	120	50	0

- 分别是：点 1、3、4；点 2、8；点 5、6、7。
- (2) 组内安排路线
- 这里以点 5、6、7 的路线安排为例来说明前述算法的应用过程。

- ① 计算点 5、6、7 中各点对间的费用节约值 $S(i, j)$ ，并按从大到小的顺序将其排列，制成表 3。

表 3 点对间的节约值

Tab.3 The savings of nodes

(i, j)	(5, 6)	(7, 5)	(6, 7)
$S(i, j)$	175	120	120

- 这里给出的各个任务点的距离是对称的，因此有 $S(5, 6) = S(6, 5) = d_{50} + d_{06} - d_{56} = 90 + 130 - 45 = 175$
- ② 构造线路，具体过程见表 4。

表 4 点对间的连接过程

$S(i \rightarrow j)$		两点间的位置	$EF_j = s_j + T_j + t_{ij} - s_i$	Δ_j^- 或 Δ_j^+	连接否	$s_k = s_k + EF(k \geq j)$
5→6	非线路点		$EF_6 = s_5 + T_5 + t_{56} - s_6 = 1.8 + 1 + 0.9 - 2.6 = 1.1$	$\Delta_6^+ = LT_6 - s_6 = 6 - 2.6 = 3.4$	5→6	$s_6 = s_6 + EF_6 = 2.6 + 1.1 = 3.7$
7→5	非线路点	外点	$EF_5 = 2 + 1 + 1.4 - 1.8 = 2.6$	$\Delta_5^+ = \min\{LT_5 - s_5, LT_6 - s_6\} = 2.2$	×	
6→7	外点非线路点		$EF_7 = 3.7 + 2 + 2.2 - 2 = 5.9$	$\Delta_7^+ = LT_7 - s_7 = 0$	×	

故求得点 5、6、7 间的线路安排为：0→5→6→0 和 0→7→0。其余两点的线路安排过程与此相类似，这里不做详述。另两组点的线路安排顺序分别是：0→2→8→0 和 0→4→1→3→0。

4 结语

本文采用的分两步进行的算法简明，易于理解，可操作性强。但在算法中存在着某些边缘点难于组合以致于影响寻优率的缺点，这还需要（下转第 153 页）

路密度已达 $0.95 \text{ km}/100 \text{ km}^2$, 已经贯通全美各州, 连接了全国 5 万人以上的所有城市; 日本的高速公路已达 $6\,455 \text{ km}$, 高速公路密度达 $1.7 \text{ km}/100 \text{ km}^2$, 绝大部分城市都有高速公路连接; 在欧洲, 德国的高速公路已达 $11\,515 \text{ km}$, 高速公路密度达 $3.2 \text{ km}/100 \text{ km}^2$, 所有 5 万人以上城市及 90% 的 5 万人以下城市通了高速公路 (指高速公路距市中心在 10 km 以内), 全国各地能在 $20\sim 30 \text{ min}$ 内到达高速公路; 法国的高速公路已达 $11\,500 \text{ km}$, 高速公路密度达 $2.1 \text{ km}/100 \text{ km}^2$ 。而目前我国一些人口和经济总量已达到相当规模的地级城市与省会城市之间以及地级城市之间还不通高速公路。根据国家高速公路网规划, 到本世纪中叶我国基本实现现代化时, 也只能把目前人口在 20 万以上的城市全部连通。

3.2 对我国高速公路发展阶段的判断和认识

我国高速公路建设最初是连接主要城市, 近几年转向大规模跨省贯通, 目前已开始进入网络化的关键阶段。现今建成和在建的高速公路主要是依据“五纵七横”国道主干线规划和各地的高速公路规划, 覆盖能力很有限。在全面建设小康社会、我国经济将保持持续快速发展的新形势下, 国家高速公路网迫切需要加快实施, 尽快成网。作为国家高速公路网的有益和必要补充, 为服务与地区经济社会快速发展的需要, 各地都规划了地方高速公路网, 其总规模大于国家高速公路网。近几年全国每年建成高速公路 $3\,000\sim 4\,000 \text{ km}$, 而且这个趋势还将保持一定的时间。

