

doi: 103969/j. issn. 0490-6756. 2016. 03. 013

考虑跑滑结构的机场跑道容量评估模型

康 瑞¹, 杨 凯²

(1. 中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 广汉 618307;

2. 四川大学计算机学院, 成都 610064)

摘 要: 跑道容量是衡量机场服务水平的重要指标. 民航中小型机场跑道滑行道结构简单, 航空器起降占用跑道时间较长, 是影响机场容量的主要因素. 本文细化航空器起降滑行、滑跑时间, 引入管制规则, 构造了考虑跑滑结构的机场容量评估模型. 采用 Visual C++ 编程进行数值模拟仿真, 结果表明, 该模型能量化实际滑跑距离、滑行道位置、起降比例等关键因素对机场容量、跑道占用时间的影响. 以赣州机场为例, 该模型容量评估结果符合实际飞行原则和管制规则, 能为提高机场吞吐量提供技术支持, 具有一定的参考价值和实用性.

关键词: 空中交通管理; 容量评估; 计算机仿真; 数值模拟

中图分类号: V355 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2016)02-0319-07

Runway capacity evaluation model with considering of runway and taxiway instruction

KANG Rui¹, YANG Kai²

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Runway capacity is an important indicator of the level of airport services. Because of simple runway taxiway structure in small and medium-sized aviation airport, runway occupancy time is longer while aircraft taking off and landing is the main factor affecting airport capacity. Detailed aircraft landing, taxiing time and introduced of regulatory rules, the capacity evaluation model considering runway and taxiway structure was proposed. Programming with Visual C++ for numerical simulation, the results show that the model quantified the key factors acting the airport runway capacity and runway occupancy time, such as real rolling distance, taxiway location, taking off and landing proportion in Ganzhou airport, for example, the model of capacity evaluation results accord with actual flight principles and control rules, to improve the airport throughput to provide technical support, has certain reference value and practical.

Key words: Air traffic management; Capacity evaluation; Computer simulation; Numerical simulation

1 引 言

机场是航空运输网的终端节点, 机场跑道容量

是在满足安全的前提下, 单位时间内跑道能提供服务的最多航空器架次. 跑道容量是衡量机场吞吐量及运行能力的重要指标, 也是制订航班时刻表的重

收稿日期: 2015-03-16

基金项目: 中国民航飞行学院科研基金(J2013-52); 民航局安全能力建设基金项目(1401501000605)

作者简介: 康瑞(1981-), 女, 陕西延安人, 副教授, 研究方向为计算机应用、空中交通流量管理. E-mail: kimura521@163.com

通讯作者: 杨凯. E-mail: yangkai@scu.edu.cn.

要依据. 国内外学者对此进行了深入研究^[1-9], 1948 年 Bowen 最早提出了单一跑道容量模型^[1]; Blumstein 等人相继完善该模型^[2]; 1969 年 Harris 考虑随机因素提出新的容量模型^[3]; 80 年代美国联邦航空局制定了空域系统容量手册^[4]; 2000 年胡明华等人研究了单跑道确定性和随机性容量模型^[5]; 2006 年彭莉娟等考虑航空器进近速度差异, 构造了接近、分开单跑道容量评估模型^[6]; 2011 年孟祥伟等考虑管制间隔和航空器类型构建了跑道最大容量模型^[7]. 现有的模型往往针对大型枢纽机场, 这些机场结构完善, 建有联络道和脱离道, 航空器起飞和降落占用跑道时间很短, 因此现有的跑道容量评估方法不同程度地弱化或者忽略了跑道及滑行道结构(下称跑滑结构)的影响.

我国还有数量众多的支线、中小型机场, 占民用机场总数的 76.6%. 但由于建设投资较少, 机场跑滑结构相对简单, 特别是部分机场仅有单一滑行道, 机场跑道还要承担滑行道的的作用, 飞机在跑道上滑行的时间长, 严重制约了跑道服务能力, 不能照搬现有模型评估此类机场跑道容量. 随着我国民用航空航线网络不断完善, 支线运输需求日益增加, 因此合理评估中小机场容量, 科学量化简单跑滑结构造成的瓶颈效应尤为重要. 本文在分析了相

管制规则后, 将航空器占用跑道的过程细化抽象, 建立考虑跑滑结构的跑道容量评估模型, 采用 Visual C 编程实现模型, 并进行计算机数值模拟仿真, 就各相关参数改变对跑道容量影响进行了对比分析, 并结合机场跑道及滑行道结构, 管制规则等对如何提高机场跑道服务能力进行了讨论.

