

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.01.020

## 考虑尾流影响的侧向双跑道机场的跑道容量研究

沈志远, 胡莹莹

(南京航空航天大学民航学院, 南京, 211106)

**摘要:** 侧向跑道由于能够灵活面对强侧风的影响从而提高机场的效率,在我国大型机场的规划设计中逐渐推广。但是目前国内外在侧向跑道容量模型方面的研究较少,因此对侧向跑道的跑道容量模型的研究具有重大的意义。本文针对侧向双跑道系统,考虑了一组侧向跑道上航空器之间的尾流影响,通过计算尾流消散时间给出了侧向跑道航空器的放行条件,同时利用时序图得出在侧向双跑道系统中连续进场航空器间插入离场航空器的条件,从而构建出侧向双跑道系统的跑道容量理论计算模型;最后以成都天府国际机场一期跑道为算例,计算出尾流影响下侧向双跑道系统的小时容量,并给出航班起降架次表,验证了模型的正确性,为侧向跑道机场的跑道容量理论计算提供了参考。

**关键词:** 侧向双跑道;跑道容量;容量模型;尾流消散

**中图分类号:** U8      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)01-0161-10

## Runway Capacity of Lateral Double-Runway Airport Considering Wake Effect

SHEN Zhiyuan, HU Yingying

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

**Abstract:** Lateral runways have gradually popularized in the planning and design of large airports in China because they can flexibly face the influence of strong crosswind and thus improve the efficiency of airports. However, few studies on lateral runways have emerged globally, and research on runway capacity model of lateral runways is of great significance. In this paper, the wake effect between aircraft on a set of lateral runways is considered for the system with two lateral runways. The release conditions of aircraft on the lateral runways are given by calculating the wake dissipation time. At the same time, the conditions for inserting departing aircraft between continuously approaching aircraft in the system with two lateral runways are obtained by using the timing chart. Thus, the runway capacity calculation model of the system with two lateral runways is constructed. Finally, Chengdu Tianfu International Airport Phase I runway is taken as an example to calculate the hourly capacity of each runway under the influence of wake flow, and a flight take-off and landing schedule is given to verify the correctness of the model, which provides a reference for the theoretical calculation model of runway capacity for lateral runway airports.

**Key words:** lateral double-runway; runway capacity; capacity model; wake dissipation

随着社会经济的不断进步,中国航空运输业进入快速增长期,中国民航已成为全球第二大航空运输体系。航空需求的增长,导致机场系统的规模越来越大,为缓解运输压力,各大机场实施多跑道运

**基金项目:** 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20190701)资助项目;南京航空航天大学“实验技术与开发”(2017050700044049)资助项目。

**收稿日期:** 2019-11-13; **修订日期:** 2020-01-20

**通信作者:** 沈志远,男,副教授, E-mail: shenzy@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 沈志远,胡莹莹. 考虑尾流影响的侧向双跑道机场的跑道容量研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 161-170. SHEN Zhiyuan, HU Yingying. Runway capacity of lateral double-runway airport considering wake effect[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 161-170.

行成为必然。我国的机场跑道构型以单跑道、平行双跑道为主,但过多的平行跑道(超过4条时)会导致机场地面运行效率降低,同时带来跑道穿越或滑行距离过长等问题。相对于平行跑道,侧向跑道能灵活地面对强侧风的影响,从而提高机场的效率和通行能力。在综合考虑空域结构、地形条件、噪声影响及航站楼布局等因素下,在平行跑道周边规划侧向跑道已在新建机场中逐步开展应用,如北京大兴国际机场和成都天府国际机场。但是,目前国内关于侧向跑道容量的研究主要集中在对具体实例的分析评估及容量评估仿真软件的开发应用上,对侧向跑道具体容量评估模型的研究较少,对实际运行造成了一定的限制和影响。因此,研究侧向跑道机场的跑道容量理论模型,探究侧向跑道与邻近平行跑道系统的跑道容量对于指导我国未来机场建设具有重大意义。

跑道容量是决定机场容量最为重要的因素,随着航空运输量的快速增长,跑道的负荷也逐渐增大,很大程度上影响机场的运行效率,常常导致航班的空中等待和地面延误。国外在20世纪50年代就开始了跑道容量的研究。早期跑道容量的研究主要集中在数学模型和仿真模型两方面。Blumstein在1959年分析了跑道的降落容量与间隔要求、下滑道长度及飞机速度之间的关系,提出了只有到达航空器条件下的单跑道容量评估模型<sup>[1]</sup>,但并未考虑离场航空器;Harris在1969年的研究指出降落飞机之间的间隔遵循正态分布原则,构建了基于随机因素的跑道容量评估模型,并把人为因素考虑以及各种设备的误差考虑在内<sup>[2]</sup>;1998年, Lee等在总结前人研究的基础上,提出了机场容量和延迟模型,并将该模型应用于美国十多个机场的容量评估项目中,取得了不错的效果<sup>[3]</sup>;2011年, Wang等基于到达/离场容量包络线提出了一种评估跑道容量的快速方法,可以更加简便地计算容量同时不受历史数据缺乏的限制<sup>[4]</sup>;2014年, Farbod等基于新老多哈国际机场为例提出基于跑道构型、调度方法和飞机间隔标准的跑道容量管理的三因素方法,采用了混合整数规划模型同时保留了排序政策得到了可以节省燃料和减少延误的最优方案<sup>[5]</sup>。