在借鉴发达国家发展经验的基础上, 相关研究成果表明, 要适应未来 20 年全面建设小康社会和本世纪中叶实现现代化的需要, 我国高速公路网的总规模将超过 10 万 km 。因此, 在今后 $20\sim 30$ 年间高速公路仍将处于大规模集中建设时期, 需要在国家规划的统一指导下, 以支撑国民经济发展为基点,

保持相当的建设步伐, 以支撑国民经济顺利实现新的跨越式发展。

4 结论

(1) 经与美国、日本等发达国家及墨西哥为代表的发展中国家的对比分析, 高速公路的国土分布密度和综合密度均低于国际发达国家, 我国高速建设仍处于初级阶段。

(2) 根据对全国高速公路的交通量调查统计, 我国高速公路年平均日交通量达到国道网年平均日交通量的 1.6 倍多, 高速公路在我国公路网中发挥了主骨架作用。

(3) 高速公路与其它运输方式并存, 虽然有一定程度的竞争, 但互补性远大于竞争性或可替代性, 高速公路已经成为全国综合运输大通道的重要组成部分。

(4) 随着国家高速公路网规划的正式实施, 今后 $20\sim 30$ 年间高速公路仍将处于大规模集中建设时期, 需要在国家规划的统一指导下, 继续加快建设。

参考文献:

- [1] 交通部规划研究院. 国家干线公路交通情况综合分析[R]. 2004.
- [2] 长安大学. 公路主通道运输量统计调查方法[R]. 2005.
- [3] 交通部. 国家高速公路网规划[R]. 2004.
- [4] 交通部综合规划司. 全国交通统计资料[R]. 1995~2004.
- [5] 顾政华, 李旭宏, 等. 区域高速公路网布局结构的连通度研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22 (2).
- [6] 刘振肖, 孙雨耕. 一种扩充网络规模的新方法及其对网络可靠性的影响[J]. 天津大学学报, 2000, 33 (5).
- [7] 马川生, 魏广奇. 公路网功能结构及配置研究——组合归并法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2004, 4 (3).
- [8] 刘小丽, 等. 我国综合运输发展的若干思考[J]. 华东交通大学学报, 1996, 13 (1).
- [9] 张国伍. 论交通运输系统规划、协调与发展[J]. 交通运输系统工程信息, 2005, 5 (1).

(上接第 149 页)

在今后进行不断研究, 以将此法进一步修正, 使之更适用于求解带有时间窗约束的非满载物流配送车辆的调度问题。

参考文献:

- [1] 程世东, 刘小明, 王兆赓. 物流配送车辆调度研究的回顾与展望[J]. 交通运输工程与信息学报, 2004, 2 (3): 93~97.
- [2] 杨弋, 顾幸生. 物流配送车辆优化调度的综述[J]. 东南大学学报, 2002 (9): 105~111.
- [3] 李金苹. 现代物流配送系统的运输优化调度方案[J]. 物流技术,

2002 (5): 11~13.

- [4] 李军, 郭耀煌. 物流配送车辆优化调度理论与方法[M]. 中国物资出版社, 2001.
- [5] 李军. 非对称距离的旅行商问题的构造算法[J]. 运筹与管理, 2000 (1): 1~6.
- [6] 汪爱娇, 柴飞. 车辆路线问题的平行节约启发式算法[J]. 物流技术, 2003 (11): 65~67.
- [7] 霍佳震, 张磊. 有时间窗的集送货一体化车辆路径规划启发式算法研究[J]. 物流技术, 2004 (5): 64~66.
- [8] 张建勇, 郭耀煌, 李军. 一种具有模糊费用系数的 VSP 的修正 C-W 节约算法[J]. 西南交通大学学报, 2004 (3): 281~284.