

多跑道机场离场航班 推出时刻的优化研究

魏 云 王莉莉

中国民航大学，空中交通管理学院，天津 300300

摘 要：针对繁忙机场场面拥挤造成的大量航班延误状况，作者研究了繁忙多跑道机场离场航班的推出时刻最优问题，以缓解机场场面拥挤，减少航班的地面等待时间和提高跑道利用率。根据飞机尾流间隔的要求以及跑道起飞容量的限制，本文建立了多跑道机场离场航班推出时刻模型，并针对机场小规模离场航班流量，设计启发式算法，并用算例进行仿真验证。结果表明，与先到先服务的推出时刻策略相比，经该算法优化后的航班总地面等待时间减少了近 41%，同时跑道利用率提高了 30%。

关键词：多跑道机场；离场推出时刻；启发式算法；跑道利用率

中图分类号：V355

文献标识码：A

文章编号：1672-4747 (2015) 02-0070-05

DOI:10.3969/j.issn.1672-4747.2015.02.013

Research on the Optimization of Launch Time of Departure Flights of Multi-runway Airport

WEI Yun WANG Li-li

College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China,
Tianjin 300300, China

Abstract : According to those problems caused the airport surface congestion and flight delays, the optimization problem of launch time on the sequencing of departure flights of a multi-runway airport was studied. Meanwhile, aimed to ease the situation of the airport surface congestion, reduce the waiting time of aircraft and improve the efficiency of runway operation, in view of the aircraft wake separation and runway capacity, a launch time model of departure flights on a multi-runway airport was built, and a heuristic algorithm was

收稿日期：2014-10-02.

基金项目：国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目（61179042）；

作者简介：魏 云（1989-），男，江西南昌人，中国民航大学空中交通管理学院硕士研究生，主要研究方向为多跑道机场航班排序，机场场面优化。

adopted to solve the problems. An example to verify the true or false of the model was taken. Results showed that, compared with the first come first service launch method, after simulation of this model, the total waiting time of flights reduced by nearly 41%, the runway utilization ratio increased by 30% at the same time.

Key words: Multi-runway airport, launch time of departure, heuristic algorithm, the runway utilization ratio

0 引言

随着我国民航事业的快速发展,航班流量的不断增加,航班延误问题正严重阻碍着我国民航事业又快又好的发展。根据美国联邦航空局的调查显示,美国有近84%的航班延误发生在机场场面,尤其是大型机场。根据美国航空运输协会的数据显示,2009年的美国航空延误费用达100亿美元,其中90%由于地面运行造成的。而我国国内的几个繁忙机场,航班延误问题也十分突出,尤其是在流量高峰时段。虽然国内很多大型机场都是多跑道,但机场容量的增加没能带来机场交通流量的较大增加,其中很大一部分原因是由于不合理的场面调度引起的场面拥挤造成的。因此,在有限的机场资源下,研究机场场面的调度优化问题,来提高资源利用率,进而提高机场交通流量显得十分迫切和必要。近年来,国内外学者对此做了不同层次的研究,从不同角度提出了多种解决方案。Gautam Gupta^[1]和 Andrea D'Ariano^[2]等对进离场航班的排序问题进行研究,但求出的解实时性不好。徐肖豪^[3]和李志荣^[4]等分别利用不同智能算法求解进离场航班排序问题,但这些算法都存在求解效率低且容易陷入局部最优解问题。H.Balakrishnan^[5]等研究了滑行道优化运行问题,并以真实机场仿真验证了其可有效减少航班滑行时间和排队序列。董莹^[6]等都分别对机场滑行道调度策略进行了研究,建立了滑行道优化模型。刘期建^[7]等研究了多跑道机场的跑道调度问题并设计了多目标和分阶段的调度算法。国内目前关于航班推出时刻的研究较少,王洁宁^[8]等基于有色Petri网对航空器推出建模,对航空器推出策略进行了研究。

