

轴 - 辐式机场长途巴士线网运营时刻表优化设计

杨忠振, 陆 婧

(大连海事大学 交通运输管理学院, 大连 116026)

摘 要 针对轴 - 辐式机场长途巴士线网的发车时刻问题, 构建时空网络, 分析乘客到达机场的行为与过程; 基于航班起飞时刻, 在乘客的候机与换乘时间上限约束下, 建立巴士时刻表优化模型, 并设计基于矩阵式编码的遗传算法进行求解. 通过分析不同候机与换乘时间上限的组合对运营成本的敏感性, 得出合理的运营时刻表.

关键词 机场长途巴士; 轴 - 辐式线网; 时空网络; 矩阵编码

Optimization of the timetable for a hub-spoke airport coach network

YANG Zhong-zhen, LU Jing

(Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract To depart the coaches for the hub-spoke airport coach network, a time-and-space network is constructed and the behaviors and process of passengers going to at the airport with the coaches are analyzed. Based on the flight schedules the model to optimize the coach timetable is developed under the constraint of the upper limits of the airport waiting time and the hub transfer time, and corresponding algorithms is designed. Based on the effects of the different combinations of the time limits on the operate cost, a rational timetable is obtained.

Keywords airport coach; hub-spoke network; time-and-space network; matrix coding

1 引言

近年来我国民航业高速发展, 旅客运量年均增长达 22.5%, 民用机场数量和密度大幅增加, 部分地区已达到每十万平方公里 4.8 个机场^[1]. 为吸引腹地客源及提供优质的地面喂给服务, 部分机场在机场与腹地间开通长途巴士, 接送乘客. 随着这种巴士覆盖范围的增大, 其线网结构呈现出由“点 - 点式”向“轴 - 辐式”转化的趋势^[2]. 由于轴 - 辐式线网采取干支线协同的运营方式, 因此与点 - 点式线网相比, 轴 - 辐式线网中各线路的发车时刻相互依赖^[3], 所以在设计巴士时刻表时既要考虑干支线的衔接, 又要考虑运营服务水平与运营成本间的关系^[4].

2 轴 - 辐式机场长途巴士网络

2.1 轴 - 辐式线网的结构

轴 - 辐式机场长途巴士网络一般为单枢纽形式^[5], 如图 1 所示, 其支线连接支线节点与枢纽节点, 干线连接枢纽节点与机场, 枢纽节点之间不相互连接^[6]. 支线节点的乘客汇集至枢纽节点后, 与枢纽节点的乘客一起乘坐干线巴士前往机场. 由于涉及换乘, 在设计巴士发车时刻表时, 要同时考虑干支线间的空间上和空间上的衔接. 因此, 轴 - 辐式机场长途巴士网络时刻表的优化设计问题是时空结合的二维问题, 较为复杂.

收稿日期: 2011-06-02

资助项目: 教育部人文社科基金 (09YJA790021); 国家自然科学基金 (51078049)

作者简介: 杨忠振 (1964-), 男, 辽宁凌海人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 交通规划与管理, E-mail: yangzhongzhen@263.net; 陆婧 (1987-), 女, 博士研究生, 研究方向: 交通运输规划与管理, E-mail: 609412568@qq.com.

