

机场大巴营运网络设计模型和算法研究

陆学智, 文浩

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 随着航空业的发展和人们生活水平的提高, 对时间的要求越来越高, 选择航空出行的乘客与日俱增, 给航空和机场大巴营运提出了更高要求。文中通过对机场功能特征和机场乘客出行特点的分析, 建立了以机场大巴站点和线路选择模型为上层, 目标函数为乘客出行成本最低和机场大巴营运企业盈利最大, 下层为客流分配模型的双层规划模型, 并利用遗传算法进行求解。

关键词: 公路交通; 机场大巴; 营运网络; 网络设计; 遗传算法

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0044-06

根据周一鸣等的调查分析结果, 目前机场的陆侧交通能力不足, 出行所花费时间成本较多, 网络和其快捷性有待提高。为改善机场陆侧大巴交通质量, 需探讨机场陆侧交通与城市交通的有效融合。2010 年中国民航发展论坛报告指出中国未来 10 年机场建设和发展趋势将是民航部门全力打造以大中型机场为核心的综合交通枢纽, 将机场建设成汇集其他各种交通运输方式的零换乘、无缝隙交通枢纽中心, 方便客货流的快捷集散。

针对交通网络优化, Tom V. M. 等以企业经营成本和居民出行成本最低为优化目标进行了网络设计, 其中关键变量是巴士班次之间的时间间隔; Petrelli M. 以公交系统费用最低为约束条件设计了公交线网; Y. Lee 等利用迭代方法进行了公交网络设计; Shrivastava P. 等利用遗传算法建立了公共交通与轨道交通联合模型; Ciaffi F. 等对公铁接驳网络模型与算法作了进一步改进; 司徒炳强等将公交网络中的所有线路分为合作和竞争两种并分别建立了网络优化模型, 合作模型以乘客到达目的地时间最小为目标, 竞争模型以到站时间差最大为目标; 戴帅等进行了一体化多层次公交线网优化研究, 建立了双层规划模型并用遗传算法求解; 刘文驰等考虑公交需求的弹性, 结合票价和发车频率对公交网络进行优化, 将影响乘客出行选择的因素考虑在内, 建立了双层规划模型, 上层为社会效益最大化, 下层为弹性乘客的出行客流平衡分配, 并用模拟退火算法求解; 刘海旭利用可靠性指标评价随机环境下的公共交通服务水平, 在一个确定的 OD 出行下加入随机出行概率, 用用户平衡原理进行公交客流分配。目前, 国外对于机场交通的研究成果较多, 而国内的研

究成果主要集中在机场客流量预测、交通方式分担率预测和机场理论政策方面, 模型研究较少, 机场建设和城市交通之间存在一定的脱节。为此, 该文对机场大巴营运网络设计模型及算法进行研究。

1 机场大巴营运网络模型构建

机场一般具有客流量大、客源分散等特点, 为了更好地将分散各点的乘客聚集到机场或将机场到达乘客分散到各目的地, 将机场综合交通枢纽的大巴营运网络设计分为两部分, 即大巴线路设计和客流分配, 结合大巴的特点, 建立相应数学模型。

1.1 机场大巴线路选择模型

1.1.1 目标函数

机场、节点和乘客出发或到达小区的关系见图 1。将乘客出行小区分为 $1, 2, \dots, i$ 个, 机场节点分为 $1, 2, \dots, j$ 个, 乘客通过节点汇集到机场或通过节点分散到各小区。目标函数从营运企业利益最大、乘客的总出行时间成本最小两方面考虑。

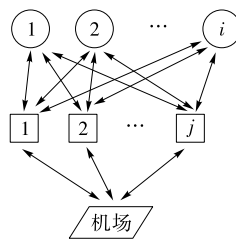


图 1 交通小区、机场节点和机场的关系示意图

(1) 乘客总出行时间成本(包括出行时间成本和候车时间成本)最少, 其函数表达式为:

$$\min T = \sum_{i=1} \sum_{j=1} q_{ij} t_{ij} + \sum_{j=1} \frac{q_{je} d_{je}}{v} \quad (1)$$

