

文章编号: 1674-8190(2022)05-095-09

交叉跑道进离场航空器安全间隔研究

胡明华, 王旗, 王春政, 赵征

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

摘要: 交叉跑道在我国尚属新的跑道构型, 亟需建立相关标准和评估方法来提高其运行安全性与运行效率。针对交叉跑道进近航空器与离场航空器可能出现航迹交叉的情况建立安全间隔, 首先通过建立碰撞风险模型计算进近航空器至跑道端的距离; 然后建立交叉跑道进近复飞航空器与离场航空器之间的尾流间隔模型, 并求出离场航空器产生的尾流是否影响复飞航空器, 从而确定出尾流安全间隔; 最后将碰撞风险模型计算的安全间隔与尾流模型计算的安全间隔作比较取较大者即为最终的安全间隔。以起飞航空器 B747 和进近航空器 B737 为案例, 在考虑尾流因素时, 计算的最小安全间隔值为 6 km, 小于大兴机场现有运行间隔标准 12 km, 使得大兴机场交叉跑道运行间隔标准得以进一步优化。

关键词: 交叉跑道; 安全间隔; 碰撞风险模型; 尾流间隔模型; 运行间隔标准

中图分类号: V328.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.05.10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the Safe Separation of Aircraft Approaching and Departing from Cross-runway

HU Minghua, WANG Qi, WANG Chunzheng, ZHAO Zheng

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

Abstract: The cross-runway is still a new runway configuration in my country, and its operation safety and efficiency need to establish relevant standards and evaluation methods, and establish a safe separation for the possible track crossing of the approaching aircraft and the departing aircraft. Firstly, the distance from the approaching aircraft to the end of the runway is calculated by establishing a collision risk model; then a wake separation model between the approaching and departing aircraft across the runway is established, and whether the wake generated by the departing aircraft will affect the approaching go-around aircraft is obtained. So as to determine the wake safety separation; finally, compare the safety separation calculated by the collision risk model with the safety separation calculated by the wake model, and take the largest one as the final safety separation; taking the takeoff aircraft B747 and approach aircraft B737 as examples. When considering the wake factor, the calculated minimum safe separation value of 6 km is less than the current operating separation standard of Daxing Airport, which is 12 km, which further optimizes the operating separation standard of Daxing Airport's cross-runway.

Key words: cross-runway; safety separation; collision risk model; wake model; run interval standard

收稿日期: 2021-11-27; 修回日期: 2022-02-14

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(71731001); 国家自然科学基金民航联合重点课题资助(U2033203)

通信作者: 赵征, zheng_zhao@nuaa.edu.cn

引用格式: 胡明华, 王旗, 王春政, 等. 交叉跑道进离场航空器安全间隔研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 95-103.

HU Minghua, WANG Qi, WANG Chunzheng, et al. Research on the safe separation of aircraft approaching and departing from cross-runway[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 95-103. (in Chinese)

0 引言

随着机场跑道运行日益繁忙,导致航班大量延误,需要尽可能增加跑道数量来提高机场的通行能力。目前国内机场跑道建设的数量不断增加,使得机场跑道的运行安全环境相对复杂,亟需解决机场跑道运行安全间隔问题。国内对平行跑道安全运行的研究相对较多,而对交叉跑道运行安全的研究较少,鲜见有关于交叉跑道上进近航空器又复飞导致其与离场航空器产生安全问题的相关研究。而对交叉跑道运行安全问题的研究将会改变离场航空器的放行间隔^[1]。

交叉跑道在国外建设比较多,其主要参考 FAA 发布的 ORDER JO7110.65X^[2],其中规定“假设跑道的中心线延长穿过汇聚跑道或汇聚跑道延长的中心线,并且距离两个离场端不大于 1 n mile”。针对交叉跑道,也规定了如果非交叉跑道偏离 15°及以上,且跑道边缘不接触,即为非交叉分散跑道。欧美发达国家已经开始建造多条跑道,国外对多跑道运行安全问题进行了大量的理论研究,例如,1995年,R. Slattery等^[3]通过空中交通管制对平行跑道的精密进近进行了研究。较早的理论研究可以追溯到 20 世纪 60 年代,其中英国的 P. G. Reich^[4]提出了 Reich 碰撞风险模型,该模型就是将长方体模板的长、宽、高分别表示为两架飞机的机身长度、翼展和机身高度,飞机质点向碰撞盒穿过,当质点进入至位于碰撞盒航空器的内层或表面时,意味着两架飞机发生了碰撞;K. Pang等^[5]以国际民航组织规定的航速分类为依据,对平行跑道的安全间距进行了研究,旨在为适用于不同航速组合的平行跑道配置提供更为合理的规划,并建立了改进的仿真模型,当由不同机型组成时,重点研究了接近速度差异最大的 A-E 机型组合,在 A-E 机型组合情况下,跑道间距 10.35 m 时碰撞风险相对较高;N. M. Guerreiro等^[6]通过模拟实验,对近距离平行跑道(CSPR)运行概念进行可行性分析,通过尾流特征数据证明尾流对飞机安全运行因素有重要影响,并表明尾流的传播特性可以被用作评估后机跟随前机的间隔时间和距离;D. C. Burnham等^[7]提出了近距离平行跑道平行仪表进近尾流湍流安全间隔的建立方法,安全标准基于外界天气的侧风影响,通过尾流模型对芝加哥和达拉斯国际机场中航空器产生的尾流移动影响范围进行了研究,对尾流纵向间隔和侧向间隔的

