

多跑道机场着陆方案研究

陈金良, 杨 婕, 蒋崇阳, 冯社辉

(空军第二飞行学院 西安分院, 陕西 西安 710077)

摘要:在分析多跑道机场不同利用率下几种着陆方案基础上,通过比较模拟数据并依据 $M/D/n$ 队列瞬态模型计算出多跑道机场的飞机平均空中滞留时间。结果表明:随着飞机进场密度的增加,应按照飞机重量等级的不同安排着陆次序,最佳的着陆方案为首先安排中型飞机降落,然后安排大型机和小型机分别在不同的跑道降落。

关键词:空中交通管制;多跑道机场;着陆方案

中图分类号:V355 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)01-0008-03

多跑道着陆是战时提高机场利用率、实现军用、民用机场合一、增强空军战斗力的一种有效措施之一。超前性研究和分析多跑道机场着陆方案对评估和论证我军未来多跑道机场设计,充分发挥战时民用机场的潜力,以及减少飞机空中滞留时间和提高飞机生存力都是非常重要的。就目前我国部分具有同时接收几架飞机在不同跑道同时降落的民用机场来说,其着陆计划的制订仍然沿袭传统的先到先服务(FCFS)的原则。该原则对于和平时期民航单一机型多跑道机场着陆的情况是适应的。然而,战时空军对民用机场征用时,需要多跑道机场着陆的飞机机型是多种多样的,既有大型运输机和中型轰炸机,又有小型歼击机等,如若仍然沿用先到先服务(FCFS)的原则必然会造成机场着陆混乱,使空中滞留时间增长,甚至造成飞行事故。因此,必须确立新的着陆计划方法。

1 模型分析

飞机到场时间是随机的,一般将其视为泊松流。根据飞机的重量,我们可以将飞机划分为大型、中型、小型三个等级,同时给出各型飞机之间在着陆航线上必须保持的最小距离,见表1。为了研究给定混合比例、进场密度和机场接收能力条件下单架飞机的等待时间,我们建立了两种队列模型,一种是服务时间定长模型,另一种是服务时间服从指数分布模型。

表1 各型飞机之间的最小距离 km

	大型机	中型机	小型机
大型机	7.4	9.3	11.1
中型机	5.5	5.5	7.4
小型机	5.5	5.5	5.5

2 确定服务时间

假设飞机进场符合参数为 λ 的泊松流,在 $[t, t + \Delta t]$ 时间内进场的飞机数量为 $\lambda \Delta t$,到场的平均时间间隔为 $1/\lambda$,服务时间定长为 T_s 。

2.1 服务时间定长时的模型

服务时间定长是指所有飞机飞完其着陆航线上与前机所保持的最小距离的平均时间,平均时间可以根据进场飞机中各型飞机的比例和飞机间应保持的最小距离矩阵计算得出。假设服务时间定长,就意味着认

收稿日期:2002-08-28

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:陈金良(1958-),男,江苏泰安人,副教授,主要从事航空管制等研究。

为空中滞留时间只与飞机到场时机有关。知道进场飞机中各型飞机的比例和飞机间应保持的最小距离矩阵后,平均服务时间 $T_s = \mathbf{P}_m^T \mathbf{S} \mathbf{P}_m / v$ 。式中: $\mathbf{P}_m = [P_h, P_l, P_s]^T$, P_h, P_l, P_s 分别表示大、中、小型飞机到场的概率。设机场接收能力 $\mu = 1/T_s$ 。假设各型飞机到场的概率 $\mathbf{P}_m = [0.2, 0.7, 0.1]^T$, 飞机的平均着陆速度为 278 km/h, 则 $T_s = 82.8$ s, $\mu = 43.5$ 架/小时。

