

基于虚拟排序与航空公司自主决策的航班推出策略研究

胡德振

(中国航空无线电电子研究所,上海 200241)

[摘 要] 当机场场面出现拥堵时,新增的航班推出会增加机场的拥堵,同时增加燃油的消耗以及污染物的排放。提出了航班虚拟推出队列方法,以航班停机位等待代替航班滑行道排队等待,可以减少场面拥堵和污染物排放。在该方法的基础上提出了乘客等待时间最小及航班场面滑行成本最优的策略。仿真结果表明,对虚拟航班时隙的调整,可以降低旅客的等待时间、减少航空公司场面运行成本。

[关键词] 机场拥挤;离场队列管理;航班排序;推出率控制

[中图分类号]V355 [文献标识码]A [DOI 编码]10.12175/j.issn.1006-141X.2020.01.07

[文章编号] 1006-141X(2020)01-0039-06

Research on Flight Launch Strategy Based on Virtual Sorting And Airline Decision-making

HU De-zhen

(China National Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241, China)

Abstract: When the airport is congested, the new flight launch will increase the congestion of the airport, fuel consumption and the pollutants. In order to solve the problem, a method is proposed to construct a flight virtual launch queue, which makes the flight waiting in the flight stop instead of waiting for a flight taxiway in line. It can reduce airport surface congestion and pollutant emissions by this method. Based on the method, the strategy of minimum passenger waiting time and optimal cost of flight schedule is proposed. The simulation results show that the adjustment of the virtual flight time slot can reduce the waiting time of passengers and reduce the running cost of airlines.

Key words: airport congestion; departure queue management; flight sorting; pushback rate control

0 引言

随着民航运输需求的不断增长,空中交通量的持续增加,机场也变得愈发拥挤,尤其是在进离场高峰时段,场面交通拥堵矛盾尤为突出,主要表现为离场航空器“时走时停”、离场航班长时间在跑道等待,甚至出现滑行网络死锁导致的交通瘫痪等^[1],造成额外燃油消耗、成本增加、机场及周边环境的

持续污染。据统计,机场进离场地面运行过程占整个航行时间的 10%~30%,期间消耗共计有 5%~10%的航空燃油^[2]。

针对该问题,早期主要通过调整航班时刻表的方式^[3],降低离场航班流的波峰、波谷。即时策略方面主要集中于路径规划方面的研究,冯程、胡明华^[4]等采用滚动时域算法对航班的滑行路径进行优化,Idris 和 Clarke J P 等^[5]对飞机滑出过程中的各

种影响因素进行了分析和研究,王翀和汤新民等^[6]通过建立 Peri 网并使用场面管理系统对航空器动态最优滑行路径进行了规划。也有研究人员采用智能算法中的贪婪算法^[7]、改进蚁群算法^[8]、Agent 建模^[9]对航空器的推出时隙以及最优路径规划进行分析和研究。

推出率方面,Dipasis 和 David^[10]等基于机场地面交通探测系统(ASDE-X: Airport Surface Detection Equipment, Model X)各类监视数据对纽约肯尼迪机场建立了航空器虚拟推出队列,并分析和研究了航空器推出模型。侯文涛^[11]使用 SIMMOD 仿真工具对北京首都机场进行建模,并对繁忙时段的推出率控制进行了研究。赵焱飞、侯文涛等^[12]探索了离场航班滑行量与进场航班量、起飞率之间的关系,提出推出率控制策略及实现方法,采用 SIMMOD 仿真工具对北京首都机场进行建模分析。

推出率控制是一种解决场面滑行拥堵较为有效的策略,它将航空器在场面的滑行等待转化为停机位等待,航空器不撤轮挡、不启动发动机,缓解了场面拥挤并节约了燃油。本文设计了航空器协同的虚拟队列,航空器推出不仅由队列的长度阈值控制,还可根据排队航空器总成本最优及旅客等待时间最优动态调整控制飞机停机位等待时间。该策略

减少了场面滑行拥挤,降低了航空公司的运营成本以及旅客的等待时间。

1 机场场面运行

1.1 先到先服务

机场地面运行系统一般由起降飞机、跑道、滑行道以及停机位组成。机场离港航班一般运行流程为飞机在停机位进行状态检修、旅客登机流程,收到指令后推出进入滑行道运行至跑道入口端,收到起飞指令后便滑跑起飞。飞机起飞受场面滑行容量以及降落量的限制。机场场面运行流程如图 1 所示。

当前管制人员在对飞机场面运行进行管理时,一般忽略不同航班运行成本及延误时间差异,以先到先服务(FCFS: first come first service)为基本原