2 简单跑滑结构的跑道运行规则

如图 1(a)所示, 着陆航空器 f_i 在此机场降落程序为: 在 T_i^{land} 时刻得到着陆许可, 沿最后进近航段飞行直至 $T_i^{\text{touchdown}}$ 时刻接地, 在跑道上刹车减速, 滑跑冲程结束时刻为 T_i^{reduce} 速度降至 50 km/h, 继续减速直至 T_i^{turn} 时刻在跑道上进行 180°调头, T_i^{taxi} 时刻完成调头开始向滑行道入口处滑行, T_i^{exit} 时刻滑行至滑行道口, 进行 90°转弯后于 T_i^{vacate} 时刻脱离跑道, 全部机身处于停止等待线外侧.

如图 1(b)所示, 起飞航空器 f_i 在此机场起飞程序为: 在 T_i^{enter} 时刻越过停止等待线进入跑道, T_i^{taxi} 时刻完成 90°转弯向跑道入口滑行, T_i^{turn} 时刻在跑道头进行 180°的调头, T_i^{lineup} 时刻对准跑道中心线准备起飞, T_i^{takeoff} 时刻航空器从静止加速直至到达 V_R (抬前轮速度), 并上升高度于 T_i^{airborne} 时刻脱离跑道末端.

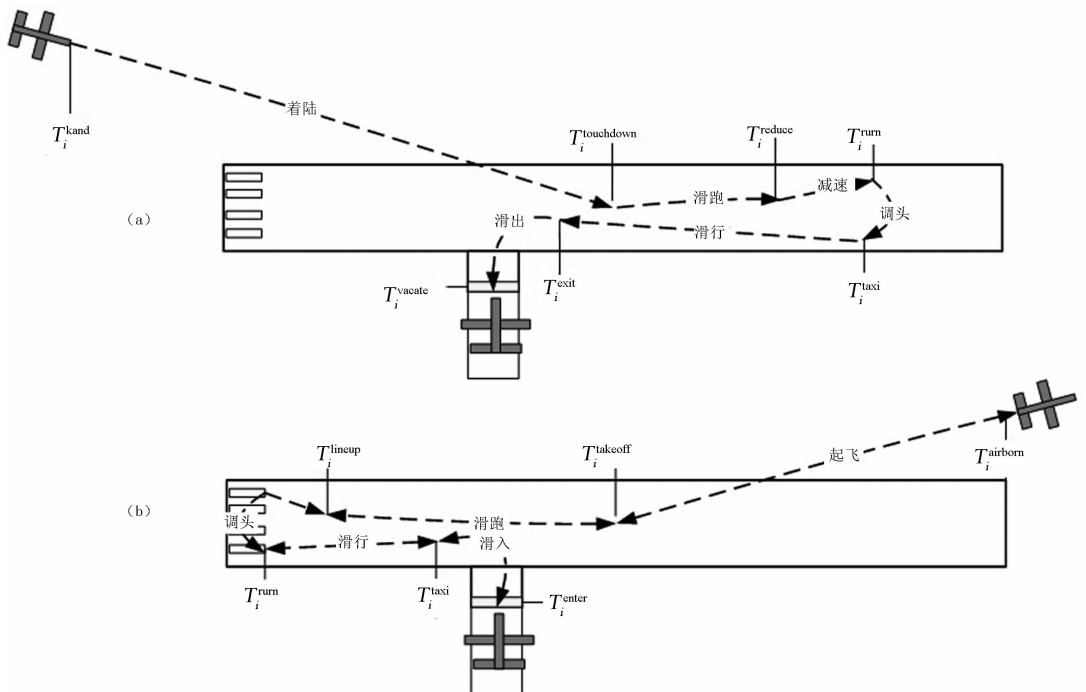


图 1 降落(a)、起飞(b)航空器运行过程

Fig. 1 Procedure of arrival (a) and departure (b) aircraft

3 考虑跑滑结构的跑道容量评估模型

3.1 主要参数说明

(1) 跑滑道结构相关参数: L :跑道长度; w :跑道宽度; L_{taxi} :滑行道距离跑道入口的长度; L_T :滑行道停止等待线距离跑道边线的长度; f :跑道地面摩擦因数;