因为 t 时刻队列中正在接受服务的飞机在 $t + T_s$ 时刻将接受完服务离开队列。所以, $t + T_s$ 时刻系统中的飞机数等于 t 时刻系统中的等待飞机数加上 T_s 时间内进入队列的飞机数^[1]。设 $A(T_s)$ 为 $[t, t + T_s]$ 时间内进入队列的飞机数, $N(t)$ 为 t 时刻系统中的飞机数, 用 $P_j(t) = P\{N(t) = j\}$ 表示系统中 t 时刻有 j 架飞机的概率, 则 $t + T_s$ 时刻系统中有 j 架飞机事件可以用多个互斥事件表示。 t 时刻系统中有 0 到 n 个飞机时, T_s 时间内有 j 架飞机加入队列, t 时刻系统中有 $n + 1$ 到 $n + j$ 架飞机时, T_s 时间内有 $j - 1$ 架到 0 架飞机加入。表示如下: $P_j(t + T_s) = P\{A(T_s) = j | N(t) = 0\} P_0(t) \cup \dots \cup P\{A(T_s) = j | N(t) = n\} P_n(t) \cup P\{A(T_s) = j - 1 | N(t) = n + 1\} P_{n+1}(t) \cup \dots \cup P\{A(T_s) = 0 | N(t) = j + n\} P_{j+n}(t)$ 。由于 $[t, t + T_s]$ 时间入队飞机数与系统中的飞机数是互相独立的事件, 且代入初始条件 $\bar{\mathbf{P}}_0 = \bar{\mathbf{P}}(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots]^T$ 。当 $n = 2$ 时, 其解为 $\bar{P}(kT_s) = F^k \bar{\mathbf{P}}_0$ 。当 F 取满足要求的维数时, 上式可以求出近似解。同时, 队列中的等待时间为 $W_o(k) = \frac{1}{\lambda} m_o(k) = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=n}^{N_r} (j - n) P_j(k)$ 。式中: $m_o(k) = \sum_{j=n}^{\infty} (j - n) P_j(k)$ 为队列中等待飞机的平均数。

2.2 服务时间服从指数分布时的模型

如果飞机到达服从泊松分布, 服务时间服从指数分布, 就有 n 个服务窗口, 这样的队列模型称为 $M/M/n$ 模型, 可以用 Kologrov 描述它的生灭过程 (Birth and Death Process)^[2]。若飞机平均到达率 λ 一定, 即所有的 $\lambda_j = \lambda$ 且平均服务率为

$$\mu_j = \begin{cases} j\mu & j = 0, 1, 2, \dots, n - 1 \\ n\mu & j \geq n \end{cases}$$

服务率 $j\mu$ 表示在一段时间内飞机完成服务的快慢, 则生灭过程的微分差分方程可以写为 $\bar{\mathbf{P}}'(t) = G \bar{\mathbf{P}}(t)$ 。向量 $\bar{\mathbf{P}}(t)$ 的元素 $P_j(t)$ 表示 t 时刻队列中有 $j - 1$ 架飞机的概率。取满足要求维数的 G 来求出上述微分差分方程的近似解, 其解为 $\bar{\mathbf{P}}(t) = e^{Gt} \bar{\mathbf{P}}_0$ 。

3 跑道分配方案比较

3.1 双跑道分配

进场密度小时(到达率为 32 架/小时为例)分析结果见表 2。

表 2 进场密度小时等待时间比较

方案	平均等待时间计算值/(分/架)	平均等待时间模拟值/(分/架)	标准差/(分/架)
不允许选择跑道	0.395 5	0.472 5	0.202 2
允许选择跑道	0.117 4	0.184 7	0.096 8
分开大、小型飞机		0.235 9	0.108 0

结果显示: 由于等待时间非常短, 利用调整降落次序减少飞机的等待时间没有必要。因为飞机着陆平均间隔时间长, 很少会发生空中拥挤现象。可以通过 $M/D/1$ 队列和 $M/D/2$ 队列的计算结果来比较飞机选择跑道和不选择跑道降落时的等待时间^[3]。

