

航空航天

单跑道着陆容量改进模型

陈宽明 刘德军 潘卫军

(中国民航飞行学院, 广汉 618307)

摘要 跑道容量是航空运输的瓶颈,尾流间隔、进近速度、公共进近航段、机型比率构成跑道容量的关键参数。考虑到实际管制程序实施的可行性,将飞机跑道脱离时间作为跑道着陆容量研究的关键参数。分别对飞机实际间隔和对跑道占用时间进行正态分布分析,根据可接受的安全水平下,加上缓冲余度,对雷达管制下单跑道着陆容量模型进行调整完善。

关键词 着陆容量 进近速度 脱离跑道时间 管制间隔

中图法分类号 V355.2; **文献标志码** A

空中交通网络的拥挤,其原因主要是由于跑道瓶颈现象所至,特别在天气情况恶劣的时候,跑道容量减小现象更加严重,因此对跑道容量极具研究意义。20世纪70年代美国FAA即提出其工程分析模型即FAA容量模型^[1],我国的胡明华在20世纪90年代提出基于到达时间间隔的跑道模型;2002年余江在ASAC模型基础上进行了研究^[2]。

在跑道各种模型中,普遍运用的是跑道容量等于所有被服务飞机的加权平均服务时间的倒数^[3]:

$$C = 1 / \sum (p_{ij} \Delta T_{ij})。$$

式中 C 代表跑道容量, ΔT_{ij} 代表机型 i 在前、机型 j 在后的时间间隔, p_{ij} 代表机型 i 在前、机型 j 在后的几率。

1 理想状态运行

假设飞机的运行状态稳定,完全按照设想的速度、飞机之间恰好按照规定的间隔运行,称为理想状态运行。

$$C_a = 1/E(\Delta T_{ij}) = 1/\sum [p_{ij}][M_{ij}]。$$

式中 p_{ij} 为 i 类飞机在前, j 类飞机在后的概率; $[P_{ij}]$ 为 i 类飞机在前, j 类飞机在后的概率矩阵; $[M_{ij}]$ 为最小无误差飞行间隔组成的矩阵。式中 C_a 为全着陆飞机进行服务的跑道容量。

1.1 追赶情形($v_i \leq v_j$)

当前机速度小于后机速度($v_i \leq v_j$)时,在进近过程中,两机的时间间隔是逐渐缩小的趋势,因此,在跑道入口的最小时间间隔不小于最小距离间隔和后机速度的比值。此情况的数学表述为:

$$\Delta T_{ij} = T_j - T_i \geq \delta_{ij}/v_j$$

其中 T_j 为在后面的 j 类飞机到达机场的所需时间, T_i 为在前面的 i 类飞机到达机场所需时间, δ_{ij} 为前机 i 与后机 j 在整个公共进近航器阶段的最小允许间隔距离, v_j 为后机 j 的飞行速度。

从管制工作程序来看,机场着陆容量的计算不仅仅要依据尾流间隔标准,同时也要考虑到着陆飞机的脱离跑道的时间和实际工作中管制员的着陆指令的下达时机。因此,在雷达管制的条件下,必须保证后机抵达五边4km前,前机已经脱离跑道。用数学表达如下。

$$\Delta T_{ij} \geq E(T_{\text{ivacated}}) + 4/v_j。$$

式中 $E(T_{\text{ivacated}})$ 表示前机 i 从跑道入口到脱离跑道的

平均时间。则

$$\Delta T_{ij} = \max(E(T_{\text{ivacted}}) + 4/v_j; \delta_{ij}/v_j) \quad (1)$$

1.2 渐远情形 ($v_i > v_j$)

此情况下,最小间隔距离 δ_{ij} 在公共进近航路入口就开始被实施,而不是在跑道入口。当后机经过进近航路入口时开始实施到达飞机之间的最小间隔距离。同理,必须保证后机抵达五边 4 km 前,前机已经脱离跑道。因此有

$$\Delta T_{ij} = \max(E(T_{\text{ivacted}}) + 4/v_j, \delta_{ij}/V_i + \gamma[1/v_j - 1/v_i]) \quad (2)$$

式(2)中 γ 为公共进近航路的长度, v_j 为后机 j 的平均进近速度, v_i 为前机 i 的平均进近速度。

2 考虑飞机位置漂移

在实际运行中,飞机不可能总按照理想方式运行,因此要保证运行的安全,必须在理想状态运行下的间隔考虑加入缓冲区,以保证在可接受的安全水平下运行。为缓冲区建立数学模型,矩阵 $[B_{ij}]$ 的元素 b_{ij} 表示 j 类飞机跟随 i 类飞机时的缓冲时间。将此矩阵加入无误差矩阵中,就可得到实际情况下的间隔时间矩阵。

$$E(\Delta T_{ij}) = \sum [p_{ij}][M_{ij} + B_{ij}] \quad (3)$$

2.1 追赶情形 ($v_i \leq v_j$)

