

# 免费接送机场服务的多目标规划模型及算法<sup>①</sup>

唐加福, 董 纲, 潘震东, 孔 媛

(东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室, 沈阳 110004)

**摘要:** 综合考虑了航空票务公司免费接送机场服务过程中的顾客满意度与成本, 将顾客满意度这一定性因素量化, 并将运输成本分为车次起用的固定费用和车辆运行的运行费用. 由此建立了针对免费接送机场服务中车次分配与调度问题的以最大满意度和最小成本费用为目标的0-1混合整数规划模型. 根据问题和模型的特点, 提出基于C-W节约思想的两阶段启发式算法对该问题进行求解. 最后通过实验仿真和结果分析, 说明了模型的实用性和算法的有效性.

**关键词:** 航空票务公司; 免费接送机场服务; 多目标规划; 启发式算法; 顾客满意

**中图分类号:** TP29   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1007-9807(2008)06-0035-08

## 0 引 言

在当今的社会生活中, 服务行业的竞争日益激烈, 合理的价格是生存的根本, 更为重要的是服务质量, 可以说服务质量是服务型企业发展壮大的最强有力的推动力. 航空票务公司是典型的服务型企业, 主要为航空公司代售机票业务. 面对竞争愈发激烈的航空服务市场, 各航空票务公司也不断推陈出新, 陆续推出各种人性化的服务策略, 不仅代售机票, 还为顾客设计最佳飞行线路, 免费送票上门等增值服务. 近来一些航空票务公司如沈阳的中山航服, 推出免费上门接送顾客到机场的服务项目, 其主要目的是吸引顾客, 提高顾客的满意度. 一般情况下, 航空票务公司与出租车公司合作以租赁出租车的方式来实现免费接旅客送机场服务. 这种情况下, 航空票务公司需要以让利即提高服务成本(增加运输成本)来获得顾客更高的满意度. 这就需要制定合理的车次分配和调度安排, 以尽可能低的运输成本, 来获得尽可能高的顾客满意度. 本文以航空票务公司的运作管理问

题为背景, 提出航空票务公司免费接送旅客服务中的车次分配与调度问题(vehicle allocation and scheduling problem, 简称 VASP)的多目标规划方法.

## 1 车次分配与调度问题(VASP)的多目标规划模型

### 1.1 问题的描述与假设

在实行免费接送顾客到机场服务项目过程中, 高质量服务和低成本费用必将成为决策者追求的主要目标. 航空票务公司每天可以卖出不同航班、不同日期的机票, 本文考虑以计划周期(某天)内出港航班的乘机旅客为对象. 航空票务公司在计划周期根据出港航班旅客的基本信息, 比如: 航班号及顾客的接送位置, 接送时间要求等, 对派出车次的数量, 每个车次的出发时间, 每个车次需要接送哪些顾客以及这些顾客的接送时间、接送顺序做出安排, 以达到高质量服务和低

<sup>①</sup> 收稿日期: 2006-10-09; 修订日期: 2007-03-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70471028; 70601004); 教育部科技研究重点资助项目(104064); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-280); 辽宁省自然科学基金资助项目(20022019).

作者简介: 唐加福(1965—), 男, 湖南东安人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: jftang@mail.neu.edu.cn

成本费用之目的。

航空票务公司免费接送旅客的车次分配与调度问题(VASP)可以归结为带有时间窗的车辆路径与调度问题(vehicle routing and scheduling problem with time windows, 简称VRSPTW)。用 $M$ 表示顾客点的总数, $i$ 和 $j$ 表示顾客点的序号, $n$ 表示车次序号,并且将出发地看作第“0”个顾客点,将机场看作第“ $M+1$ ”个顾客点。针对问题自身的特点特作如下假设:

- 1) 一个车辆从发车地出发接送顾客往返一次机场为一个车次,同时假设车辆的出发地不变,即只有一个出发地;
- 2) 单车型问题,即所有车辆容量相同,且车辆匀速行驶;
- 3) 车辆到达顾客点后无等待时间;
- 4) 将一个顾客点的所有顾客看作一个整体,即不可分割<sup>[1]</sup>,因此同时假设每个顾客点的顾客人数小于车辆承载能力;
- 5) 在同一地理位置却有不同时间要求的顾客看作不同的顾客点。