从20世纪80年代开始,国外开始使用计算机仿真分析模型来进行跑道容量评估并开发了相关的仿真软件。跑道容量常用的模型有美国联邦航空局的机场容量模型(FAA airfield capacity model)和美国后勤管理学院的跑道容量模型(LMI

runway capacity model)。LMI模型最突出的特点是它直观考虑了飞机之间的随机性。FAA机场容量模型是可用于近似复杂跑道配置容量的分析模型,它基于Blumstein模型及其扩展的基本概念来近似单跑道容量并将单跑道容量分析扩展到多跑道分析。MACAD模型(MENTEA机场容量及延误模型)就是将LMI模型和FAA模型相结合并做出了改进,使得单跑道模型扩展为了多种跑道构型的容量模型。目前相关的仿真软件主要有SIMMOD, TAAM和Airtop仿真软件等。

国外由于天气原因,季风较多且风向不稳定早期建设时存在部分交叉跑道构型。FAA针对交叉跑道给出了相应的尾流间隔规定。交叉跑道由于其特殊的跑道构型,跑道入侵及碰撞概率相对于平行跑道较大。国外在交叉跑道容量方面的主要集中在不同跑道运行方案及航空器调度方面,以提高机场场面运行效率;同时研究开发仿真软件对跑道容量进行仿真评估。针对交叉跑道构型的跑道容量理论模型研究较少,且对交叉跑道运行航空器之间的尾流影响欠缺考虑。

国内的研究起步相对较晚。2000年,胡明华等基于对统计的分析,研究了单跑道的跑道容量并进行建模,研发了跑道容量评估系统<sup>[6]</sup>;2003年,胡明华等引入了其他各方面影响容量的因素,从空中交通管制员的视角分析,提出了进场和起飞离场的跑道容量评估模型<sup>[7]</sup>;2005年,傅建军从理论的角度对于停机位、跑道以及滑行道的容量进行了研究,并以成都双流国际机场为例,建立模型由此提出了地面容量评估系统<sup>[8]</sup>;2010年,尹嘉男等通过分析航班流生成策略和场面运行的冲突检测和解脱策略,建立了机场多跑道评估模型<sup>[9]</sup>;2011年,孟祥伟等综合了LMI、MACAD和FAA三种模型的特征,在众多影响因素限制下,研发出了新的单跑道容量计算模型,验证了不同的模型思维对于跑道容量分析带来的影响,指出应该根据不同机场的具体情况选择不同的模型,进行建模<sup>[10]</sup>;卢朝阳等在假定机场到达流特性是韦布尔分布或正态分布的前提下,采用T型系统推导跑道容量计算模型,并分析了各到达流分布计算模型之间的相互关系<sup>[11]</sup>;2017年任武玲考虑了近距平行跑道、近距平行跑道头不对齐和大大下滑角运行方式下分别建立了跑道容量模型,并以首都机场为例进行了仿真分析<sup>[12]</sup>;2018年周心阳、朱代武、李晨鹿等在MACAD模型基础上提出了用于评估交叉跑道构型的容量模型<sup>[13]</sup>,但该模型并未考虑前机尾流的影

响,且仅针对相关离场运行模式进行分析,缺乏对不同运行模式下交叉跑道容量评估方法的研究。

### 1 跑道容量

跑道容量为单位时间内跑道能够服务的最大飞机架次,一般用跑道对所有类型的飞机服务时间的加权平均值表示<sup>[14]</sup>

$$C = \frac{1}{E[T]} \quad (1)$$

$$E[T] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} T_{ij} \quad (2)$$

式中: $C$ 为跑道容量; $E[T]$ 为跑道的平均服务时间; $p_{ij}$ 为*j*型飞机尾随*i*型飞机的概率; $T_{ij}$ 为*j*型飞机尾随*i*型飞机时的时间间隔。

### 2 一组侧向跑道容量模型

#### 2.1 单跑道进场容量模型

跑道容量模型中所需的参数如表 1 所示。

表 1 跑道容量模型参数

Table 1 Parameters of the runway capacity model

参数	参数含义( <i>j</i> 机尾随 <i>i</i> 机进场)
$\delta_{ij}$	两架相邻进场飞机的最小允许距离间隔
$\delta_d$	不违反空管规定的最小进场—离场飞机间距
$\sigma_0$	连续进场飞机时间间隔标准差
$\gamma$	最后进近定位点到跑道入口的长度
$q_v$	连续到达飞机在跑道入口不违反管制规则的概率
$T_{ij}(I_{aa})$	相邻进场飞机机型 <i>j</i> 与机型 <i>i</i> 的实际时间间隔
AASR( <i>ij</i> )	不违反空管最小间隔规定的连续到达飞机的时间间隔规定
$T_{ij}(I_{dd})$	相邻起飞飞机机型 <i>i</i> 与机型 <i>j</i> 的实际间隔时间
DDSR( <i>ij</i> )	不违反空管最小间隔规定的连续起飞飞机的时间间隔规定
ROT <sub><i>i</i></sub>	进场前机 <i>i</i> 的跑道占用时间
$B_{ij}$	缓冲时间
$V_i$	前机 <i>i</i> 的最后进近速度
$TD_i$	起飞飞机 <i>i</i> 的跑道占用时间