则,管理推出的飞机分别进入推出等待队列、场面滑行队列以及跑道滑行队列等待直至起飞,飞机在滑行道等待加剧了场面拥堵。本文考虑根据滑行道使用情况以及进离场航班需求,为管制员提供建议措施,在不同的时间段内实施不同的推出率,减少整体滑行等待时间。

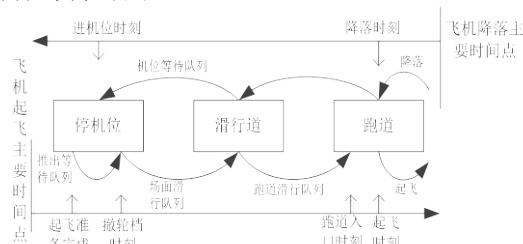


图1 机场场面运行图

1.2 虚拟推出队列

虚拟推出队列(CVQ: Collaborative Virtual Queuing)是一种协同离场排序方法^[10],该方法通过将已提交推出请求的航班放入一个虚拟队列中,实际航班仍然在原停机位等待,如图 2 所示。

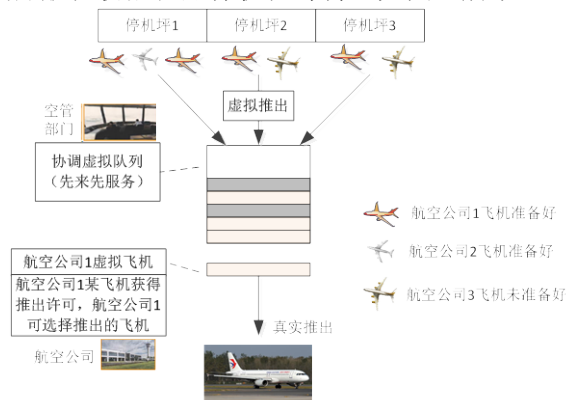


图2 虚拟队列基本运行流程图

当场面滑行航班滑行量低于推出率控制临界值时,排在队列前面的航班将被许可推出、滑行、起飞、离场。若出现跑道滑行拥堵等状况,则新申请推出的航班将仍留在停机位等待,并且将以虚拟飞机(VP: Virtual Plane)的形式在队列中增加一个包含航班信息及虚拟推出时间的时隙。基于机场协同决策(ACDM: Airport Collaborative Decision Making)思想,航空公司对其所属的航班时隙具有自由支配权,可以根据即将推出的时隙分配给虚拟队列中的任意航班。

由起飞离港创建的虚拟队列是对机场所所有跑

道均有效的航班推出队列。航班离场管理服务基本遵循了先到先服务的公平性原则, 但给予了航空公司所属的航班自由支配权, 可以通过虚拟队列方式间接参与航班离场运行, 航空公司对于离港航班推出具有较大的灵活性和滑行离场可预测性, 可根据实际情况调整重点保障的航班, 选择合适的推出方式。

2 推出时隙策略

2.1 运行效率最大化

从运行效率最大化的角度出发, 策略的优化目标为减少飞机停机位等待及排队轮候等待时间, 策略主要数学模型为:

$$\min(t_a) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{ij}^g w_{ij} \quad (1)$$

式中, t_a 为航空公司所属航班地面停机等待时间总和; t_{ij}^g 为航班 i 地面滑行及等待时间; w_{ij} 为时隙分配变量, 时隙 j 分配给航班 i 时为 1, 否则值为 0。

2.2 等待时间最短

等待时间最短策略以所有旅客平均等待时间最短为优化目标, 使旅客较多的航班优先推出, 旅客较少的航班延迟推出。该策略在航班出现大面积延误时, 航空公司为了缓解旅客焦急等待情绪, 减少群体性事件时可优先选择的航班推出策略。策略的数学模型为:

$$\min(t_p) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{ij}^g w_{ij} p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (2)$$

式中, t_p 为该航空公司所有旅客平均等待时间; p_i 为航班 i 的旅客数量。

2.3 运行成本最优

离港航班从舱门关闭开始, 地面运行流程一般包括停机位等待、推出、滑行、轮候以及起飞等过程, 相应产生了停机位等待和飞机推出时产生的副推进单元 (APU: Auxiliary Propulsion Unit) 油耗成本 c_i^{APU} 、飞机滑行和轮候期间的发动机油耗成本 c_i^{taxi} 以及停机位等待的延误成本 c_i^{delay} 。该策略数学模型为:

$$\min(\sum_{i=1}^n \epsilon_i \sum_{i=1}^n c_i^{APU} + \sum_{i=1}^n c_i^{taxi} + \sum_{i=1}^n c_i^{delay}) \quad (3)$$