令 ΔT_{ij} 的数学期望为 $E(\Delta T_{ij})$, 随机误差为 e_0 , e_0 服从均值为零、标准方差为 σ_0 的正态分布, q_v 为在置信区间为 $1 - p_v$ 时正态分布表中对应的值。则

$$\Delta T_{ij} \geq E(\Delta T_{ij}) + b_{ij} = \delta_{ij}/v_j + q_v \sigma_0 \quad (4)$$

对于飞机跑道占用时间,前机 i 脱离跑道的的时间 $\Delta T_{\text{ivacted}}$ 也是服从正态分布,假定其均值为 $E(\Delta T_{\text{ivacted}})$, 标准差为 σ_{ivacted} , 随机误差为 e_{ivacted} 。则有

$$\Delta T_{\text{ivacted}} = E(\Delta T_{\text{ivacted}}) + e_{\text{ivacted}} \quad (5)$$

飞机在跑道入口处的间隔应该需要缓冲余度 b_{ivacted} , 因此

$$\Delta T_{ij} = E(\Delta T_{\text{ivacted}}) + b_{\text{ivacted}} + 4/v_j \quad (6)$$

要求后机 j 到达距接地点 4 km 前,前机脱离跑道,对应数学表达式为

$$\Delta T_{ij} \geq E(\Delta T_{\text{ivacted}}) + b_{\text{ivacted}} + 4/v_j \quad (7)$$

飞机 i 脱离跑道时间缓冲值

$$b_{\text{ivacted}} = q_{\text{vvacted}} \sigma_{\text{ivacted}}, \quad (8)$$

式(8)中 q_{vvacted} 为在置信区间为 $1 - p_{\text{vvacted}}$ 时正态分布表中对应的值。结合式(4)和式(7)得

$$\Delta T_{ij} = \max[\delta_{ij}/V_j + q_v \sigma_0, E(\Delta T_{\text{ivacted}}) + q_{\text{vvacted}} \sigma_{\text{ivacted}} + 4/v_j] \quad (9)$$

2.2 渐远情形 ($v_i > v_j$)

前后两机的距离间隔从公共进近航路入口开始增大。假定前机通过进近航路入口时开始对前后两机实施最小间隔,并由此建立模型。违反间隔的概率就是后机到达进近入口而前机通过进近入口后还未飞出一定距离的概率。

$$\Delta T_{ij} \geq m_{ij} + b_{ij} = m_{ij} + \sigma_0 q_v - \delta_{ij}[1/v_j - 1/v_i]。$$

再结合式(7)得出

$$\Delta T_{ij} = \max(m_{ij} + \sigma_0 q_v - \delta_{ij}[1/v_j - 1/v_i], E(\Delta T_{\text{ivacted}}) + q_{\text{vvacted}} \cdot \sigma_{\text{ivacted}} + 4/v_j) \quad (10)$$

3 算例分析

以成都双流机场为例,进行跑道容量分析,对其机型进行分类如表 3-1,根据统计的数据得出机型的跑道占用时间及其随机误差如表 3-2,根据机型统计得出机型概率阵

$$[p_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0 & 2.8 & 8.9 & 0 & 1.4 \\ 0.7 & 8.3 & 53.8 & 4.8 & 4.1 \\ 0 & 0.7 & 4.8 & 1.4 & 0 \\ 0 & 2.1 & 3.4 & 0.7 & 1.4 \end{bmatrix}。$$

表 3-1 成都双流机场机型分类表

机型	尾流类别	进近速度 (km/h)
Type ₁ (B767)	H	270
Type ₂ (B757, A330)	H	260
Type ₃ (A321, B733, B736, B738, B739, A319, MD82, MD90)	M	255
Type ₄ (B737)	M	240
Type ₅ (CRJ, ERJ, D38, Bae146)	M	210

其对应的尾流间隔阵

$$[\delta_{ij}] = \begin{bmatrix} 8 & 8 & 10 & 10 & 10 \\ 8 & 8 & 10 & 10 & 10 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \end{bmatrix}。$$

表 3-2 飞机对跑道占用时间分布参数

	Type ₁	Type ₂	Type ₃	Type ₄	Type ₅
$E(T_{\text{ivacated}})$	62	59	53	52	50
σ_{ivacated}	10	8	8	7	8

3.1 理想状态运行

根据式(1)和式(2)计算出

$$[\Delta T_{ij}] = \begin{bmatrix} 107 & 116 & 147 & 163 & 202 \\ 107 & 111 & 143 & 159 & 197 \\ 98 & 99 & 100 & 102 & 139 \\ 97 & 98 & 99 & 101 & 129 \\ 95 & 96 & 97 & 99 & 105 \end{bmatrix}$$

