

机场独立运行跑道起飞容量计算模型

郝 伟¹, 蔡良才¹, 邵 斌¹, 种小雷¹, 王观虎¹, 李天民²

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 成都军区空军勘察设计院, 四川 成都 610041)

摘 要:跑道容量的确定是多条跑道开设时机的依据。给定了独立运行跑道起飞容量的概念, 分析了各种影响跑道起飞容量的因素, 按典型正态分布问题建立了计算模型; 根据起飞飞机的速度关系和空管规则综合考虑了跑道占用时间、飞机前后间距标准、空管规则、风速影响、起飞公共段长度等影响因素, 从理论上分类建立了机场独立运行跑道起飞容量的计算模型, 提出了确定容量的方法, 并利用某机场的实际运行航班数据对起飞容量进行计算, 计算结果验证了该模型的实用性和可行性。

关键词:机场; 跑道容量; 起飞容量; 独立运行跑道

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.04.005

中图分类号: V355.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)04-0021-05

跑道容量是机场运输能力发展的瓶颈, 跑道起飞容量直接体现跑道服务飞机离场起飞的能力。2003 年, 蒋兵在分析跑道容量影响因素的基础上建立了跑道到达容量模型和离场容量模型, 但离场容量模型中没有考虑地面管制员的控制因素和跑道容量的误差系数^[1]。2004 年, 余江对跑道着陆容量模型进行了研究, 确定了各因素对跑道着陆容量的影响^[2]。只考虑两架飞机的速度关系建立模型有一定的局限性, 本文详细地考虑起飞公共段长度和间距标准的关系、时间间隔和跑道占用时间限制的关系, 并将一些无法定量计算的参数以误差修正系数的形式加入模型, 建立了独立运行跑道起飞容量的计算模型, 为进一步确定跑道容量提供了依据。

1 跑道容量概念及影响因素

跑道容量是指在一个时间段内, 可以使用跑道的飞机数量。跑道容量根据跑道的运行方式又分为着陆容量、起飞容量和起飞/着陆混和运行容量。跑道的起飞容量是指跑道全部用于起飞时的容量, 或在特定着陆容量前提下的起飞容量。独立运行跑道是指机场只有一条跑道运行或一个机场拥有跑道数量多于一条, 但每条跑道运行相互不受影响, 可以独立使用^[3-4]。

影响跑道起飞容量的因素主要有飞机的跑道占用时间、两飞机的最小间隔、飞机的起飞速度、风速、通讯、机场运行飞机的机型组合等, 本文主要根据上述因素建立跑道起飞容量的计算模型。对跑道及联络道结构、滑行道、停机坪^[5-8]等因素, 可以根据对相关专家和飞行员的抽样调查结果, 在模型中一并作为误差系数进行计算。

由于机型及主观操作不同, 外界环境在时刻变化, 大部分影响起飞时间间隔的因素都有很大的不确定性和随机性, 本文假设这是一个典型的正态分布问题^[1,9]。容量计算模型的各个参数及含义见表 1。

* 收稿日期: 2010-03-09

作者简介: 郝 伟(1982-), 男, 山东栖霞人, 博士生, 主要从事机场规划与设计研究; E-mail: haowei983@sohu.com
蔡良才(1960-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要从事机场工程研究。

表1 跑道起飞容量建模主要参数及含义

Tab.1 Key parameters of runway takeoff capacity and meanings

参数	含义	参数	含义
$\delta_{x_i}, \sigma_{x_i}$	飞机的位置偏差、标准差	$V_{T_i}, \delta_{v_{T_i}}, \sigma_{v_{T_i}}$	飞机 i 的离场平均速度均值、偏差、标准差
S_{CT}	起飞公共段长度	$R_{T_i}, \delta_{R_{T_i}}, \sigma_{R_{T_i}}$	起飞飞机 i 的跑道占用时间均值、偏差、标准差
$\delta_{w_i}, \sigma_{w_i}$	飞机 i 承受的风的偏差、标准差	Φ^{-1}	$N(0,1)$ 正态分布函数的反函数 $\Phi(\alpha) = \int_{-\infty}^{\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx$
S	两架飞机之间的最小间隔	β	跑道容量误差修正系数,该值通过调研确定为4%。