连续进场的飞机对的时间间隔为前机的跑道占用时间与空管规定的飞机对最小空中间隔标准的最大值,表达式如下<sup>[14]</sup>

$$T_{ij}(I_{aa}) = \max [ROT_i, AASR(ij)] \quad (3)$$

不同机型的最后进近速度不同,将相邻进场飞机(*j*型飞机尾随*i*型飞机)先后进近的情况分为以下两种,分别计算它们的时间间隔

(1) 前机速度大于后机,即  $V_i > V_j$  时,两机间时间间隔为

$$AASR(ij) = \frac{\delta_{ij}}{V_j} + \gamma \left( \frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i} \right) \quad (4)$$

考虑到管制员与飞行员的反应时间,需要加入一个缓冲时间  $B_{ij}$ 。当  $B_{ij} \leq 0$  时,  $B_{ij} = 0$ ; 当  $B_{ij}$  为正时,其计算公式为

$$B_{ij} = \sigma_0 q_v - \delta_{ij} \left( \frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i} \right) \quad (5)$$

(2) 后机速度大于前机,即  $V_i \leq V_j$  时,两机间的时间间隔和缓冲时间计算如下

$$AASR(ij) = \frac{\delta_{ij}}{V_j} \quad (6)$$

$$B_{ij} = \sigma_0 q_v \quad (7)$$

将连续到达的飞机对在跑道入口的间隔时间进行加权求和,得到跑道平均服务时间

$$E[T(I_{aa})] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} [T_{ij}(I_{aa}) + B_{ij}] \quad (8)$$

根据跑道容量的定义,可得到单位小时内跑道的进场容量为

$$C_{arrival} = \frac{3600}{E[T(I_{aa})]} \quad (9)$$

#### 2.2 单跑道离场容量模型

跑道实行混合运行模式时,管制员根据进港飞机是否满足 DA 间隔决定是否对离港飞机发布放行许可,即进港飞机预计接地时刻与它前一架进场飞机接地时刻的时间差的大小决定是否允许当前申请放行的飞机起飞<sup>[14]</sup>。当进港飞机满足 DA 间隔时,两架相邻降落飞机间的时间间隔  $G > 0$ ,即

$$G = T_{ij} + B_{ij} - \frac{\delta_d}{V_j} - ROT_i - (n-1)\epsilon_{ij} > 0 \quad (10)$$

管制员可根据  $G$  的大小,适当地在其中插入  $n$  架起飞飞机<sup>[15]</sup>,此时须满足

$$E[T_{ij} + B_{ij}] \geq E\left(\frac{\delta_d}{V_j}\right) + E(ROT_i) + (n-1) \cdot E(\epsilon_{ij}) + E(\tau) \quad (11)$$

式中 $\tau$ 表示起飞飞机的延误时间。即当 $j$ 型飞机尾随 $i$ 型飞机时,两机间时间间隔满足式(11),可在其中插入 $n$ 架起飞飞机。计算各种情况下相邻降落飞机对间可插入起飞飞机数量 $n_{ij}$ ,再分别乘上 $j$ 型飞机尾随 $i$ 型飞机的概率和单位小时内间隙数量<sup>[14]</sup>,可计算出跑道离场容量

$$C_{\text{departure}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_i P_{ij} n_{ij} \quad (12)$$

式中: $G_i$ 为单位小时内的间隙总数, $G_i = C_{\text{arrival}} - 1$ ;  $n_{ij}$ 为在两个连续进场飞机 $i, j$ 的时间间隔中可以插入起飞离场飞机的数量。

### 2.3 尾流消散模型

尾流消散模型如下

$$\Gamma(t) = \Gamma_0 \quad t \leq t_1 \quad (13)$$

$$\Gamma(t) = \Gamma_0 (t_1/t)^n \quad t > t_1 \quad (14)$$

式中: $\Gamma(t)$ 为 $t$ 时刻尾流的强度; $t_1$ 为尾流保持初始强度的时间。

$\Gamma_0$ 为尾流起始强度

$$\Gamma_0 = \frac{4Mg}{\pi\rho_a V_\infty B}$$

$b_0$ 为初始涡间距

$$b_0 = \frac{\pi}{4} B$$

$t_0$ 为参考时间

$$t_0 = \frac{b_0}{\omega_0} = \frac{2\pi b_0^2}{\Gamma_0} = \frac{2\pi\rho_a V_\infty b_0^2}{mg}$$

式中: $M, B$ 分别为飞机质量和翼展; $g$ 为重力加速度; $\rho_a$ 为空气密度; $V_\infty$ 为飞机飞行真空速。

当给定了尾流的临界值 $\Gamma_{\infty T}$ 时,由式(14)可以得到尾流的消散时间<sup>[16]</sup>

$$t = t_1 / (\Gamma_{\infty T} / \Gamma_0)^{\frac{1}{n}} \quad (15)$$

飞机的尾流可以分为两个阶段:近场涡(扩散阶段)和远场涡(快速衰减阶段)。在尾流的近场阶段,尾流环量衰减速度较慢,强度可以近似认为不变。而在远场涡阶段,尾流的强度则会迅速减小<sup>[17]</sup>。因而近场涡的持续时间 $t_c$ 即可认为是尾流保持初始强度不变的时间 $t_1$ 。