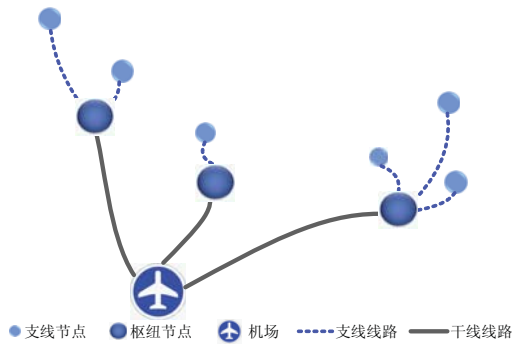


图 1 轴 - 辐式机场长途巴士线网的结构

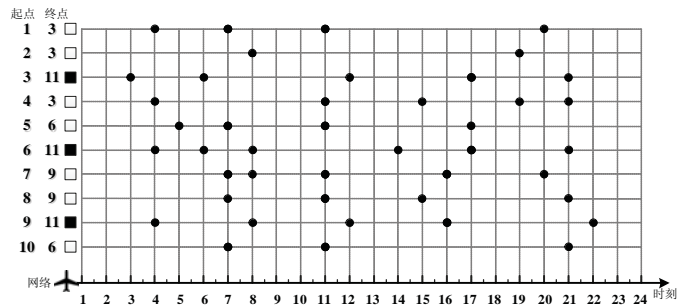


图 2 巴士线网与线路发车时刻的时空图

2.2 巴士系统的时空网络图

为同时研究线网结构和线路时刻表, 我们用时空网络图 [7-8] (图 2) 表现上述二维问题. 图中前部的阴影表示线网结构, 数字表示节点 (这里 1-10 表示城市节点, 11 表示机场节点), 每行表示线网中的一条巴士线路, 行的第一列和第二列分别表示线路的起点和终点, 第三列的正方形表示线路的性质 (空心的为支线, 实心的为干线). 支线的起点为支线节点, 干线的起点为枢纽节点. 例如, 图中节点 1 通过支线 (1-3) 和干线 (3-11) 连接到机场.

图 2 中线网结构后面的部分为时空网格, 底部的时间轴为一天的 24 个时刻, 网格将线路与时间连接起来, 实心圆点表示某线路在该时刻有巴士发出. 例如, 图中的第一行表示线路 (1-3) 为支线, 节点 1 在 4:00、7:00 11:00 和 20:00 各有一班巴士发往节点 3.

3 乘客确定离开出发地时刻的过程

当巴士线网和巴士在线路上的行走时间固定时, 理性乘客会根据时空网络确定出发时刻, 形成出行链. 如果知道乘客离开出发地的时刻, 就可以分析其出行链的情况, 并获得其在出发地和中转地所乘坐的巴士班次.

为简化分析, 将乘客按照登机时刻分组, 每小时为一组, 并假设组内的乘客集中在时间段的起始时刻登机. 枢纽节点乘客的决策是支线节点乘客决策的一部分, 因此图 3 仅以支线乘客为例进行描述. 图中弧形虚线表示车辆在时空网络上的时空位移, 直线虚线表示乘客在节点上的时间位移, 两者联合起来表示支线节点的乘客在已知登机时刻时, 确定出发时刻的过程. 此过程分为两步: 确定在枢纽点的出发时刻; 确定在支线节点的出发时刻, 具体如下所述:

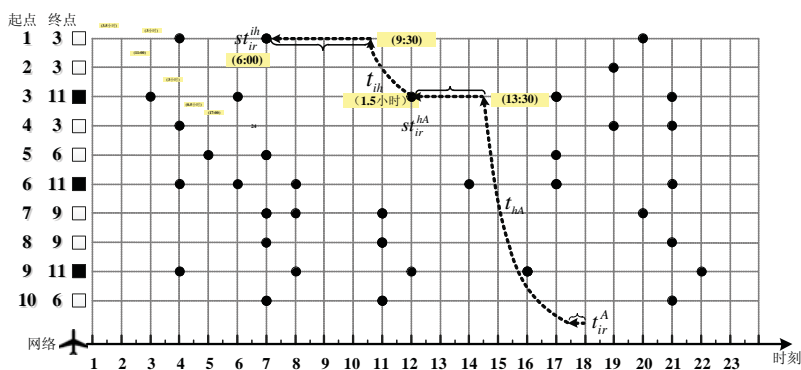


图 3 乘客确定出发时刻及形成出行链的过程

当支线节点 i 的 r 组乘客的登机时刻为 t_{ir}^A 时, 其最晚到达机场 (用 A 表示) 的时刻应为 $(t_{ir}^A - 0.5)$, 因为他需要提前 30 分钟到达机场. 由于他要在节点 h 中转, 而节点 h 至机场的巴士行驶时间为 t_{hA} 小时, 因此乘客在节点 h 最晚的出发时刻为 $(t_{ir}^A - 0.5 - t_{hA})$. 为准点登机, 同时在机场候机时间最短, 乘客要乘坐早于上述最晚时刻的最后一班发往机场的巴士, 因此其在枢纽节点的出发时刻为 st_{ir}^{hA} , 在支线节点的出发时刻为 st_{ir}^{ih} .