其中,

$$c_i^{APU} = c_i^{apu} \times (t_{ij}^{gate} \sum_{j=1}^m w_{ij} + t_i^{push}) \quad (4)$$

式中, c_i^{apu} 为飞机 i 的单位时间油耗, 民航客机 APU 油耗为 1.5~2.1 kg/min; t_{ij}^{gate} 为飞机停机位等待时间; t_i^{push} 为从停机位到滑行道入口滑行所需的时间。

$$c_i^{taxi} = c_{pi}^{taxi} \times \sum_{j=1}^m w_{ij} t_{ij}^{taxi} \quad (5)$$

式中, c_{pi}^{taxi} 为飞机滑行单位时间油耗; t_{ij}^{taxi} 为航班的停机位-机坪滑行道滑行时间、机坪滑行道-普通滑行道-联络道-离港滑行队列的滑行时间、排队等待的滑行时间总和。

$$c_i^{delay} = c_{ti}^{delay} \times t_i^{delay} + c_{pi}^{delay} \times s_i \quad (6)$$

式中, c_{ti}^{delay} 是飞机单位时间的延误成本, 其值是飞机在占用停机的服务费用; t_i^{delay} 为航班 i 在停机位等待时间, 具体如表 1 所示; c_{pi}^{delay} 是因航班延误增加于服务旅客的成本, 具体如表 2 所示; s_i 为航班 i 的乘客数量。

表 1 延误增加的航班成本

飞机类型	最小时间间隔 (分钟)	延误成本 (元/分钟)
重型	6	6
重型	4	5
轻型	2	4

表 2 航班延误增加的旅客成本

延误时间 (分钟)	处理策略	延误费用 (元/人)
<30	无需处理	0
30~60	提供小食品等	2
60~240	提供小食品等	8
>240	下机、休息	-

2.4 航班推出策略分析

航班 FCFS 规则是相对公平的运行策略, 但在场面发生拥堵时其灵活性较差, 虚拟推出时隙基本遵循了 FCFS 规则, 将具体航班推出时隙交由航空公司进行支配。在场面发生严重拥堵时, 航空公司可选择旅客等待时间最短策略, 使乘客较多的航班先行推出, 乘客较少航班延后推出, 减少乘客拥堵滞留。场面出现一般拥挤时航空公司可选择航班运

行成本最优策略,该策略可通过对时隙的调整使得航空公司运营成本最优。航空公司从运营效率角度出发可选择运营效率策略,使得机场场面运行效率最高。

3 算例分析

3.1 算例策略选择

为验证算法有效性,本文根据某机场的实际运行情况对其空置率进行了仿真分析。在某期间内航班的小时平均起降量变化如图2所示。

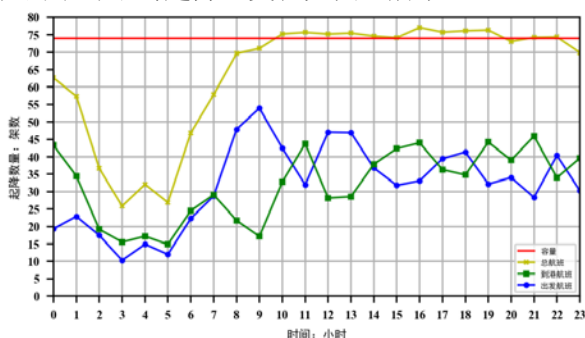


图2 某机场航班小时平均起降量图

从图2可以看出,自早上5点开始航班起降量急剧增大,直到夜晚11点航班容量开始下降。根据中国民航局公布的协调机场小时容量,机场的容量为74架次/小时^[13]。图2中水平横线即为规定的小时容量线,实际运行中平均每天12个小时超过规定容量,其容量峰值出现于下午14时,峰值约为78架次/小时。由图2可见,机场长时间处于超容量运行状态,但峰值容量变化量在规定容量的5%以内,在大部分时间内处于一般拥挤状态,本文以航空公司角度出发选择航班运行成本最优策略,同时兼顾旅客的利益,也将旅客等待时间最短策略目标策略之一。