(2) 航空器 f_i 起飞、着陆性能相关参数: V_i^H :进场速度,飞机着陆前下降至安全高度处的瞬时速度. V_i^d :接地速度是着陆过程中飞机主轮接地瞬时速度. G_i :航空器重力; P_i :航空器全发推力; Y_i :地面对航空器的总支持力; X_i :航空器总阻力; D_i^T :航空器起飞滑跑距离; D_i^L :降落航空器减速至冲程结束,距跑道入口的平均长度;

(3) 航空器 f_i 滑行相关参数: V_i^{\max} :航空器滑行的最大速度; a_i 滑行减速度; V_i^{at} :航空器滑行平均速度. V_i^{turn} :航空器滑行中转弯速度; R_i :航空器滑行转弯半径; D_i :降落航空器从50 km/h减速至 V_i^{turn} 的滑行距离.

3.2 着陆航空器占用跑道时间

着陆滑跑冲程结束时刻:

$$T_i^{\text{reduce}} = \frac{2(V_i^d - V_i^{\max})}{g(\frac{1}{K} + f)} + T_i^{\text{land}} \quad (1)$$

减速距离:

$$L_2 = \frac{1}{2}m \int_{v_i^{\max}}^{V_i^d} \frac{dV_i^2}{X_i + F_i} \quad (2)$$

减速至转弯速度时间:

$$T_i^{\text{turn}} = \frac{V_i^{\max} - V_i^{\text{turn}}}{a} + T_i^{\text{reduce}} \quad (3)$$

减速至转弯速度所需距离:

$$D_i = \frac{(V_i^{\text{turn}} - V_i^{\max})^2}{a_i} \quad (4)$$

开始滑行时刻:

$$T_i^{\text{taxi}} = \frac{R_i \theta}{V_i^{\text{turn}}} + T_i^{\text{turn}} \quad (5)$$

滑出时刻:

$$T_i^{\text{exit}} = \frac{|D_i + D_i^L - L_1|}{V_i^{\text{at}}} + T_i^{\text{taxi}} \quad (6)$$

脱离时刻:

$$T_i^{\text{vacatet}} = \frac{R_i \pi}{2V_i^{\text{turn}}} + \frac{L_T}{V_i^{\text{at}}} + T_i^{\text{exit}} \quad (7)$$

降落航空器占用跑道的总时间为

$$T_i^A = T_i^{\text{vacatet}} - T_i^{\text{land}} \quad (8)$$

若 $L_1 \geq D_i + D_i^L$, f_i 可由滑行道直接脱离:

$$\theta_i = 0, T_i^{\text{taxi}} = T_i^{\text{turn}},$$

$$T_i^A = \frac{L_1 - (D_i + D_i^L)}{V_i^{\text{at}}} + \frac{R_i \pi}{2V_i^{\text{turn}}} + \frac{L_T}{V_i^{\text{at}}} + \frac{V_i^{\max} - V_i^{\text{turn}}}{a} + \frac{2(V_i^d - V_i^{\max})}{g(\frac{1}{K} + f)} \quad (9)$$

若 $L_1 < D_i + D_i^L$,降落航空器在跑道上进行 180° 转弯, $\theta = 180^\circ$,脱离跑道时刻:

$$T_i^A = \frac{D_i + D_i^L - L_1}{V_i^{\text{at}}} + \frac{3R_i \pi}{2V_i^{\text{turn}}} + \frac{L_T}{V_i^{\text{at}}} + \frac{V_i^{\max} - V_i^{\text{turn}}}{a} + \frac{2(V_i^d - V_i^{\max})}{g(\frac{1}{K} + f)} \quad (10)$$

3.3 起飞航空器占用跑道时间

滑入结束时刻:

$$T_i^{\text{taxi}} = \frac{R_i \pi}{2V_i^{\text{turn}}} + \frac{L_T}{V_i^{\text{at}}} + T_i^{\text{enter}} \quad (11)$$

开始调头时刻:

$$T_i^{\text{turn}} = \frac{L_1 - R_i}{V_i^{\text{at}}} + T_i^{\text{taxi}} \quad (12)$$

对准跑道时刻:

$$T_i^{\text{lineup}} = \frac{R_i \theta}{V_i^{\text{turn}}} + T_i^{\text{turn}} \quad (13)$$