4 机场巴士时刻表优化模型

为简化问题, 假设: 1) 腹地城市的所有离港乘客都利用机场巴士到达机场; 2) 机场巴士系统的车辆数不受限制; 3) 机场巴士 24 小时运营. 在上述假设的基础上, 基于时空网络和乘客乘车行为, 本文针对为离港乘客服务的长途巴士线路设计发车时刻表.

4.1 目标函数

以日运营成本最小为目标, 目标函数的形式如下:

$$\min C = \sum_i \sum_h \sum_t k_t^{ih} c_{ih} d_{ih} x_t^{ih} + \sum_h \sum_t k_t^{hA} c_{hA} d_{hA} x_t^{hA} \quad (1)$$

这里, C = 机场长途巴士系统的总营运成本, 前一部分为支线营运成本, 后一部分为干线营运成本. i = 支线节点, h = 枢纽节点, A = 机场; d_{ih} = 支线长度, d_{hA} = 干线长度; $t=1$ 至 24 点的各整点时刻, c_{ih} = 支线巴士单位距离的运营成本, c_{hA} = 干线巴士单位距离的运营成本. x_t^{ih} 为 0-1 变量, 表示支线 ($i-h$) 在 t 时刻是否有巴士发出, 如有 $x_t^{ih} = 1$, 否则 $x_t^{ih} = 0$, x_t^{hA} 与 x_t^{ih} 类似.

$$x_t^{ih} = \begin{cases} 1, & \text{支线 } i-h \text{ 在 } t \text{ 时刻有巴士发出} \\ 0, & \text{支线 } i-h \text{ 在 } t \text{ 时刻没有巴士发出} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_t^{hA} = \begin{cases} 1, & \text{支线 } h-A \text{ 在 } t \text{ 时刻有巴士发出} \\ 0, & \text{支线 } h-A \text{ 在 } t \text{ 时刻没有巴士发出} \end{cases} \quad (3)$$

k_t^{ih} = 支线 ($i-h$) 在 t 时刻需要发出的巴士数, 可以用公式 (4) 计算, 式中 N_s = 支线巴士车辆的容量, n_t^{ih} = 支线 ($i-h$) 在 t 出发时刻的乘客人数, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号.

$$k_t^{ih} = \lceil n_t^{ih} / N_s \rceil \quad (4)$$

n_t^{ih} 可以用式 (5) 计算, 其中 $q_{ir} = i$ 节点上第 r 组乘客的人数; y_{iht}^{ir} 为 0-1 变量, 表示支线 ($i-h$) 在 t 时刻发出的巴士是否被当地的第 r 组乘客选择. $st_{ir}^{ih} = t$ 表示被选择, 其值为 1, 否则为 0 (式 (6)).

$$n_t^{ih} = \sum_r q_{ir} \cdot y_{iht}^{ir} \quad (5)$$

$$y_{iht}^{ir} = \begin{cases} 1, & st_{ir}^{ih} = t \\ 0, & st_{ir}^{ih} \neq t \end{cases} \quad (6)$$

同理可用式 (7) 计算 k_t^{hA} , 但干线 ($h-A$) 上 t 时刻的乘客人数等于由支线 ($i-h$) 前来, 并在 t 时刻前往机场的支线乘客人数 $q_{ir} \cdot y_{hAt}^{ir}$ 与此时当地乘客人数 $q_{hr} \cdot y_{hAt}^{hr}$ 之和 (式 (8)). 另外, y_{hAt}^{ir} 和 y_{hAt}^{hr} 分别如式 (9) 和式 (10) 所示.