2 建立跑道起飞容量的计算模型

为便于研究,假设飞机在跑道的滑跑过程是匀加速运动,离地后做匀速运动。

起飞容量用前后两架飞机开始滑跑起飞间隔时间的加权计算值的倒数表示。前后两架飞机的位置关系需要满足2个条件:①两机间距满足最小间距要求 S ,这个最小距离发生在前机飞越第一转弯点时;②后机在跑道开始起飞滑跑的时间大于前机的跑道占用时间。如果起飞飞机的最小时间间隔小于前机的跑道占用时间,则两架飞机的间隔时间按前机的跑道占用时间取值^[1]。

$$T_{ij} = \max(T_{R(i)}, T_{S(j)}) \quad (1) \quad E(T) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} T_{ij} \quad (2) \quad C_T = (1 - \beta) \frac{1}{E(T)} \quad (3)$$

式中: T_{ij} 为前后两架起飞飞机开始滑跑起飞的时间间隔, i 表示前机, j 表示后机; $T_{R(i)}$ 为起飞飞机跑道占用时间规定,该规定保证起飞飞机离开跑道后其它飞机才能进入跑道; $T_{S(j)}$ 为起飞飞机的时间间隔规定,该规定保证相继起飞飞机的空中间隔不违反空中最小间隔规定; $E(T)$ 为跑道对起飞飞机的平均服务时间; p_{ij} 为飞机 j 在飞机 i 之后的概率。在假设飞机随机起飞次序的前提下,有 $p_{ij} = p_i p_j$, $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, p_{ij} \geq 0, n$ 为飞机架数; C_T 为跑道的起飞容量。起飞容量的计算模型分以下2种情况来考虑。

2.1 后机速度大于前机速度

在后机速度大于前机速度的情况下,两机的最小距离发生在前机转弯离开起飞公共段时,见图1。

图中纵坐标表示距离飞机离地点的距离。两机的最小间隔距离在前机飞越公共段转弯点时产生,此时,时间为 t_0 ,前机的位置为 S_{CT} ,即第一转弯点。两机满足最小间隔要求 S 的概率为 q_1 ,用公式表述 S_{CT} 为:

$$S_{CT} = \delta_{x_i} + (V_{T_i} + \delta_{v_{T_i}} + \delta_{w_i})(t_0 - R_{T_i} - \delta_{R_{T_i}}) \quad (4)$$

此时,后机 j 的位置为:

$$X_{j(t_0)} = \delta X_j + (V_{T_j} + \delta_{v_{T_j}} + \delta_{w_j}) \left(\frac{S_{CT} - \delta X_i}{V_{T_i} + \delta_{v_{T_i}} + \delta_{w_i}} + R_{T_i} + \delta_{R_{T_i}} - R_{T_j} - \delta_{R_{T_j}} - \Delta t_1 \right) \quad (5)$$

式中 Δt_1 为前后飞机飞越公共段转弯处的时间间隔。

两机的位置关系需满足最小间隔要求 S :

$$S_{CT} - X_{j(t_0)} \geq S \quad (6)$$

结合式(5)和式(6)可以得到:

$$\Delta t_1 \geq \frac{S_{CT}}{V_{T_i}} - \frac{S_{CT} - S}{V_{T_j}} + (R_{T_i} - R_{T_j}) + \frac{\Phi^{-1}(q_1)}{V_{T_j}} \sigma_1 \quad (7)$$

式中 σ_1 为前后两机距离的偏差,下文 σ_3, σ_4 意义相同。

$$\sigma_1^2 = \left[\frac{S_{CT}}{V_{T_i}} + (R_{T_i} - R_{T_j}) - \Delta t_1 \right]^2 (\sigma_{v_{T_j}}^2 + \sigma_{w_j}^2) + \frac{V_{T_j}^2 S_{CT}^2}{V_{T_i}^2} \frac{\sigma_{v_{T_i}}^2 + \sigma_{w_i}^2}{V_{T_i}^2} + V_{T_j}^2 \sigma_{R_{T_i}}^2 + V_{T_j}^2 \sigma_{R_{T_j}}^2 \quad (8)$$