式中: T 为乘客总的出行时间; q_{ij} 为小区 i 到节点 j 的交通流量; t_{ij} 为小区 i 到节点 j 所需时间; q_{je} 为节点 j 到机场 e 的交通流量; d_{je} 为节点 j 到机场 e 的交通距离; \bar{v} 为节点 j 到机场 e 的平均车速。

(2) 企业利益最大,其函数表达式为:

$$\max B = \sum_{j=1} q_{je} d_{je} C_b - \sum_{j=1} C_c d_{je} f_{je} \quad (2)$$

式中: B 为企业利益; C_b 为节点 j 到机场 e 每单位距离的票价; C_c 为节点 j 到机场 e 每辆车单位距离的成本; f_{je} 为节点 j 到机场 e 的发车频率。

(3) 乘客的等候时间最小。在机场大巴线接运点确定后,如何得到机场大巴的最佳发车间隔是重点。其思路是在机场航班时刻表的基础上充分考虑乘客的等候时间,以其时间最短为目标函数建立模型。为方便模型建立和计算,作如下假设:1) 其他非机场乘客选择机场大巴出行的到达情况服从均匀分布;2) 机场大巴的载客量足够大,可满足需要换乘的所有乘客;3) 在某个时段内发车间隔是固定的。设 t^h 为某一时段内第 h 航班的抵达时间; Q^h 为 h 航班的实载乘客数; s_j^h 为 h 航班乘客选择乘坐机场大巴 j 线的比例,在机场大巴线路节点确定后确定; t_0^h 为 h 航班抵达机场并到达机场大巴乘坐点的时间,主要包括机场内部的行走时间; t_0^b 为该时间区间内第 1 班机场大巴交通线的发车时间; t_k^b 为该时间区间内第 k 班机场大巴线的发车时间, $t_k^b = t_0^b + k/f_{je}$ 。则该区间内选择机场大巴 j 线的航空乘客候车时间可按式(3)计算。如果时间区间为 $[t_1, t_2]$, f_{\min} 、 f_{\max} 分别表示在实际情况下所能承受的最小发车频率和最大发车频率,则机场乘客转乘机场大巴所需等候时间的目标函数见式(4)。

$$H = \sum_{h=1} \sum_{k=1} Q^h s_j^h [(t^h + t_0^h) - (t_0^b + k/f_{je})] \quad (3)$$

$$\min H = \sum_{h=1} \sum_{k=1} Q^h s_j^h [(t^h + t_0^h) - (t_0^b + k/f_{je})] \quad (4)$$

考虑到目标的量纲不一致,采用下式进行无量纲化处理:

$$T' = \frac{T}{\max T}, B' = \frac{B}{\max B}, H' = \frac{H}{\max H}$$

经过专家凭借经验确定目标函数的权重,则目标函数转化为:

$$\min Z = \alpha T' - \beta B' + (1 - \alpha - \beta) H' \quad (5)$$

式中: α 、 β 分别为专家确定的 T 、 B 的权重。

1.1.2 约束条件

(1) 总流量约束。从小区出发或到达小区的总客流量应等于从节点到机场或从机场到节点的总客流量,即:

$$\sum_{j=1} q_{ij} = \sum_{j=1} q_{je} \quad (6)$$

(2) 容量约束。每个节点的客流量不得超过一个节点的最大容量,即:

$$\sum_{i=1} q_{ij} \leq Q \quad (7)$$

(3) 节点个数约束。节点覆盖的规模需有一定的限制,即:

$$J_{\min} \leq j \leq J_{\max} \quad (8)$$

式中: J_{\min} 、 J_{\max} 分别为节点最小、最大覆盖个数。

(4) 所有参数均大于零,即:

$$q_{ij}, t_{ij}, d_{je}, \bar{v}, C_b, C_c, f_{je} > 0 \quad (9)$$

(5) 发车频率约束:

$$\begin{cases} t_1 \leq t_k^b \leq t_2; i = 1, 2, \dots, m \\ f_{\min} \leq f_{je} \leq f_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