根据 Sarpkaya 提出的无因次尾流消散时间 $t_c^*$ 和无因次消散率 $\epsilon^*$ 之间的关系<sup>[18]</sup>,可以得到近场涡的持续时间 $t_c$ 的计算公式

$$\epsilon^* = \frac{(\epsilon b_0)^{1/3}}{\omega_0} = \frac{2\pi\rho_a V_\infty b_0^2 (\epsilon b_0)^{1/3}}{mg} \quad (16)$$

当 $\epsilon^* > 0.2535$ 时

$$t_c = t_0 \left( \frac{0.7475}{\epsilon^*} \right)^{0.75} \quad (17)$$

当 $0.2535 \geq \epsilon^* > 0.0121$ 时

$$\epsilon^* = \left( \frac{t_c}{t_0} \right)^{0.25} \cdot \exp\left( \frac{-0.7t_c}{t_0} \right) \quad (18)$$

当 $0.0121 \geq \epsilon^* > 0.001$ 时

$$t_c = t_0 (9.18 - 180\epsilon^*) \quad (19)$$

当 $\epsilon^* \leq 0.001$ 时

$$t_c = 9t_0 \quad (20)$$

尾流保持初始强度的时间 $t_1 = t_c$ 。

尾流临界强度值为

$$\Gamma_{\infty T} = \frac{\Gamma'_T(b/2)}{[1 - (2r_c/b)\arctan(2r_c/b)]} = \frac{\pi f \rho b^2}{6[1 - (2r_c/b)\arctan(2r_c/b)]} \quad (21)$$

式中: $f$ 为比例系数; $\rho$ 为飞机最大限度可控制滚转率(rad/s); $r, b$ 分别为尾流半径和翼展。

则跑道起飞飞机的尾流消散时间

$$W_d = t - t_1 / (\Gamma_{\infty T} / \Gamma_0)^{\frac{1}{n}} \quad (22)$$

### 2.4 一组侧向跑道模型的建立

一组侧向跑道构型如图1所示,分别标记为18/36跑道,09/27跑道。

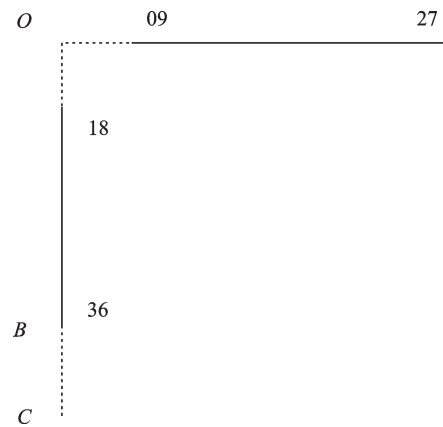


图1 一组侧向跑道构型示意图

Fig.1 Schematic of a set of lateral runway configurations

图中,设36号跑道入口为 $B$ 点,两跑道中线交点为 $O$ 点,36号跑道复飞飞机从跑道入口飞至09号跑道头所需的时间

$$t_1 = \frac{S_{OB}}{V_i} \quad (23)$$

式中: $S_{OB}$ 为36跑道入口处至北一跑道头的距离; $V_i$ 为36跑道复飞飞机的复飞初始速度。

当 $D_d + W_d \geq t_1$ 时,认为36跑道复飞飞机受到09跑道起飞飞机尾流的影响。

否则,要消除尾流对复飞飞机的影响,必须使复飞飞机到达09跑道头时尾流已完全消散。设 $t_2 = D_d + W_d - t_1$ ,在36跑道的延长线上确定一 $C$

点,09跑道必须在36跑道复飞的飞机到达C点之前放行离场飞机。B,C两点之间的距离

$$S_{BC} = t_2 V_i \quad (24)$$

36号、09号跑道的运行时序图如图2所示。

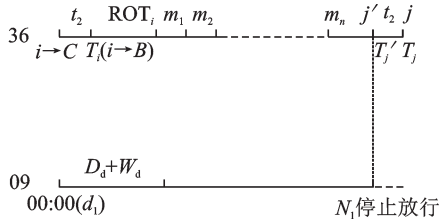


图2 36,09号跑道运行时序图

Fig.2 Runtime diagram of runways 36,09

自由离场情况下,在36跑道连续进场飞机之间插入 $n$ 架起飞飞机的条件为

$$E(T_{ij} + B_{ij}) \geq E(ROT_i) + (n - 1) \cdot E[\max(D_{ij}, \epsilon_{ij})] + E\left[\max\left(\frac{\delta_d}{V_j}, D_m\right)\right] + E(t_2) + E(\tau) \quad (25)$$

式中: $T_{ij} = T_j + t_2$ 为考虑尾流影响的连续进场的飞机 $i,j$ 之间的间隔; $T_j$ 为不考虑尾流影响情况下连续进场的飞机 $i,j$ 之间的间隔; $t_1 = \frac{S_{OB}}{V_i}$ 为36跑道复飞飞机从跑道入口飞至09跑道头所需的时间; $t_2 = D_d + W_d - t_1$ 为36跑道复飞飞机到达09跑道头受到尾流影响的时间; $S_{BC} = t_2 V_i$ 是为了消除尾流影响,09跑道飞机放行时,36跑道复飞飞机距离跑道入口的最小距离; $\tau$ 表示起飞飞机的延误时间。

单位小时内36号跑道的离场总架次为

$$C_{36depar} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n GP_{ij} n_{ij} \quad (26)$$