权衡进行了评估。

国内,Liu Fei等^[8]提出飞行轨迹的仿真计算方法、碰撞风险计算方法以及尾流遭遇风险计算方法,通过对不同情况下的飞行轨迹进行仿真计算,发现碰撞冲突和尾流遭遇的概率均低于现行的运行规则;张兆宁等^[9]提出了基于航空器碰撞发生概率来确定侧向跑道上航空器进场保护区的方法,通过建立碰撞风险模型来确定航空器在不同位置下的碰撞概率,并通过拟合方法确定安全保护区范围;岳睿媛等^[10]提出基于改进 Event 模型的航路飞行过程垂直碰撞风险评估方法来改进前后碰撞盒的面积大小比值,通过改进方法计算航空器在航路中垂直碰撞风险是原长方体 Event 模型碰撞风险模型的 13% 左右;何昕等^[11]对侧风影响下的尾流间隔进行优化,分析尾流消散及运动情况,并建立尾流间隔模型,以虹桥机场为例,模拟仿真出在侧风大于 2.5 m/s 时,对起飞尾流间隔进行缩减,并验证了计算结果的安全性;王莉莉等^[12]提出在近距离平行跑道一起一降模式中研究 ADW(到达与离场)窗,并通过碰撞风险模型来求解大兴机场近距离平行跑道 ADW 窗下边界。

上述研究的碰撞风险模型和尾流模型大多是针对平行跑道的,对交叉跑道的研究相对较少,而且在交叉跑道求解 ADW 窗下边界对尾流因素方面的考虑欠缺,导致结果偏大而影响运行效率。针对上述问题,本文首先通过建立碰撞风险模型计算进场航空器至跑道入口端的距离;其次建立两机航迹交叉时的尾流间隔模型,以验证进场航空器至跑道入口端的不同距离下,离场航空器是否对进场航空器有影响,并找出安全距离的边界;然后将碰撞风险模型计算出的距离与尾流间隔模型计算出的距离作比较取最大值即可;最后以大兴机场为例,通过两个模型结果比较而计算出最终安全间隔的最小边界。

1 交叉跑道现有规章运行模式与问题

FAA 出台的文件 7110.65X^[2]中规定了非交叉汇聚跑道运行和非交叉分散跑道运行的规则。当飞行路径交叉时,为使用非交叉跑道的航空器与离场航空器之间配备间隔,确保离场航空器没有开始起飞滑跑,直到有下列情况之一存在时:

(1) 前机已经离场并越过了离场跑道,或者正在转弯以避让任何冲突;

(2) 前方进场的飞机已经完成着陆滑跑,将在预定交叉路口外等待,已经通过预定交叉路口,或者已经越过起飞跑道。

FAA 的规定只是解决了进场航空器着陆,同时起飞离场航空器从一条跑道起飞。但是规定中没有说明当进场航空器出现转弯复飞时,与起飞航空器可能出现航迹交叉的情况,这时就有可能发生危险,可能发生碰撞和起飞航空器爬升过程产生的尾流对复飞航空器产生尾流影响。

在大兴机场和天府国际机场跑道运行中,复飞发生的情况为千分之一^[13],对于管制员来说,复飞情况发生的概率较低,比较难以预测,很难准确把握离场航空器起飞的时机,因此对于研究 ADW 窗下边界并优化下边界的问题尤为重要。进场航空器最小安全间隔如图 1 所示。

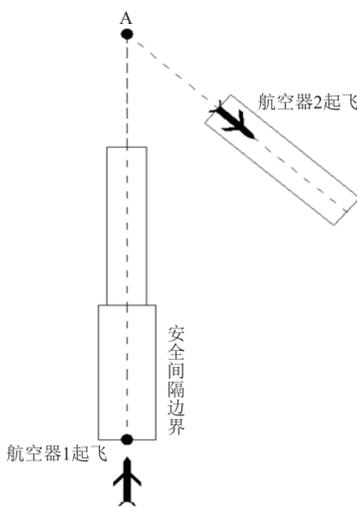


图 1 进场航空器最小安全间隔

Fig. 1 Minimum safety interval for approaching aircraft

2 基于位置误差的航空器碰撞风险模型建立

本文交叉跑道碰撞风险是取纵向和侧向两个方向为主进行研究,且只考虑两机飞行位置误差因素作为碰撞的主要因素,垂直方向碰撞概率取值为 1。定义进场航空器为后机 1,起飞离场航空器为前机 2。以进场跑道中心线为两架航空器的纵向距离,垂直于跑道中心线的水平方向为两架航空器的侧向距离^[12]。考虑交叉跑道运行规则特点,根据文献[14],建立交叉跑道的复飞和离场碰撞风险模型,该过程如图 2 所示。

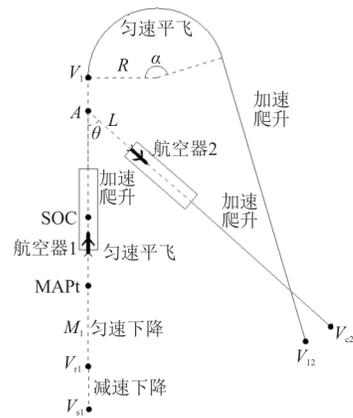


图 2 复飞与离场航空器飞行过程
Fig. 2 The flight process of the go-around and departure aircraft