### 1.2 多目标0-1混合整数规划模型

在一个计划周期内,用 $U$ 表示工作计划的时间范围; $w_i$ 表示顾客点 $i$ 的顾客人数; $d_i$ 表示顾客点 $i$ 的顾客必须到达机场的期限时刻,由航班时间和一定的松弛时间来确定; $e_i, l_i$ 表示顾客点 $i$ 软时间窗<sup>[2]</sup>的下限和上限; $e'_i, l'_i$ 分别表示顾客 $i$ 点硬时间窗<sup>[3]</sup>的下限和上限; $T_{ij}$ 表示车辆从顾客点 $i$ 直接运行到顾客点 $j$ 的最短运输时间; $Q$ 表示车辆的最大运载能力; $N$ 表示航空票务公司可用的最大车次数量。

用 $z_n$ 表示车次 $n$ 是否被使用的0-1变量; $y_{in}$ 表示顾客点 $i$ 是否由车次 $n$ 接送的0-1变量; $x_{ijn}$ 表示顾客点 $i$ 和 $j$ 是否由车次 $n$ 直接接送的0-1变量,即车次 $n$ 在接送顾客点 $i$ 和 $j$ 时中间不经过其它顾客点 $x_{ijn} = 1$ ,若经过其它顾客点 $x_{ijn} = 0$ ;  $t_i$ 表示车辆到达顾客点 $i$ 的时刻; $\delta_n^i$ 表示车次 $n$ 从出发地出发的时刻; $\delta_n^M$ 表示车次 $n$ 到达机场的时刻。

对于服务行业来说,决策者首先关心的就是服务质量。这里将服务质量理解为顾客的满意程度,因此第1个目标即为最大化顾客的满意度。经航空服务公司与顾客点 $i$ 的顾客协商并确定接送时间后,每个出港顾客点 $i$ 的顾客对接送时间会

有一个预期的范围 $[e_i, l_i]$ (软时间窗),如果车辆在此范围内到达接送顾客,顾客将会非常满意,那么此时的满意度即为100%。如果车辆到达顾客点的时间太早或太晚对于顾客来说都是不可接受的,所以对于顾客点 $i$ 的顾客来说车辆到达的时间不能超过时间范围 $[e'_i, l'_i]$ (硬时间窗),显然 $[e_i, l_i] \subseteq [e'_i, l'_i]$ 。这里用一个分段线性函数 $S(\cdot)$ 来将满意度量化,称其为满意度函数,描述如下

$$S(i) = \begin{cases} 1 & t_i \in [e_i, l_i] \\ \frac{e'_i - t_i}{e'_i - e_i} & t_i \in [e'_i, e_i] \\ \frac{l'_i - t_i}{l'_i - l_i} & t_i \in [l_i, l'_i] \\ 0 & t_i \notin [e'_i, l'_i] \end{cases} \quad (1)$$

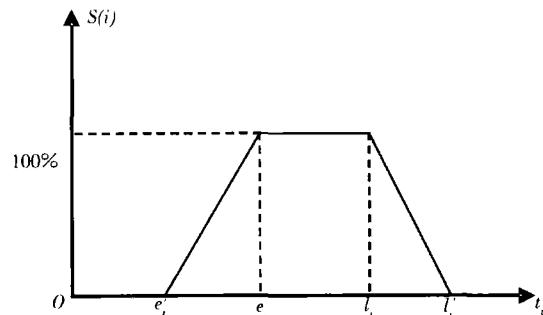


图1 顾客对接送时间的满意度函数

Fig. 1 Customer satisfaction degree function of service time

因此,总体满意度可表示为  $\max \sum_{i=1}^M S(i)$ 。

运输成本由固定的车辆起用成本和可变的运行成本两部分组成。每派出一个车次都需要固定成本,由于该问题为单车型问题,所以设每个车次的固定起用成本均为 $g$ ,那么所有起用车辆的总固定成本等于 $g$ 乘起用的总车次数。因为 $g$ 为常数,所以求最小总固定成本可以转化为求最少车次数  $\min \sum_{n=1}^N z_n$ 。