解式(7)和式(8)组成的方程组,则两架飞机开始起飞滑跑的时间间隔为:

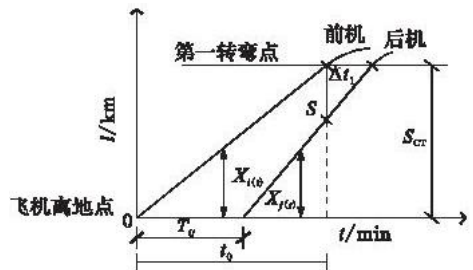


图1 后机速度大于前机速度的起飞情形

Fig.1 The last aircraft's speed is bigger than the first one's

$$T_{S(ij)} = \frac{S_{CT}}{V_{Ti}} - \frac{S_{CT}}{V_{Tj}} + (R_{Ti} - R_{Tj}) + \Delta t_1 \quad (9)$$

另外,两机的起飞时间关系还需要满足跑道占用时间 $T_{R(i)}$ 的限制,两架飞机不能同时在一条跑道上,即后机的起飞时间要大于前机的跑道占用时间,不违反这种管制规定的概率为 q_2 ,前机跑道占用时间的偏差为 σ_2 ,可以得到:

$$T_{R(i)} = R_{Ti} + \Phi^{-1}(q_2)\sigma_2 \quad (10)$$

式(9-10)中 $T_{S(ij)}$ 和 $T_{R(i)}$ 的最大值即为此种情况下前后两架飞机开始滑跑起飞的时间间隔 T_{ij} 。

2.2 后机速度小于前机速度

在后机速度小于前机速度的情况下,两机的最小间隔发生在后机刚离地起飞时,见图2。除非 S_{CT} 很短使得后机起飞时,前机已经飞越了第一转弯点。此时,后机的位置为 $X_j = 0$,前机的位置为:

$$X_i = \delta_{x_i} + (V_{Ti} + \delta_{v_{Ti}} + \delta_{w_i})(\Delta t_2 + R_{Tj} + \delta_{R_{Tj}} - R_{Ti} - \delta_{R_{Ti}}) \quad (11)$$

则两机的间距为 X_i ,满足条件 $X_i \geq S$ 的概率为 q_3 ,可以得到:

$$\Delta t_2 \geq \frac{S}{V_{Ti}} + (R_{Ti} - R_{Tj}) + \frac{\Phi^{-1}(q_3)\sigma_3}{V_{Ti}} \quad (12)$$

$$\sigma_3^2 = \left[\frac{S}{V_{Ti}} + (R_{Ti} - R_{Tj}) - \Delta t_2 \right]^2 (\sigma_{v_{Ti}}^2 + \sigma_{w_i}^2) + S^2 \frac{\sigma_{v_{Ti}}^2 + \sigma_{w_i}^2}{V_{Ti}^2} + V_{Ti}^2 \sigma_{R_{Ti}}^2 + V_{Ti}^2 \sigma_{R_{Tj}}^2 \quad (13)$$

式中 Δt_2 为前后飞机飞越起飞离地点处的时间间隔。满足这一条件两机开始起飞滑跑的时间间隔为:

$$T_{S(ij)} = \Delta t_2 \quad (14)$$

另外,两机的起飞时间关系需要满足跑道占用时间 $T_{R(i)}$ 的限制,即需要满足式(10)的要求。式(10)和式(14)中 $T_{R(i)}$ 、 $T_{S(ij)}$ 的最大值即为此种情况下前后两飞机开始滑跑起飞的时间间隔 T_{ij} 。

2.3 管制员人为控制时间间隔

当起飞公共段长度小于两机的间距标准时,后机还没有离地前机就已经脱离了起飞公共段,这时管制员可以人为地根据起飞公共段长度来控制两机的起飞间隔时间,当前机位于第一转弯点时,后机刚离地起飞,满足这种间距标准的概率为 q_4 。可得 T_{ij} 为:

$$T_{ij} \geq R_{Ti} - R_{Tj} + \frac{S_{CT}}{V_{Ti}} + \Phi^{-1}(q_4)\sigma_{R_{Ti}} \quad (15)$$

$$\sigma_4^2 = \sigma^2 V_{Ti}^2 + S_{CT}^2 \frac{\sigma_{v_{Ti}}^2 + \sigma_{w_i}^2}{V_{Ti}^2} + \sigma_{R_{Ti}}^2 \quad (16)$$