2.1 复飞与离场航空器运动学模型

降落航空器 1 进近复飞和起飞航空器 2 离场的全部飞行过程:首先降落航空器在进场过程中降落失败而导致在复飞点处进行复飞,而离场航空器同时起飞直线爬升,降落航空器复飞过程会到达某一点开始转弯复飞,再加速爬升与航空器 2 起飞爬升过程会有航迹交叉,直至航空器 1 爬升至 V_{12} 点,航空器 2 爬升至 V_{c2} 点分散式结束。规定进场航空器进场方向为北。其符号含义如表 1 所示。

表 1 符号说明
Table 1 Symbol Description

符号	含义
M_1	进近过程中匀速阶段的长度
S_0	复飞点到跑道入口的距离
S_1	降落跑道末端至两条跑道中心线交点的距离
S_2	起飞爬升点至两条跑道中心线交点的距离
X_{soc}	MAPt 复飞点至 SOC 起飞爬升点的距离
l	降落跑道的长度
θ	两条跑道中心延长线相交叉角度
L	起飞离场跑道入口端至两条跑道中心线交点的距离
a_{11}	航空器 1 减速下降的加速度
a_{12}	航空器 1 复飞时的加速度
a_2	航空器 2 的加速度
V_{s1}	航空器 1 在开始减速下降时的起始速度
V_{r1}	航空器 1 在复飞时刻的起始速度
V_{12}	航空器 1 复飞离场时的最大速度
N_1	复飞点到达 V_1 点的距离
R	航空器 1 的转弯半径
$L_x(t)$	两架航空器的纵向距离
$L_y(t)$	两架航空器的侧向距离

(1) T_1 时段

当进场航空器北向复飞时,还未到达复飞点之前第一阶段,飞机开始减速下降,该时段为 T_1 时

$$L_x(t) = \left| M_1 + S_0 + S_1 + l + \frac{V_{r1}^2 - V_{s1}^2}{2a_{11}} - V_{s1}t - \frac{1}{2}a_{11}t^2 - \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \cos \theta \right| \quad (1)$$

两架飞机的侧向距离表达式为

$$L_y(t) = \left| \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \sin \theta \right| \quad (2)$$

(2) T_2 时段

$$L_x(t) = \left| M_1 + S_0 + S_1 + l - V_{r1}(t - t_1) - \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \cos \theta \right| \quad (3)$$

两架飞机的侧向距离表达式为

$$L_y(t) = \left| \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \sin \theta \right| \quad (4)$$

(3) T_3 时段

当进场航空器北向复飞时,到达复飞点,但还

$$L_x(t) = \left| S_0 + S_1 + l - V_{r1}(t - t_1 - t_2) - \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \cos \theta \right| \quad (5)$$

两架飞机的侧向距离表达式为

$$L_y(t) = \left| \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \sin \theta \right| \quad (6)$$

(4) T_4 时段

当进场航空器北向复飞时,位于起飞爬升点至最早转弯点的时刻,该时刻飞机以一定的爬升

$$L_x(t) = \left| S_2 - V_{r1}(t - t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2}a_{12}(t - t_1 - t_2 - t_3)^2 - \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \cos \theta \right| \quad (7)$$

两架飞机的侧向距离表达式为

$$L_y(t) = \left| \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \sin \theta \right| \quad (8)$$

(5) T_5 时段

$$L_x(t) = \left| N_1 - S_2 - X_{soc} + R \sin \left[\frac{V_1(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)}{R} \right] + \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \cos \theta \right| \quad (9)$$

两架飞机的侧向距离表达式为

$$L_y(t) = \left| \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \sin \theta - R + R \cos \left[\frac{V_1(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)}{R} \right] \right| \quad (10)$$

(6) T_6 时段

飞机 1 匀速平飞转弯复飞结束后,进行直线匀加速爬升,在此期间与飞机 2 加速爬升存在一个高度差的交叉位置,最后飞机 1 到达 V_{12} 点,飞机 2 到

$$L_x(t) = \left| N_1 + R - \left[V_1 \left(t - \sum_{i=1}^5 t_i \right) + \frac{1}{2}a_{12} \left(t - \sum_{i=1}^5 t_i \right)^2 \right] \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) + \left(\frac{1}{2}a_2t^2 + L \right) \cos \theta \right| \quad (11)$$

段,其中 $T_1 \in [0, t_1], t \in T_1$ 。

两架飞机的纵向距离表达式为

当进场航空器北向复飞时,还未到达复飞点之前第二阶段,飞机开始匀速下降,该时段为 T_2 时段,其中 $T_2 \in (t_1, t_1 + t_2], t \in T_2$ 。

两架飞机的纵向距离表达式为

未到达起飞爬升点之前,飞机保持匀速平飞,该时段为 T_3 时段,其中 $T_3 \in (t_1 + t_2, t_1 + t_2 + t_3], t \in T_3$ 。

两架飞机的纵向距离表达式为

梯度向上爬升至最早转弯点,该时段为 T_4 时段,其中 $T_4 \in (t_1 + t_2 + t_3, t_1 + t_2 + t_3 + t_4], t \in T_4$,其中 $t_4 = \frac{V_1 - V_{r1}}{a_{12}}$ 。

