

文章编号: 2095-2163(2020)01-0200-04

中图分类号: U8

文献标志码: A

基于多目标时隙优化模型在地面等待策略上的研究

张虹, 熊静, 张文成, 严宇

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

摘要: 如今当产生目的机场流量不足的情况时, 航班通常实行地面等待策略, 然而地面等待的核心是时隙分配, 现在对时隙分配的研究上主要集中于建立单目标优化模型, 但是这并不能满足时隙的效率性和公平性, 所以本文在此基础上建立了基于航空公司延误成本最少和航空公司平均延误最少的多目标优化模型, 并利用改进的模拟退火算法进行求解, 最终结果表明利用本文模型相对于RBS模型得到的结果可以初步满足时隙的效率性和公平性。

关键词: 多目标; 时隙分配; 效率性; 公平性

Research on ground waiting strategy based on multi-objective time slot optimization model

ZHANG Hong, XIONG Jing, ZHANG Wencheng, YAN Yu

(School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] Nowadays, when the flow of the destination airport is insufficient, the flight usually adopts a ground waiting strategy. However, the core of the ground waiting is the time slot allocation. Now the research on time slot allocation mainly focuses on establishing a single target optimization model, which does not meet the efficiency and fairness of the time slot. After that, this paper establishes a multi-objective optimization model based on the minimum cost of airline delays and the minimum average delay of airlines, and uses the improved simulated annealing algorithm to achieve the solution. The final result shows that the results obtained by the model relative to the RBS model can initially satisfy the efficiency and fairness of the time slot.

[Key words] multi-target; time slot allocation; efficiency; fairness

0 引言

现如今随着经济的发展, 航空运输需求不断增长, 航班延误也时有发生。航班延误不仅给旅客带来不便, 也给航空公司等带来巨大的损失, 而当目的机场产生容量不足这一情况时, 将空中等待转化为地面等待, 实行地面等待策略是如今的一大研究热点, 地面等待策略的核心是时隙分配, 时下国内外对时隙分配的研究主要局限于对时隙的公平性进行考虑, 在充分考虑公平性的情况下忽视了时隙的效率性。

1987年, Odoni^[1]首次系统地阐述了空中交通流量问题的研究领域、基本概念和主要问题, 提出了重新安排飞机起飞时间以使拥挤成本最小化的思想。1989年, Terrab等人^[2]将单机场确定型模型转化成了网络流模型, 提出用最小费用流来求解模型。1994年 Odoni等人^[3], Varanas等人^[4]对地面等待的实时性问题和多机场受限的地面等待问题进行了研究, 建立了著名的VBO模型。

20世纪90年代, 胡明华等人^[5]针对中国空域

情况首次对地面等待策略进行研究。稍后, 胡明华等人^[6]还对多元地面等待策略下时隙分配进行研究, 建立了以降低延误成本为决策目标的数学模型。接下来, 胡明华等人^[7]又在简单网络规划模型的基础上改进成本函数构造了改进的网络流规划模型。此后, 董云龙^[8]剖析了地面等待程序中公平性的重要性, 改进了初始分配算法, 提出了PRA算法, 也就是二次整数规划算法。

综上所述可知, 目前对时隙分配的研究主要集中在对时隙的初次分配, 对于时隙的初次分配多是考虑时隙的公平性或效率性, 鲜少有文献基于时隙的公平性和效率性建立多目标优化模型, 对时隙的公平性和效率性同时加以考量, 让时隙在初次分配时初步达到时隙的公平性和效率性。本文即在此基础上建立了基于公平性和效率性的多目标优化模型, 并运用模拟退火算法进行求解, 可以让优化目标初次达到时隙的效率性和公平性。

1 多目标时隙优化模型

本文主要建立基于航班总延误成本最低和航空

作者简介: 张虹(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划管理。

通讯作者: 熊静 Email: 1374698715@qq.com

收稿日期: 2019-09-19

公司平均延误成本最低的多目标优化模型, 其中求解多目标优化模型的方法有很多, 但本文主要使用权重法将多目标模型转化为单目标优化模型进行求解, 如下所示:

$$\min T(X) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x), \quad (1)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1, \quad (2)$$