基于以上研究,本文在研究多跑道离场航班排序

的基础上,考虑不同航班从各自停机位滑向跑道端的滑行时间不同,建立以总的地面等待时间最小为目标的离场航班推出时刻模型,设计了相应的启发式算法并进行算例仿真。

1 问题描述

在实际机场运行过程中,如果仅仅根据航班时刻表的预计起飞时间确定航班推出时刻,那不仅会造成整体航班延误量增大,使得机场运行效率低下,并且,由于场面拥挤带来的无谓等待时间所造成的航班燃油的消耗,既不经济也不环保,因此,研究航班推出时刻,得出合理的航班推出时间,不仅具有理论意义,也有十分重要的现实意义。

研究航班推出时刻,必须根据航班预计起飞时刻表,结合前后不同机型航班所必须满足的安全间隔的不同,得到最优的航班推出序列。根据国际民航组织(ICAO)规定,前后不同航班之间必须满足一定的安全间隔,将安全间隔转化为时间,得到前后各种机型航班的最小安全时间间隔,如表1所示。

表1 离场航班不同机型间的最小安全间隔 S_{ij} (单位: min)

Tab.1 The minimum safety separation of departure flights among different plane models (unit: min)

前机 i 类型	后机 j 类型		
	重型机(H)	中型机(L)	轻型机(S)
重型机(H)	1	1.5	2
中型机(L)	1	1.5	1.5
轻型机(S)	1	1	1

2 推出时刻模型建立与分析

假设离场航班全部在廊桥口等候推出,航班推出

过程是指航班从廊桥口推出一直滑至跑道端等待起飞的整个过程，见网格图1。

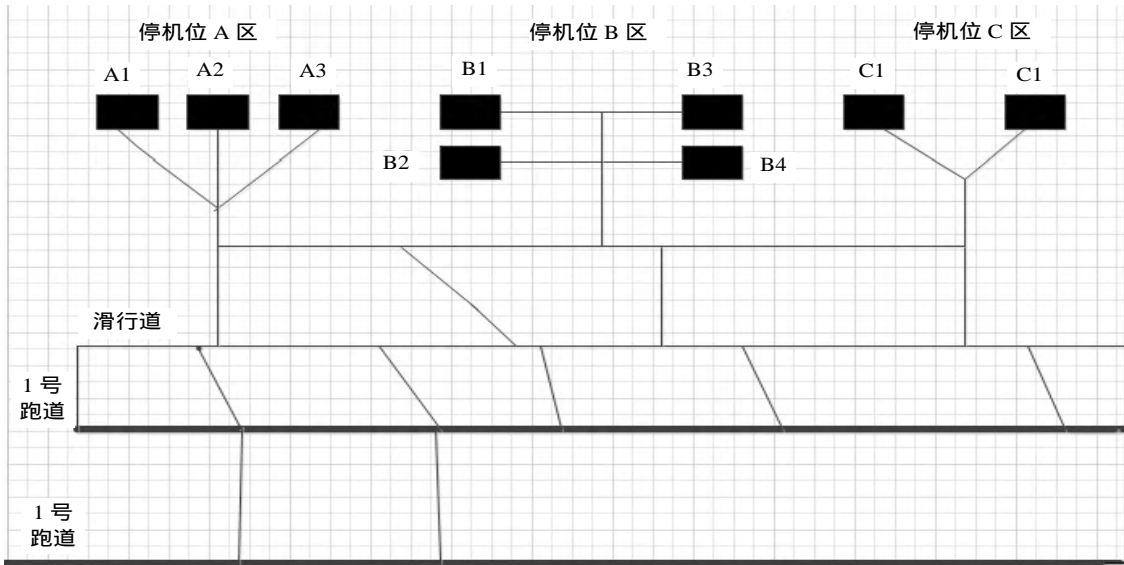


图1 离场航班推出过程网格图

Fig.1 Launched process grid figure of the departure flights

地面等待时间是指从关舱门开始直至实际起飞这段时间。一般情况下，关舱门时间与预计起飞时间是一样的，故在此使用预计起飞时间代替关舱门时间，即地面等待时间=实际起飞时间-预计起飞时间。假设某一繁忙机场高峰期离场航班架次为 N ， E_{ir} 表示航班 i 在跑道 r 的预计起飞时间， $r=1,2,\dots,R$ ； A_{ir} 表示航班 i 在跑道 r 的实际起飞时间， $r=1,2,\dots,R$ ； x_{ir} 表示航班对跑道的变量； y_{ij} 表示航班对航班的变量。