另一部分是车辆在运行过程中的运行成本,这里将运行成本看成是距离的正比例函数,设每单位距离的费用为 $c$ ,则总运行成本等于 $c$ 乘总运行距离。由于该问题中假设车辆的速度为匀速,且 $c$ 为一个常数,所以求总运行成本最小转化为求总的运输时间最少,即可表示

$$\text{为 } \min \sum_{n=1}^N \sum_{i=0}^M \sum_{j=i+1}^{M+1} T_{ij} x_{ijn}.$$

因此,在综合考虑了顾客满意度与运输成本的情况下,航空票务公司的免费接送机场服务可以描述为多目标车次分配与调度问题(multi-objective vehicle allocation and scheduling problem, 简称 MO-VASP)

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^M S(i) \\ & \min \sum_{n=1}^N z_n \\ & \min \sum_{n=1}^N \sum_{i=0}^M \sum_{j=i+1}^{M+1} T_{ij} x_{ijn} \\ & (d_i - \delta_n^a) y_{in} \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, M; \\ & \quad \quad \quad n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

$$e_i' \leq t_i \leq l_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^M w_i y_{in} \leq Q \quad \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$(\delta_n^s - t_i) y_{in} \leq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, M; \\ n = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$(\delta_n^a - t_i) y_{in} \leq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, M; \\ n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

如果  $x_{ijn} = 1$ , 则

$$\begin{aligned} & |t_j - t_i| = T_{ij} \\ & \quad \quad \quad \forall i, j = 0, 1, 2, \dots, M, M+1; \\ & \quad \quad \quad n = 1, 2, \dots, N; i \neq j \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^N y_{in} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{M+1} x_{ijn} = 2 \quad \forall i = 1, 2, \dots, M; \\ & \quad \quad \quad n = 1, 2, \dots, N; i \neq j \end{aligned} \quad (9)$$

$$x_{ijn} \leq y_{in} \leq z_n \quad (10)$$

$$x_{ijn} \leq y_{jn} \leq z_n \quad (11)$$

$$0 < \delta_n^s, t_i, \delta_n^a < U \quad (12)$$

$$x_{ijn}, y_{in}, z_n \in \{0, 1\} \quad (13)$$

式(2)保证每个顾客点的顾客都能按时到达机场,式(3)保证硬时间窗约束,式(4)为车载能力约束,式(5)和(6)保证接送每个顾客点的时间是在车辆的出发和到达时间之间,式(7)表示如果顾客点  $i$  和  $j$  被同一辆车直接接送,保证接送时间差准确,式(8)表示每个顾客点的顾客只由一辆车接送,式(9)表示车辆路径问题中出度与入度的约束,式(10)和(11)表示 0-1 变量之间的逻辑关系,式(12)保证所有计划时间安排在工

作计划的时间范围内.

## 2 基于 C-W 节约算法的两阶段启发式算法求解 MO-VASP

多目标规划可以用来处理具有多个互相冲突目标的问题,通过求解可以得到问题的非劣解集.一般得到非劣解集的方法有:加权法、 $\epsilon$  约束法、菲利浦线性多目标方法、席勒尼线性多目标方法<sup>[4]</sup>. 但有时得到的非劣解并不能满足实际应用中的要求,而且在应用以上方法的时候经常需要确定一些参数.对于决策者来说,有些参数是难以确定的,并且 VRSPW 为 NP 难问题<sup>[5]</sup>. 所以本文采用启发式方法,它可以快速、有效地帮助决策者做出合理的安排.服务质量是决策者在做安排时首先关心的问题,并且在通常情况下每个车次的启用费用要远高于其运输费用<sup>[6]</sup>. 根据以上特点,本文设计了基于 C-W 节约思想的两阶段启发式算法.第 1 阶段的基本思想是在同时考虑满意度和运输成本的情况下,以最大化满意度为优先考虑的目标,求得初始解.第 2 阶段启发式算法在第 1 阶段的基础上考虑车辆起用的固定成本费用,对初始解进行改进.

### 2.1 第 1 阶段启发式算法

C-W 节约算法是 Clarke 和 Wright 提出的启发式算法<sup>[7]</sup>. 以该思想为基础的改进 C-W 节约算法已被国内外学者广泛应用在 VRP 相关问题中<sup>[8-10]</sup>. 本文提出的第 1 阶段启发式算法借鉴了 C-W 节约算法的思想.但是与以往不同的是,本文考虑的问题中,车辆的“始点”(出发地)与“终点”(机场),并不是同一地点,如图 2 所示.