1.2 双层模型的建立

机场大巴线路和发车频率之间是互相影响的,线路的确定会影响发车频率的确定,发车频率也会影响线路的选择。双层规划法可较好地处理两者之间的关系,故使用该方法建模。

将乘客出行成本和候车时间最小、企业利益最大作为模型上层目标函数,无量纲化后通过加权组合成一个目标函数;下层选用基于频率的客流分配模型计算每条路段上的客流分配量。上层模型为:

$$\min Z = \alpha T' - \beta B' + (1 - \alpha - \beta) H' \quad (11)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1} q_{ij} = \sum_{j=1} q_{je} \\ \sum_{i=1} q_{ij} \leq Q \\ \text{s.t.} \begin{cases} J_{\min} \leq j \leq J_{\max} \\ q_{ij}, t_{ij}, d_{je}, \bar{v}, C_b, C_c, f_{je} > 0 \\ t_1 \leq t_k^b \leq t_2; i = 1, 2, \dots, m \\ f_{\min} \leq f_{je} \leq f_{\max} \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

下层模型为:

$$\min \sum_{a \in A} t_a q_a + \sum_{j \in J} \omega_j \quad (13)$$

$$\begin{cases} \sum_{a \in A^+} q_a - \sum_{a \in A^-} q_a = g_j; j \in J \\ \text{s.t.} \begin{cases} q_a \leq f_a \omega_j; a \in A^+, j \in J \\ q_a \geq 0; a \in A \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

式中: t_a 为路段的出行时间; q_a 为分配到网络上的

路段流量; ω_j 为机场大巴节点 j 的总等待时间; g_j 为点 j 到终点的出行需求; f_a 为路段的频率。

2 机场大巴营运网络遗传算法设计

双层规划模型适于采用遗传算法求解,虽然当备选点数量较多时计算会更加繁琐,但由于遗传算法有较好的全局搜索能力,且不过多依赖目标函数,通过合理的编码和适应度函数处理,可得到较为满意的结果。

(1) 编码。必选点不参与编码。每个备选点采用“0,1”编码方式,“1”表示选择这个备选点为机场巴士停靠站点,“0”表示不选该点。编码长度为备选点的个数,每串编码代表一种方案。如当备选点个数为10时,染色体长度为10,染色体“1 1 0 0 0 1 0 1 1 0”表示对应编码位置为“1、2、6、8、9”的备选点被选中。

(2) 生成初始解。由电脑随机生成多个初始染色体,生成若干个初始解集,形成一个初始种群、很多对应备选组合。

(3) 适应度函数。适应度函数是遗传算法求解过程的评价函数,通过适应度函数值区分优良或劣势个体,从而进行自然选择。适应度较高的个体为优良个体,遗传到下一代的概率较高;适应度较低的个体在下一代出现的概率低,非优良个体逐渐被淘汰。适应度函数影响遗传算法的求解能力,通常要求设计尽可能简单,以降低运算时间成本,一般与目标函数作一定转换。该模型中的目标函数为费用最小,需作如下转换:

$$FN_y = \begin{cases} U_{\max} - Z_y; & Z_y < U_{\max} \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: U_{\max} 为一个适当的相对较大的数,可取进化到最近几代群体中或当前代为止的最大目标函数值。

(4) 惩罚函数。对于一些不符合实际情况的个体,可用惩罚函数降低其在遗传中的优势。该模型设立一个惩罚函数避免节点横向选择。

(5) 算子设计。遗传算法一般采用选择、交叉和变异算子。1) 选择算子。先计算种群中每个个体适应度值,该值与种群中所有个体适应度值的和的比即为该种群中该个体遗传到下一代的概率。适应度值占总体的比例越大,则该个体进入下一代的概率越高。设种群数目为 n ,则第 i 个个体被选中的概率 p_i 可由式(16)确定。2) 交叉算子。首先设定种群中个体交叉的概率 $p_c=0.7$,根据种群中个