式(13)和式(15)中 T_{ij} 的最大值,即为此种情况前后两飞机开始滑跑起飞的时间间隔 T_{ij} 。

将这3种情况下所计算得到的 T_{ij} 值分别代入到式(2)中可得到相应的 $E(T)$,再代入式(3)中可分别计算出3种情况下的跑道起飞容量。

3 案例分析

某机场正常运行中有A、B2种机型,A为轻型机,B为中型机,飞机间距按表2确定。起飞公共段长度 S_{CT} 为10 km,各种机型飞机参数见表3,机型比例均为0.5。飞机从接到飞行指令到滑行至起飞位置准备滑跑起飞的这段时间为48 s,飞机的位置偏差标准差 σ_{x_i} 为0.4 km,风速标准差为0.5 m/s,不违反空中管制概率为99%。

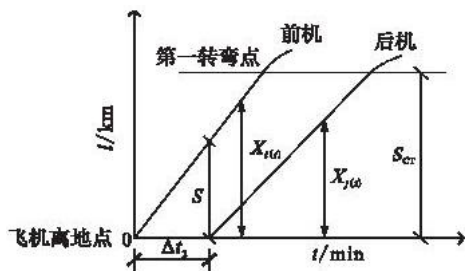


图2 后机速度小于前机速度的起飞情形
Fig.2 The last aircraft's speed is smaller than the first one's

表2 起飞飞机间距标准(单位:km)

Tab.2 Space criterion between takeoff aircrafts

后机	前机	
	轻型	中型
轻型	6	6
中型	10	6

表3 该机场飞机起飞速度及机型组合比例

Tab.3 Takeoff speed and types proportion of aircrafts

机型	参数			
	$V_T/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\sigma_{V_T}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	R_T/s	σ_{R_T}/s
A	110.6	5.8	35	2
B	118.4	6.2	33	2

1) A飞机在前, B飞机在后, 起飞时两机前后安全间隔距离为6 km, 速度关系为后机速度大于前机速度。

满足前后安全间隔的公式见式(7), 将参数代入到式(7) - (8)中可得: $\Delta t_1 = 64.28 \text{ s}$ 。

将结果代入到式(9)中得: $T_{S(ij)} = 70.24 \text{ s}$ 。

满足前机跑道占用时间限制见式(10), 将参数代入到式(10)中得: $T_{R(i)} = 39.65 \text{ s}$ 。

最终 T_{ij} 按两机安全间隔时间取值为: $T_{ij} = 70.24 \text{ s}$

2) B飞机在前, A飞机在后, 起飞时两机前后安全间隔距离为10 km, 速度关系为后机速度小于前机速度。

满足前后安全间隔的公式见式(12), 将参数代入到式(12)和(13)中可得: $T_{S(ij)} = \Delta t_2 = 92.95 \text{ s}$ 。

满足前机跑道占用时间限制的公式见式(10), 可得: $T_{R(i)} = 37.65 \text{ s}$ 。

最终 T_{ij} 按两机安全间隔时间取值为: $T_{ij} = 92.95 \text{ s}$ 。

根据式(2)可确定:

$$E(T) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} T_{ij} = 0.5 \times 70.24 + 0.5 \times 92.95 = 81.60 \text{ s}$$

根据式(3)有:

$$C_T = (1 - \beta) \frac{1}{E(T)} = 0.96 \times \frac{3600}{81.60} = 42.35 \text{ 架次/h}$$

由计算结果可以看出, 起飞飞机的时间间隔要大于前机的跑道占用时间, 所以该机场容量由起飞飞机的时间间隔标准来决定。如果起飞飞机的时间间隔小于前机的跑道占用时间, 则容量由前机的跑道占用时间来决定。当该机场的航空运输量超过该跑道的起飞容量时, 就必须增加跑道的数量来解决机场保障能力不足的问题。