$$k_t^{hA} = \lceil n_t^{hA} / N_h \rceil \quad (7)$$

$$n_t^{hA} = \sum_r q_{ir} \cdot y_{hAt}^{ir} + q_{hr} \cdot y_{hAt}^{hr} \quad (8)$$

$$y_{hAt}^{ir} = \begin{cases} 1, & st_{ir}^{hA} = t \\ 0, & st_{ir}^{hA} \neq t \end{cases} \quad (9)$$

$$y_{hAt}^{hr} = \begin{cases} 1, & st_{hr}^{hA} = t \\ 0, & st_{hr}^{hA} \neq t \end{cases} \quad (10)$$

4.2 约束条件

• 候机与换乘时间约束

$$0 < (t_{ir}^A - 0.5 - t_{hA} - t) \cdot x_t^{hA} \leq T \tag{11}$$

$$0 < (t_{hr}^A - 0.5 - t_{hA} - t) \cdot x_t^{hA} \leq T \tag{12}$$

$$0 < (st_{ir}^{hA} - t_{ih} - t) \cdot x_t^{ih} \leq T' \tag{13}$$

式 (11) 为节点 i 的第 r 组乘客在机场候机时间的上限约束, 大于 0 是为了保证系统中至少有一班巴士能使乘客准点登机, 小于上限 T 是要保证候机时间不超过某一上限, 以避免为减少巴士发班次数, 过早地将乘客送至机场, 同理可解释式 (12). 式 (13) 对支线乘客在枢纽点的换乘时间进行约束, 原理与式 (11) 相同.

• 乘客乘车时刻约束

式 (14) 规定支线 ($i-h$) 的第 r 组乘客在满足式 (11) 的巴士中, 选择使其在机场等待时间最少的一班干线巴士出发. 其中, K 为满足条件 (11) 的所有时刻中的最大时刻, 将 K 赋值于 st_{ir}^{hA} 可得到支线乘客在枢纽节点的实际出发时间. 式 (15) 和式 (16) 分别是对支线乘客在支线节点和干线乘客在枢纽点的乘车时刻约束, 原理与式 (14) 相同, K' 和 K'' 与变量 K 的原理相同.

$$st_{ir}^{hA} = K, K \geq t \cdot x_t^{hA} > 0 \tag{14}$$

$$st_{ir}^{ih} = K', K' \geq t \cdot x_t^{ih} > 0 \tag{15}$$

$$st_{hr}^{hA} = K'', K'' \geq t \cdot x_t^{hA} > 0 \tag{16}$$

• 无空车约束

式 (17) 表示在支线 ($i-h$) 上, 当 $x_t^{ih} = 1$ 时, 乘坐 t 时刻巴士的乘客数不能为 0, 式 (18) 与式 (17) 类似, 但与干线巴士对应.

$$(n_t^{ih} - 0.5) \cdot (x_t^{ih} - 0.5) > 0 \tag{17}$$

$$(n_t^{hA} - 0.5) \cdot (x_t^{hA} - 0.5) > 0 \tag{18}$$

5 模型的求解算法

由于巴士的车头时距不固定, 因此在优化线网的发车时刻时, 解空间巨大, 需要以时空网络为基础, 用矩阵式编码的遗传算法^[9]进行求解.

5.1 染色体编码

染色体编码如图 4 所示, 染色体编码的行和列分别对应时空网络中的弧段与时刻, 其中矩阵元素的位置对应时空网络的经纬线交点, 元素的值表示弧段在某时刻是否发车, 1 表示发车, 0 表示不发车.