决策变量：

$$x_{ir} = \begin{cases} 1 & \text{航班 } i \text{ 分配到跑道 } r \text{ 起飞} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{航班 } i, j \text{ 分配到同一跑道起飞} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

则目标函数为：

$$z = \min \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^N (A_{ir} - E_{ir}) \quad (1)$$

约束条件为：

$$\sum_{r=1}^R x_{ir} = 1 \quad i=1,2,\dots,N \quad (2)$$

$$A_j - E_i = S_{ij}y_{ij} + D_{ij}(1 - y_{ij}) \quad i, j=1,2,\dots,N \quad i = j-1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ir} \leq M_r \quad (4)$$

式(2)表示每架航班有且只有一条跑道可以起飞；式(3)表示前后航班必须满足的安全间隔，前后两架航班 i 和 j 在同一条跑道起飞的间隔要大于等于 S_{ij} ，而前后两架航班 i 和 j 在同一条跑道起飞的间隔要大于等于 D_{ij} ；式(4)在跑道端等待起飞的航班数小于该跑道该时刻的起飞容量。

3 启发式算法设计

根据航班推出模型和求解思路，设计对应的启发式算法，步骤如下：

Step 1 选择推出时刻参考值。根据航班时刻表以及先到先服务原则，以航班的预计起飞时间作为航班的推出时刻参考值，得出航班总的地面等待时间 t_1 ；

Step 2 根据飞机不同机型的安全间隔，构造前后离场航班的安全间隔矩阵；

Step 3 根据前后不同机型航班的组合排列,得到各航班的离场次序,算出不同离场次序的总航班延误时间,确出航班总延误时间最少的离场次序 r_1 ;

Step 4 由于不同停机位距跑道端的距离不同,导致停靠不同停机位的各个航班滑至跑道端的滑行时间不同,即各航班的滑行时间数组,得到最终的航班离场次序 r_2 ;

Step 5 若出现推出时刻相同的情况,由于跑道起飞容量的限制,根据优先级原则,将优先等级低的航班往后延迟一个推出时刻,得到各航班最终的推出时刻。

4 算例仿真与分析

为了验证模型的准确性,下面采用成都双流机场运控部门提供的进离场航班数据进行仿真。成都双流机场为多跑道设置,设跑道数 $R=2$,由于还有进场航班,故起飞容量取 $M=2$ 。由于在实际运行过程中,前后两架在不同跑道起飞的航班,往往使用同一安全间隔 S_{ij} 。因此,本文算例仿真采用的安全间隔都是 S_{ij} ,即 $D_{ij} = S_{ij}$ 。选取某 15 分钟内的 10 架起飞航班,根据国际民航组织 (ICAO) 的规定,将飞机按机型分为重型 (H),中型(L),轻型 (S) 三类,且相邻两架不同机型航班的最小尾流安全间隔标准,可用 3×3 矩阵表示:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 1.5 & 2 \\ 1 & 1 & 1.5 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵中的单位为 min;行为前机 i ,列为后机 j 。

每架班延误如公式 (1) 所示。美国联邦航空管理局 (FAA) 对无障碍滑行时间是这样定义的:在最理想运行条件下,航空器在没有受到拥挤、气象和其他造成延误等因素影响时从停机位推出到起飞这一过程的滑行时间。故假设 10 架航班的起飞跑道,预计起飞时间以及各航班滑至跑道端的无障碍滑行时间已知,如表 2 所示:

表 2 航班预计起飞时间与跑道以及滑行时间 (单位: min)

Tab.2 Flight departure time and the runway and sliding time (unit: min)

航班号	机型	跑道号	预计起飞时间	滑行时间
CHH7855	H	2	10	5
CES2342	L	1	15	5
CES2295	H	1	6	2
CSC8801	L	1	6	6
CES2161	S	1	9	4
CES2305	H	2	6	5
OKA2851	H	1	15	5
CCA4184	H	1	6	5
CSC8843	H	1	6	4
CES2939	S	1	9	2

仿真的具体结果,见表 3,表 4。

表 3 利用 FAFS 算法计算的仿真结果 (单位: min)

Tab.3 Simulation results calculated with FAFS algorithm (unit: min)