起飞滑跑距离:

$$D_i^T = \frac{1}{2g} \int_0^{V_L} \frac{dV^2}{\frac{P_i}{G_i} - f - \frac{\rho S}{2G_i} (C_x - fC_y)V^2} \quad (14)$$

脱离跑道时刻:

$$T_i^{\text{airborne}} = T_i^{\text{lineup}} + \frac{1}{g} \int_0^{V_L} \frac{dV}{\frac{P_i}{G_i} - f - \frac{\rho S_i}{2G_i} (C_x - fC_y)V^2} \quad (15)$$

起飞航空器占用跑道的总时间为

$$T_i^D = T_i^{\text{airborne}} - T_i^{\text{enter}} \quad (16)$$

若 $L_1 \leq R_i$,起飞航空器可以直接通过滑行道跑道端,

$$\theta = 0, T_i^{\text{lineup}} = T_i^{\text{turn}};$$

$$T_i^D = \frac{L_T}{V_i^{\text{at}}} + \frac{R_i \pi}{2V_i^{\text{turn}}} + \frac{1}{g} \int_0^{V_L} \frac{dV}{\frac{P_i}{G_i} - f - \frac{\rho S_i}{2G_i} (C_x - fC_y)V^2} \quad (17)$$

若 $L_1 > R_i$,起飞航空器在跑道上滑行并做 180° 转弯后对准跑道, $\theta = 180^\circ$

$$T_i^D = \frac{L_1 + L_T - R_i}{V_i^{\text{at}}} + \frac{3R_i \pi}{2V_i^{\text{turn}}} + \frac{1}{g} \int_0^{V_L} \frac{dV}{\frac{P_i}{G_i} - f - \frac{\rho S_i}{2G_i} (C_x - fC_y)V^2} \quad (18)$$

3.4 约束条件

我国《中国民用航空空中交通管理规则》(CCAR-93TM)规定航空器使用同一跑道起飞、着陆时应当符合如下规定。

(1) 在前面航空器已飞越跑道末端或在跑道上空改变航向已无相撞危险前,或者根据目视或前面航空器报告确认该航空器已脱离跑道前,后面航空器不得开始起飞滑跑。

(2) 在前面航空器已飞越跑道末端或在跑道上空改变航向已无相撞危险前,或者根据目视或前面航空器报告确认该航空器已脱离跑道前,后面航空器不得飞越跑道进入端。

(3) 当起飞跑道被占用或在航空器进入跑道的那一点即将有进入着陆的航空器通过时,应指示将进入跑道的航空器在跑道外等待。

(4) 当在航空器进近着陆的航径上,没有其他航空器活动;跑道上无障碍物;符合规定的尾流间隔标准. 可向着陆航空器发布着陆许可。

将以上规则结合图 1 所示起飞、降落航空器运行方式,模型约束条件如下。

若前机 f_i 为起飞飞机,在其后降落的航空器 f_{i+1} 得到着陆许可的时间应满足

$$T_{i+1}^{\text{land}} \geq T_i^{\text{airbrone}} \quad (19)$$

在其后起飞的航空器 f_{i+1} 进入跑道的的时间应满足

$$T_{i+1}^{\text{center}} \geq T_i^{\text{airbrone}} \quad (20)$$

若前机 f_i 为着陆飞机,在其后着陆的航空器 f_{i+1} 得到着陆许可的时间应满足

$$T_{i+1}^{\text{land}} \geq T_i^{\text{vacate}} \quad (21)$$

在其后起飞的航空器 f_{i+1} 进入跑道的的时间应满足

$$T_{i+1}^{\text{center}} \geq T_i^{\text{vacate}} \quad (22)$$

3.5 跑道容量计算

由于在航空器占用跑道起飞或降落时,其他航空器不得在此时间范围内进入用跑道,由此单跑道容量模型可以抽象为单位时间 T 与起降航空器占用跑道时间期望值之比^[1,2]如下式。

$$C = \frac{T}{\epsilon[T_i]} \quad (23)$$

$\epsilon[T_i]$ 为一段时间内在跑道上起降航空器跑道占用时间平均值. 设该段时间内航班总架次为 K ,第 i 架航班的跑道占用时间为 T_i ,则有

$$\epsilon[T_i] = \frac{\sum_{i=1}^K T_i}{K} \quad (24)$$

若 K 架航班中, M 为降落航空器, N 为起飞航空器. 则有

$$\epsilon[T_i] = \frac{\sum_{i=1}^K T_i}{K} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i^D + \sum_{j=1}^M T_j^A}{M+N} \quad (25)$$