其中, λ_1 和 λ_2 表示 2 个目标函数的系数权重, 本文为了保证两模型的公平性, 分别将两权重系数都设置为 0.5。

式(1)中, $f_1(x)$ 指的是航班总延误最低, 主要模型可表示为:

$$f_1(x) = \min \sum_{i \in F} \sum_{j \in N} C_{ij} X_{ij}, \quad (3)$$

$$C_{ij} = (a_i^{xy} + a_i^{yl} + a_i^{lk})(t_j - ota_i) + p, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in F} X_{ij} = 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} X_{ij} = 1 \quad j \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (6)$$

$$x_{ij} \in (0, 1), \quad (7)$$

其中, F 是所有航班的集合; N 是所有可用时隙的集合; i 是所有航班集合中的某一航班; j 是所有时隙集合中的某一时隙; C_{ij} 是将某一时隙 t_j 指派给航班 f_i 上所延误的损失; X_{ij} 是如果将某一时隙 t_j 指派给航班 f_i 时, $X_{ij} = 1$, 否则为 0; a_i^{xy} 是该飞机机型单位时间内的运营成本; a_i^{yl} 是航班 f_i 单位时间内的盈利损失, $a_i^{yl} = n_i * p_i * \rho / h_i$, 而且 n_i 是航班 f_i 上的旅客数量, p_i 是平均票价, ρ 是航空公司利润率, h_i 是该航班预计飞行的小时数; a_i^{lk} 是航班 f_i 的旅客单位时间延误经济损失, $a_i^{lk} = n_i * l_i$; l_i 是每名旅客单位时间的平均延误成本; t_j 是分配给航班的时隙起始时间; ota_i 是航班 f_i 的初始时刻表起飞时间; $t_i - ota_i$ 指的是航班 i 的延误时间; p 表示隐性成本, $p = n_i * p_i * [\frac{1}{11} * k * (t_i - ota_i) + 0.4]$; $\sum_{i \in F} X_{ij} = 1$ 指的是每一个航班只有一个时隙与之匹配; $\sum_{j \in N} X_{ij} = 1$ 指的是每个时隙有且只有一个航班与之匹配; $x_{ij} \in (0, 1)$ 指的是 x 只能取 0 或者 1。

相应地, 式(1)中的 $f_2(x)$ 指的是航空公司平均延误成本最低, 主要模型如下所示:

$$f_2(x) = \min \sum_{A \in A'} \left(\frac{\sum_{i \in F_A} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij}}{|F_A|} - \frac{\sum_{i \in F} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij}}{|F|} \right)^2, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in F} X_{ij} = 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (9)$$

$$\sum_{j \in N} X_{ij} = 1 \quad j \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (10)$$

$$x_{ij} \in (0, 1), \quad (11)$$

其中, $\frac{\sum_{i \in F_A} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij}}{|F_A|}$ 表示航空公司 A 的延误成本,

$\frac{\sum_{i \in F} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij}}{|F|}$ 表示航空公司 B 的延误成本。

研究可知, 式(8)主要是利用方差最小化来体现航空公司的公平性。方差公式为:

$$D(X) = E\{[X - E(X)]^2\}. \quad (12)$$

方差是用来衡量一组数据离散程度的统计量, 方差越大, 离散程度越大; 方差越小, 离散程度越小。所以用方差来衡量公平性的话, 方差越大, 数据越离散, 各航空公司的平均延误时间越不接近总航空公司延误时间, 公平性差; 方差越小, 数据的离散程度小, 各航空公司的平均延误时间越接近总航空公司延误时间, 公平性越好。

2 模拟退火算法研究与应用

模拟退火算法是模仿自然界退火现象而得, 利用了物理中固体物质的退火过程与一般优化问题的相似性, 就是从某一初始温度开始, 伴随温度的不断下降, 为了避免陷入局部最优采用了 Metropolis 准则, 最终使得算法收敛于全局最优。模拟退火算法的计算步骤可做设计表述如下:

Step 1 初始化。任选初始解, $i \in S$, 给定初始温度 T_0 , 终止温度 T_f , 令迭代指标 $k = 0$, $T_k = T_0$ 。

Step 2 随机产生一个领域解, $j \in N(i)$, ($N(i)$ 表示的领域) 计算目标值增量 $\Delta f = f(j) - f(i)$ 。

Step 3 $\Delta f < 0$, 令 $i = j$ 转 Step 4 (j 比 i 好, 无条件转移); 否则产生 $\varepsilon \in (0, 1)$, 若 $\exp(-\Delta f / T_k) > \varepsilon$, 则令 $i = j$ (j 比 i 好, 有条件转移)。需特别指出, T_k 高时, 广域搜索; T_k 低时, 局域搜索。

Step 4 若达到热平衡 (内循环次数大于 $n(T_k)$), 转 Step 5, 否则转 Step 2。

Step 5 $k = k + 1$, 降低 T_k , 若 $T_k < T_f$ 停止, 否则转 Step 2。

上述是模拟退火算法的基本步骤, 但模拟退火算法的地面等待策略时隙分配的运用中, 研究推得的设计步骤可详述如下:

