

基于优先级的航班到达调度算法

张 颢 刘宏志 赵巍飞

(中国民航大学天津市空管运行规划与安全技术重点实验室,天津 300300)

摘 要 随着空中交通流量的迅猛增长,终端区空中交通拥堵,以及由此导致的航班延误现象日益突出,甚至危及航空安全,航运效益也随之受到巨大的损失。作为终端区流量管理的核心,航班到达调度旨在为终端区待着陆的航班安排合理的着陆顺序和降落时刻,在确保安全的前提下提高进港航班运行效率。基于优先级思想,提出了PBSA和PBSA-CPS两种航班到达调度算法;并引入约束位置交换概念,以提高调度结果对于管制员的可操作特性。最后以首都机场为例进行了仿真,并与现行的先到先服务算法FCFS进行了对比。仿真结果表明,通过对航班赋予相应的优先级,有助于优化调配到达航班队列的降落时隙分配结果,提高终端区运行效率,减少延误损失。

关键词 航空运输 到达调度 优先级算法 空中交通流量管理

中图法分类号 V355.2; **文献标志码** A

随着航空运输业需求的迅猛增长,在繁忙机场,资源有限与交通流量快速增长的矛盾日益突出,导致航班延误与拥堵问题越来越严重,造成了大量的经济损失和不良的社会影响;且伴随着很大的安全隐患。

因此,空中交通流量管理越来越受到人们的重视。航班到达调度问题^[1](aircraft arrival scheduling problem, AASP)是空中交通流量管理中的核心问题之一。现行空管中,航班降落顺序通常是以先到先服务(first come first serve, FCFS)为准则,由管制员来进行调整的。而在航班数量较多时,这种方式会导致运行效率降低,管制员负荷增大,并容易产生安全隐患^[2]。航班到达调度问题可以简要描述为:对于终端区内等待降落在同一条跑道上的航班队列,在确保安全的前提下,为每一架航班分配一个优化的降落时隙,使得整个航班队列中的航班高效、有序降落;且给出的结果对于管制员是可接

受的。

针对此问题,国内外学者纷纷展开研究,方法层出不穷^[3-5]。与其他学者的研究方法不同, Milan^[6]从航班运行实际出发,将该问题归结为给一批到达的航班(在比较接近的时间段内到达的飞行器)制定优先级,优先级的制定考虑到了以下影响因素:旅客数量、乘客的延误费用,以及换乘旅客的比率。一旦航班的优先级确定以后,这些航班就按照优先级顺序来降落。这种方法最为直观并贴近现行先到先服务的运行模式,且易于应用。但该方法忽略了实际调度的复杂性,如航班无法在较大的范围内进行调整,单纯依照优先级来排序可能导致调度序列是无效的。

因此,在此基础上,提出基于优先级的航班到达调度算法,与 Milan 等人^[6]所提出方法不同的是,本文算法并不是按照优先级高低直接进行排序,而是依据优先级的高低,航班将获得降落时隙选择权顺序,按照顺位选择原则,来进行时隙分配,达到优化调度的目的;即优先级较高的航班将优先选择占用时隙。同时考虑到管制可操作性,引入约束位置交换概念^[7]限制优化前后航班次序的变化范围,以降低管制员工作负担。

2013年6月28日收到,7月25日修改 国家自然科学基金
(61039001)、国家科技支撑计划(2011BAH24B10)、中国民
航大学科研基金(2011kyE04)、中国民航大学科研启动基金
(2012QD04X)资助

第一作者简介:张 颢(1981—),男,博士,助理研究员。研究方向:
空中交通流量管理,优化与控制。E-mail: xiezhang@cauc.edu.cn。

1 航班到达调度问题

首先给出时隙 slot 的概念。时隙是某个机场某段时间内提供给航班的可用预定起飞或降落时间。机场在某个时间段时隙数量的多少取决于机场跑道的个数、当时天气以及能见度情况、机场终端区容量等条件^[8]。降落航班调度的核心问题是如何有效地分配时隙资源,从而达到最优化利用的问题。它可以描述为:某机场某时间段内有 m 架航班到达,且该时间段可以划分为 n 个时隙,我们需要为每架到达航班分配一个时隙供其降落;而由于不同航班在不同时隙降落所造成的代价亦不相同;因此,调度算法需要在所有可能的时隙分配方案中找到符合管制决策需求的一种最佳分配方案。