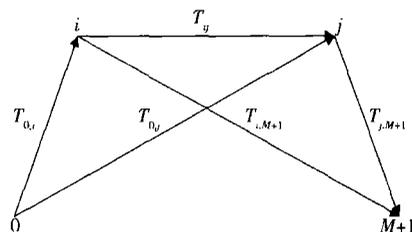


图 2 连接  $i \rightarrow j$  后的行驶路线图

Fig. 2 Route of linking  $i \rightarrow j$

由图易知连接  $i \rightarrow j$  时间节约值可表示为

$$\Delta t_{i \rightarrow j} = T_{i,M+1} + T_{0,j} - T_{i,j} \quad (14)$$

同理,可得连接  $j \rightarrow i$  时间节约值为

$$\Delta t_{j \rightarrow i} = T_{j, M+1} + T_{0, i} - T_{j, i} \quad (15)$$

因此一般来说,连接  $i \rightarrow j$  与连接  $j \rightarrow i$  是不同的,需分别考虑. 并且  $\Delta t_{i \rightarrow j}$  可正可负,当  $\Delta t_{i \rightarrow j} > 0$  时,说明连接  $i \rightarrow j$  后车辆运行时间减少,即节约了运行时间,且  $\Delta t_{i \rightarrow j}$  越大节约时间越多;当  $\Delta t_{i \rightarrow j} < 0$  时,说明连接  $i \rightarrow j$  后车辆运行时间增加,且  $\Delta t_{i \rightarrow j}$  越小时间增加得越多;当  $\Delta t_{i \rightarrow j} = 0$  时,连接前后运行时间没有变化.

同样,在每进行一个连接  $i \rightarrow j$  前后,顾客的满意度也会发生变化. 设  $End(i)$  表示以  $i$  为结尾路线上顾客点的集合,  $Start(j)$  表示以  $j$  为首的线路上所有顾客点的集合,  $Connection_{i \rightarrow j}$  表示连接  $i \rightarrow j$  之后,  $i$  和  $j$  所在路线上所有顾客点的集合. 用  $\Delta s_{i \rightarrow j}$  表示连接  $i \rightarrow j$  前后的满意度的差值,计算公式如下

$$\Delta s_{i \rightarrow j} = \sum_{k \in End(i)} S(k) + \sum_{l \in Start(j)} S(l) - \sum_{m \in Connection_{i \rightarrow j}} S(m) \quad (16)$$

$\Delta s_{i \rightarrow j}$  亦可正可负,当  $\Delta s_{i \rightarrow j} < 0$  时,说明连接  $i \rightarrow j$  后满意度增加了,且  $\Delta s_{i \rightarrow j}$  越小满意度增加得越多;当  $\Delta s_{i \rightarrow j} > 0$  时,说明连接  $i \rightarrow j$  后满意度减少了,且  $\Delta s_{i \rightarrow j}$  越大满意度减少得越多;当  $\Delta s_{i \rightarrow j} = 0$  时,说明连接前后满意度没有变化.

根据上述可知,在选择是否连接  $i \rightarrow j$  的时候可能会出现多种  $\Delta s_{i \rightarrow j}$  和  $\Delta t_{i \rightarrow j}$  的组合,考虑到对目标函数值的改进,本文只考虑以下 3 种情况: ①  $\Delta s_{i \rightarrow j} \leq 0$  并且  $\Delta t_{i \rightarrow j} > 0$ ; ②  $\Delta s_{i \rightarrow j} < 0$  并且  $\Delta t_{i \rightarrow j} \leq 0$ ; ③  $\Delta s_{i \rightarrow j} \geq 0$  并且  $\Delta t_{i \rightarrow j} > 0$ , 并且假设一个  $\mu_{i \rightarrow j}$  作为判断标准.

对于满足 ① 的所有连接  $i \rightarrow j$  来说,计算  $\mu_{i \rightarrow j} = \Delta s_{i \rightarrow j} \Delta t_{i \rightarrow j}$ . 由前面分析可知,  $\Delta s_{i \rightarrow j}$  越小说明连接  $i \rightarrow j$  后满意度增加得越多,而  $\Delta t_{i \rightarrow j}$  越大说明连接  $i \rightarrow j$  后时间节约得越多,且易知  $\Delta s_{i \rightarrow j} \Delta t_{i \rightarrow j} \leq 0$ , 所以取  $\mu_{i \rightarrow j} = \min_{i \rightarrow j} (\Delta s_{i \rightarrow j} \Delta t_{i \rightarrow j})$ .