4 结束语

本文综合考虑各种影响跑道起飞容量的因素, 介绍了解决问题的思路, 建立计算模型对跑道的起飞容量进行评估计算, 并通过实践证明这种方法可行、合理、有效, 为机场开设新的跑道提供了理论技术方面的决策依据, 也为建立多跑道起飞容量的评估模型奠定了基础。

这种单一的起飞容量模型还有一定局限性, 只适用于某段时间内只有起飞飞机的跑道容量计算。当前很多跑道还是起降混合运行的, 这种混合模型将在后面的工作中继续研究。

参考文献:

- [1] 蒋兵, 胡明华, 田勇, 等. 机场跑道容量评估模型和估计方法的进一步研究[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(2): 80 - 83. JIANG Bing, HU Minghua, TIAN Yong, et al. Further Research of Airport Runway Capacity Evaluation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(2): 80 - 83. (in Chinese)
- [2] 余江, 蒲云. 跑道着陆容量的数学模型及其分析[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(1): 42 - 46. YU Jiang, PU Yun. Mathematical Model and Analysis of Runway Landing Capacity[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(1): 42 - 46. (in Chinese)
- [3] 张莹, 胡明华, 田勇. 一种新的机场地面容量评估模型[J]. 交通运输工程与信息学报, 2006, 4(2): 61 - 66. ZHANG Ying, HU Minghua, TIAN Yong. Research on A New Capacity Evaluation Model of Airport Ground[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2006, 4(2): 61 - 66. (in Chinese)
- [4] 胡明华, 刘松, 苏兰根. 基于统计分析的单跑道容量估计模型研究[J]. 数据采集与处理, 2000, 15(1): 74 - 77.

- HU Minghua, LIU Song, SU Langen. Research of Airport Capacity Estimation Model Based on Statistic Analysis[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2000, 15(1):74-77. (in Chinese)
- [5] 彭莉娟,吴鹄,余静. 机场跑道最大容量评估模型的研究[J]. 四川大学学报:自然科学版,2006, 43(5):1018-1022. PENG Lijuan, WU Kun, YU Jing. The Design and Research of Airport Maximal Capacity Estimation Model[J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2006, 43(5):1018-1022. (in Chinese)
- [6] 余江. 跑道容量的运行优化[J]. 中国民航学院学报, 2003, 21(3):48-50. YU Jiang. Operational Optimization of Runway Capacity[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2003, 21(3):48-50. (in Chinese)
- [7] 傅建军. 机场地面容量评估研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2005. FU Jianjun. The Research on the Airport Ground Capacity Evaluation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [8] Hinton David A, O'connor Cornelius J. Development of A Wake Vortex Spacing System for Airport Capacity Enhancement and Delay Reduction[C]//19th Digital Avionics Systems Conference. Philadelphia: [s. n.], 2000:1-10.
- [9] Alcabin Monica S, Schwab Robert W, Coats Michael L. Airport Capacity and NAS - Wide Delay Benefits Assessment of Near - Term Operational Concepts[R]. AIAA 2006-7720.

(编辑:徐敏)

Research on Takeoff Capacity Calculation Model of Independent Runway

HAO Wei¹, CAI Liang-cai¹, SHAO Bin¹, CHONG Xiao-lei¹, WANG Guan-hu¹, LI Tian-min²

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China; 2. Air Force Investigate Designing Institute of PLA Chengdu Military Area Command, Chengdu 610041, China)

Abstract: The determination of runway capacity is the warrant of confirming the time of constructing new runways in one airfield. This paper defines the concept of takeoff capacity of the independent runway, analyzes the various factors influencing the takeoff capacity and sets up a computation model as a representative of normal distribution problem. This paper still sets up the takeoff capacity calculation model of independent runway and classifies it in theory according to the speed relation of the takeoff aircraft and airway controlled rule, then brings forward the method of fixing on the takeoff capacity. In the calculation model many influence factors such as runway occupancy time, space demand of takeoff aircraft, ATC regulation, wind speed, the length of takeoff commonality district are considered comprehensively. The calculation of the actual takeoff capacity is done with the data of some airport, which verifies the practicability and feasibility of this calculation model.

Key words: airfield; runway capacity; takeoff capacity; independent runway