需要注意的是,AASP 的时隙分配针对已临近目的机场并等待降落的航班进行降落顺序及降落时刻的分配。由于 AASP 中航班已非常接近目的机场,加上终端区复杂的条件、以及航班自身的性能条件等问题,导致航班时隙分配的约束条件复杂、分配的自由度降低、实时调整难度加大。例如,鉴于终端区航班队列调整的难度因素,AASP 要求调度优化结果前后单架航班的位置移动不超过一定的范围,这样才能保证所得到的结果是可以被管制员所接受的。因此,AASP 中调度算法需要针对这些具体问题进行相应的设计。

2 调度算法设计

时隙的划分主要依据当时机场的容量,例如 13:00 到 14:00 期间,某机场容量为 12 架/h,则创建出 5 min 为一间隔的时隙:13:00, 13:05, 13:10, ...。在程序执行时间内不能安排降落的航班依次堆积在此后的时段中,直到所有航班都能降落为止。

由于机型的不同,以及各航班的重要程度不同,相同的延误时间会造成不同的延误损失;因此,总延误时间最小的调度方案与总延误损失最小的调度方案往往是不一致的。本文引入了航班优先级来表征航班在降落过程中的重要程度。

下面给出基于优先级的调度算法。

2.1 优先级调度算法 PBSA

集合 F1 表示等待调度的航班集合;

集合 F2 表示已调度完成的航班集合。

优先级调度算法(priority based scheduling algorithm, PBSA)对航班时隙的分配基于其优先级别的高低,与 Milan 方法不同的是, PBSA 并不是按照优先级高低直接进行排序,而是依据优先级的高低,航班将获得其时隙选择权顺序,按照顺位选择原则,来进行时隙分配,达到优化调度的目的,即优先级较高的航班将优先选择占用时隙。

PBSA 算法步骤描述如下:

1) 设 F2 为空集。

2) 若 F1 为空,转 5); 否则, F1 不为空,转 3)。

3) 选取待调度航班队列中优先级系数最高的航班(优先级系数相等时,按先到先服务原则确定选择权顺序),将其插入其预计降落时隙,若该时隙已被占用,则向后递推一个或多个时隙,直到找到空的降落时隙为止,插入该航班。

4) 更新待调度队列 F1 和已调度完成队列 F2, 转 2)。

5) 所有航班分配完毕,调度完成,输出调度队列,以及航班时隙分配情况。

2.2 改进的优先级调度算法 PBSA-CPS

PBSA 算法可以快速给出调度结果,但也存在一些问题。若某架航班的预计到达时间较早,但其优先级系数较低,则该航班拥有较低的时隙选择权顺序,不能优先选择理想的降落时隙,在交通拥塞严重的情况下,容易导致其最终降落时间与其预期值相去甚远,有失公平;另外,在空管实际运行中,大范围地调整航班队列,将导致管制员的调配难度,飞行员、管制员的工作负荷,潜在的飞行安全冲突风险概率大大增加。鉴于以上原因,我们引入约束位置交换(constraint position shifting, CPS)的概念^[7],将一架航班调度前后的位置交换范围约束在一定的区间内,使其在优化调度前后的位置差不会过大,这样既提高了调度的公平性,又保证了优化调度结果具有较强的可操作性,是易于接受的优化调度方案。

因此,本文提出一种带 CPS 约束的优先级调度

算法 (priority based scheduling algorithm with CPS constraint, PBSA-CPS)。以下对各部分进行详细介绍。