如果没有满足 ① 的连接,那么选择所有满足 ② 的连接  $i \rightarrow j$ , 计算

$$\mu_{i \rightarrow j} = \frac{\Delta s_{i \rightarrow j}}{\Delta t_{i \rightarrow j} - 1}$$

因为  $\Delta s_{i \rightarrow j}$  越小说明连接  $i \rightarrow j$  后满意度增加得越多,而因为  $\Delta t_{i \rightarrow j} \leq 0$ , 所以说明此种情况下连接

$i \rightarrow j$  后时间并没有节约而是增加了,  $\Delta t_{i \rightarrow j}$  越大说明增加得越少,且易知  $\frac{\Delta s_{i \rightarrow j}}{\Delta t_{i \rightarrow j} - 1} > 0$ , 所以取

$$\mu_{i \rightarrow j} = \max_{i \rightarrow j} \left( \frac{\Delta s_{i \rightarrow j}}{\Delta t_{i \rightarrow j} - 1} \right)$$

如果既没有满足 ① 的连接,也没有满足 ② 的连接,那么选择所有满足 ③ 的连接. 计算

$$\mu_{i \rightarrow j} = \frac{\Delta s_{i \rightarrow j}}{\Delta t_{i \rightarrow j}}$$

因为  $\Delta s_{i \rightarrow j} \geq 0$  说明连接  $i \rightarrow j$  后满意度减少了,  $\Delta s_{i \rightarrow j}$  越小说明减少得越少,而  $\Delta t_{i \rightarrow j}$  越大说明时间节约得越多,且易知,  $\frac{\Delta s_{i \rightarrow j}}{\Delta t_{i \rightarrow j}} \geq 0$ , 所以取

$$\mu_{i \rightarrow j} = \min_{i \rightarrow j} \left( \frac{\Delta s_{i \rightarrow j}}{\Delta t_{i \rightarrow j}} \right)$$

如果连接  $i \rightarrow j$  不满足以上 3 种情况中的任何一种,则认为  $\mu_{i \rightarrow j}$  不存在.

在算法中引入  $u_{i \rightarrow j}$  来表示  $i \rightarrow j$  是否已连接 (或是否违反约束). 在对  $u_{i \rightarrow j}$  进行赋初值时,将  $i$  和  $j$  相等的连接赋予初值  $M + 1$ , 其他的连接赋予 0. 当  $i \rightarrow j$  连接成功或连接  $i \rightarrow j$  违反约束时,将  $u_{i \rightarrow j}$  赋值为  $M + 1$ .

### 第 1 阶段启发式算法的步骤

**步骤 1** 给  $u_{i \rightarrow j}$  赋初值.

**步骤 2** 对所有的连接  $i \rightarrow j$ , 当  $u_{i \rightarrow j} \neq M + 1$  时,计算连接前后的时间的差值  $\Delta t_{i \rightarrow j}$ .

**步骤 3** 对所有的连接  $i \rightarrow j$ , 当  $u_{i \rightarrow j} \neq M + 1$  时,计算连接前后的满意度的差值  $\Delta s_{i \rightarrow j}$ .

**步骤 4** 选择最优的  $\mu_{i \rightarrow j}$ , 若存在,则转步骤 5; 否则停止,输出结果.

**步骤 5** 检查  $i$  和  $j$  是否满足以下条件:

①  $Start(j) = \phi$ ; ②  $End(i) = \phi$ ; ③  $u_{i \rightarrow j} = 0$

如果同时满足以上 3 条则转步骤 6; 否则转步骤 10.

**步骤 6** 检查连接  $i \rightarrow j$  后线路上的每个顾客点是否满足硬时间窗的约束. 如果均满足,则转步骤 7; 否则转步骤 10.

**步骤 7** 检查连接  $i \rightarrow j$  后线路上的顾客点的顾客人数的和是否满足车辆运载能力约束. 如果满足,则转步骤 8; 否则转步骤 10.

**步骤 8** 检查连接  $i \rightarrow j$  后线路上的每个顾客点是否满足期限时刻的约束. 如果满足,则转步骤

9; 否则转步骤 10.