36跑道的单位小时的总容量为

$$C_{36} = C_{36arri} + C_{36depar} = \frac{3600}{E(T_{ij} + B_{ij})} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n GP_{ij} n_{ij} \quad (27)$$

对09跑道而言,只要36跑道进近、复飞的飞机距离跑道入口的距离大于 $S_{BC}$ ,就可以放行离场飞机。假设在09跑道可放行离场飞机的时间内放行 $k$ 架离场飞机,则

$$T_{ij} + t_1 + B_{ij} = k \max(D_d, DDSR_{ij}) \quad (28)$$

单位小时内09跑道的离场容量为

$$C_{09} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n GP_{ij} k_{ij} \quad (29)$$

式中: $k_{ij}$ 为在36跑道连续进场 $i,j$ 飞机的时间间隔中09跑道可以插入离场飞机的数量。

### 3 具有侧向跑道的多跑道容量模型建立

#### 3.1 独立运行模式下双跑道容量计算

若1、2号平行跑道采用独立进场—独立离场运行模式时,则双跑道系统容量计算模型如下<sup>[19]</sup>:

首先计算1号跑道的进、离场跑道容量,计算方法与单跑道进离场容量计算方法相同,设计计算结果为: $C_1 = C_{arrival} + C_{departure}$ 。

在独立进场—独立离场的运行模式下,1、2号跑道间间距足以保证双跑道系统的安全起降,所以2跑道可以维持于1号跑道相同的起降架次。

则平行双跑道在采用独立进场—独立离场运行模式下,跑道容量为: $C = 2C_1$ 。

#### 3.2 具有侧向跑道的三跑道模型建立

具有侧向跑道的三跑道构型如图3所示,从左至右一次为1号、2号、3号跑道。其中1号、2号跑道属于宽距平行跑道,采用独立平行仪表模式混合运行,两跑道的离场航迹在航空器起飞后立即建立不小于30°的扩散角<sup>[20]</sup>。3号跑道为侧向跑道,用于向东起飞。

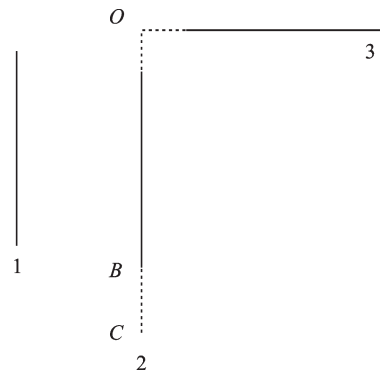


图3 具有侧向跑道的三跑道构型示意图

Fig.3 Schematic diagram of a three-runway configuration with lateral runways

1号跑道的容量可以参照独立运行模式下双跑道容量计算方法进行计算。

2号跑道向北偏置15°离场时,航空器的起飞离场保护区与3号跑道有重叠,假设2号跑道起飞飞机的起飞离场保护区边界与3号跑道中线交于A点(图4),3号跑道起飞飞机对正跑道滑跑至A点用时 $t_h$ ,2号跑道起飞飞机开始滑跑至飞越A点用时 $t_c$ ,则2号跑道起飞航班需在3号跑道起飞航

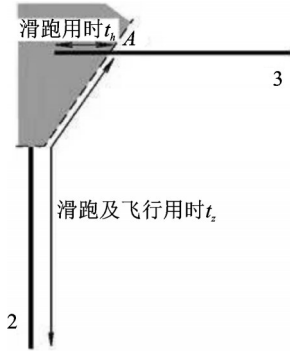


图4 2号跑道航空器离场保护区边界与3号跑道相交示意图

Fig.4 Schematic diagram of the intersection of aircraft departure protection area on runway 2 and runway 3

班启动滑跑  $t_h$  时间后放行,同时3号跑道起飞航班

需在2号跑道起飞航班启动滑跑  $t_c$  时间后放行。

当  $t_h + w_d \geq t_c$  时,说明当2号跑道的复飞飞机飞至A点时,3号跑道离场飞机的尾流还未完全消散,复飞飞机受到尾流影响。参考2.4节,3号航空器放行时要求2号跑道复飞飞机距跑道入口的距离大于  $S_{BC}$ 。

2号跑道航空器偏置  $15^\circ$  离场时,2号和3号跑道的运行时序图如图5所示。2号跑道复飞航空器经过  $t_2 + ROT_i$  时间离开2号跑道,在  $t_h + W_d$  时刻飞越A点。2号跑道离场航空器经过  $t_c$  时刻飞越A点后3号跑道可以放行离场飞机,同理,3号跑道离场飞机经过  $t_h$  时间飞越A点后,若间隙时间足够,2号跑道可继续放行离场飞机。

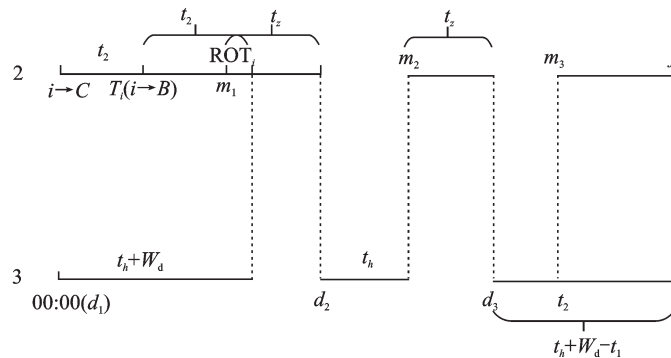


图5 偏置  $15^\circ$  离场时2号和3号跑道运行时序图

Fig.5 Runtime diagrams of runways 2 and 3 when leaving at  $15^\circ$  offset

进场容量不变的前提下,2号和3号跑道插入  $n$  架起飞飞机的条件为

$$E(T_{ij} + B_{ij}) \geq E(ROT_i) + n(t_h + t_c) + E\left[\max\left[t_2, t_h + \max\left(\frac{\delta_d}{V_j}, D_d\right)\right]\right] + E(\tau) \quad (30)$$