两架飞机的纵向距离表达式为

当进场航空器北向复飞时,飞机 1 通过 V_1 点进行匀速转弯,该时段为 T_5 时段, $T_5 \in (t_1 + t_2 + t_3 + t_4, t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5], t \in T_5$ 。

两架飞机的纵向距离表达式为

达 V_{c2} 点,至此结束。该时段为 T_6 时段, $T_6 \in (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6], t \in T_6$ 。

两架飞机的纵向距离表达式为

两架飞机的侧向距离表达式为

$$L_y(t) = \left| \left(\frac{1}{2} a_2 t^2 + L \right) \sin \theta - R - R \cos(\pi - \alpha) - \left[V_1 \left(t - \sum_{i=1}^5 t_i \right) + \frac{1}{2} a_{12} \left(t - \sum_{i=1}^5 t_i \right)^2 \right] \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right| \quad (12)$$

$$\text{其中, } t_1 = \frac{V_{r1} - V_{s1}}{a_{11}}, t_2 = \frac{M_1}{V_{r1}}, t_3 = \frac{X_{soc}}{V_{r1}}, t_4 = \frac{V_1 - V_{r1}}{a_{12}}, t_5 = \frac{\pi R}{6V_{r1}}, t_6 = \frac{V_{c2}}{a_2}.$$

$$P_X = P(A_1 < S(t) < A_2) =$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{1}{4} \sigma_{1x}^2 t^4 + \frac{1}{4} \sigma_{2x}^2 t^4 + 2\sigma_{ex}^2 \right)} \times \int_{A_1}^{A_2} \exp \left\{ - \frac{\left[x - \left(L_x(t) + \frac{1}{2} \mu_{1x} t^2 - \frac{1}{2} \mu_{2x} t^2 + 2\mu_{ex} \right) \right]^2}{2 \times \left[\frac{1}{4} \sigma_{1x}^2 t^4 + \frac{1}{4} \sigma_{2x}^2 t^4 + 2\sigma_{ex}^2 \right]} \right\} dx \quad (13)$$

$$P_Y = P(C_1 < H(t) < C_2) =$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{1}{4} \sigma_{1y}^2 t^4 + \frac{1}{4} \sigma_{2y}^2 t^4 \right)} \times \int_{C_1}^{C_2} \exp \left\{ - \frac{\left[y - \left(L_y(t) + \frac{1}{2} \mu_{1y} t^2 - \frac{1}{2} \mu_{2y} t^2 \right) \right]^2}{2 \times \left[\frac{1}{4} \sigma_{1y}^2 t^4 + \frac{1}{4} \sigma_{2y}^2 t^4 \right]} \right\} dy \quad (14)$$

式中: A_1 为航空器机身长度之和的二分之一(符号为负); A_2 为航空器机身长度之和的二分之一(符号为正); C_1 为航空器翼展长度之和的二分之一(符号为负); C_2 为航空器翼展长度之和的二分之一(符号为正); μ_{ix} ($i=1$ 表示后机, $i=2$ 表示前机,下同) 为纵向加速度误差均值; σ_{ix}^2 为纵向加速度误差方差; μ_{iy} 为侧向加速度误差均值; σ_{iy}^2 为侧向加速度误差方差; μ_{ex} 为由于导航误差因素所引起的偏差, 代表航空器在纵向方向上的偏航距离的平均值; σ_{ex}^2 为导航系统在纵向方向的方差。

3 复飞航迹与起飞航迹交叉时尾流模型

尾流模型主要包括尾流消散模型和尾流运动模型, 文献[16]描述了尾流三个阶段的演化过程, 即远地运动阶段、近地运动阶段和地效影响阶段, 在每个涡流阶段, 通过方程组来求解涡流的运动轨迹过程。

假设复飞航空器1的位置坐标为 (x^1, y^1, z^1) , 则在两机之间的水平距离小于最小尾流间隔且高度差小于300 m的时间范围内, 复飞航空器1第 n 秒的位置坐标为 $(x_{1n}^1, y_{1n}^1, z_{1n}^1)$, 其中 n 代表第 n 秒的时间, $n=1, 2, 3, \dots$; 起飞航空器2的位置坐标为

2.2 碰撞风险模型

设纵向碰撞风险概率为 P_X , 侧向碰撞风险概率为 P_Y , 那么两架航空器在交叉跑道上的纵向和侧向碰撞风险模型^[15]分别为

(x^2, y^2, z^2) , 则起飞航空器2在第 n 秒的位置坐标为 $(x_{2n}^2, y_{2n}^2, z_{2n}^2)$, 而起飞航空器产生的尾流坐标为 $(x_{in}^2, y_{in}^2, z_{in}^2)$, 其中 $i=1, 2, 3, \dots$ 。

为了便于表示每一秒产生的尾流影响坐标, 可以把尾流坐标用向量表示, 假设复飞航空器1与起飞航空器2之间水平距离小于最小尾流间隔的开始时间为 n , 结束时间为 $2n$, 再设第 n 秒时向量 $a_i = (x_{in}^2, y_{in}^2, z_{in}^2)^T$, 第 $n+1$ 秒时向量 $b_i = (x_{i(n+1)}^2, y_{i(n+1)}^2, z_{i(n+1)}^2)^T$, 第 $n+2$ 秒时向量 $c_i = (x_{i(n+2)}^2, y_{i(n+2)}^2, z_{i(n+2)}^2)^T$ 直至第 $2n$ 秒时向量为 $w_i = (x_{i(2n)}^2, y_{i(2n)}^2, z_{i(2n)}^2)^T$, 则每一秒起飞航空器产生的尾流影响坐标如下。