5.2 适应度函数

由于应用了轮盘赌算法, 而这类算法在目标函数求最大时效果最好, 因此取目标函数的负数作为适应度函数, 如式 (19) 所示.

$$FitV = -C \tag{19}$$

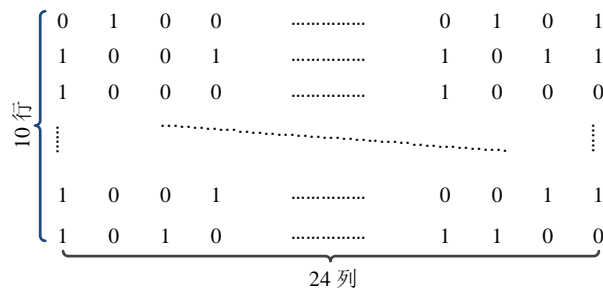


图 4 染色体编码示意图

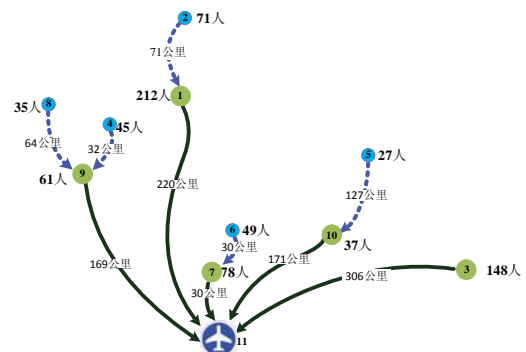


图 5 机场长途巴士线网结构

5.3 交叉和变异

采用单点交叉, 首先按照交叉概率 P_c 选择两个父个体, 并随机确定一个交叉点, 然后将两个父个体中对应的交叉点的右端基因数值进行交换^[10].

采用单点变异, 首先按照变异概率 P_m 选择需要进行变异的个体, 并随机选择基因位, 然后用新生成的随机数替代该基因中的数值^[11-12].

6 实例分析

本文以某机场设计的长途巴士线网为对象, 利用模型和求解算法优化设计各条巴士线路的发车时刻表.

6.1 所需数据

根据机场覆盖的腹地的地理位置及其航空出行需求, 该机场规划了如图 5 所示的单枢纽轴-辐式巴士线网. 其中, 大圆点表示枢纽节点, 小圆点表示支线节点, 各节点中的数字表示城市编号, 1-10 表示城市节点, 11 表示机场; 节点下方的数字表示该节点每天的航空出行需求; 实线表示干线巴士, 虚线表示支线巴士, 线上的数字为线路的距离. 干线巴士的额定载客人数 = 50 人, 运营成本 = 1.84 元/公里; 支线巴士的额定载客人数 = 30 人, 运营成本 = 1.3 元/公里. 求解时, 设 $P_c = 0.7$, $P_m = 0.1$.

为知道各城市航空出行者的起飞时刻, 我们在机场实施了乘客问卷调查.

6.2 计算结果

设乘客在机场的候机时间上限 $T = 3$, 支线乘客在枢纽节点换乘的时间上限 $T' = 2$, 求解模型得到此时机场长途巴士的发车时刻表如表 1 所示, 其日运营成本为 2.9 万元.

表 1 机场长途巴士发车时刻表 ($T = 3, T' = 2$)

线路	发车时刻 (发出的车辆数)								
1-11	5:00	6:00 (2)	8:00	11:00	13:00	16:00	18:00	20:00	—
2-1	2:00	4:00	5:00	8:00	11:00	13:00	15:00	17:00	—
3-11	3:00	7:00	10:00	14:00	18:00	—	—	—	—
4-9	4:00	5:00	7:00	9:00	11:00	15:00	16:00	18:00	20:00
5-10	3:00	6:00	9:00	7:00	11:00	14:00	—	—	—
6-7	3:00	5:00	7:00	9:00	11:00	14:00	17:00	17:00	—
7-11	5:00	7:00	9:00	10:00	12:00	13:00	16:00	19:00	—
8-9	3:00	5:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	19:00	—
9-11	5:00	7:00	9:00	11:00	13:00	16:00	18:00	20:00	21:00
10-11	3:00	6:00	7:00	10:00	13:00	15:00	18:00	—	—

表 2 长途机场巴士满载率 ($T = 3, T' = 2$)