再分别乘上  $j$  型飞机尾随  $i$  型飞机的概率和单位小时内间隙数量,可计算出跑道离场容量,算式如下

$$C_3 = C_{2depar} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n GP_{ij} n_{ij} \quad (31)$$

### 4 算例验证

成都天府国际机场一期跑道构型图6所示,其中西一跑道和东一跑道为一组宽距平行跑道,采用独立平行仪表进近模式运行;东一跑道与北一跑道为一组侧向跑道,东一跑道进离场混合运行,北一跑道仅用于起飞<sup>[21]</sup>。

东一跑道向北直线离场、复飞及偏置  $15^\circ$  离场,北一跑道向东离场时,需要判断北一跑道离场航空器的尾流对东一跑道的航空器是否产生影响,判断结果如图7所示。

I类精密进近MAPt位于DH(60 m)与标称的  $5.2\%/3^\circ$  下降梯度相交的位置,以C类飞机相应参数计算  $X_{soc} = 630.8$  m,按照  $2.5\%$  爬升梯度计算, I类运行标准,复飞航空器到达正切北一跑道头位置时,航空器高度为

$$X_{MAPT} = -((DH - RDH)/5.2\%) = -[(60 - 15)/5.2\%] = -865.4(m)$$

$$(1430 + 3200 - 630.8) \times 2.5\% + 60 = 159.98(m)$$

II类精密进近MAPT位于DH(30 m)与标称的  $5.2\%/3^\circ$  下降梯度相交的位置,以C类飞机相应参数计算,  $X_{soc} = 580$  m。按照  $2.5\%$  爬升梯度计算, II类运行标准,复飞航空器到达正切北一跑道头位置时,航空器高度为

$$X_{MAPT} = -((DH - RDH)/5.2\%) = -[(30 - 15)/5.2\%] = -285.5(m)$$

$$(1430 + 3200 - 580) \times 2.5\% + 30 = 131.25(m)$$

航空器离地高度小于300 m,可能受到北一跑道起飞航班的尾流影响<sup>[22]</sup>。为避免尾流影响着陆航空器,按照尾流间隔计算,东一跑道着陆航空器在距跑道头3.7 km及以内,对北一跑道起飞航空

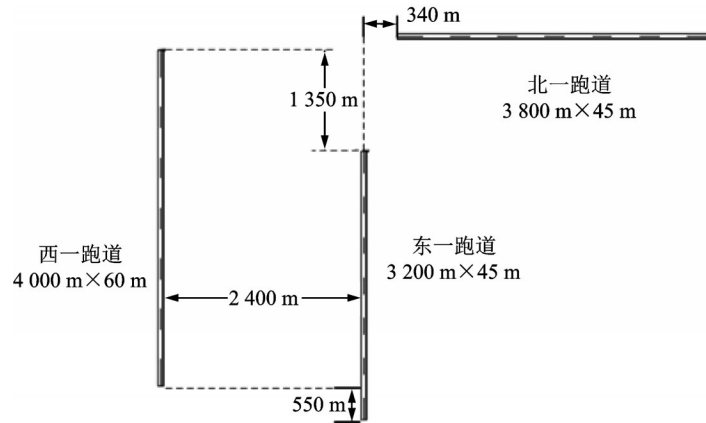


图 6 成都天府国际机场 1 期三跑道构型示意图

Fig.6 Schematic diagram of the three runways of Chengdu Tianfu International Airport Phase 1

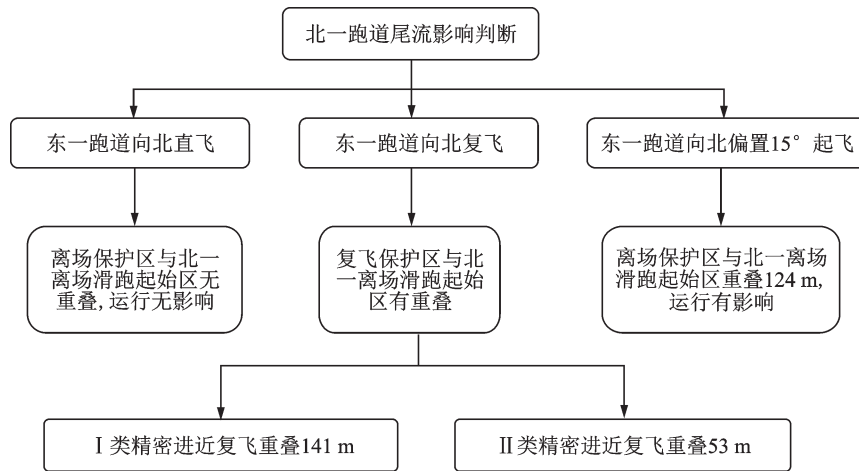


图 7 北一跑道尾流影响结果示意图

Fig.7 Schematic diagram of the effect of the wake of the north runway

器停止发放起飞指令。待东一跑道着陆航空器着陆之后,北一跑道航空器可以起飞。东一跑道复飞的航空器飞越北一跑道头后,与北一跑道起飞飞机航迹呈发散角度,按照 FAA 相关标准,北一跑道头可以起飞。