体随机配对结果,对每对个体按交叉概率完成交叉,产生新的个体,从而生成新的种群。若采用两点交叉,即在染色体上随机选取两个交叉点对它们之间的部分染色体进行交换。3) 变异算子。首先设定种群中个体变异的概率 $p_m \in [0,1]$,为了使染色体中每个元素的变异概率近似等于0.5,变异的概率一般取 $0.7/l$ (l 为染色体结构长度)。根据变异概率对种群个体随机选择某个点进行变异,规则为随机选取基因取值范围中的一个数覆盖并代替原来的数,从而保证不超出变量定义范围。

$$p_i = \frac{FN_i}{\sum_{i=1}^n FN_i} \quad (16)$$

(6) 计算终止。当遗传算法的迭代次数达到指定最大迭代次数时停止运算,将其解码并输出种群中的最终解。

3 算例说明

假设某城市有一机场,其总体布置见图2,交通小区情况见图3。各交通小区日平均出行需求量见表1,交通小区到各机场节点的时间见表2,各机场节点到机场的距离见表3。

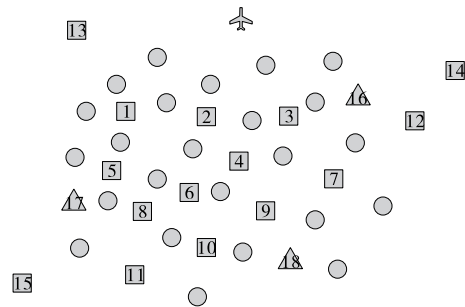
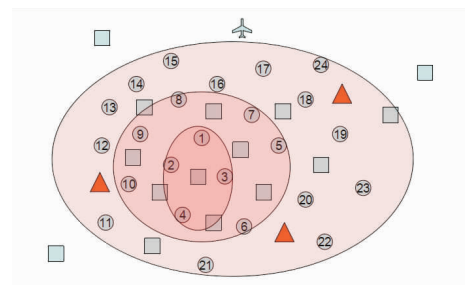


图2 算例总体示意图



1~4代表核心区域,5~10代表次核心,11~24为非核心区域。

图3 交通小区编号

表 1 各交通小区日平均出行需求量 人

交通小 区编号	机场巴士 出行需求量	交通小 区编号	机场巴士 出行需求量	交通小 区编号	机场巴士 出行需求量	交通小 区编号	机场巴士 出行需求量
1	3 561	7	3 222	13	1 919	19	1 746
2	3 329	8	3 124	14	1 407	20	1 488
3	3 785	9	3 038	15	1 625	21	1 543
4	3 345	10	3 286	16	1 609	22	1 718
5	2 806	11	1 710	17	1 421	23	1 796
6	2 980	12	1 611	18	1 412	24	1 475

表 2 交通小区到各机场节点的时间 min

交通小 区编号	交通小区到下列机场节点的时间									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	15	10	15	10	15	10	20	15	15	15
2	15	15	20	15	10	10	25	10	15	15
3	20	20	20	15	15	10	25	10	15	10
4	20	15	15	10	15	10	15	15	10	10
5	25	15	10	10	25	15	10	20	10	15
6	25	20	20	15	20	15	15	20	10	10
7	20	10	10	10	20	15	15	20	15	20
8	10	10	20	15	15	15	25	20	20	25
9	10	15	25	20	10	15	30	15	25	20
10	30	20	25	20	10	15	30	10	25	15
11	20	15	25	25	15	20	30	10	25	20
12	15	20	25	25	10	20	30	15	25	25
13	10	20	25	25	15	20	30	20	25	30
14	10	25	25	20	15	20	30	20	25	30
15	15	15	25	20	20	20	30	25	25	30
16	15	10	15	15	20	20	20	20	20	25
17	20	15	10	15	25	20	20	25	20	30
18	25	20	10	15	30	20	15	25	20	25
19	30	20	10	15	30	20	10	30	15	25
20	30	20	15	15	25	20	10	25	10	15
21	25	25	25	20	30	20	25	20	15	10
22	30	25	20	20	30	25	15	30	15	15
23	30	25	15	20	30	25	10	30	15	25
24	25	25	10	20	30	25	20	30	25	30