由上文分析,式(3)是成本控制的目标函数,应存在航班延误时间约束条件:

$$t_{ij}^{gate} \leq 30 \quad (7)$$

同时还应存在如下约束条件:

$$\sum_{j=1}^m w_{ij} = 1 \quad (8)$$

式(7)为根据民航局关于航班延误规定^[14],航班延误超过30分钟,应向旅客通告航班动态信

息,因此本文增加了式(7)的时间约束。

式(8)是航班时隙唯一性的数学约束,即每一架飞机将只分配给一个时隙。

3.2 算法流程

针对机场场面运行优化,首先根据当前空域状况判断当前虚拟队列长度,未达到队列长度上限的可以直接推出,达到虚拟队列长度的航班在虚拟队列中进行排序等待,航空公司获得推出时隙后根据当前航空公司航班运行成本最优策略选择推出的航班,具体算法流程如图4所示。

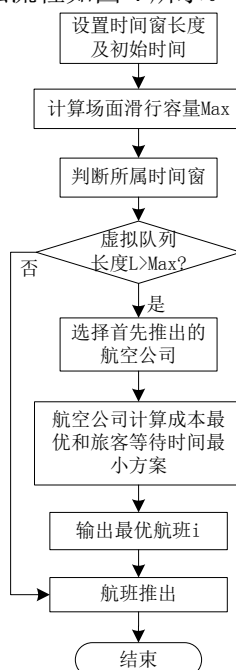


图4 算法运行流程图

图4中,虚拟队列长度由当前机场滑行容量上限决定,对起降数据分析使用Python对15分钟内不同到场量 $A(t)$ 、滑行道 $N(t)$ 和起飞量 $T(t)$ 采用3次多项式进行拟合,获得的机场场面滑行容量曲线如图5所示。

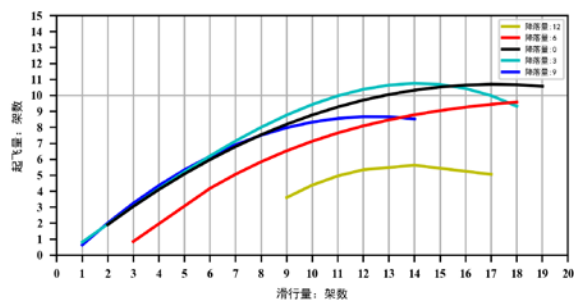


图5 不同降雨量下起飞量与滑行道关系图

由图 5 可知, 对于不同降落量, 对应可以起飞的飞机数量不同, 即可推出航班虚拟队列长度也不尽相同, 虚拟队列长度可简略为如表 3 所示。

表 3 不同的降落量下对应虚拟队列长度表

降落量: A	滑行量临界值(架)	虚拟队列长度(架)
0	16	11
1	16	11
2	15	11
3	13	11
4	15	10
5	15	10
6	15	9
7	14	9
8	13	9
9	12	8
10	12	7
11	12	6
12	12	5
13	12	5

3.3 模型求解

对于式 (3)~式 (8) 的求解是在多约束条件下, 以航空公司最小地面成本和旅客最少等待时间为目标的方程最优解, 目标的优化求解涉及多维数、多方程, 本文采用离散差分算法进行求解连续优化。差分进化算法是借助种群内个体差异性完成对种群空间的探索过程并最终得到最优解, 算法寻优过程中同时选用贪婪机制。

在算法中, 飞机推出时隙做为种群的个体, 首先随机生成飞机的初始时隙, 然后进行变异操作,

通过比较适应值, 选择合适个体进入下一代, 本文推出策略为航班推出成本最小与旅客等待时间最短的双目标优化, 因此变异交叉的个体需在两个目标同时变小时才允许进入下一代, 最后计算下一代分配的时隙目标函数计算判断是否满足需求并输出。该算法具体计算处理流程如图 6 所示。

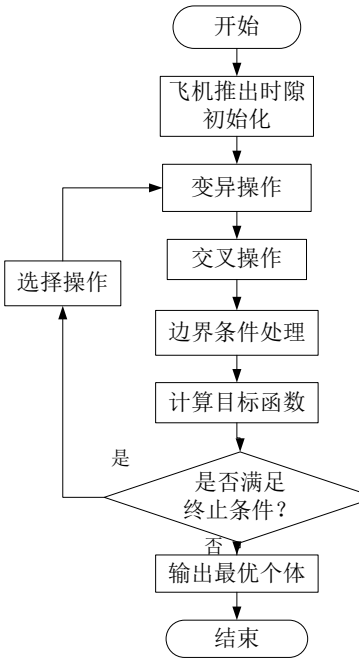


图 6 差分进化算法处理流程

仿真产生 30 组航班场面滑行的数据, 选取仿真产生的部分航班数据如表 4 所示。

表 4 部分仿真场面运行数据

序号	航班号	计划离港时刻	关舱门时刻	机型	乘客数量 (位)	t_i^{push} (分钟)	t_i^{taxi} (分钟)
1	A01	9:00	8:50	H	307	1.91	15.21
2	B01	7:30	9:27	M	125	2.37	12.37
3	C01	9:21	9:10	H	260	1.36	14.52