在考虑尾流影响向北运行的条件下,单位小时内,北一跑道的离场容量

$$C_{N1} = 28 \text{ 架/h}$$

东一跑道的容量

$$C_{E1} = 32 \text{ 架/h}$$

两条跑道的单位小时航班时刻计划如表 3 所示。

针对成都天府国际机场的一组侧向跑道,本文利用所建立的模型对其容量进行了计算,由于考虑到航空器之间的尾流影响,东一跑道着陆航空器在距跑道头 3.7 千米及以内时,停止北一跑道航空器放行,东一跑道进场航空器着陆后或复飞航空器飞

东一跑道航空器向北混合运行,北一跑道仅用于向东离场时,运用第 2 节式(3)~(12)对成都天府国际机场一组侧向跑道容量进行计算,参数见表 2,计算结果如下所示。

越北一跑道头后,方可对北一跑道航空器发布放行指令。计算得出北一跑道仅用于离场时的容量为 28 架/h,东一跑道混合向北运行容量为 32 架/h。周心阳、朱代武等人提出的基于 MACAD 模型的交叉跑道容量模型<sup>[13]</sup>,并未考虑前机尾流的影响,且仅针对相关离场运行模式进行分析,因此本文的计算结果要低于其评估的一组侧向跑道容量。本文重点讨论了一组侧向跑道在尾流影响下的容量模型,后续研究可继续优化模型参数,使其适用于更多构型的跑道;在成都天府国际机场投入使用后,可以将计算容量与实际容量进行对比,从而进一步完善模型。

表 2 跑道容量计算数据

Table 2 Data for runway capacity calculations

参数	数值
$P_{H-H}/P_{H-M}/P_{M-H}/P_{M-M}/\%$	4, 16, 16, 64
尾流间隔 $S_{H-H}/S_{H-M}/S_{M-H}/S_{M-M}/\text{km}$	8/6/10/6
$I_{dd}$ 间隔/s	100
$I_{da}$ 间隔/s	180
$I_{aa}$ 间隔/s	100
发布起飞许可所需降落飞机距入口最小距离/s	95
进场航空器平均跑道占用时间( $ROT_i$ )/s	50
离场航空器平均跑道占用时间( $D_{tr}$ )/s	55
重型机最后进近速度 $V_{重}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	300
中型机最后进近速度 $V_{中}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	270
$\sigma_{V_{重}}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	0.14
$\sigma_{V_{中}}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	0.14

表 3 单位小时三跑道的航班时刻计划

Table 3 Flight schedules per unit of three runways

序号	进/离场	降落时刻	起飞时刻	使用跑道号	进/离场	起飞时刻	使用跑道号
1	进	9:01		E1	离	9:00	N1
2	离		9:03	E1	离	9:03	N1
3	离		9:04	E1	离	9:05	N1
4	进	9:06		E1	离	9:08	N1
5	离		9:08	E1	离	9:10	N1
6	进	9:10		E1	离	9:12	N1
7	离		9:12	E1	离	9:14	N1
8	进	9:14		E1	离	9:16	N1
9	离		9:16	E1	离	9:18	N1
10	进	9:18		E1	离	9:20	N1
11	离		9:20	E1	离	9:22	N1
12	进	9:22		E1	离	9:24	N1
13	离		9:24	E1	离	9:26	N1
14	进	9:26		E1	离	9:28	N1
15	离		9:28	E1	离	9:30	N1
16	离		9:29	E1	离	9:32	N1
17	进	9:31		E1	离	9:34	N1
18	离		9:33	E1	离	9:36	N1
19	离		9:34	E1	离	9:38	N1
20	进	9:36		E1	离	9:40	N1
21	进	9:38		E1	离	9:42	N1
22	离		9:40	E1	离	9:44	N1
23	进	9:42		E1	离	9:46	N1
24	离		9:44	E1	离	9:48	N1
25	进	9:46		E1	离	9:50	N1
26	离		9:48	E1	离	9:52	N1
27	进	9:50		E1	离	9:54	N1
28	离		9:52	E1	离	9:56	N1
29	进	9:54		E1			
30	离		9:56	E1			
31	离		9:57	E1			
32	进	9:59		E1			



## 5 结 论

本文提出了考虑尾流影响下的一组侧向跑道的容量计算模型。该模型首先通过计算尾流消散时间判断航空器是否受到尾流影响,确定了在尾流影响情况下给出侧向跑道的航空器放行条件;其次利用时序图,结合单跑道容量模型给出了在连续进场航空器间插入离场航空器的条件,构建出侧向跑道容量模型。最后结合成都天府国际机场一期跑道构型进行了算例分析,并给出了航班起降架次表,在实际应用中具有较高的可操作性。