由此可得跑道容量为单位时间内以一定比例混合的起降航空器服务架次最大值。

$$C = \frac{T(M+N)}{\sum_{i=1}^N T_i^D + \sum_{j=1}^M T_j^A} \quad (26)$$

其中, T 为单位时间长度,通常取 1 h. 由以上公式可知 T_i^D , T_i^A 越大,航空器起降过程中占用跑道时间越长,单位时间内在跑道上起降航空器架次越少. 因此本文模型构造时细化航空器起降过程中占用跑道的滑行、滑跑时间,能详细量化机场跑滑结构对航空器占用跑道起降时间的影响,进而能合理评估机场跑道容量。

4 试验及数据分析

利用 VC++ 编程对本文模型进行计算机数值模拟,数据输入如下:跑道全长 $L=2500$ m,宽 $w=60$ m,道面干且刹车效应好, $f=0.5$,航空器最大滑行速度 $V_i^{\text{max}}=50$ km/h,滑行转弯速度 $V_i^{\text{turn}}=15$ km/h,滑行减速度 $a_i=0.65$ m/s²,滑行转弯半径 $R_i=25$ m. 由于中小、支线机场起降机型多为尾流等级 M,进近类型为 C 的机型,此类航空器最大起飞全重为范围 $[7 \times 10^3 \text{ kg}, 1.36 \times 10^5 \text{ kg}]$,最大着陆重量为范围 $[6 \times 10^3 \text{ kg}, 1.3 \times 10^5 \text{ kg}]$,跑道入口速度在 $[224 \text{ km/h}, 261 \text{ km/h}]$ 范围内. 航空器重量 G_i ,着陆入口速度 V_i^d ,起飞抬前轮速度 V_i^R 都直接影响了航空器起降时占用跑道滑跑时间,而以上参数的变化将反映在着陆滑跑距离 D_i^L ,起飞滑跑距离 D_i^T 的变化上,而滑行道道口位置 L_1 影响了航空器占用跑道滑行的时间. 下图给出当 L_1 由 0 至 2500、 D_i^L 、 D_i^T 由 1700 至 2200 变化时,航空器起飞、着陆占用跑道时间 T_i^D (如图 2(a)), T_i^A (如图 2(b)) 的变化趋势。

由图 2(a)可知,当 $L_1 \leq 50$,起飞航空器滑行距离最短,当 $D_i^T=1700$ 时 T_i^D 最短仅为 63.92 s,此时若不考虑尾流影响,机场跑道起飞容量最大为 56 架次. 当 $L_1 > 50$ 航空器要向跑道头滑行并进行 180°调头,滑行距离增加, T_i^D 增大. 当 $L_1 \in [50, 350]$, T_i^D 随 L_1 线性增长. 但若滑行距离较长,平均滑行速度也会增加,因此 T_i^D 在一个较短的区间基

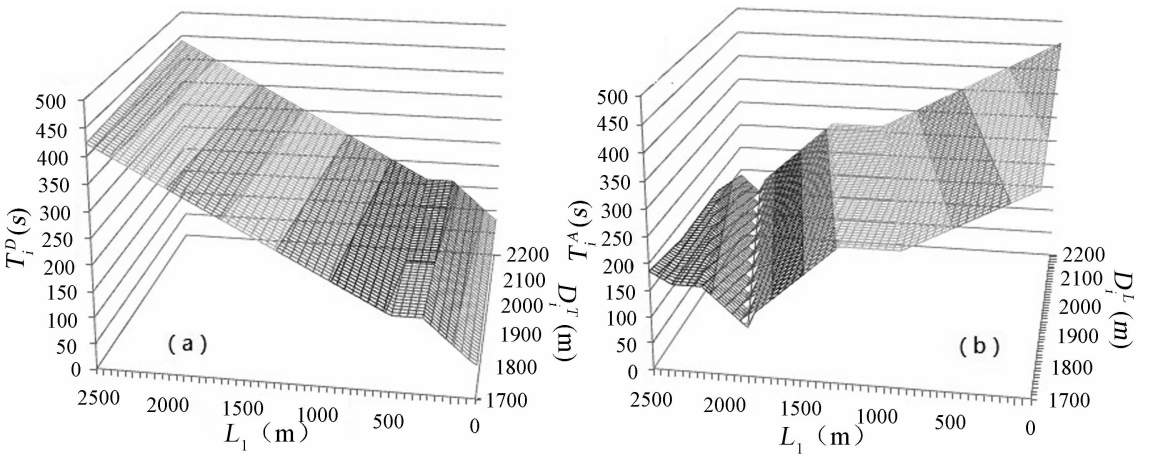


图 2 T_i^D, T_i^A 随 L_1, D_i^T, D_i^L 变化趋势
 Fig. 2 T_i^D, T_i^A with L_1, D_i^T, D_i^L changes