第 n 秒时, 飞机的尾流坐标向量为

$$(a_1, a_2, a_3, \dots, a_m) = \begin{pmatrix} x_{1n}^2 & x_{2n}^2 & x_{3n}^2 & \dots & x_{mn}^2 \\ y_{1n}^2 & y_{2n}^2 & y_{3n}^2 & \dots & y_{mn}^2 \\ z_{1n}^2 & z_{2n}^2 & z_{3n}^2 & \dots & z_{mn}^2 \end{pmatrix}$$

第 $n+1$ 秒时, 飞机的尾流坐标向量为

$$(b_1, b_2, b_3, \dots, b_m) = \begin{pmatrix} x_{1(n+1)}^2 & x_{2(n+1)}^2 & x_{3(n+1)}^2 & \dots & x_{m(n+1)}^2 \\ y_{1(n+1)}^2 & y_{2(n+1)}^2 & y_{3(n+1)}^2 & \dots & y_{m(n+1)}^2 \\ z_{1(n+1)}^2 & z_{2(n+1)}^2 & z_{3(n+1)}^2 & \dots & z_{m(n+1)}^2 \end{pmatrix}$$

第 $n+2$ 秒时, 飞机的尾流坐标向量为

$$(c_1, c_2, c_3, \dots, c_m) = \begin{pmatrix} x^2_{1(n+2)} & x^2_{2(n+2)} & x^2_{3(n+2)} & \dots & x^2_{m(n+2)} \\ y^2_{1(n+2)} & y^2_{2(n+2)} & y^2_{3(n+2)} & \dots & y^2_{m(n+2)} \\ z^2_{1(n+2)} & z^2_{2(n+2)} & z^2_{3(n+2)} & \dots & z^2_{m(n+2)} \end{pmatrix}$$

直至第 $2n$ 秒时的尾流坐标向量为

$$(w_1, w_2, w_3, \dots, w_m) = \begin{pmatrix} x^2_{1(2n)} & x^2_{2(2n)} & x^2_{3(2n)} & \dots & x^2_{m(2n)} \\ y^2_{1(2n)} & y^2_{2(2n)} & y^2_{3(2n)} & \dots & y^2_{m(2n)} \\ z^2_{1(2n)} & z^2_{2(2n)} & z^2_{3(2n)} & \dots & z^2_{m(2n)} \end{pmatrix}$$

复飞航空器 1 第 n 秒的位置坐标也用向量表示, 即 $A_n = (x^1_n, y^1_n, z^1_n)^T$, 因此复飞航空器 1 全程飞行轨迹的坐标向量为

$$(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = \begin{pmatrix} x^1_1 & x^1_2 & x^1_3 & \dots & x^1_n \\ y^1_1 & y^1_2 & y^1_3 & \dots & y^1_n \\ z^1_1 & z^1_2 & z^1_3 & \dots & z^1_n \end{pmatrix}$$

如果要保证复飞航空器 1 与起飞离场航空器 2 出现航迹交叉时安全, 也就是复飞航空器 1 避免受到起飞离场航空器 2 的尾流效应影响, 只需要把复飞航空器 1 的飞行轨迹位置坐标向量列元素不在每一秒起飞航空器产生的尾流影响坐标向量列元素内即可, 即向量 A_n 中的坐标列元素在每一秒产生的尾流影响坐标向量 $a_i, b_i, c_i, \dots, w_i$ 中的坐标列元素不落入尾流坐标范围。

因此, 如果要保证尾流的安全间隔, 只需要找出复飞航空器 1 的飞行轨迹坐标不落入到离场航空器每一秒产生的尾流运动坐标向量 $a_i, b_i, c_i, \dots, w_i$ 中的运动坐标范围内即可。可以根据复飞航空器的速度 V_{s1} 求出航空器 1 至跑道端的距离, 也就是航空器在该距离之内, 航空器 2 不得起飞, 在该距离之外, 航空器 2 可以起飞。需要根据不同速度 V_{s1} 的变化来首先确定航空器 1 至跑道端的距离, 其次判断两机之间水平距离小于最小尾流间隔时, 起飞航空器 2 产生的尾流对复飞航空器 1 是否有影响; 如果有影响, 那么在 V_{s1} 速度确定下, 航空器 1 至跑道端的距离就不符合。

4 算例分析

大兴机场的交叉跑道有东一跑道(01L)与北一跑道(11L), 根据第 2 节建立的碰撞风险模型和第 3 节建立的尾流间隔模型, 对大兴机场交叉跑道的安全间隔进行求解。