**步骤 9** 连接  $i \rightarrow j$ , 更新数据. 转步骤 10.

**步骤 10** 将  $u_{i \rightarrow j}$  赋值为  $M + 1$ .

**步骤 11** 检查  $u_{i \rightarrow j}$ , 若所有的  $u_{i \rightarrow j}$  均为  $M + 1$ , 则停止, 输出结果; 否则转步骤 3.

### 2.2 第 2 阶段启发式算法

由第 1 阶段启发式算法得到一个总满意度较大且总运输成本较少的车次分配和调度安排, 但是第 1 阶段并没有考虑如何使得起用车次尽量少. “插入”启发式算法是由 Rosenkrantz 等<sup>[11]</sup>提出的, 而且该方法已经在车辆路径和调度方面有了广泛的应用<sup>[12]</sup>. 本文就以“插入”启发式算法的思想为基础构造了第 2 阶段启发式算法. “插入”启发式算法的基本思想是在线路  $(0, 1, \dots, i, j, \dots, M + 1)$  中插入  $k$  构成新的路线, 比如将  $k$  插入到  $i$  与  $j$  之间构成新的路线  $(0, 1, \dots, i, k, j, \dots, M + 1)$ , 插入过程如图 3 所示.



图 3 选择点  $k$  的插入位置

Fig. 3 Choosing an insertion position for customer point  $k$

第 2 阶段的启发式算法主要是在第 1 阶段的基础上对初始解作适当的调整以减少车次的使用数量, 但是一般来说在作调整的时候都会影响到第 1 阶段得到的总满意度和总运输成本, 由于在一般情况下车辆的起用费用要远大于运行成本, 所以在插入的过程中, 先不考虑对运输成本的影响, 而只考虑对满意度的影响. 对于以下两个条件: ① 调整后的总满意度小于调整前的总满意度的 90%; ② 调整后的运行成本和车辆启用的固定成本之和大于调整前的运行成本和车辆启用的固定成本之和. 如果由第 2 阶段启发式算法得到的结果满足其中一条, 则选择第 1 阶段得到的结果, 否则选择第 2 阶段的结果.

为了描述方便, 引入“单点”顾客点的概念. 所谓的“单点”顾客点, 是在某条已经形成的线路中, 唯一存在的顾客点, 即该线路中只有这一个顾客点. 用 0-1 变量  $v_k$  来表示顾客点  $k$  是否是“单点”顾客点.

“单点”顾客点  $k$  的插入方式为: 将“单点”顾客点  $k$  插入到除  $k$  所在路线以外的所有其它路线的所有连接中, 这里的连接也包括顾客点与发车

地的连接以及顾客点与机场之间的连接. (也可以描述为: 将“单点”顾客点  $k$  分别插入到除  $k$  以外的其它顾客点的前面和后面, 当然这里的顾客点不包括虚拟的第 0 个顾客点(发车地) 和第  $M + 1$  个顾客点(机场)). 用  $\Delta s_{i \rightarrow k \rightarrow j}$  表示连接  $i \rightarrow j$  在插入“单点” $k$  前后的满意度的差值, 计算公式如下

$$\Delta s_{i \rightarrow k \rightarrow j} = \sum_{l \in \text{End}(i)} S(l) + \sum_{m \in \text{start}(j)} S(m) + S(k) - \sum_{n \in \text{Connection}_{i \rightarrow k \rightarrow j}} S(n) \quad (17)$$

### 第 2 阶段启发式算法的步骤

**步骤 1** 找出每个“单点”顾客点  $k$ , 并且给  $v_k$  赋值.

**步骤 2** 将每个“单点”顾客点  $k$  都插入到其它线路中的每个连接  $i \rightarrow j$  中, 计算插入前后的满意度的差值  $\Delta s_{i \rightarrow k \rightarrow j}$ .