航班号	预计起飞时间	跑道号	实际推出时刻	地面等待时间
CES2295	6	1	6.0	0.0
CSC8801	6	1	7.5	1.5
CCA4184	6	1	8.5	2.5
CSC8843	6	1	9.5	3.5
CES2305	6	2	6.0	0.0
CES2161	9	1	11.5	2.5
CES2939	9	1	12.5	3.5
CHH7855	7	2	7.0	0.0
CES2342	12	1	13.5	2.5
OKA2851	12	1	14.5	3.5

表 4 利用启发式算法计算的仿真结果

Tab.4 Simulation results calculated with heuristic algorithm

航班号	预计起飞时间	跑道号	实际推出时间	地面等待时间
CES2295	6	1	6.0	0.0
CSC8801	6	1	7.5	1.5
CES2161	9	1	9.0	0.0
OKA2851	12	1	10.0	-2.0
CHH7855	7	1	11.0	4.0
CES2305	6	2	6.0	0.0
CSC8843	6	2	7.0	1.0
CES2939	9	2	9.0	0.0
CES2342	12	2	10.0	-2.0
CCA4184	6	2	11.0	9.0

说明:航班 OKA2851 以及 CES2342 的地面等待时间为负值,表示这两个航班提前推出,其余航班按推出顺序推出。

本文用 FAFS 算法求得的航班总的地面等待时间为 19.5 min,而采用启发式算法求得的航班总的地面等待时间为 11.5 min,相比先到先服务原则 (FAFS 算法),采用该算法对离场航班的推出时刻进行优化,使得航

下转第 79 页

- 究[J]. 铁道运输与经济, 2012, 34(18): 47-50+66.
- [4] 吕红霞, 倪少权, 纪洪业. 技术展调度决策支持系统的研究——到发线的合理使用[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35 (3), 255-258.
- [5] 乔瑞军, 朱晓宁, 张天伟. 客运专线车站到发线运用多目标优化模型[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36 (3) : 57-64.
- [6] 李 琦. 高速铁路大型客运站到发线运用优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [7] 陈建鑫. 客运专线本站作业计划协同优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

(中文编辑: 吴继屏)

上接第 73 页

班地面总的等待时间减少了近 41% , 可以明显的减少航班地面等待时间, 同时跑道利用率提高了 30%。

5 结束语

本文研究了繁忙多跑道机场的离场航班推出时

刻问题, 在满足安全间隔和不同滑行时间的约束条件下, 设计推出时刻启发式算法, 求解出离场航班的最优推出时刻, 通过 matlab 仿真, 对该算法进行验证, 结果表明, 针对机场短时间小流量的离场航班, 本文建立的模型符合机场实际, 算法可行, 为以后对航班推出时刻的进一步研究作了一定的理论探讨。

参考文献

- [1] Gautam Gupta, Waqar Malik, Yoon C. Jung. A mixed integer linear program for airport departure scheduling[C]//Hilton Head, South Carolina: Proc. of 9th American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aviation Technology Integration and Operations Conference (ATIO), 2009.
- [2] Andrea D'Ariano. Paolo D'Urgolo, Dario Pacciarellietal. Optimal sequencing of aircrafts take-off and landing at a busy airport[C]//Madeira Island, Portugal: Proc. of 2010 13th International IEEE, Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, 2010.
- [3] 徐肖豪, 姚 源. 遗传算法在终端区排序中的应用[J]. 交通运输工程学报, 2004,4(3): 121-126.
- [4] 李志荣, 张兆宁. 基于蚁群算法的航班着陆排序[J]. 交通运输工程与信息学报, 2006,4(2): 66-19.
- [5] Simaiakis I., Balakrishnan H. . Queuing models of airport departure processes for emissions reduction[C]. Proc. of American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation and Control Conference, 2009.
- [6] 董 莹, 安 然. 机场航空器地面滑行时间优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(5): 141-146.
- [7] 刘期建. 多目标分阶段的跑道调度计划算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009 .
- [8] 王洁宁, 薛 鹏, 徐肖豪. 基于 CPN 的 Agent 建模及其用于航空器推出的分析[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(1): 187-190.

(中文编辑: 吴继屏)