### 参考文献:

- [1] BLUMSTEIN A. The landing capacity of runway[J]. *Operations Research*, 1959, 7(6): 752-763.
- [2] HARRIS R M. Models for runway capacity analysis [R]. Washington DC: Mitr Corporation, 1969: 45-52.
- [3] LEE D A, NELSON C, SHAPIRO G. The aviation system analysis capacity: airport capacity and delay models: NASA/CR-207695[R]. Washington: NASA, 1998.
- [4] WANG Shidong, ZHANG Yue, YU Haiyang, et al. A fast method to evaluate the runway capacity at the airport based on arrival/departure capacity curve[C]// *Automation and Logistics (ICAL)*, 2011 IEEE International Conference on. [S.l.]: [s.n.], 2011.
- [5] FARBOD F, GHONIEM A, AL-SALEM M. Runway capacity management—An empirical study with application to Doha International Airport [J]. *Transportation Research Part E*, 2014, 68: 53-63.
- [6] 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, 25(1): 74-77.  
HU Minghua, LIU Song, SU Langen. Study on single runway capacity estimation model based on statistical analysis [J]. *Data Acquisition and Processing*, 2000, 25(1): 74-77.
- [7] 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 (22): 80-83.  
JIANG Bing, HU Minghua, TIAN Yong, et al. Further research on airport runway capacity evaluation model and estimation method [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003(22): 80-83.
- [8] 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. Research on airport ground capacity evaluation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [9] 尹嘉男,胡明华,赵征.多跑道机场地面容量评估模型[C]//2010年航空器适航与空中交通管理学术年会.北京:中国知网,2010: 1-5.  
YIN Jianan, HU Minghua, ZHAO Zheng. Multi-runway airport ground capacity assessment model [C]// *Proceedings of the 2010 Annual Conference on Aircraft Airworthiness and Air Traffic Management*. Beijing, China: CNKI, 2010: 1-5.
- [10] 孟祥伟,张平,李春锦.机场跑道最大容量模型研究[J]. *飞行力学*, 2011, 29(1): 78-83.  
MENG Xiangwei, ZHANG Ping, LI Chunjin. Study on the maximum capacity model of airport runway [J]. *Flight Mechanics*, 2011, 29(1): 78-83.
- [11] 卢朝阳,赵新灿.基于到达流特性的跑道容量分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(1): 30-34.  
LU Chaoyang, ZHAO Xincan. Runway capacity analysis based on arrival flow characteristics [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 43(1): 30-34.
- [12] 任武玲.多跑道机场容量评估模型研究[D].天津:中国民航大学,2017.  
REN Wuling. Study on capacity evaluation model of multi-runway airport [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017.
- [13] 朱代武,周心阳,吴题,等.基于MACAD模型的成都新机场交叉跑道容量评估[J]. *指挥信息系统与技术*, 2016, 7(6): 40-44.  
ZHU Daiwu, ZHOU Xinyang, WU Ti, et al. Capacity evaluation of Chengdu new airport cross runway based on MACAD model [J]. *Command Information System And Technology*, 2016, 7(6): 40-44.
- [14] 胡明华.空中交通流量管理理论与方法[M].北京:科学出版社,2010  
HU Minghua. Theory and method of air traffic flow management [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [15] 潘卫军,梁延安,梁海军,等.基于数值计算模型的单跑道起飞间隔安全分析[J]. *航空计算技术*, 2019(4): 4-8.  
PAN Weijun, LIANG Yan'an, LIANG Haijun, et al. Safety analysis of single runway takeoff interval based on numerical calculation model [J]. *Aeronautical Computing Technology*, 2019(4): 4-8.
- [16] 胡军,徐肖豪.空中交通中尾流间隔的研究[J]. *中国民航大学学报*, 2002, 20(4): 1-5.  
HU Jun, XU Xiaohao. Study on wake spacing in air traffic [J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2002, 20(4): 1-5.
- [17] 朱翀,王同光,钟伟.风力机尾流流场的数值分析和尾流边界建模[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43 (5): 688-692.

- ZHU Chong, WANG Tongguang, ZHONG Wei. Numerical analysis of wake field of wind turbine and modeling of wake boundary[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics 2011, 43 (5) : 688-692.
- [18] 张兆宁,张彬.纵向尾流间隔计算方法研究[J].中国民航大学学报,2010,28(5):12-14.  
ZHANG Zhaoning, ZHANG Bin. Study on calculation method of longitudinal wake spacing[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(5) : 12-14.
- [19] 李雄,陈晓清,卫东选.机场侧向跑道运行模式与容量仿真研究[J].飞行力学,2018,36(1):84-92.  
LI Xiong, CHEN Xiaoqing, WEI Dongxuan. Simulation study on lateral runway operation mode and capacity of airport [J]. Flight Mechanics, 2018, 36 (1) : 84-92.
- [20] 孙宁,陈肯,王振.成都新机场交叉跑道管制运行模式[J].中国科技信息,2016(19):59-61.  
SUN Ning, CHEN Ken, WANG Zhen. Chengdu new airport cross runway control operation mode[J]. China Science and Technology Information, 2016 (19) : 59-61.
- [21] 中国民用航空总局.平行跑道同时仪表管理规定:CCAR-98TM[S].北京:中国民用航空局,2004.  
General Administration of Civil Aviation of China. Administration of parallel runway simultaneous instruments: CCAR-98TM[S]. Beijing: China Civil Aviation Administration, 2004.
- [22] 孙宁.成都天府机场多跑道管制运行安全研究[D].绵阳:中国民用航空飞行学院,2017.  
SUN Ning. Chengdu Tianfu Airport multi-runway control operation safety research[D]. Mianyang: China Civil Aviation Flight Academy, 2017.

(编辑:张蓓)