选用 B747-800 作为起飞航空器, B737-800 作为进场航空器计算, 各参数如表 2~表 3 所示。

表 2 交叉跑道的基本数据
Table 2 Basic data of crossed runways

参数	取值
M_1/m	2 070
S_0/m	1 800
S_1/m	1 600
S_2/m	3 200
X_{soc}/m	2 308
l/m	3 400
$\theta/(\circ)$	70
L/m	563
$a_{11}/(m \cdot s^{-2})$	-0.25
$a_{12}/(m \cdot s^{-2})$	1.2
$a_2/(m \cdot s^{-2})$	1.0
$V_{r1}/(m \cdot s^{-1})$	73
N_1/m	6 008
R	1 455
μ_1	0
μ_2	0
σ^2_1	1.27
σ^2_2	1.27
空气密度/($kg \cdot m^{-3}$)	1.293
涡流消散率	0.000 2
初始尾流下降速度(负值)/($m \cdot s^{-2}$)	-2.747 6

表 3 前后航空器机型数据
Table 3 Aircraft type data before and after

机型	翼展/m	最大起飞质量/kg	机身身长/m
B747-800	68.50	439 985	76.4
B737-800	34.31	75 976	39.5

4.1 碰撞风险模型安全间隔计算

使用 Matlab 进行仿真, 计算进场航空器至跑道端的不同距离值所对应的危险接近概率值, 在可接受的安全目标水平内, 找出符合距离值对应的安全目标水平值, 确定距离跑道端位置的速度为 75.25 m/s。仿真结果如图 3 所示, 最终能够确定在距离跑道端的距离为 4 984 m, 对应的碰撞风险值为 3.747×10^{-9} 次/小时, 对应小于规定的目标安全水平值 5×10^{-9} 次/小时。

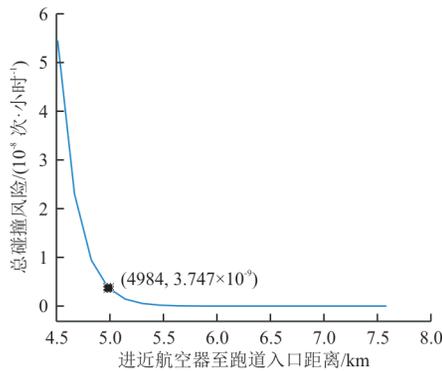


图 3 总碰撞风险
Fig. 3 Total collision risk

4.2 尾流安全间隔计算

本文选取的前机(起飞离场航空器)为重型机,后机(进场复飞航空器)也属于重型机,根据尾流分类标准,两机之间的最小尾流间隔为 5.6 km,因此只需要考虑小于 6 km 的范围内,前机对后机是否有影响。

首先根据碰撞风险模型的速度 V_{s1} 确定其大小为 75.25 m/s,然后计算出航空器 1 至跑道端的距离为 4 984 m,即复飞航空器 1 距离跑道端 4 984 m,而起飞离场航空器 2 产生的尾流对复飞航空器 1 是否有影响,分析过程如下:

首先计算出两架飞机水平距离小于 6 km 的时间范围,如图 4 所示,可以看出:当时间为 57 s 时,复飞航空器转弯爬升靠近起飞离场航空器,开始时间为 57 s 时,结束时间为 108 s,在 57~108 s 之间两机之间的水平距离小于 6 km;在 57~108 s 之间,起飞航空器 2 始终在进场复飞航空器 1 的高度之上,在 106~108 s 时间范围内,由于两机高度差在 300 m 之上,对于 106~108 s 之间无需考虑尾流影响。最终尾流影响的时间范围为 57~106 s 之间,起飞航空器 2 对进场复飞航空器 1 存在尾流影响。

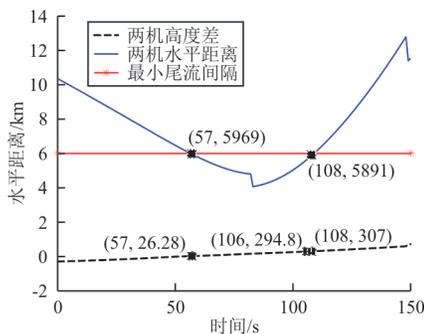


图 4 两机水平距离小于 6 km 的时间范围
Fig. 4 The time range when the horizontal distance between the two aircraft is less than 6 km

计算离场航空器在 156~539.3 m 的高度范围内,飞机在每一个高度产生的尾流变化位置坐标;尾流环量随着时间 t 的变化如图 5 所示,计算该尾流坐标时,只需要结束时间为尾流环量等于 0 的时间即可。从图 5 可以看出:在 115 s 时,尾流环量为 0.56 m^2/s ,可以认为该环量大小对飞机没有影响。

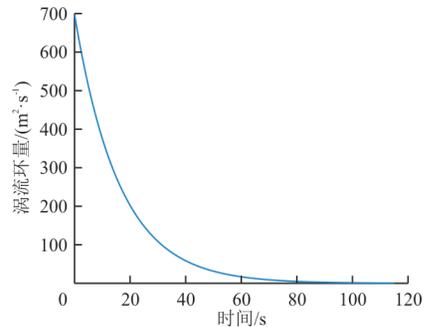


图 5 尾流环量的变化大小
Fig. 5 The magnitude of the change in wake circulation

根据尾流三个阶段的坐标变化,可以求出尾流横向位置和垂直位置的运动坐标,再把尾流二维坐标系转化成三维坐标系,57~106 s 的尾流坐标和进近复飞航空器坐标轨迹范围如图 6 所示。