Step 1 输入一个 $n * n$ 的成本矩阵 (n 和参与的时隙数量相同)。

Step 2 由于算法在时隙分配的应用中生成的解是一个向量,因此领域的产生,是通过随机调换这个向量中的任意两个位置,从而得到可行解。

Step 3 解的接受与淘汰。在得到一个新解时,将新的解与当前解作比较,相减得到 Δf ,若 $\Delta f < 0$ (本文是以最小化为例),说明得到的新解相对于原始的解是更优化的,则当前值将被新解所取代;相反若 $\Delta f > 0$,首先看新解所得出的适应度函数值的接收概率是否大于一个 0~1 之间的随机数。若大于则接收该并不是最优的新解,若小于则舍弃该解,重新生成新解。

Step 4 终止条件。在内循环中设置一个 Metropolis 链,当内循环次数达到 Metropolis 链所设置的次数时则跳出,外循环通过降低初始温度,当最终的温度小于设置的最低温度值时则跳出外循环,循环结束。

3 算例验证

本文研究拟运用上海虹桥机场某天上午航班进场的航班时刻表的原始数据作为仿真数据,其中主要涉及到 2 个航空公司的 11 个航班,仿真数据见表 1。

表 1 数据验证表

Tab. 1 Data validation table

序号	航班号	航空公司	OSTD	类型	最大载客人数
1	MU4762	MU	2:00	H	236
2	MU4413	MU	2:05	M	162
3	CZ6981	CZ	2:05	H	223
4	MU5805	MU	2:10	M	189
5	CZ9343	CZ	2:15	H	236
6	MU2386	MU	2:15	M	150
7	CZ9062	CZ	2:20	H	250
8	CZ3539	CZ	2:25	H	242
9	MU9514	MU	2:30	M	162
10	CZ3557	CZ	2:35	H	220
11	MU722	MU	2:40	H	220

由表 1 可知航班时刻表从进场的 2:00 开始直到 2:40 结束,当流量下降为 10 min/架次时,利用 RBS 算法得到时隙的初次分配结果,详见表 2。

研究中,根据前文求得的 RBS 算法下航班时刻表,利用上述建立的多目标优化模型求解航班的总延误成本、各航空公司平均延误成本,得到结果见表 3。

由表 3 可知在 RBS 算法的基础上,总的延误成本较高,因此 RBS 算法的时隙排序方案并不是最佳排序方案。接下来,研究中将利用模拟退火算法对

上述多目标优化模型进行求解。最终求得的结果见表 4。

表 2 RBS 算法下时隙分配表

Tab. 2 Time slot allocation table under RBS algorithm

序号	航班号	航空公司	OSTD	类型	最大载客人数	RBS 初次分配
1	MU4762	MU	2:00	H	236	2:00
2	MU4413	MU	2:05	M	162	2:10
3	CZ6981	CZ	2:05	H	223	2:20
4	MU5805	MU	2:10	M	189	2:30
5	CZ9343	CZ	2:15	H	236	2:40
6	MU2386	MU	2:15	M	150	2:50
7	CZ9062	CZ	2:20	H	250	3:00
8	CZ3539	CZ	2:25	H	242	3:10
9	MU9514	MU	2:30	M	162	3:20
10	CZ3557	CZ	2:35	H	220	3:30
11	MU722	MU	2:40	H	220	3:40
总延误时间						350

表 3 RBS 算法下航班延误损失表

Tab. 3 Flight delay loss table under RBS algorithm

序号	航班号	航空公司	OSTD	类型	最大载客人数	RBS 方法	
						OSTD	延误成本
1	MU4762	MU	2:00	H	236	2:00	0
2	MU4413	MU	2:05	M	162	2:10	1 029
3	CZ6981	CZ	2:05	H	223	2:20	4 289
4	MU5805	MU	2:10	M	189	2:30	4 642
5	CZ9343	CZ	2:15	H	236	2:40	7 464
6	MU2386	MU	2:15	M	150	2:50	6 798
7	CZ9062	CZ	2:20	H	250	3:00	12 486
8	CZ3539	CZ	2:25	H	242	3:10	13 698
9	MU9514	MU	2:30	M	162	3:20	10 294
10	CZ3557	CZ	2:35	H	220	3:30	15 567
11	MU722	MU	2:40	H	220	3:40	16 982
总延误成本						350	93 249
CZ 延误成本						185	53 504
MU 延误成本						160	39 745
CZ 平均延误成本							10 700
MU 平均延误成本							6 624

由表 4 可知,利用模拟退火算法对多目标优化模型进行求解后得到总的延误成本为 82 872。CZ 航空公司和 MU 航空公司的延误成本分别为 37 450 和 45 422,相对于 RBS 算法对时隙分配得到的延误成本都有所下降。最终运算结果见表 5,研究对比结