本为常数 144.69 s. 但滑行速度不能超过 50 km/h, 因此当 L_1 越大, 航空器逆向滑行段越长, T_i^D 成线性增长. 而 D_i^T 越大, 意味着航空器起飞滑跑距离越长, 加速时间也增加, 因此 T_i^D 随之增大, 当 $L_1 = 2500, D_i^T = 2200$ 时, T_i^D 最大为 453.29 s, 机场一小时内仅能起飞 7.9 架次.

由图 2(b)可知, 当 $L_1 < D_i^L$ 时, T_i^A 较大且随 L_1 增加而减少, 随 D_i^L 增加而增大. 这是由于滑行道口位于航空器着陆滑跑结束位置的后方, 航空器要经过 180° 调头并且逆向滑行至滑行道口才可脱离跑道, 因此 T_i^A 较大, L_1 增加意味着逆向滑行距离缩短, 因此 T_i^A 与 L_1 呈反相关, 而 D_i^L 增加意味着航空器滑跑距离增加, 逆向滑行距离增加, 因此 T_i^A 与 D_i^L 呈正相关. 当逆向滑行距离较短时, 平均滑行速度也减小, 因此也出现了 T_i^A 基本不变的区域. 当 D_i^L 与 L_1 值接近时, T_i^A 达到最小值 99.61 s. 此时航空器滑跑冲程结束后距离滑行道口很近, 减速至 V_i^{turn} 即可脱离跑道, 此时若不考虑尾流影响, 跑道一小时内最多能降落 36 架次. 当 $L_1 > D_i^L$ 时, T_i^A 随 L_1 增加而增大, 随 D_i^L 增加而减小. 这是由于滑行道口位于航空器滑跑冲程结束位置的前方. 航空器要继续向前滑行才能脱离跑道, 因此 L_1 越大滑行距离越长, D_i^L 越大滑行距离越短.

由以上分析可知, 起飞、降落滑跑距离、滑行道位置等因素综合作用影响跑道占用时间和容量, 滑行道距离跑道入口越近, 起飞滑行距离越短, 跑道占用时间越小, 跑道起飞效率较高, 但降落航空器

需进行调头才能滑出跑道, 降落效率很低, 利用开反推等减少减速滑跑距离的措施能有效增加跑道使用效率. 若滑行道口距离跑道末端较近, 延后航空器接地位置, 延长降落滑跑冲程能减少降落跑道占用时间, 但起飞跑道占用很长, 严重限制了跑道容量. 因此若机场建设投资有限, 仅能修建一条滑行道与跑道相连, 应该综合运行机型性能、起降比例等因素合理安排滑行道位置.

以赣州机场为例对本文模型进行验证. 赣州机场开通了直飞北京、广州、上海、南昌、深圳、杭州、昆明、厦门以及成都等航线, 是我国重要支线机场. 如图 3 所示, 该机场跑滑结构简单, 只有唯一一条与跑道垂直的滑行道 A. 机场跑道长 2600 m, 宽 45 m, 跑道运行方向为 07(起飞着陆方向自西向东)和 25(起飞着陆方向自东向西), 滑行道口距离 07 跑道头 860 m, 距离 25 跑道头 1700 m. 该机场运行机

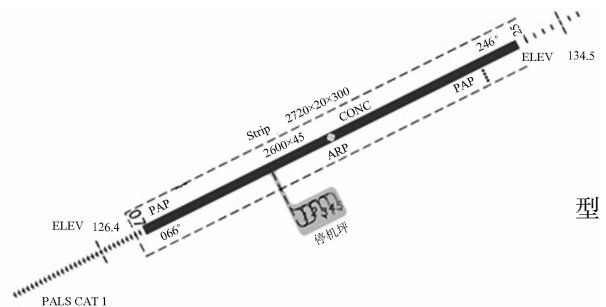


图 3 赣州机场跑道、滑行道结构图
 Fig. 3 Runway, taxiway structure diagram of Ganzhou airport

型单一,均为进近类型为 C,尾流等级为 M 的机型,仅考虑正常运行时,不考虑飞机中断起飞,复飞等特殊情,利用本文模型对不同起降比、 D_i^L 、 D_i^T 的机场跑道容量进行评估。