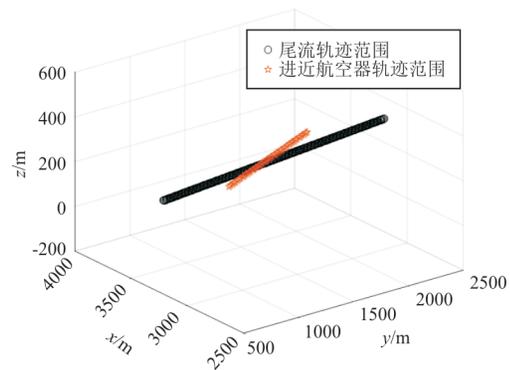


图 6 航空器轨迹和尾流坐标范围
Fig. 6 Aircraft trajectory and wake coordinate range

从图 6 可以看出:进近航空器在 57~106 s 之间的某一时间段,飞机轨迹位置坐标落入至离场航空器在 57~106 s 之间产生的尾流坐标范围之内,因此通过碰撞风险模型计算的 ADW 边界值 4 984 m 受到尾流影响,该 ADW 边界不满足要求,需要对 ADW 窗的边界值进行调整。

使其将 ADW 窗的边界值增加,分别计算 ADW 窗是 5.22 和 5.42 km,是否有尾流影响,计算结果如图 7 所示。

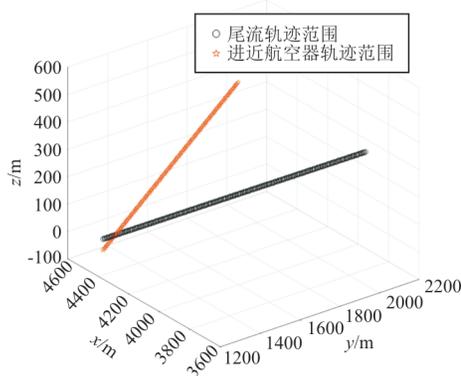


图 7 ADW 窗 5.22 km 的尾流影响
Fig. 7 Wake impact of ADW window 5.22 km

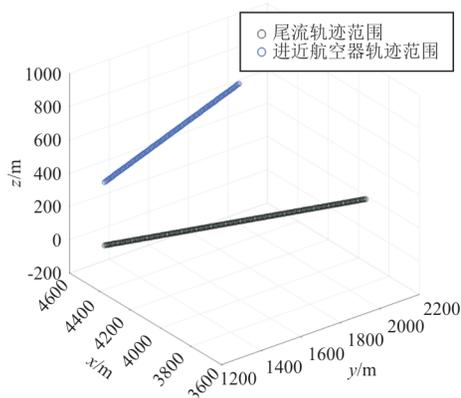


图 8 ADW 窗 5.42 km 的尾流影响
Fig. 8 Wake impact of ADW window 5.42 km

从图 7~图 8 可以看出:在 ADW 窗是 5.22 和 5.42 km 的条件下,当 ADW 窗为 5.22 km 时,离场航空器对进近复飞航空器产生尾流影响,因此该 ADW 窗不符合要求;当 ADW 窗为 5.42 km 时,离场航空器对进近复飞航空器产生没有产生尾流影响,因此该 ADW 窗符合要求。综上所述,通过改变初始速度的不同值可以得到最终的 ADW 窗为 5.42 km。为了保证安全,航空器 1 至跑道端的距离安全裕度设定为 6 km。

通过碰撞风险模型计算出的安全间隔边界值是 4.984 km,而使用尾流间隔模型计算出的安全间隔边界是 6 km,为了保证绝对安全,取两者较大值,即安全间隔的边界是 6 km 符合要求,该最小安全间隔值能够有效保证交叉跑道两架航空器之间的运行安全。考虑尾流因素时,并且对比现有大兴机场跑道运行标准间隔 12 km,使得大兴机场交叉跑道运行标准间隔得到了优化。

4.3 不同交叉角度的 ADW 边界值

当交叉跑道的交叉角度,变化时这对于 ADW 的边界值是有影响,而且不同角度的 ADW 值是不同的,另外对于不同角度的交叉跑道,其碰撞风险值和尾流间隔模型计算的值都会与其密切相关。

取交叉角度步长为 10° ,这里计算常用机型 B、C 和 M 机型,其进近复飞不同机型组合的不同角度的 ADW 窗,通过 Matlab 仿真结果如图 9 所示。

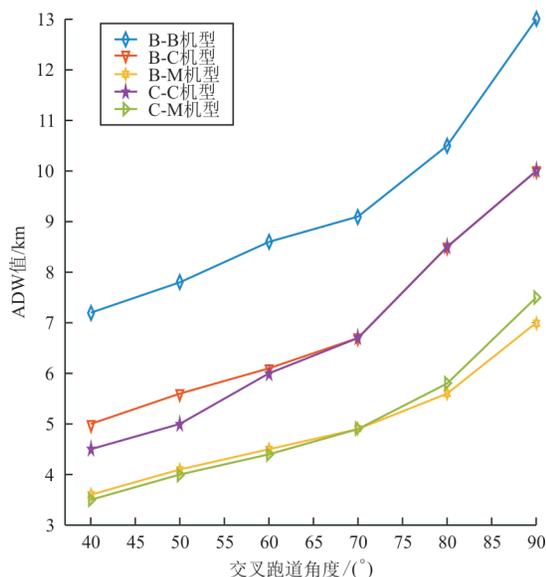


图 9 复飞不同角度 ADW 值
Fig. 9 The ADW value of different angles of go-around

从图 9 可以看出:(1) 该不同机型组合的 ADW 值是随着交叉跑道角度的增大而增大;(2) 当进近航空器机型为重型机,离场航空器也为重型机时,相比较前后机为轻型机,所需 ADW 值越大,表明航空器机型的大小影响 ADW 值;(3) ADW 值越大,对于管制员来说不利于指挥飞机进行风险规避。因此建立不同机型组合的 ADW 值,一方面有利于管制员根据不同机型的 ADW 值确定起飞离场航空器放行时机,另一方面也提升了运行安全效率。