线路	巴士车辆满载率								
1-11	28%	28%	77%	80%	78%	26%	98%	20%	—
2-1	17%	14%	57%	9%	57%	11%	20%	17%	—
3-11	80%	52%	69%	22%	4%	—	—	—	—
4-9	8%	5%	37%	31%	11%	17%	45%	8%	6%
5-10	20%	23%	28%	17%	20%	9%	—	—	—
6-7	20%	31%	6%	20%	20%	20%	20%	20%	—
7-11	44%	56%	54%	78%	72%	70%	94%	48%	—
8-9	14%	3%	85%	60%	17%	17%	20%	6%	—
9-11	16%	12%	60%	72%	26%	42%	60%	10%	8%
10-11	14%	8%	20%	18%	22%	42%	10%	—	—

由表 1 可以看出各线路的发车频率较为密集, 这是因为设计时既要满足乘客的出行需求, 又要保证乘客的候机与换乘时间不超过规定的范围. 由于模型是基于登机时刻优化巴士发车时刻表, 因此发车时刻多聚集在 6:00-9:00 和 11:00-14:00, 因为该区间是航班起飞的高峰时段. 各辆巴士的满载率如表 2 所示, 满载率高于 60% 的只占总数的 9.2%. 满载率较高的多为在 6:00-9:00 和 11:00-14:00 时段发车的巴士.

7 敏感度分析

通过设定不同的 T 和 T' , 得到在不同的等待时间上限组合下, 机场巴士的运营成本如图 6 所示. 图

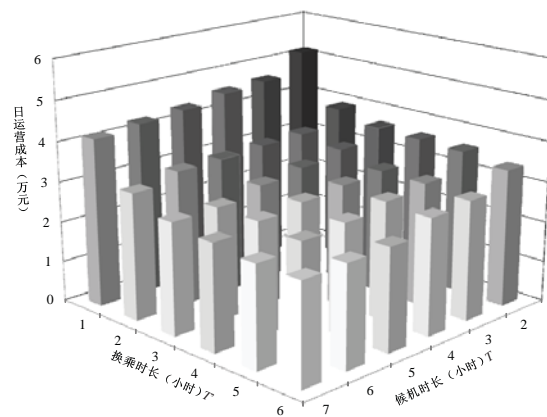


图 6 运营成本对乘客候机与换乘时间的灵敏度分析图

中 X 轴表示乘客的候机时间 T , Y 轴表示支线乘客在枢纽节点的换乘时间 T' , Z 轴表示巴士的日运营成本 C . 图中立柱的高度表示日运营成本随乘客的候机时间与换乘时间上限的变化而变化的趋势. 当乘客候机时间上限固定, 支线乘客在枢纽节点换乘时间的上限 T' 每降低一小时, 日运营成本平均增加 0.35 万元. 当 T' 从 2 小时变为 1 小时时, 机场巴士的日运营成本增加幅度最大, 为 23%. 随着 T' 的不断增加, 机场巴士日运营成本的增加幅度逐渐缩小.

当支线乘客换乘时间上限固定, 乘客候机时间上限 T 每降低 1 小时, 日运营成本平均增加 0.19 万元. 当 T 从 2 小时变为 1 小时时, 日运营成本增加幅度最大, 为 7.1%, 随着 T 的不断增加, 机场巴士日运营的边际成本的增加幅度逐渐缩小.

可以看出, 缩短支线巴士车头时距上限 1 小时所增加的运营成本高于缩短干线巴士车头时距上限 1 小时所增加的运营成本. 这是因为支线节点的航空出行少, 乘客的起飞时刻分散, 需要多个巴士班次来满足. 同时, 缩短支线巴士的车头时距使支线乘客到达枢纽节点的时间分散, 干线巴士也需增加发车次数来满足支线乘客. 因此, 调节支线巴士的发车频率比调节干线巴士发车频率更能起到控制成本的效果.