设 $\lambda = N/(M+N)$, λ 是起飞航空器占总航空器架次的比例. 设 $D_i^{AD} = \{D_i^L, D_i^T\}$, 当占用跑道的为起飞航空器 $D_i^{AD} = D_i^L$, 当占用跑道的是降落航空器 $D_i^{AD} = D_i^T$. 图 4(a) 给出 07 跑道、图 4(b) 给出 25 跑道容量随 λ, D_i^{AD} 的变化趋势。

如图 4 所示,当运行方向不同时,机场跑道容量随 λ, D_i^{AD} 改变呈现不同的变化趋势. 当跑道方向为 07 时,如图 4(a) 所示,跑道容量随 λ 增加而增加,随 D_i^{AD} 增加而减少. 这是因为跑道为 07 方向运行时,滑行道口位于跑道口 860 处,相对于跑道末端距离跑道入口更近,对比图 2 可知,此时起飞航空器占用跑道时间比降落航空器短,因此起飞

比例越大容量越大. 而 D_i^{AD} 增大使起飞滑跑时间增加,降落滑跑时间增加,逆向滑行时间增加,跑道容量与 D_i^{AD} 呈反比. 当 $\lambda=1.0, D_i^T=1700$ 时,跑道容量的最大值约为 19 架次. 当跑道方向为 25 时,如图 4(b) 所示,跑道容量随 λ, D_i^{AD} 增加而减少,这是因为跑道为 25 方向运行时,滑行道口位于跑道口 1700 处,距离跑道末端较近,对比图 2 可知,此时降落航空器占用跑道时间比起飞航空器短,因此降落比例越大容量越大. 与图 4(a) 相同, D_i^{AD} 与容量成反比. 当 $\lambda=0, D_i^L=1700$ 时,跑道容量最大值约为 25 架次. 不论是 07 还是 25 方向运行, D_i^{AD} 增大均会引起跑道容量减少,因此若不改变现有跑滑结构,逆风起降、增加发动机推力、降落后开反推等减少起飞、着陆滑跑的措施能有效减少跑道占用时间,提高机场跑道吞吐量。

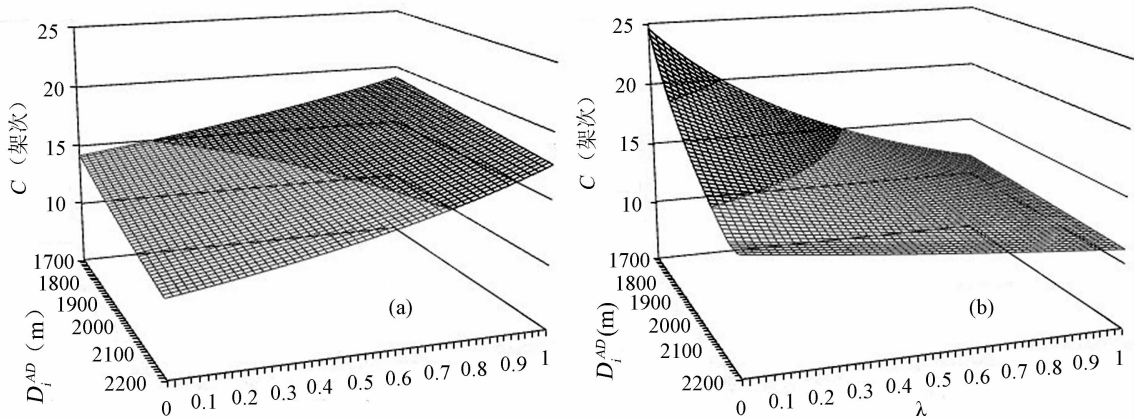


图 4 不同方向运行时,机场跑道容量随 λ, D_i^{AD} 变化趋势

Fig. 4 In different direction, airport runway capacity with λ, D_i^{AD} changes

进一步分析数据可知,当运行方向为 07 时,跑道容量最大值为 19.05,最小值为 10.851,平均值为 14.971,标准差为 1.909. 当运行方向为 25 时,跑道容量最大值为 24.54,最小值为 11.087,平均值为 14.032,标准差为 2.411.