果绘制如图 1 所示。

表 4 模拟退火算法下的多目标时隙分配表

Tab. 4 Multi-target time slot allocation table under simulated annealing algorithm

序号	航班号	航空公司	OSTD	类型	最大载 客人数	模拟退火算法		
						OSTD	延误成本	
1	MU4762	MU	2:00	H	236	2:00	0	
2	MU4413	MU	2:05	M	162	3:30	17 499	
3	CZ6981	CZ	2:05	H	223	3:00	15 727	
4	MU5805	MU	2:10	M	189	2:10	0	
5	CZ9343	CZ	2:15	H	236	2:40	7 464	
6	MU2386	MU	2:15	M	150	3:10	10 682	
7	CZ9062	CZ	2:20	H	250	2:20	0	
8	CZ3539	CZ	2:25	H	242	2:30	1 522	
9	MU9514	MU	2:30	M	162	3:40	14 411	
10	CZ3557	CZ	2:35	H	220	3:20	12 737	
11	MU722	MU	2:40	H	220	2:50	2 830	
总延误成本							82 872	
CZ 延误成本							37 450	
MU 延误成本							45 422	
CZ 平均延误成本							7 490	
MU 平均延误成本							7 570	

表 5 计算结果对比

Tab. 5 Comparison of calculation results

	总延误 成本	MU 延误 成本	CZ 延误 成本	MU 单个航班 延误成本	CZ 单个航班 延误成本
RBS	93 249	53 504	39 745	10 700	7 949
SA 多目标 优化	82 872	45 422	37 450	7 490	7 570

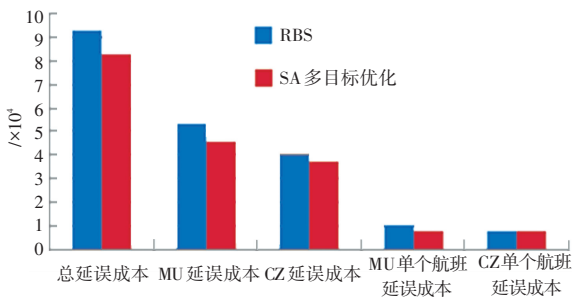


图 1 结果对比图

Fig. 1 Comparison of results

由表 5 和图 1 分析可知,利用模拟退火算法对多目标优化模型进行求解,相比 RBS 算法的求解在总延误成本上减少了 11.1%;在 MU 航空公司总延误成本上减少了 15.10%;在 CZ 航空公司的总延误成本上减少了 5.7%。并且 2 家航空公司的延误成本相对于 RBS 算法求得的延误成本更加平均。因此采用模拟退火算法对多目标优化模型进行求解在时隙的效率性上和公平性上都可以取得一定的优化效果。

4 结束语

本文主要研究了地面等待策略下基于时隙的公平性和效率性,建立了时隙多目标优化模型,并利用模拟退火算法对模型进行智能求解,最终结果相对于利用 RBS 算法求得的结果不仅是在总的延误成本上、还是各航空公司的平均延误成本上都有一定的优化。因此在时隙的初次分配上,利用模拟退火算法可以使得时隙初次分配达到效率性和公平性。

参考文献

[1] ODONI A R. The flow management problem in air traffic control [M]//ODONI A R, BIANCO L, SZEGÖ G. Flow control of congested networks. NATO ASI Series (Series F: Computer and Systems Sciences). Berlin: Springer-Verlag, 1987, 38: 269-298.

[2] TERRAB M, ODONI A, DEUTSCH O. Ground - holding strategies for ATC flow control[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Boston, MA: AIAA, 1989: 1636-1646.

[3] RICHTER O, ODONI A R. Dynamic solution to the ground-holding problem in air traffic control[J]. Transportation Research. Part A: Policy and Practice, 1994, 28(3): 167-185.

[4] VRANAS P B M, BERTSIMAS D, ODONI A R. Dynamic ground - holding policies for a network of airports [J]. Transportation Science, 1994, 26(4): 275-290.

[5] 胡明华, 徐肖豪. 空中交通流量控制的地面保持策略[J]. 南京航空航天大学学报, 1994, 26(S1): 26-30.

[6] 胡明华, 徐肖豪, 陈爱民, 等. 空中交通流量管理中的多元受限地面等待策略问题研究[J]. 航空学报, 1998, 19(1): 78-82.

[7] 胡明华, 李丹阳, 李顺才. 空中交通地面等待问题的网络流规划模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30(3): 104-108.

[8] 董云龙. 空中交通流量管理资源公平分配算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.