2.2.1 预分配时隙

按预计到达时间 (estimated time of arrival, ETA) 先将各航班依次填入降落时隙中 (以最早可能的时间填入, 在非高峰阶段可能出现时隙空闲的情况, 且当后续队列拥挤时, 可以提前后续队列的第一架航班来缓解后续队列的堵塞状况), 形成初始待调度队列, 及各航班的预分配时隙。

2.2.2 时隙占用区间

每架航班都有其预计到达时间, 依此预计到达时间来确定各航班可能占用的航班降落时隙, 此为一范围, 用区间表示 $[ETA, ETA + t_1]$, $ETA + t_1$ 为航班的最晚降落时间; 以 CPS 约束的定义, 航班的位置只能在其预分配时隙前后 k 个时隙位置里调整, 故可得到另一范围, 用区间表示 $[ETA - kslot, ETA + kslot]$; 将上述两个区间取交集, 得到的区间 $[ETA, \min\{ETA + t_1, ETA + kslot\}]$ 就是该航班可能占用的时隙范围。

另外, 如果设定航班可以提前, 提前量为 n 个时隙间隔。将上边的区间向左边扩展 n 个时隙长度, 得到一个新的区间 $[ETA - nslot, \min\{ETA + t_1, ETA + kslot\}]$, 就是该航班带有提前情况下可能占用的时隙区间。

2.2.3 时隙航班占用矩阵 P

定义一个 $N \times M$ 的矩阵, 行代表时隙、列代表航班, 称为时隙航班占用矩阵, 用 P 表示该矩阵。若 $N < M$, 待降落航班多于可用时隙, 表示此时终端区空域处于高峰堵塞状态; 若 $N > M$, 可用时隙多于待降落航班, 表示此时终端区空域处于非高峰状态; 若 $N = M$, 待降落航班与可用时隙数相等, 表示此时终端区空域处于临界饱和状态。矩阵中的元素有 3 种, 0、1、 p , 元素 P_{ij} 为 0 表示时隙 i 不能分配给航班 j , 航班 j 不能占用时隙 i ; 元素 P_{ij} 为 p 表示时隙 i 可以分配给航班 j , 航班 j 可以占用时隙 i ; 元素 P_{ij} 为 1 表示将时隙 i 分配给航班 j , 航班 j 占用时隙 i 。

由于一架航班不能同时占用两个时隙, 而一个时隙也不能同时分配给两架航班, 这就要求时隙航

班占用矩阵的各行、列最多只能包含一个非零元素, 因此, 原问题就转化为如何将初始分配所得到的时隙航班占用矩阵化为各行、列至多只有一个非零元素的矩阵。

由上, PBSA-CPS 算法步骤描述如下:

以预计到达时间得到各航班的预分配时隙; 结合 CPS 约束得到各航班可能占用的时隙区间;

将航班可能占用时隙区间的关系填入矩阵, 得到时隙航班占用矩阵 P ;

若有 $P_{ij} = p$ 且 $\sum_i P_{ij} = p$ 或 $\sum_j P_{ij} = p$, 将时隙 i 分配给航班 j , 航班 j 将占用时隙 i , 同时令 $P_{ij} = 1$, 转 5);

否则, 选取与当前时间最近未分配的降落时隙 i , 将其分配给待调度队列中可能占用该时隙的优先级系数最高的航班 j (优先级系数相等时, 按先到先服务原则确定优先顺序), 令 $P_{ij} = 1$;

更新时隙航班占用矩阵, 将矩阵中元素 1 所在行列其他的 p 置 0;

直到矩阵中没有 p 元素, 输出航班调度及时隙分配情况, 算法结束; 否则, 转 3)。

3 仿真与分析

以首都机场为例, 某天 12:00 ~ 12:20 时间段内的 10 架进港航班发生冲突, 时隙间隔为 2 min, 航班提前量为 1 个时隙, 各航班预计到达时间 ETA 、优先级系数 PC 见表 1, 实验采用现行的先到先服务算法 (FCFS) 以及本文提出的两种优先级调度算法 (PBSA、PBSA-CPS) 来对此 10 架航班进行降落排序和时隙分配, 调度结果如表 1 所示, 其中 1 206 表示 12:06 开始, 长度为 2 min 的时隙, $k = 2, n = 1$ 。