**步骤 3** 选择满意度差值  $\Delta s_{i \rightarrow k \rightarrow j}$  最小的插入方式.

**步骤 4** 检查插入顾客点  $k$  后,  $i \rightarrow k \rightarrow j$  所在线路上所有顾客点是否满足硬时间窗约束. 如果满足, 则转步骤 5; 否则转步骤 8.

**步骤 5** 检查插入顾客点  $k$  后,  $i \rightarrow k \rightarrow j$  所在线路上所有顾客点的顾客数之和是否满足车辆运载能力的约束. 如果满足, 则转步骤 6; 否则转步骤 8.

**步骤 6** 检查插入顾客点  $k$  后,  $i \rightarrow k \rightarrow j$  所在线路上所有顾客点是否满足期限时刻约束. 如果满足, 则转步骤 7; 否则转步骤 8.

**步骤 7** 将顾客点  $k$  插入到  $i$  和  $j$  之间, 更新数据. 转步骤 8

**步骤 8** 将  $v_k$  赋值为 1.

**步骤 9** 检查  $v_k$  是否全部为 1. 若全部为 1, 则停止, 输出结果; 否则转步骤 2.

## 3 仿真与结果分析

在计算过程中假设每个车次到达每条线路第 1 个顾客点的时间为该顾客点的软时间窗的下限, 且假设每个车次的运载能力为 4 人, 即一辆车上最多坐 4 个顾客, 工作计划时间范围为 12 小时. 为了验证算法的有效性, 首先随机产生了 9 个顾客点, 给出每个顾客点相应信息如表 1 所示, 各顾客点之间的运行时间如表 2 所示.

表1 各顾客点信息

Table 1 Information of each customer

顾客点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
硬时间窗下限	7:25	7:30	7:35	8:00	8:00	7:45	7:50	8:20	8:35
软时间窗下限	7:30	7:40	7:40	8:10	8:10	7:50	8:00	8:30	8:40
软时间窗上限	7:40	7:50	7:50	8:20	8:20	8:00	8:10	8:40	8:50
硬时间窗上限	7:50	8:00	8:00	8:30	8:30	8:20	8:20	9:00	9:00
期限时刻	8:00	8:10	8:20	8:45	8:45	8:40	8:40	9:15	9:15
顾客点人数	1	1	2	1	2	3	1	3	1

表2 车辆在各顾客点之间的运行时间  $T_{ij}$  (min)

Table 2 Vehicle traveling times between different customer points

顾客点	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	9	6	12	16	5	5	7	10	2	10
1	9	0	5	10	9	13	6	3	12	9	15
2	6	5	0	11	12	7	6	4	9	5	10
3	12	10	11	0	10	12	7	5	11	8	15
4	16	9	12	10	0	6	13	10	12	9	15
5	5	13	7	12	6	0	8	6	12	4	10
6	5	6	6	7	13	8	0	7	13	6	10
7	7	3	4	5	10	6	7	0	11	7	15
8	10	12	9	11	12	12	13	11	0	10	15
9	2	9	5	8	9	4	6	7	10	0	10
10	10	15	10	15	15	10	10	15	15	10	0

首先可以根据顾客总人数和车辆的运载能力,估算出最少需要的车次数.由以上数据易知,至少需要4个车次,也就是说车次数的下界为4.

第1阶段启发式算法得到结果如下:

车次1 发车时间:7:21 路线:出发地 → 顾客点1 → 顾客点3 → 机场

车次2 发车时间:7:34 路线:出发地 → 顾客点2 → 机场

车次3 发车时间:7:45 路线:出发地 → 顾客点6 → 机场

车次4 发车时间:7:53 路线:出发地 → 顾客点7 → 顾客点4 → 顾客点5 → 机场

车次5 发车时间:8:20 路线:出发地 → 顾客点8 → 机场

车次6 发车时间:8:43 路线:出发地 → 顾客点9 → 机场

总满意度为100%;车次数:6;车辆总行使时间:135 min

在该结果的基础上应用第2阶段启发式算法得到结果如下:

车次1 发车时间:7:21 路线:出发地 → 顾客点1 → 顾客点3 → 顾客点2 → 机场

车次2 发车时间:7:45 路线:出发地 → 顾客点6 → 机场

车次3 发车时间:7:53 路线:出发地 → 顾客点7 → 顾客点4 → 顾客点5 → 机场

车次4 发车时间:8:20 路线:出发地 → 顾客点8 → 顾客点9 → 机场

总满意度为93.33%;车次数:4;车辆总行使时间:118分钟

显然第2阶段的满意度大于第1阶段的90%,车次数和运行时间也都减少了,并且车次数已经达到了最优值,所以选择第2阶段的结果.

为了进一步验证算法的有效性,对随机产生的20个顾客点和30个顾客点的情况也分别做了仿真实验,计算结果如表3所示.