因此计算出不考虑位置漂移的跑道着陆容量为

$$C_a = 1/E(\Delta T_{ij}) = 1/\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 p_{ij} \Delta T_{ij} = 1/107.6 \times 3600 = 33(\text{架/h})。$$

3.2 考虑位置漂移

假设在空中交通管制中,认为违反规定的间隔的几率为5%是可以接受的,则 $p_v = 0.05$,对应的 $q_v = 1.65$ 。从大量的统计数据中分析得出:成都双流机场飞机在五边进近过程中的位置漂移约15 s。

则 $b_{ij} = q_v \cdot \sigma = 1.65 \times 15 = 25$,

因 $b_{\text{ivacated}} = \sigma_{\text{ivacated}} q_{\text{vvacated}}$,所以可以计算出 $[b_{\text{ivacated}}] = [17 \ 13 \ 13 \ 12 \ 13]$ 。

$$[\Delta T_{\text{vacated}ij}] = \begin{bmatrix} 124 & 125 & 126 & 128 & 134 \\ 117 & 118 & 119 & 121 & 127 \\ 111 & 112 & 113 & 115 & 121 \\ 109 & 110 & 111 & 113 & 119 \\ 108 & 109 & 110 & 112 & 118 \end{bmatrix}。$$

结合式(9)和式(10)得出

$$\Delta T_{ij} = \begin{bmatrix} 132 & 137 & 161 & 171 & 202 \\ 132 & 136 & 165 & 172 & 197 \\ 111 & 112 & 113 & 121 & 146 \\ 109 & 110 & 111 & 115 & 141 \\ 108 & 109 & 110 & 115 & 128 \end{bmatrix}。$$

则计算出考虑位置漂移的着陆容量

$$C_a = 1/\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 p_{ij} \Delta T_{ij} = 3600/122 = 29(\text{架/h})。$$

4 结论

机场容量的关键在跑道容量,其影响因素众多,机场容量模型中参数的取舍是关系到研究方向和研究结果可信度。从空中交通管制实施程序的角度,结合民航具体相关规定,在雷达管制条件下,以管制员下着陆指令的最晚时机作为跑道着陆容量评估的重要指标,以着陆飞机对脱离跑道时间作为跑道着陆容量评估中做为关键参数;讨论飞机空中位置的漂移和跑道占用时间进行正态分布分析,加入时间缓冲余度,从例证分析可以看出,此容量模型更加切合实际的跑道容量。

参 考 文 献

- 1 Federal Aviation Administration. Technical report on airport capacity and delay studies. Report FAA RD-76, 1976
- 2 余江. 跑道容量的概率模型及容量曲线. 交通运输工程学报, 2002;12:99—102
- 3 胡明华. 基于统计分析的机场容量估计方法研究. 数据采集与处理, 2000;15(1):74—77
- 4 刘松. 机场空中交通容量估计系统研究. 南京:南京航空航天大学, 1999:15—25

Improved Model of Single-runway Landing Capacity

CHEN Kuan-ming, LIU De-jun, PAN Wei-jun

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, P. R. China)

[**Abstract**] Runway capacity is the bottleneck of air transportation, The key patterns of runway capacity involve wake separation, approaching speed, the same approaching leg, ratio of aircraft type. Considering the possibility of air traffic control procedure in facts, the time of landing aircraft vacating runway was reckoned the key parameter of runway landing capacity in the text. It was analyzed that aircraft actual separation and the time of landing aircraft vacating runway were considered normal distribution. On acceptable safety level, runway capacity model was adjusted and consummated by adding cushion surplus, then more actual runway landing capacity model come into being.

[**Key words**] landing capacity approaching speed the time of vacated runway separation of control

(上接第 328 页)

The Study of Evaluation Index Model about the Optimization of Bus Scheduling

LIN Fu-cheng, JIN Wen-zhou, FU Wei-wei, XIE Ming-long

(College of Traffic, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

[**Abstract**] By the effect of the optimization of bus scheduling, bring forward evaluation index model to evaluate optimization results, the corresponding algorithm of the model is given. This evaluation index is included transport capacity match, average transfer time, effective time-use law. analytic hierarchy process to integrate indicators into a comprehensive evaluation index, is used and built the evaluation index model about the optimization of bus scheduling. For several bus lines in Guangzhou City example, the use of indicators model line scheduling algorithm to optimize the evaluation made a simple algorithm. The three indicators in this model belong to quantitative technical indicators, overcome the line network optimization index can not evaluate the program for dynamic scheduling it's easy to evaluate program of bus scheduling, with strong practicality.

[**Key words**] bus scheduling evaluation index analytic hierarchy process scheduling optimization