由此可知,虽然 07 方向运行时能达到的最大容量较小,但容量均值大于 25 方向运行的容量均值,且当 λ, D_i^{AD} 变化时,容量标准差较小. 说明 07 方向运行时服务水平较为稳定,随起降比、航空器滑跑距离等动态因素影响较小,容量均值约为 15 架次. 而 25 方向运行时,仅在个别情况下容量较大,平均容量较小约为 14 架次,且跑道容量值波动

较大,受各动态因素影响明显. 因此当天气条件允许时,应尽量使用 07 方向运行以提供较高且稳定的服务水平. 而实际上,根据图 3 所示,赣州机场跑道 07 方向设有 CAT I 精密进近着陆系统并配备了一类精密进近灯光系统,25 方向只能进行非精密进近飞行,说明该机场在实际运行时也采取 07 方向为主要运行方向. 由此说明本文提出的考虑跑滑结构的机场跑道容量评估模型能根据跑道、滑行道结构,结合航空器起飞、着陆、滑行运动特征,能合理评估机场跑道容量,能合理量化滑行道位置、起降比、滑跑距离等重要因素对跑道容量的影响,评估结果及分析结论与实际相符。

5 结束语

完善航线网络,提高中小机场运力是我国发展民用航空的工作重点之一.由于小型机场,支线机场建设投资较少,跑道、滑行道结构简单,航空器起飞降落占用跑道时间过长成为限制机场吞吐量的主要因素.机场跑道、滑行道布局变更需要较长的建设周期和较大资金,厘清跑滑结构形成的运行瓶颈是提高机场跑道服务水平的首要工作.为了合理量化跑滑结构对机场跑道容量的影响,本文将航空器在占用跑道的过程细化抽象,建立考虑跑滑结构的跑道容量评估模型,并进行计算机数值模拟仿真,就各相关参数改变对跑道容量影响进行了对比分析.经试验验证表明,本文模型能合理量化航空器着陆距离、滑行道位置和起降比例等关键因素对机场容量、跑道服务时间的影响,能对支线机场跑道以及滑行道结构设计提供技术支持,能对机场运行关键参数设置提供参考依据.

参考文献:

- [1] Bowen E G, Pearcey T. Delays in the flow of air traffic[J]. *Ops Res*, 1948, 52(4): 251.
- [2] Blumstein A. The landing capacity of a runway [J]. *Ops Res*, 1959, 7(6): 752.
- [3] Harris M. Models for runway capacity analysis[R]. Washington DC: Mitre Corporation, 1969.
- [4] Lee D A. Estimating the effects of the terminal area productivity program [R]. NASA-97 /CR-201682. Virginia: Langley Research Center, 1997.
- [5] 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.
- [6] 彭莉娟,吴鹏,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.
- [7] 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.
- [8] 杨凯.基于自适应滑动窗的降落航班排序模型[J].*四川大学学报:自然科学版*,2009,46(4): 963.
- [9] 陈敏,朱敏.RDP仿真测试系统的设计与实现[J].*四川大学学报:自然科学版*,2008,45(5): 1067.
- [10] 康瑞,杨红雨,余静,等.地面等待策略数学模型分析[J].*四川大学学报:自然科学版*,2007,44(1): 61.
- [11] 魏洁,洪玫,杨嘉.基于UML模型的组件集成测试方法[J].*四川大学学报:自然科学版*,2007,44(4): 791.
- [12] 李松娜,周杰.多机场动态地面等待问题中起降能力的概率更新策略[J].*四川大学学报:自然科学版*,2013,50(5): 923.
- [13] 康瑞,杨凯.考虑空域高度限制的航空器飞行轨迹推算模型[J].*四川大学学报:自然科学版*,2014,51(4): 713.
- [14] 刘洪,杨红雨,刘宇,等.基于单一移动平台的飞机进近排序模型研究[J].*四川大学学报:自然科学版*,2014,51(6): 1149.
- [15] Liu P B, Hansen M, Mukherjee A. Scenario-based air traffic flow management: From theory to practice [J]. *Trans Res Part B*, 2008, 42(7): 685.
- [16] Zografos K G, Madas M A. Advanced modeling capabilities for airport performance assessment and capacity management [J]. *J Trans Res B*, 2007, 8(2): 60.