5 结 论

(1) 本文根据碰撞和尾流模型计算进近航空器至跑到入口端的最小安全距离为 6 km,即在大兴机场交叉跑道的一起一降模式中,两架航空器的安全间隔为 6 km。

(2) 通过综合考虑碰撞风险和尾流间隔模型,

本文通过扩展不同角度下的ADW值,可对不同交叉跑道的ADW进一步优化和划分。

参考文献

- [1] 张兆宁,王莉莉. 机场多跑道安全运行理论[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 260-380.
ZHANG Zhaoning, WANG Lili. The theory of safe operation of multiple runways in airports [M]. Beijing: Science Press, 2014: 260-380. (in Chinese)
- [2] Federal Aviation Administration. Air traffic organization policy: ORDER JO7110.65X [S]. USA: US Department of Transportation, 2017.
- [3] SLATTERY R, LEE K, SANFORD B. Effects of ATC automation on precision approaches to closely spaced parallel runways[J]. Approach Control, 1995, 19(1): 1769-1776.
- [4] REICH P G. Analysis of long-range air traffic systems: separation standards III [J]. Journal of the Institute of Navigation, 1996, 19(3): 331-347.
- [5] PANG K, CAI L C, QIAO Y, et al. The analysis of collision risk effect among different aircraft combinations by parallel runways spacing[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(3): 221-232.
- [6] GUERREIRO N M, NEITZKE K W. Simulated wake characteristics data for closely spaced parallel runway operations analysis[C]// 12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. USA: AIAA, 2012: 5642.
- [7] BURNHAM D C, HALLOCK J N, GREENE G C. Wake turbulence limits on paired approaches to parallel runways [J]. Journal of Aircraft, 2013, 39(4): 630-637.
- [8] LIU Fei, LIU Xinze, MOU Mingjiang, et al. Safety assessment of approximate segregated parallel operation on closely spaced parallel runways[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 32(2): 560-565.
- [9] 张兆宁,徐超,卢婷婷,等. 基于雷达数据的侧向跑道进近保护区研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1391-1396.
ZHANG Zhaoning, XU Chao, LU Tingting, et al. Probe into the radar data-based lateral entrance arrival protected area [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1391-1396. (in Chinese)
- [10] 岳睿媛,苏彬,朱新平,等. 基于改进Event模型的航路飞行过程垂直碰撞风险研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(1): 129-134.
YUE Ruiyuan, SU Bin, ZHU Xinping, et al. Research on vertical collision risk of air route flight based on improved Event model [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 129-134. (in Chinese)
- [11] 何昕,侯宇杰,陈亚青,等. 基于侧风影响的CSPRs起飞尾流间隔优化[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 411-418.
HE Xin, HOU Yujie, CHEN Yaqing, et al. Optimistic approach to the wake turbulence separation for the takeoff of CSPRs under the crosswind conditions [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(2): 411-418. (in Chinese)
- [12] 王莉莉,钟灵. 近距平行跑道到达离场窗划设方法研究[J]. 飞行力学, 2020, 38(3): 18-23, 27.
WANG Lili, ZHONG Ling. Study on the method of dividing arrival-departure window for closely spaced parallel runway [J]. Flight Mechanics, 2020, 38(3): 18-23, 27. (in Chinese)
- [13] 张兆宁,徐超,卢婷婷. 雷达间隔下的侧向跑道运行碰撞风险[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(25): 386-391.
ZHANG Zhaoning, XU Chao, LU Tingting. Collision risk of lateral runway under radar separation [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(25): 386-391. (in Chinese)
- [14] 鲁胜男. 基于事件模型的碰撞风险评估及应用研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
LU Shengnan. Collision risk assessment and application research based on event model [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [15] 王健,张兆宁,卢飞. 近距平行跑道配对进近纵向碰撞风险安全评估[J]. 航空工程进展, 2017, 8(3): 286-292.
WANG Jian, ZHANG Zhaoning, LU Fei. Safety assessment of close-to-parallel runway paired approach longitudinal collision risk [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(3): 286-292. (in Chinese)
- [16] ROBINS R E, DELISI D P. NWRA AVOSS wake vortex prediction algorithm[R]. USA: NASA, 2002.

作者简介:

胡明华(1962—),男,硕士,教授。主要研究方向:空中交通系统信息化与智能化、空中交通流量管理理论与实现、空域规划管理与评估技术。

王旗(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:交通安全。

王春政(1992—),男,博士研究生。主要研究方向:空中交通流量管理。

赵征(1978—),男,博士,讲师。主要研究方向:空域与机场运行评估与优化。

(编辑:马文静)