表3 20个顾客点和30个顾客点的实验结果

Table 3 Experiment results of 20 customer points and 30 customer points

顾客点数	算法	总满意度	车次数	最少车次数	总运行时间/min
20个顾客点	第一阶段启发式算法	100%	12	9	273
	第二阶段启发式算法	98.5%	9		255
30个顾客点	第一阶段启发式算法	100%	17	14	429
	第二阶段启发式算法	99.67%	14		406

对随机产生的 20 个顾客点和 30 个顾客点, 经过第 2 阶段启发式算法得到的结果, 车次数均有大幅度减少, 而对满意度的影响却很小, 并且使得运输成本费用减少了。

## 4 结 论

本文在综合考虑顾客满意度和运输成本的情

况下, 对航空服务公司免费上门接送顾客到机场服务建立了车次分配和调度优化多目标规划模型。根据问题的自身特点提出了两阶段启发式算法对模型进行求解。通过该算法可以得到较高的顾客满意度, 在此基础上, 也尽可能地减少了成本费用。该模型的建立与求解能够帮助车次分配与调度人员做出合理、高效的车次分配安排, 以提高公司的服务质量和降低运营成本。

## 参 考 文 献:

- [1] Simchi-Levi D, Chen Xin, Bramel J. The Logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistics and Supply Chain Management[M]. New York: Springer Science + Business Media, Inc., 2005. 217—219.
- [2] Fagerholt K. Ship scheduling with soft time windows: An optimization based approach[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131(3): 559—571.
- [3] Wang X, Regan A C. Local truckload pickup and delivery with hard time window constraints[J]. Transportation Research Part B, 2002, 36(2): 97—112.
- [4] 乔伊科奇 A, 汉森 D R, 达克斯丁 L. 多目标决策分析及其在工程和经济中的应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 1987. 23—28.  
Goicoechea A, Hansen D R, Duckstion L. Multi-target Decision-making Analysis and Its Application in Engineering and Economy[M]. Beijing: Publishing House of Aviation Industry, 1987. 23—28. (in Chinese)
- [5] Solomon M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints[J]. Operations Research, 1987, 35(2): 254—265.
- [6] 李 军, 郭耀煌. 车辆优化调度理论与方法[M]. 北京: 中国物资出版社, 2001. 105—107.  
Li Jun, Guo Yao-huang. Optimization Theory and Application of Vehicle Scheduling[M]. Beijing: China Material Press, 2001. 105—107. (in Chinese)
- [7] Clarke G, Wright J W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points[J]. Operations Research, 1964, 12(4): 568—581.
- [8] 宋伟刚, 张宏霞, 佟 玲. 有时间窗约束非满载车辆调度问题的节约算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(1): 69—72.  
Song Wei-gang, Zhang Hong-xia, Tong Ling. C-W algorithm for vehicle routing problem of non-full loads with time windows [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2006, 27(1): 69—72. (in Chinese)
- [9] Bennett B, Gazis D. School bus routing by computer[J]. Transportation Research, 1972, 6(4): 317—326.
- [10] 陈继山, 须鼎兴, 刘大杰. 多约束条件的车辆装卸算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(11): 48—52.  
Chen Ji-shan, Xu Ding-xing, Liu Da-jie. Algorithm in vehicle pickup and delivery problem[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, 31(11): 48—52. (in Chinese)
- [11] Rosenkrantz D J, Stearns R E, Lewis P M. An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem[J]. SIAM Journal on Computing, 1977, 6(3): 563—581.
- [12] Campbell A M, Savelsbergh M. Efficient insertion heuristics for vehicle routing and scheduling problems[J]. Transportation Science, 2004, 38(3): 369—378.

## Multi-objective model and algorithm of free pickup customer and delivery to airport service

*TANG Jia-fu, DONG Gang, PAN Zhen-dong, KONG Yuan*

School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China

**Abstract:** Customers' satisfaction degree and total costs of the service of free pick up of customers to airport for Flight Ticket Sales Companies are considered synthetically. The qualitative factor of customer satisfaction degree is quantified and the total costs are divided into vehicle fixed start-up costs and transportation costs, then a multi-objective 0-1 mixed integer programming model is established for the vehicle allocation and scheduling problem arising in the service of free pick up of customers to airport of Flight Ticket Sales Companies. According to the characteristics of the problem and model, a two-stage heuristic algorithm which is based on Savings Algorithm of Clarke and Wright is proposed. The model is useful and the algorithm is effective, which is verified by the simulation experiment and results analysis.

**Key words:** flight ticket sales company; free pick up to airport service; multi-objective programming; heuristic; customer satisfaction