总体来看, 运营费用随着乘客候机与换乘时间的增加而减少, 但边际成本的减低幅度逐渐缩小. 当候机与换乘时间的上限组合由 $T = 2, T' = 1$ 变为 $T = 3, T' = 2$ 时, 机场长途巴士的成本减低了 33%; 由 $T = 3, T' = 2$ 变为 $T = 4, T' = 3$ 时, 机场长途巴士的成本减低了 9%; 由 $T = 4, T' = 3$ 变为 $T = 5, T' = 4$ 时, 机场长途巴士的成本只减低 2.3%. 说明当乘客的候机与换乘时间上限分别大于 3 小时和 2 小时时, 机场巴士的边际成本不再明显变化. 可以认为, 将候机时间上限定为 3 小时, 换乘时间上限定为 2 小时时, 优化的时刻表比较合理.

8 结论

建立时空网络图为机场长途巴士时刻表的优化提供了分析的平台, 在优化模型中考虑了机场的航班时刻与乘客的候机与换乘时长. 通过敏感程度分析, 得知当乘客候机时间上限为 3 小时, 换乘时间上限为 2 小时时, 得到的长途机场巴士的时刻表较为合理. 调节支线巴士的发车频率比调节干线巴士发车频率更能起到控制成本的作用. 由于时刻表优化模型是以航班时刻为导向的, 因此优化的时刻表既符合乘客的乘机需求, 又满足机场节约巴士运营成本的要求, 具有较好的实用性.

参考文献

- [1] 杨忠振, 王璐, 陈刚. 基于供需双方利益的新空港选址及航线费率优化 [J]. 华南理工大学学报, 2009, 37(3): 132-137.
Yang Z Z, Wang L, Chen G. Optimization of new airport location and airline rate considering suppliers profit and users utility[J]. Journal of South China University of Technology, 2009, 37(3): 132-137.
- [2] 航科院民用机场地面喂给交通系统研究课题组 (刘玉梅, 王璐, 陆婧). 国外机场地面喂给交通系统的分析与启示 [J]. 中

- 国民用航空, 2011, 121(1): 47–50.
- Airport Surface Access System Research Group of China Academy of Civil Aviation Science and Technology (Liu Y M, Wang L, Lu J). The analysis and enlightenment of the surface access system of foreign airports[J]. China Civil Aviation, 2011, 121(1): 47–50.
- [3] Wen B W, Hansen M. An aggregate demand model for air passenger traffic in the hub-and-spoke network[J]. Transportation Research Part A, 2006, 40(10): 841–851.
- [4] Jou R C, Hensher A D, Hsu T L. Airport ground access mode choice behavior after the introduction of a new mode: A case study of Taoyuan international airport in Taiwan[J]. Transportation Research Part E, 2011, 47(3): 371–381.
- [5] Ashley B, Kateley J. Bus and coach operations at a major airport[C]// European Transport Conference Proceedings, London: PTRC Education and Research Services Ltd, 1996: 213–224.
- [6] Bryan L D, O’Kelly E M. Hub-and-spoke networks in air transportation: An analytical review[J]. Journal of Regional Science, 1999, 39(2): 275–295.
- [7] Kliewer N, Mellouli T, Suhl L. A time-space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175(3): 1616–1627.
- [8] Garrido R A, Mahmassani H S. Forecasting freight transportation demand with the space-time multinomial probit model[J]. Transportation Research Part B, 2000, 34(5): 403–418.
- [9] 菅倩. 基于矩阵编码的遗传算法研究与应用 [D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
Jian Q. Research and application of genetic algorithm based on matrix coding[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [10] 李云峰, 武小悦. 遗传算法在卫星数传调度问题中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(1): 124–131.
Li Y F, Wu X Y. Application of genetic algorithm in satellite data transmission scheduling problem[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2008, 28(1): 124–131.
- [11] Bielli M, Caramia M, Carotenuto P. Genetic algorithms in bus network optimization[J]. Transportation Research Part C, 2002, 10(1): 19–34.
- [12] Huang J, Wang Q Y. Robust optimization of hub-and-spoke airline network design based on multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(3): 86–92.