通过对离散差分算法进行时隙求解优化后, 对 FCFS 策略和本算法策略进行对比分析, 获得结果如表 5 所示。

根据表 5 优化结果, 与传统 FCFS 策略相比, 旅客平均等待时间缩短了 5.69%~8.69%, 航班的运

行成本平均节约 14.76%~22.42%, 相应航班在停机位等待时间则延长了 8.22%~9.66%, 在增加航班停机位等待时间的前提下, 通过增加虚拟队列对航班时隙优化调整可有效减少旅客的等待时间、降低航班的场面运行成本。

表 5 算法优化结果

航空公司	优化项	优化平均值 (分钟)	FCFS 项 (分钟)	优化比 (%)
A	旅客时间	44.15	48.36	8.69
	航班运行成本	8735	10231	14.62
	航班停机位等待时间	50.35	46.21	-8.22
B	旅客时间	59.64	63.24	5.69
	航班运行成本	15364	18911	18.76
	航班停机位等待时间	67.88	61.32	-9.66
C	旅客时间	51.32	55.62	7.73
	航班运行成本	23480	30264	22.42
	航班停机位等待时间	57.54	52.36	-9.01

4 结束语

本文通过对某机场实际运行情况的研究,提出可通过建立航班推出虚拟队列的方式减少场面滑行拥堵以及燃油消耗,同时航空公司可根据所属航班的运行状态选择合适的航班推出策略,以减少航班运行成本及旅客等待时间,并采用仿真数据进行了分析对比,验证了该方法的有效性。

本文从宏观角度给出航班推出的时隙分配方法,未考虑机场多跑道运行模式时不同跑道对时隙分配的影响。航班推出研究应综合考虑航班停机位不同、跑道不同等情况。另外,离散差分进化算法有时会获得多个近似最优解而陷入局部最优,这些均为后续研究方向。

参 考 文 献

- [1] 杨磊. 大型繁忙机场离场交通流拥堵特征分析[J]. 航空学报, 2016, 37 (6) : 1921-1930.
- [2] KHADILKAR H, BALAKRISHNAN H. Estimation of aircraft taxi fuel burn using flight data recorder archives [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2012, 17(7): 532-537.
- [3] BEATTY R, HSU R, BERRY L, et al. Preliminary evaluation of flight delay propagation through an airline schedule [J]. Air Traffic Control Quarterly, 1999, 7(4) : 259-270.
- [4] 冯程, 胡明华, 丛伟. 基于滚动时域算法的航班滑行路径优化模型 [J]. 航空计算技术, 2014, 44(4): 80-84.
- [5] IDRIS H, CLARKE J P, BHUVA R, et al. Queuing model for taxi-out time estimation [J]. Air Traffic Control Quarterly, 2002, 10(1): 1-22.
- [6] 王翀, 汤新民, 安宏锋. A-SMGCS 航空器动态最优滑行路径规划研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2012, 36(5): 1069-1073.
- [7] 陈世林, 胡明华. 一种新的基于贪婪法的 CDM 时隙分配最优化算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 10(10): 144-146.
- [8] 丁建立, 李晓丽, 李全福. 基于改进蚁群协同算法的枢纽机场场面滑行道优化调度模型 [J]. 计算机应用, 2010, 30 (4) : 1000-1007.
- [9] 唐勇, 胡明华, 黄荣顺, 等. 基于空闲时间窗和多 Agent 的 A-SMGCS 航空器滑行路由规划[J]. 航空学报, 2015, 36(5): 1627-1638.
- [10] DIPASIS B, DAVID A. K, BENJAMIN L. Benefits of virtual queuing at congested airports using ASDE-X: A case study of JFK airport [D]. Ninth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. 2011.
- [11] 侯文涛. 基于 SIMMOD 仿真的机场拥挤时段推出率控制策略研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2015, 26(1): 38-42.
- [12] 赵云飞, 侯文涛, 岳仁田. 基于推出率控制的机场拥挤管理策略研究 [J]. 科学技术与工程. 2014, 14(5) : 309-311.
- [13] 中国民用航空局. 关于公布协调机场航班时刻容量的通知 (局航明发 (2012) 1990 号) [Z]. 2012 -0 6 .
- [14] 中国民用航空局. 航班正常管理规定 (CCAR-300) [Z]. 2016 -0 5 .

[收稿日期] 2018-11-23