表 1 各列从左至右分别表示航班号、航班的预计到达时间 ETA 、优先级系数 PC 、FCFS 算法调度结果、PBSA 算法调度结果、PBSA-CPS 算法调度结果。这里的优先级系数 PC 受众多因素影响, 包括待调度航班的机型、业载、航班性质 (国内、国际、专机)、航班状态 (良好、航油不足/故障)、时间属性 (正点、延误)、航班任务 (单程、连续航班) 等, 本文的 PC 值是直接给出的, 关于优先级的确定方法将另撰文详细阐述。

表 1 原始数据与调度结果

航班号	ETA	PC	FCFS	PBSA	PBSA-CPS
HU7680	1 200	50	1 200	1 202	1 202
MU2101	1 200	80	1 202	1 200	1 200
SC8883	1 206	30	1 206	1 216	1 210
CA1509	1 206	100	1 208	1 206	1 204
CZ3151	1 208	30	1 210	1 218	1 214
KOR155	1 208	90	1 212	1 208	1 206
CA1202	1 208	60	1 214	1 212	1 208
MU2107	1 210	60	1 216	1 214	1 216
AFR128	1 210	90	1 218	1 210	1 212
CZ3159	1 212	30	1 220	1 220	1 218

从调度结果可以看出,两种优化算法充分体现了优先级这一特征,使得优先级较高的航班能够分到尽可能接近其预计降落时间的降落时隙。两种优化算法的区别在于,PBSA-CPS 算法考虑了调度结果的可行性以及航班间的公平性问题,加入 CPS 位移交换约束条件,使得优化结果具有较高的可操作性。

表 2 给出了三种算法的总延误时间、延误时间标准差以及总延误损失三个指标的对比。总延误损失 C 是集合 F 中所有航班的延误损失之和,由 (1) 式计算,其中 Δ 为单位延误损失。

$$C = \sum_{f \in F} PC_f | \varphi(f) - ETA_f | \Delta \tag{1}$$

延误时间标准差由 (2) 式可得。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{f \in F} (d_f - \bar{D})^2}{n}} \tag{2}$$

式 (2) 中 $d_f = | \varphi(f) - ETA_f |$ 表示航班 f 的延误时间, $\bar{D}$ 表示平均延误时间。

表 2 三种算法调度统计结果

算法	总延误时间 D/min	延误时间 标准差 σ	总延误损失 $C/\text{元}$
FCFS	38	2. 91	2 460 Δ
PBSA	38	3. 94	1 420 Δ
PBSA-CPS	22	2. 37	1 580 Δ

从表 2 可以看出,对于总延误时间来说: $D_3 < D_2 = D_1$, 即 PBSA-CPS 算法得到总延误时间在三种算法中是最小的;而对于延误时间标准差来说: $\sigma_3 < \sigma_1 < \sigma_2$, 同样还是 PBSA-CPS 算法性能最优;对于总延误损失来说: $C_2 < C_3 < C_1$, 即 PBSA 算法

得到的总延误损失最小。

PBSA 算法相比 FCFS 算法,在总延误时间相同的情况下,降低了总延误损失,但由于延误时间标准差的增加,使得公平性有所降低;由于充分利用了 1204 这个空闲时隙,相比前两种算法,PBSA-CPS 算法的总延误时间较小,并且在总延误损失与 PBSA 算法相当的情况下,减小了延误时间标准差,提升了算法的公平性。

4 结论

本文研究了基于优先级的航班进港调度问题,提出了 PBSA 和 PBSA-CPS 两种算法,并与现行的先到先服务 FCFS 算法进行了对比,通过对航班赋予相应的优先级达到了优化进港航班排序队列,减少延误损失的目的。