进场密度适中时(到达率为 72 架/小时为例)分析结果见表 3, 此时机场利用率为 84%。第一种方案让每架飞机在其容易降落的跑道着陆, 用它作为基准来衡量等待时间的改进程度。第二种方案是当飞机能在另一条跑道提前降落时, 允许飞机在这条跑道降落。还要考虑两个另外的方案: ①限制选择跑道, 降低改变着陆跑道的飞机数量。②安排大型和小型飞机分别降落在不同的跑道上, 中型飞机降落在等待时间较短的跑道上。模拟结果与计算结果基本吻合, 可以看出方案四因为不会出现小型飞机跟在大飞机后面着陆的情形, 因此空中延误时间缩短, 平均等待时间明显减少。

进场密度大时(144 架, 到达率为 96 架/小时, 多次模拟, 每次模拟时间 90 min)。结果见表 3。

表3 进场密度适中与进场密度大时等待时间比较

方案	平均等待时间计算值/(分/架)		平均等待时间模拟值/(分/架)		改变跑道架数/%	
	密度适中	密度大	密度适中	密度大	密度适中	密度大
不允许选择跑道	2.53	7.402 72	2.516 1	8.562 9	0.0	0.0
允许选择跑道	1.31	6.151 70	1.340 2	6.880 0	44.85	49.24
限制选择跑道			1.471 2	7.077 2	23.12	26.04
分开大、小型飞机			1.314 0	6.179 2	50.17	49.94

从表2~3可以看出:尽管模拟试验得到的等待时间与利用排队论得到的等待时间不十分接近,但等待时间的减小程度是接近的。

让大型飞机和小型飞机分别降落在不同跑道时,平均等待时间比不允许飞机选择着陆跑道的平均等待时间要小得多,说明当空中交通比较繁忙时,让大型飞机和小型飞机分别降落在不同跑道是非常重要的。

3.2 三跑道分配

各种假设条件与双跑道机场相同。只有进场密度适中或很大时,才有必要优化跑道分配方案。进场密度较小时,让飞机在其最容易着陆的跑道着陆即可满足要求。

进场密度适中(到达率是108架/小时,机场接收能力为130架/小时)分析结果见表4。

进场密度大(90 min内飞机到达率为144架/小时的情况进行了模拟)分析结果见表4。

表4 三跑道进场密度适中与进场密度大时等待时间比较

方案	平均等待时间计算值/(分/架)		平均等待时间模拟值/(分/架)		改变跑道架数/%	
	密度适中	密度大	密度适中	密度大	密度适中	密度大
不允许选择跑道	2.524 7	7.402 7	2.700 8	8.736 4	0.0	0.0
允许选择跑道	0.854 4	5.583 4	0.924 9	6.425 4	59.38	65.69
分开大、小型飞机			0.939 9	4.958 2	66.59	66.79

4 结论

机场接收能力已知时,利用M/D/N队列的瞬态模型,分析飞机的平均等待时间是比较准确的。为了缩短平均等待时间,应根据飞机进场密度不同选择不同的着陆方案,当飞机进场率很大时,对于多跑道机场,让大型和小型飞机分别在不同的跑道上着陆,可最大程度减小等待时间。当飞机进场率适中时,可以让大、小型飞机分别在不同跑道着陆或者让飞机改变着陆跑道来减小等待时间;当飞机进场强度较小时,由于飞机间距非常大,飞机可通过增速来消除等待时间,让飞机就近着陆。

参考文献:

- [1] 陆传赓. 排队论[M]. 北京:北京邮电学院出版社, 1994.
- [2] 钱颂迪. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社, 1990.
- [3] Tambe M. Towards Flexible Termwork[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 1997, 7: 83 - 124.

(编辑:姚树峰)

Analysis and Determination of Landing - Plans in Milti - runway Airfield

CHEN Jin - liang, YANG Jie, JIANG Chong - yang, FENG She - hui

(Xi'an Subschool, Air Force 2nd Flight College, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: This paper analyzes the landing - plans under the different utilization rate of multi - runway airfield and reaches a conclusion of the high efficient landing order. The result shows that the landing - plans are different according to the different approach density of aircraft. With the increase of the aircraft density of approach, the landing order should be arranged according to the weight of the landing aircraft. The optimum plan is that the medium weight aircraft should land first, and then the giant and the small aircrafts should land on the different runways.

Key Words: air - traffic control; multi - runway airfield; landing plans