表 3 各机场节点到机场的距离 km

机场节点编号	距离	机场节点编号	距离	机场节点编号	距离	机场节点编号	距离
1	20	5	25	9	25	13	25
2	15	6	25	10	30	14	30
3	15	7	25	11	35	15	40
4	20	8	30	12	25		

假设交通小区到节点的人数具有随机性,到达时间最短的机场节点被选择的人数最多,时间最长的机场节点被选择的人数最少,为方便计算,定义为零。机场大巴客运需求量分布预测结果见表 4。

表 4 机场大巴客运需求量分布预测结果人

交通小区编号	下列机场节点的客运需求量									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	297	594	297	594	297	594	0	297	297	297
2	333	333	166	333	499	499	0	499	333	333
3	210	210	210	421	421	631	0	631	421	631
4	0	257	257	515	257	515	257	257	515	515
5	0	295	443	443	0	295	443	148	443	295
6	0	186	186	373	186	373	373	186	559	559
7	0	716	716	716	0	358	358	0	358	0
8	625	625	208	417	417	417	0	208	208	0
9	528	396	132	264	528	396	0	396	132	264
10	0	329	164	329	657	493	0	657	164	493
11	180	270	90	90	270	180	0	360	90	180
12	269	179	90	90	358	179	0	269	90	90
13	480	240	120	120	360	240	0	240	120	0
14	352	88	88	176	264	176	0	176	88	0
15	325	325	108	217	217	217	0	108	108	0
16	230	345	230	230	115	115	115	115	115	0
17	142	213	284	213	71	142	142	71	142	0
18	74	149	297	223	0	149	223	74	149	74
19	0	184	368	276	0	184	368	0	276	92
20	0	129	194	194	65	129	259	65	259	194
21	91	91	91	182	0	182	91	182	272	363
22	0	115	229	229	0	115	344	0	344	344
23	0	120	359	240	0	120	479	0	359	120
24	123	123	492	246	0	123	246	0	123	0

参数设置如下: $\bar{v}=30\text{ km/h};C_b=1;C_c=10;$
 $J_{\min}=2;J_{\max}=5;\lambda_j=300;Q^h=150;f_{\min}=10;f_{\max}=60;\alpha=0.6$ 。利用 MATLAB 软件编程求解,结果见表 5 和图 4。

4 结语

该文主要考虑机场大巴与民航的衔接,建立了机场大巴营运网络设计双层规划模型,上层以乘客出行成本最低和机场大巴营运企业盈利最大为目标

表 5 路线计算结果

路线编号	求解结果	发车频率 $f/(\text{趟} \cdot \text{d}^{-1})$
1	1—5—17	35
2	3—7—18	43
3	16—12	21

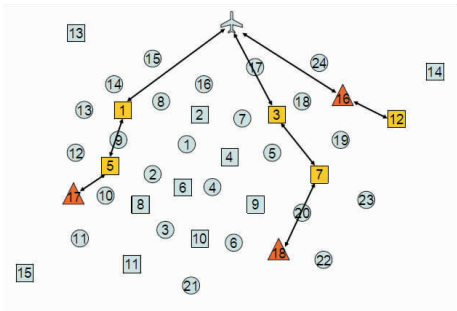


图 4 路线计算结果示意图

函数,以总流量、节点容量、节点个数及发车频率为约束条件,下层为客流分配。利用遗传算法求解该模型,经过多次循环代入确定计算结果,并以简单算例进行了说明。

参考文献:

- [1] 周一鸣,连嘉,吴晓.枢纽机场与腹地城市地面衔接研究[J].公路交通科技:应用技术版,2012(10).
- [2] 郝凯冰,徐阿鹏.基于机场的综合客运枢纽换乘需求与组织分析[J].交通信息与安全,2012,30(2).
- [3] Tom V M, Mohan S. Transit route network design using frequency coded genetic algorithm[J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(2).
- [4] Petrelli M. A transit network design model for urban areas[A]. Urban Transport X: Urban Transport and the Environment in the 21st Century[C]. 2004.
- [5] Y Lee, V R Vuchic. Transit network design with variable demand[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(1).
- [6] Shrivastava P, O Mahony M. A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules: a genetic algorithms approach[J]. Transport Policy, 2006, 13(5).
- [7] Kuan S N, Ong H L, Ng K M. Solving the feeder bus network design problem by genetic algorithms and ant

colony optimization[J]. Advances in Engineering Software, 2006, 37(6).