参 考 文 献

1 Andreussi A, Bianco L, Ricciardelli S. A simulation model for aircraft sequencing in the near terminal area. *European Journal of Operational Research*, 1981; 8(4):345—354

2 Eun Yeonju, Hwang Inseok, Bang Hyochoong. Optimal arrival flight sequencing and scheduling using discrete airborne delays. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010; 11(2): 359—373

3 徐肖豪,姚源. 遗传算法在终端区飞机排序中的应用. *交通运输工程学报*, 2004; 4(3): 121—126

4 Chandran B, Balakrishnan H. A dynamic programming algorithm for robust runway scheduling. *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, Marriott Marquis Hotel at Times Square New York City, USA, 2007;1161—1166

5 Zhan Zhihui, Zhang Jun, Li Yun. An efficient ant colony system based on receding horizon control for the aircraft arrival sequencing and scheduling problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010; 11(2):399—412

6 Milan J. The flow management problem in air traffic control: a model of assigning priorities for landings at a congested airport. *Transportation Planning and Technology*, 1997; 20:131—162

7 Balakrishnan H. Scheduling aircraft landings under constrained position shifting. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006;21—24

8 Dot Econ Ltd. Auction airport slots, a report for HM treasury and the department of the environment, transport and the regions. 2001

6 GB 50057—2010. 建筑物防雷设计规范. 北京:中国计划出版社,2010

8 黄沿波,梁 栋,康雅乔,等. 风险的三维评价方法. 自然灾害学报,2010;19(3):88—93

7 GB 50343—2012. 建筑物电子信息系统防雷设计规范. 北京:中国建筑工业出版社,2012

9 甘庆辉,许 薇,汤 强,等. 电气 - 几何模型在雷击风险评估中计算 Cd 值的应用. 气象与环境学报,2010;26(1):69—71

Research on the Selection Method of Factor A_m in the Evaluation of Lightning Disaster Risk

FENG He, TIAN Yan-ting, LI Xiao-long
(Hebei Protection Center, Shijiazhuang 050021, P. R. China)

[Abstract] The collection area of flashes striking near the structure (A_m) is one of the basic factors in the lightning risk assessment. The selection methods provided by standard IEC 62305—2 is widely used now, but this method does not consider the lightning environment of the project position and the project characteristics. So that the calculation result lack specificity. The hazard mode and extent of the lightning strikes nearby are analysed, and investigated the general method to determine the values of the parameters A_m according to engineering practice from the possible risks when lightning strike buildings, and draw a conclusion. Obtaining the parameters A_m should be quantitative calculated based on the analyzing the maximum distance of the lightning possibly striking the structure in order to ensure the orientation and the scientific of the calculation results. The lightning strike point near the building damage the internal electrical equipment in the form of lightning electromagnetic pulse, the extent of the injury relate to the thunderstorm current intensity the building scale and other protective measures.

[Key words] the lightning risk assessment factor A_m lighting electromagnetism induction lightning location data screening spatial

(上接第 10092 页)

Aircraft Arrival Scheduling Algorithm under Priorities

ZHANG Xie, LIU Hong-zhi, ZHAO Yi-fei*
(Tianjin Key Lab of Operation Programming and Safety Technology of Air Traffic Management,
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P. R. China)

[Abstract] With the rapid growth of air traffic flow, air traffic congestion and flight delays in terminal area have become increasingly prominent, and even endanger aviation safety. As one of the core contents of Air Traffic Flow Management (ATFM) in terminal area, Aircraft Arrival Scheduling (AAS) determines an efficient landing scheduling scheme for a given set of aircrafts in order to insure the safety of aircrafts. Two algorithms were presented for optimizing arrival sequences of airport runway operations. Aircraft priorities were introduced to our two algorithms. Constraint Position Sifting (CPS) constraints were also added in order to make the scheduling results more acceptable to the air traffic controller. Validated with the practical data of the Beijing Capital International Airport of CAAC, the results shows our work is much better than the FCFS solver both in total delay cost and equity.

[Key words] air transportation arrival scheduling priority algorithm air traffic flow management