- [8] Ciaffi F, Cipriani E, Petrelli M. Feeder bus network design problem: a new metaheuristic procedure and real size applications[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 54.
- [9] 司徒炳强, 靳文舟. 合作与竞争条件下公交网络发车时间优化模型[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6).
- [10] 戴帅, 陆化普, 胡启洲. 基于一体化的多层次公交线网优化研究[J]. 数学的实践与认识, 2011(1).
- [11] 刘文驰, 张建同, 王世进. 弹性需求下城市公交网络服务的优化[J]. 运筹与管理, 2012(2).
- [12] 刘海旭. 拥挤公交网络的出行费用可靠性[J]. 交通运输工程与信息学报, 2014, 12(1).
- [13] 杨阳梅. 高铁—公路旅游客运衔接网络设计模型与算法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- [14] 周筱兰. 临空经济与地区发展的空间关系研究: 以浦东机场周边地区为例[J]. 上海城市规划, 2011(4).

收稿日期: 2016-04-28

(上接第7页)

指标也有所改善, 是一个有效的优化方案。

参考文献:

- [1] 高晋, 牛子孺, 杨路, 等. 扭转梁悬架衬套安装角度与操稳性能协同优化[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2014, 37(7).
- [2] 刘艳华. 轿车扭力梁后悬架的研究与开发[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2006, 18(4).
- [3] Sista P, kang H T. Twist beam suspension design and analysis for vehicle handling and rollover behavior[R]. SAE Technical Paper, 2010.
- [4] Leal V, Landre J, Bitencourt R. Twist beam rear suspension-influences of the cross section member geometry in the elastokinematics behavior[R]. SAE Technical Paper, 2007.
- [5] Janarthanam B, Ghodekar S, Apte A. Virtual development of optimum twist beam design configuration for a new generation passenger car[R]. SAE Technical Paper, 2007.
- [6] 江浩斌, 李超, 徐兴, 等. 扭转梁式后悬架结构参数对侧倾振动影响[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012, 31(5).
- [7] 高晋, 牛子孺, 杨路, 等. 悬架控制臂液压衬套与整车平顺性关联分析[J]. 公路交通科技, 2015, 32(4).

- [8] 秦玉英, 桂军, 孙明浩, 等. 基于 ADAMS 的汽车平顺性建模仿真及优化[J]. 辽宁工业大学学报: 自然科学版, 2014, 34(1).
- [9] 邓小强, 邓雄志, 邱俊杰, 等. 汽车悬架橡胶衬套刚度特性分析方法的研究[J]. 客车技术与研究, 2016, 38(4).
- [10] 赵亮, 晏海军, 郭孔辉. 某扭转梁后悬架侧倾刚度的解算与优化[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(5).
- [11] 赵振东, 雷雨成, 袁学明. 汽车悬架橡胶衬套刚度的优化设计[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(2).
- [12] 《汽车工程手册》编辑委员会. 汽车工程手册: 设计篇[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [13] 侯广全, 刘浩, 何辉, 等. 基于负刚度理论的悬架系统设计及整车平顺性仿真分析[J]. 辽宁工业大学学报: 自然科学版, 2013, 33(1).
- [14] 李莉. 基于 ADAMS/Car 的某轿车平顺性仿真分析与改进[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [15] 赵亮, 晏海军. 基于多目标遗传算法的扭转梁式后悬架分析与设计[J]. 中国机械工程, 2014(20).
- [16] 陈无畏, 李欣冉, 陈晓新, 等. 车辆悬架中高频振动传递分析与橡胶衬套刚度优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10).
- [17] 王想亭. 某 SUV 整车平顺性的仿真分析及悬架参数优化[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2011.

收稿日期: 2016-09-19